



CY CERGY PARIS UNIVERSITE

Thèse de doctorat

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR EN CONSERVATION-RESTAURATION

délivré par

CY Cergy Paris Université

École doctorale n°628

Arts, Humanités et Sciences sociales

et réalisée dans le cadre de l'EUR Humanités, Création, Patrimoine

Ce doctorat « par le projet » — Practice-led PhD — a été mené dans le cadre d'un programme d'aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'investissements d'avenir intégré à France 2030, portant la référence ANR-17-EURE-0021

à

Juliette ROBIN DUPIRE

**Étude des matériaux de comblement des lacunes
en conservation-restauration d'artefacts muséaux en plâtre.
Statuaire de la gypsothèque et collection des cadres du XIX^e siècle du musée du Louvre.**

Sous la direction de : François Pernot, professeur des universités, HDR, CY Cergy Paris Université

Yannick Mélinge, professeur des universités, HDR, CY Cergy Paris Université, Laboratoire de recherche des monuments historiques (détachement)

Co-encadrement : Anne-Solenn Le Hô, ingénieure de recherche, Centre de recherche et de restauration des musées de France / Chimie ParisTech, Research University, CNRS, IRCP

Thèse soutenue publiquement le 19 décembre 2023

Jury

Mme Aurelia Badde, conservatrice-restauratrice de sculpture, examinatrice

Mme Ann Bourgès, ingénieure de recherche, HDR, Centre de recherche et de restauration des musées de France, rapportrice

Mme Catherine Chevillot, conservatrice générale du patrimoine, docteure en Histoire, Cité de l'architecture et du patrimoine, présidente

M. Christophe Lanos, professeur des universités, HDR, Université de Rennes – IUT de Rennes, rapporteur

Mme Delphine Morana Burlot, maîtresse de conférences, HDR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, examinatrice

Remerciements

Merci chère lectrice, cher lecteur, de porter intérêt à ces travaux de thèse, et plus généralement à la conservation-restauration et au matériau plâtre. Grâce à la réunion de spécialistes de diverses disciplines, et par la volonté d'approfondir des thématiques peu étudiées, pourtant riches et prometteuses, ces travaux de thèse ont tâché d'établir quelques jalons, de méthodologie et de connaissances, adaptés à la conservation-restauration des artefacts en plâtre.

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe « REMuPlât », mes directeurs de thèse, M. François Pernot et M. Yannick Mélinge pour leur engagement et leur implication ; mon encadrante, Mme Anne-Solenn Le Hô, pour ses contributions et les encouragements précieux ; Mme Élisabeth Le Breton et Mme Charlotte Chastel-Rousseau, pour leur confiance et leur apport ; et Mme Sigrid Mirabaud, pour son suivi et ses conseils. J'ai beaucoup appris à vos côtés au fil des années et de l'avancée des recherches.

Ayant bénéficié d'un contrat doctoral, je remercie particulièrement la Fondation des sciences du patrimoine pour leur soutien financier. Je garderai un excellent souvenir des séminaires organisés pour les doctorant-es, propices aux échanges et aux découvertes patrimoniales.

Je remercie également l'ensemble des équipes de l'école universitaire de recherche (EUR Humanité, créations, patrimoines), du laboratoire Héritages, et de l'université CYU – Cergy Paris Université, ainsi que l'Institut national du patrimoine.

Ces recherches ont été enrichies par les partenariats nombreux, au sein des musées et des laboratoires, et les accueils chaleureux et investis. Ainsi je remercie grandement les équipes des musées du Louvre (département des peintures et département des arts grecs, étrusques et romains - gypsothèque) ; du musée des Beaux-Arts de Calais ; et du musée Rodin ; avec des pensées particulières pour Mme Cristina Arlian ; Mme Laure-Hélène Kerrio et M. Bertrand Mothes ; Mme Natacha Haffringue, Mme Anne-Claire Laronde et Mme Sophie Henwood ; Mme Aude Chevalier et Mme Chloé Ariot. Un très grand merci aux équipes du L2MGC (Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil) ; du LRMH (Laboratoire de recherche des monuments historiques) ; et du C2RMF (Centre de recherche et de restauration des musées de France) ; et plus particulièrement M. Alexandre Pierre et M. Lilian Cristoforol ; Mme Aline Magnien, Mme Véronique Vergès-Belmin, M. Jean Ducasse-Lapeyrusse, M. David Giovannacci et M. Emmanuel Maurin ; M. Abdelkader Ouahrani, M. Jocelyn Perillat, Mme Maroussia Duranton, Mme Anne Bouquillon, Mme Doublet et M. Eric Laval ; ainsi que les agent-es d'accueil et de sécurité, qui encadrent les journées avec bienveillance.

Je tiens à remercier les professionnel·les de la conservation-restauration, qui ont participé de près ou de loin à ces travaux. Un très grand merci aux indépendant-es pour les contributions à l'enquête ainsi que pour les échanges et les discussions. Je remercie particulièrement les spécialistes des deux ateliers de restauration du C2RMF, en sculpture et en dorure-mobilier, pour leur disponibilité, leur apport, leur gentillesse et leur accueil, avec des pensées pour Mme Hélène Susini et Mme Azzurra Palazzo ; ainsi que Mme Marie-Jeanne Dubois ; un grand merci à Mme Stéphanie Courtier, pour les discussions riches et les échanges au cours des séances de travail et de pratique. Merci également aux responsables des filières et des ateliers de restauration du C2RMF.

Je remercie l'ensemble des professionnel·les de la conservation-restauration, croisé·es au fil de mes études, Mme Juliette Lévy, Mme Marie Payre, Mme Guylaine Mary, M. Hubert Boursier, Mme Julie André-Madjlessi, et Mme Anne Liégey, à l'Institut national du patrimoine ; au cours de mes stages de formation au C2RMF ; à M. Sébastien Forst à l'atelier de restauration des sculptures du Château de Versailles, ainsi qu'à Frau Hiltrud Jehle, Frau Marion Böhl, Herr Dieter Köcher, Dr. Neville Rowley, au Bode Museum, à Berlin. Merci également à Elise Lopez, dont les travaux de master de conservation-restauration à l'INP en 2016 ont initié ce projet de thèse.

Un très grand merci à mes collègues doctorant·es, docteur·es, et post-doctorant·es, pour le soutien, les conseils, les encouragements, et la lueur qui guide vers la finalisation de cette importante étape, avec une pensée spéciale pour Mme Mathilde Tiennot, Mme Lucile Brunel-Duverger, Mme Emilie Huby, Mme Sibylle Manya, M. Clément de Mecquenem, Mme Marwa El Yassi, Mme Rana Al Ali, Mme Clara Hairie, Mme Valentine Danché, M. Nathan Ferrandin-Schoeffel, M. Georges Roupheal, Mme Yuqing Zhang.

Je pense aux enseignant·es et professeur·es, qui ont marqué ma scolarité et qui ont contribué à mes envies d'études et de recherches.

Je remercie Mme Sophie Marchal et le groupe de danse classique, ainsi que les membres du CRL 10 de taekwondo et M. Roger Piarulli, qui m'ont permis d'explorer de nouveaux univers, loin de ma zone de confort. Ces moments de réalité suspendue ont été extrêmement précieux pour avancer mes travaux plus sereinement.

À mes ami·es, proches et loin, les jeunes et les plus âgé·es, des montagnes, des villes, des îles, des voyages, des longues discussions, du tricot, des randonnées et des balades en forêt, pour le soutien infailible, la gentillesse, les encouragements, la générosité, je vous remercie avec une très grande reconnaissance.

Enfin, je remercie mes oncles et tantes, cousins et cousines ; mes grands-parents, Claude et Manou, Claudine et Franck. Merci à ma famille des Bambous, mes parents Christine et Pierre-Jean, et mes sœurs Pauline et Emma, de m'avoir encouragée et soutenue jusqu'au bout, par votre affection, votre motivation, et vos soins, et pour la contribution importante par les relectures rapides et coriaces ! Pensées pour mes petites bêtes Indie, Frankie et Kalba, une précieuse compagnie réconfortante, même dans les moments difficiles.

Cette étape franchie, je pense désormais aux explorations à mener, aux *dan* à passer, à la connaissance de la faune et de la flore de mon nouveau lieu de vie, aux baleines à bosses et aux tortues à rencontrer, aux projets de tricot au soleil ou devant la cheminée, à tous les précieux moments en famille... À mes îles et à ma nouvelle vie.



Résumé

En conservation-restauration, les comblements des artefacts en plâtre sont fréquemment réalisés en raison de la fragilité de ce matériau. Afin de pallier les altérations produisant des instabilités structurelles et/ou visuelles et esthétiques, des matériaux non originaux sont appliqués : réalisés *in situ* par modelage de matière fraîche, ou par fixation d'une pièce mise en œuvre à part. En fonction des critères déontologiques et techniques, divers matériaux peuvent être utilisés. Afin de mieux les connaître, une étude a été menée en développant une méthodologie pluri-disciplinaire allant des techniques analytiques aux différents champs de la conservation-restauration. Dans un premier temps, un corpus d'artefacts a été étudié, constitué de deux collections du musée du Louvre : la statuaire moulée de la gypsothèque et les cadres du XIX^e siècle, en associant observations des comblements et étude documentaire. Différents usages ont été constatés, comme celui de matériaux identiques aux originaux ainsi que celui visant une différenciation par l'ajout d'additifs. À partir de ces données, des formulations de plâtre, aux rapports massiques eau/plâtre échelonnés, additionnées de carbonate de calcium et de dioxyde de titane ont été sélectionnées pour caractérisation. Dans un deuxième temps, les aspects micro-structurels ont été examinés par observations aux microscopes optique et électronique à balayage (MEB). Les éléments ont été identifiés par analyse en spectroscopie à dispersion d'énergie (MEB-EDS). La caractérisation des aspects rhéologiques à l'état frais a été traitée dans un troisième temps afin de calibrer et classer les textures. Des correspondances entre les consistances ont été établies, offrant des gammes d'usages pâteux à fluides, adaptées aux méthodes par modelage ou par coulée. Une quatrième phase a permis la caractérisation des propriétés mécaniques à l'état solide, en mesurant les résistances à la compression et à la flexion 4 points, et en calculant les modules d'élasticité. Enfin, un protocole de suivi a évalué la stabilité de trois artefacts, restaurés entre 2015 et 2017, par des relevés et des corrélations d'images 3D haute définition. Un des artefacts a également été équipé de capteurs de déplacement afin de compléter le suivi.

L'étude et la caractérisation des formulations de comblement, en liant les aspects physico-chimiques et structurels, à différentes échelles et selon les états frais ou pris, peuvent alors assister les choix des spécialistes de la conservation-restauration en fonction des conditions d'intervention. Le protocole est ajustable pour étudier d'autres formulations ou d'autres matériaux, typologies ou spécialités du patrimoine.

Mots-clés

Conservation-restauration ; comblement ; plâtre ; artefact ; caractérisation ; durabilité ; suivi ; microstructure ; rhéologie ; propriétés mécaniques

Abstract

Fillings in Conservation of gypsum plaster artifacts are frequent, given the material fragility. In order to stabilize the structure or the aesthetic when lacunas are occurring, non-original materials are applied: fresh paste is modelled *in situ*, or a cast-apart piece is fixed with adhesive after drying. Depending on deontological and technical criteria, a large range of materials can be used. To better understand them, a research was conducted with a multidisciplinary methodology involving analytical techniques of the conservation speciality. At first, statues from the *gypsothèque* and XIXth century frames were selected from the Louvre museum to be studied, combining *in situ* observations of fillings with documentary information from literature and archives. Several types of filling were identified such as material similar to the original and formulations with additives to ensure the distinction of treated parts. From those data, gypsum plaster at several water/powder ratios, with additions of calcium carbonate and titanium dioxide were selected for characterization. In a second phase, micro-structural aspects were examined by observations in optical and scanning electron microscopies (SEM). Elements were identified using energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS). Thirdly, rheological aspects of suspensions were characterized and measured. Parallels between the consistencies of formulations were established, allowing to range the textures from paste to fluid suspensions, and their most suited use as modelling or casting formulations. In a fourth phase, mechanical properties at solid state were evaluated by measuring ultimate strengths through compressive and flexural tests, alongside the identification of *E modulus*. At last, to evaluate the stability of fillings under museum conditions, three artifacts, treated between 2015 and 2017, were monitored by high definition 3D scanning and images correlation. One of the artifacts was also equipped with LVDT displacement sensors to complete the evaluation.

By relating physical, chemical, and multi-scale structural aspects of the formulations at liquid and dried state, the study of fillings can guide professionals in the selection of fillers according to specific conditions of intervention. The developed protocol can also be reused to study other filling formulations, artefact materials, typologies or specialities of Cultural Heritage.

Key words

Conservation; filling; gypsum plaster; artefact; characterization; sustainability; monitoring; microstructure; rheology; mechanical properties

Sommaire général

Introduction	p. 13		
Chapitre I		Chapitre II	
Conservation-restauration des artefacts en plâtre	p. 23	Matériaux et caractérisations physico-chimiques à l'échelle microscopique	p. 99
I.		I.	
Collections et artefacts en plâtre	p. 27	Matériaux de l'étude	p. 103
1. Usages dans un contexte artistique	p. 27	1. Présentation	p. 103
2. Collections muséales étudiées	p. 30	2. État de l'art	p. 106
3. Technique et mise en œuvre	p. 37	II.	
4. Statuts et fonctions	p. 52	Caractéristiques et descriptions techniques	p. 114
II.		1. Fabrication et production	p. 114
Conservation- restauration	p. 58	2. Descriptions structurelles	p. 122
1. État de la recherche	p. 58	3. Caractéristiques des additifs et autres matériaux	p. 128
2. Pratiques générales	p. 61	III.	
3. Altérations et problématiques du plâtre	p. 64	Caractérisations physico- chimiques	p. 134
4. Traiter les pertes de matière	p. 68	1. Méthode	p. 134
III.		2. Résultats de l'étude en microscopie	p. 136
Interventions de comblement	p. 74	3. Résultats des analyses EDS	p. 148
1. Étude des sources	p. 74	Synthèse	p. 157
2. Études des collections	p. 85		
3. Synthèse des pratiques	p. 91		
Synthèse	p. 96		

Chapitre III

Étude des matériaux à l'état
fluide et propriétés
rhéologiques p. 163

I.

Présentation p. 167

1. Définitions et principes
généraux p. 167

2. État de l'art p. 174

3. Apports en conservation-
restauration p. 187

II.

Méthodes p. 192

1. Moyens et équipements p. 192

2. Essais p. 194

3. Traitement des données p. 198

III.

**Résultats et
modélisations** p. 202

1. Comportement rhéologique
général p. 202

2. Plâtre seul p. 214

3. Effet du carbonate de
calcium p. 220

4. Effet du dioxyde de titane p. 226

5. Formulations alternatives p. 228

Synthèse p. 230

Chapitre IV

Étude des propriétés
mécaniques à l'état solide p. 237

I.

Présentation p. 241

1. Définitions et
caractéristiques p. 241

2. État de l'art p. 245

3. Apports en conservation-
restauration p. 266

II.

Méthodes p. 269

1. Présentation générale p. 269

2. Moyens expérimentaux
et traitement des données p. 274

III.

Résultats p. 283

1. Plâtres Molda® 3 Normal
et EXTHA® p. 284

2. Addition de carbonate
de calcium p. 295

3. Addition de dioxyde
de titane p. 303

4. Coefficient de Poisson p. 312

5. Autres formulations p. 314

Synthèse p. 316

Chapitre V

Évaluation d'artefacts restaurés et suivi dans le temps p. 323

I.

Cas d'études : suivi de trois artefacts p. 327

1. Présentation p. 327

2. Artefacts sélectionnés p. 330

3. Contextes de conservation p. 351

II.

Méthodologies développées pour le suivi de l'état de conservation des artefacts p. 354

1. Numérisation 3D et corrélation d'images p. 354

2. Suivi de déplacements localisés par capteurs LVDT p. 356

III.

Résultats p. 360

1. Présentation par méthode p. 360

2. Aspects mécaniques et altérations p. 384

3. Apports en conservation-restauration p. 389

Synthèse p. 391

Livret technique

Présentation des formulations et guide d'usage p. 397

Conclusion

p. 453

Annexes

p. 468

Sources et bibliographie

p. 560

Table des matières

p. 582



Introduction

La conservation-restauration des collections muséales en plâtre est une spécialité relativement récente. Bien que certains artefacts en plâtre aient été réparés au fil du temps, les premières réflexions et les premières études spécifiquement dédiées à ce matériau et à ses problèmes conservatoires sont apparues à partir des années 1980. Dans le domaine de la recherche en sciences de la conservation, le sujet n'est pas aussi couramment traité que d'autres typologies comme la peinture et ses matériaux, liants, pigments et vernis. Le matériau plâtre est pourtant très présent dans les collections muséales. Les typologies d'artefacts variées comprennent de la statuaire, des éléments d'architecture, des médailles, camées et intailles, des moules, des objets d'art tels que des cadres et des objets de design, mais encore des enduits et des supports de peintures de chevalet, de fresques. La diversité des typologies et des domaines reflète la remarquable polyvalence du matériau, qui peut être travaillé selon différentes techniques et à différents états, polychromé ou laissé brut, additionné ou non de charges. Les aspects techniques et les caractéristiques sont riches, expliquant son vaste et ancien usage, dépassant même la sphère du milieu muséal, puisqu'il est fréquemment rencontré dans d'autres contextes comme ceux du bâti et de la construction en France et à l'international, où il est utilisé pour la mise en œuvre d'enduits extérieurs ou intérieurs, ainsi que des ornements tels que des moulures, mais aussi des carreaux pour les sols. C'est par ailleurs dans ces domaines que la recherche sur ses caractéristiques techniques est la plus avancée et sert alors à la conservation-restauration des artefacts muséaux. Le plâtre a une résistance mécanique variable selon les différents paramètres de préparation, comme le processus de cuisson du matériau brut, la qualité du broyage, la quantité d'eau de gâchage ou encore la présence d'additifs. De son réseau structurel et cristallin et de sa porosité découlent des propriétés spécifiques à l'état durci. Le plâtre pris est très peu soluble dans l'eau, relativement hygroscopique, et il présente de bonnes qualités isolantes. De par ses propriétés, il est très souvent employé comme système passif de protection incendie des structures dans le milieu du bâtiment. Le matériau possède une faible dureté avec une sensibilité à la rayure et une résistance à la contrainte variable avec des profils de ruptures divers. Ainsi, au sein d'un artefact, il n'est pas rare de constater la présence de divers matériaux organiques tels que du bois, des fibres végétales ou animales, ou inorganiques, comme du sable ou des fragments de terre cuite, destinés à renforcer le substrat.

Les artefacts en plâtre présentent bien souvent des séries d'altérations, certaines superficielles, localisées sur la surface et sans dommage particulier hormis une éventuelle gêne esthétique, et d'autres structurelles risquant d'endommager irrémédiablement l'artefact. Des lacunes sont très fréquemment constatées : il s'agit de manques de matière originale, de dimensions plus ou moins importantes, qui peuvent perturber la bonne lisibilité et l'appréciation esthétique de l'artefact, mais, qui peuvent occasionner des destructions majeures voire la perte de l'artefact en engageant sa stabilité structurelle. Pour traiter les diverses altérations des artefacts en plâtre, des interventions de conservation-restauration sont menées par des professionnel·les de la discipline qui travaillent sur le matériau de façon croissante depuis les années 1980. Un véritable intérêt est porté à ce matériau complexe qu'il est nécessaire de mieux connaître et d'étudier spécifiquement. Néanmoins, les ressources bibliographiques sont considérées comme insuffisantes par les spécialistes.

Quelles sont les altérations les plus courantes ou les plus risquées ? Comment sont restaurés les artefacts en plâtre ? Quels sont les besoins ? Les divers artefacts, aux mêmes matériaux et techniques, sont-ils traités de façon similaire ? Comment sont traités les lacunes et les manques sur un artefact ? Quels matériaux et quelles méthodes sont employés ? Quels sont les enjeux d'un traitement de comblement ?

Les travaux de recherche REMuPLât, menés au cours d'un doctorat par le projet, se sont intéressés à la conservation-restauration des collections muséales en plâtre, et plus particulièrement aux matériaux employés par les professionnel·les lors d'interventions de comblements ou de restitutions au cours desquelles un matériau, autre que l'original constitutif de l'artefact, est appliqué afin de remplacer une partie manquante. Un corpus a été composé de deux typologies d'artefacts obtenus par moulage couramment rencontrés dans les milieux muséaux : une collection de statuaire et une collection de cadres provenant du musée du Louvre. La statuaire étudiée fait partie de la gypsothèque du musée du Louvre, conservée dans les bâtiments des Écuries du Château de Versailles. Elle comprend plusieurs milliers d'artefacts en plâtre, dont des statues, des reliefs, des éléments architecturaux, des moules ou encore des médailles et des intailles. Les artefacts de cette collection datent du XVII^e siècle, pour les pièces les plus anciennes, jusqu'au début du XX^e siècle. La collection de cadres du Louvre est également très riche, tant en nombre d'artefacts, qu'en variété de styles, de formats ou encore de techniques. Dans ces travaux, les cadres dits « du XIX^e siècle » sont plus particulièrement étudiés car les ornements sont obtenus par moulage en plâtre ou en « pâte », un matériau composite constitué de carbonate de calcium et de colle animale, parfois d'additifs, avant d'être recouverts d'or ou autres feuilles métalliques. La variété de chronologie des artefacts permet d'appréhender la matérialité des artefacts en plâtre sur une longue période. Ces deux collections, aux procédés techniques et aux matériaux similaires, ont donc été étudiées et comparées afin d'observer les points de concordance, les similitudes ou les différences de traitements conservatoires, présentés au chapitre I.

L'étude et la caractérisation des matériaux originaux et des formulations de restauration est nécessaire pour optimiser ou améliorer la pratique des interventions de comblement des lacunes et des manques, en enrichissant les connaissances et en fournissant des données et des références matérielles aux professionnel·les de la conservation-restauration. Une méthodologie pluri- et interdisciplinaire a été mise en place au fil des travaux, reflétant les multiples facettes de la discipline de la conservation-restauration. Ainsi, dans un premier temps, une approche historique a permis de relier l'histoire de la conservation-restauration des artefacts en plâtre à une histoire plus générale de la discipline, avec un regard sur la déontologie et son évolution. Les aspects théoriques et pratiques ont été décrits, en interrogeant notre propre approche professionnelle. Un bilan des connaissances et des références a été mené, en étudiant les ressources bibliographiques, les ouvrages spécialisés ainsi que les travaux de recherche provenant d'autres spécialités, en parcourant les documents spécifiques à la conservation-restauration tels que les mémoires de master des écoles diplômantes et les rapports d'interventions, ainsi que par la consultation d'un échantillon de professionnel·les par le biais d'une enquête afin de mieux appréhender les méthodes et les matériaux. Il a ainsi été possible de définir une liste des matériaux couramment utilisés et de procéder à la sélection d'additifs à tester au cours de l'étude.

Afin d'évaluer et de comparer les principaux matériaux de comblement avec le matériau « original », les essais de caractérisation ont été menés sur des formulations de plâtre pur à différents taux de gâchage, de plâtre additionné de carbonate de calcium à différents rapports massiques, et d'un mélange contenant du plâtre, du carbonate de calcium ainsi que du blanc de titane, pigment utilisé comme charge de marquage par les restaurateurs de l'atelier dorure du C2RMF. Une formulation de type pâte et apprêt, composée de colle animale et de craie de Bologne, mélange naturel de sulfate et de carbonate de calcium, a été testée avec et sans blanc de titane. Ce mélange est apparenté aux préparations traditionnelles utilisées notamment pour la mise en œuvre et la restauration des cadres, constituées de blanc de Meudon ou de carbonate de calcium et de colle de peau de lapin. Le produit commercial Modostuc® a été ajouté à l'étude pour comparer certaines de ses caractéristiques avec celles du plâtre seul et des formulations additionnées.

Le plâtre est un liant hydraulique à cinétique de prise. Il possède donc des caractéristiques spécifiques à l'état fluide et à l'état solide qu'il est important de connaître pour en maîtriser l'usage. Or, la caractérisation de ces états pour les formulations minérales est très peu étudiée et les données susceptibles de renseigner les professionnel·les et d'améliorer l'état des connaissances sur les propriétés microstructurales, d'ouvrabilité ou encore de résistance mécanique, sont à approfondir en considérant les aspects de la conservation-restauration. Dans la pratique, l'état fluide, donc avant la prise, correspond au moment de mise en œuvre lors du façonnage du comblement par les professionnel·les, que la matière soit coulée dans un moule ou travaillée par modelage. L'état solide, après la prise et le séchage, correspond à la fois à un moment de mise en œuvre, par sculpture, mais aussi à l'état post-intervention destiné à durer dans le temps. La caractérisation des formulations a donc été faite selon ces deux états et à différentes échelles.

À l'état solide et à la micro-échelle, les matériaux et leurs comportements mécaniques sont liés à leur structure et à leur nature physico-chimique. Les caractéristiques des formulations assimilées au matériau original (constitutif de l'artefact) et de comblement, ont été décrites et présentées au chapitre II. Afin de connaître les structures à l'état solide et à différentes échelles, des observations au microscope optique ainsi qu'au microscope électronique à balayage ont été menées sur une sélection de fragments d'éprouvettes. Des analyses élémentaires lors des observations au MEB-EDS ont permis d'identifier la nature des éléments chimiques présents et de vérifier l'efficacité du blanc de titane comme matériau de marquage.

À l'état fluide et à la macro-échelle, la capacité d'écoulement en cisaillement simple a été étudiée afin de mettre en évidence les propriétés rhéologiques des mélanges en phase dormante, présentées au chapitre III. L'effet des additifs de carbonate de calcium et de dioxyde de titane sur le plâtre a été plus particulièrement analysé. Premièrement, les mélanges de plâtre et d'eau ont été étudiés dans un repère de type contrainte de cisaillement, vitesse de cisaillement et fraction volumique solide. Puis, les lois décrivant les mécanismes de structuration ont permis d'identifier les effets de la charge minérale (carbonate de calcium) et du pigment de marquage (dioxyde de titane), en calibrant des textures adaptées aux interventions de comblement. Les formulations supplémentaires de craie de Bologne et de colle, ainsi que le produit commercial, ont été testés pour comparaison. La méthodologie est fiabilisée par l'usage d'outils mathématiques qui permettent de généraliser les propriétés rhéologiques.

À l'état solide et à la macro-échelle, les caractéristiques des matériaux et les effets des additifs sont étudiés selon les capacités de résistance ultime à la compression et à la flexion 4 points, et selon l'élasticité, présentés au chapitre IV. Des lois simples mais fiables permettent de constituer des séries de données qui, après classement, sont mises en lien avec des besoins techniques de la conservation-restauration, tels que des critères de comblement structurel ou esthétique, avec ou sans renfort.

Cette méthodologie, empruntant donc des essais ou des protocoles à des spécialités comme l'ingénierie, le génie civil ou encore les sciences des matériaux, a aussi été associée à une approche plus conservatoire, par le biais de l'étude des ressources en conservation-restauration mais aussi par la mise en place d'une campagne de constats d'état et d'observation menée sur les deux collections, avec une sélection d'artefacts permettant d'identifier les grands types de comblement et de mieux appréhender la pratique sur ces typologies. Associée à ce travail prospectif et constituant le chapitre V, une méthode de suivi des œuvres en fonction de leurs contextes de conservation a été proposée en s'appuyant sur trois études de cas. Un cadre, une statue en ronde-bosse et un relief ont été monitorés sur des durées variant de plusieurs mois à une année, dans le but d'observer le comportement général de l'artefact et plus particulièrement l'évolution des zones comblées, en fonction du climat de conservation et des conditions de présentation.

Afin de faciliter la recherche d'informations dans un contexte professionnel, un livret technique (inséré à la fin de ce document) a été constitué en compilant les données chiffrées et les illustrations de caractérisation des formulations étudiées. Le processus de choix d'une formulation étape par étape est suggéré par un guide de réflexion. Enfin, des correspondances de formulations ont été proposées en fonction des textures et des besoins en renfort, permettant de moduler les comblements selon l'artefact, pour assister la pratique de la conservation-restauration.

Préambule : terminologie employée

Sur le plâtre

Le plâtre est défini¹ comme un « matériau obtenu par la calcination partielle du gypse et qui, réduit en poudre et délayé dans l'eau, est utilisé à divers usages (bâtiment, arts, chirurgie, etc.) ». La terminologie est diverse et différents termes évoquent le même matériau, avec cependant des caractéristiques techniques spécifiques. Le mot « plâtre » est générique et renvoie au matériau sulfate de calcium au degré d'hydratation variable et à ses différents niveaux de préparation, mais aussi à l'objet fini ou à l'artefact produit. Le terme latin *gypsum* correspond au matériau à l'état brut, issu de carrière, c'est-à-dire du sulfate de calcium partiellement hydraté. Le terme « hémihydrate », parfois « semihydrate », désigne le matériau après cuisson et avant sa mise en œuvre : la poudre de plâtre. Les dénominations chimiques qui permettent de différencier les différentes phases du matériau sont présentées au chapitre II.

Le terme « plâtre » est traduit par les termes *gesso* en italien, *plaster* et *gypsum* en anglais, ou encore *gips* en allemand, qui évoquent le matériau selon ces différentes phases de préparation, ainsi que le matériau final après sa mise en œuvre.

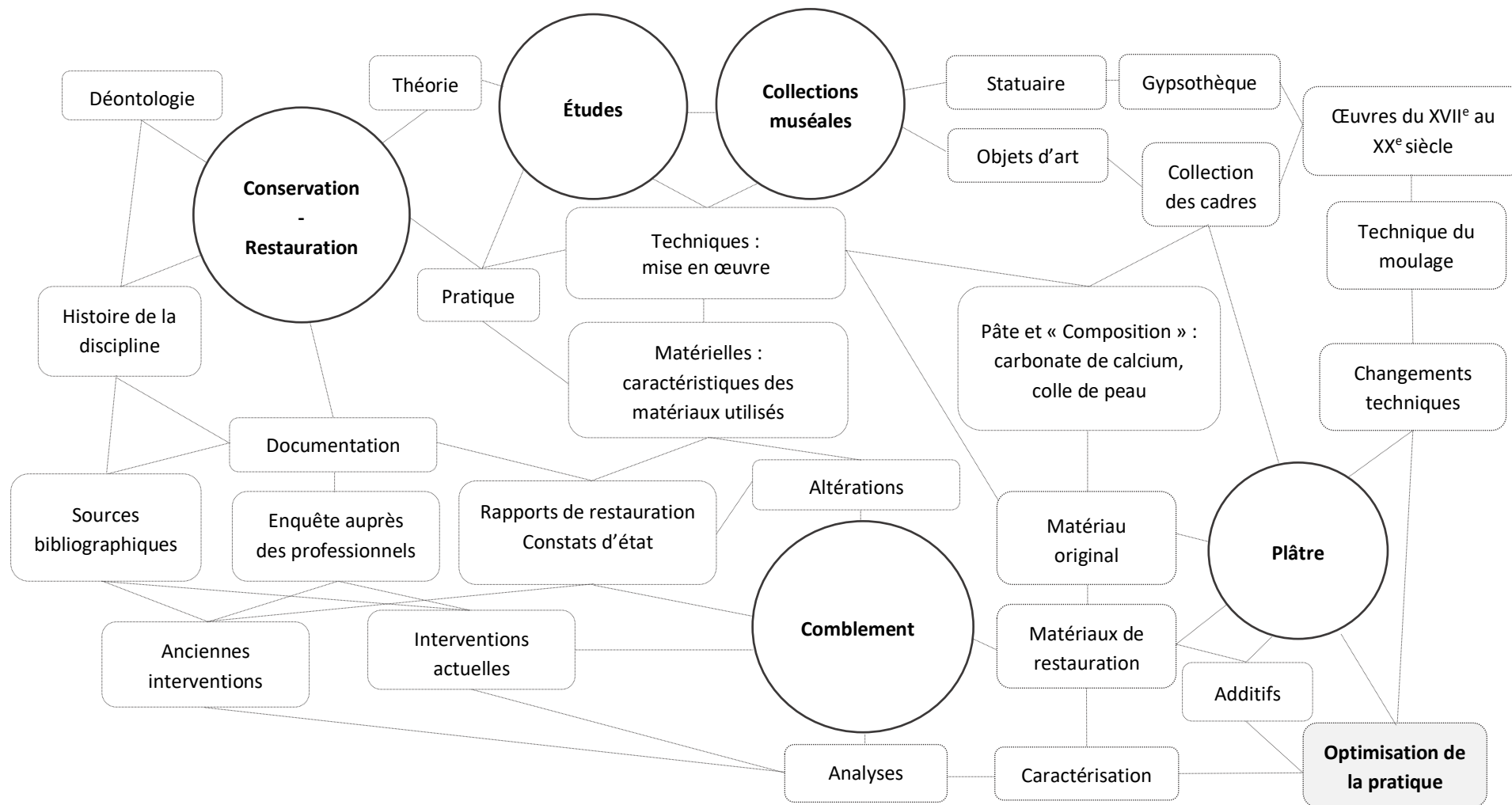
Dans ce document, le terme « plâtre » est employé pour décrire le matériau, sans considération spécifique pour les aspects techniques. En cas de mention d'un état d'hydratation ou de préparation spécifique, les termes « gypse », « sulfate de calcium », ou « hémihydrate » sont préférés.

Sur la statuaire

La statuaire présentée dans les travaux est mentionnée par les termes « plâtre », « relief », « ronde-bosse », et plus rarement « moulage », « tirage » ou « épreuve » en référence à des citations particulières. La terminologie autour de la statuaire en plâtre est encore en cours de réflexion, dans le but d'adapter le vocabulaire aux diversités d'artefacts et de collections. Ainsi les termes « moulage » et « tirage » sont de moins en moins utilisés car leur dénomination technique n'est pas considérée comme suffisante et juste. Plus généralement, l'expression « artefact moulé en plâtre » est employée ici, pour éviter toute confusion.

¹ Définition proposée par le dictionnaire informatisé Trésor de la Langue Française (TLFi) et accessible sur le site du Centre national des ressources textuelles et linguistiques (CNRTL).

Réseau sémantique de l'étude





Chapitre I

Conservation-restauration
des artefacts
en plâtre

Sommaire

Ce premier chapitre introductif présente les collections étudiées, les méthodes de conservation-restauration, en dégageant les problématiques liées au matériau, aux typologies d'artefacts, et aux méthodes de comblement.

I. Collections et artefacts en plâtre

p. 27

1. Usages dans un contexte artistique

p. 27

2. Collections muséales étudiées

p. 30

a. Historique

de la gypsothèque

p. 30

b. Collection des cadres du Louvre et histoire générale

p. 34

3. Technique et mise en œuvre

p. 37

a. Références techniques

p. 37

b. Techniques de la statuaire

p. 39

c. Techniques des cadres du XIX^e siècle

p. 43

d. Polychromies et couches superficielles

p. 47

Mise en œuvre des formulations

p. 48

Mise en œuvre des ornements

du cadre ICMO 190

p. 50

4. Statuts et fonctions

p. 52

a. Premiers statuts et dévalorisation

p. 52

b. Études et revalorisation

p. 55

c. Patrimonialisation

p. 56

II. Conservation- restauration

p. 58

1. État de la recherche

p. 58

2. Pratiques générales

p. 61

a. Évolution et méthodes actuelles	p. 62	III. Interventions de comblement	
b. Les praticiens des deux spécialités	p. 63		
c. Documentation des interventions	p. 64		
3. Altérations et problématiques du plâtre	p. 64	1. Étude des sources	p. 74
a. Structure	p. 65	a. Références bibliographiques	p. 74
b. Surface	p. 66	b. Enquête	p. 78
c. Problématiques	p. 67	Questionnaire	p. 83
4. Traiter les pertes de matière	p. 68	2. Étude des collections	p. 85
a. Pertes de matière : lacune et manque	p. 68	a. Méthodologie type « chantier des collections »	p. 85
b. Traitement : intervention de comblement	p. 70	b. Corpus de la gypsothèque	p. 85
c. Méthodes, approche théorique, mise en œuvre des matériaux	p. 71	c. Corpus des cadres du XIX ^e siècle	p. 89
		3. Synthèse des pratiques	p. 91
		a. Pratiques « anciennes »	p. 91
		b. Des années 1980 aux années 2000	p. 92
		c. Depuis les années 2000	p. 93
		Synthèse	p. 96

I. Collections et artefacts en plâtre

1. Les usages du plâtre dans un contexte artistique

Les plus anciennes occurrences de sulfate de calcium, élément constitutif du plâtre, en contexte artistique ou culturel, sont datées du Néolithique. Elles ont été mises au jour lors de fouilles archéologiques en Syrie, révélant son usage en construction et en ornementation¹.

La pluralité des usages et des techniques est déjà existante avec la construction et le bâti, la statuaire, et les polychromies à la période antique. Le plâtre est notamment un matériau de moulage et de couches préparatoires pour la production de statues égyptiennes telles que des portraits² (Fig. 1). De nombreux artefacts moulés ont été retrouvés sur le site archéologique de Baïes en Italie³ (Fig. 2). Ils témoignent d'une pratique importante de la copie des statues grecques par moulage mais ainsi que d'une véritable maîtrise technique.

À la période médiévale, le sulfate de calcium est surtout utilisé, à l'instar du stuc⁴, comme matériau de modelage pour l'ornementation architecturale ou la production de décors (Fig. 3). Cependant, il existe des exemples de moulage, comme à Gernrode et à Hildesheim, certes rares, mais qui attestent de la transmission des pratiques et des techniques⁵.

À la Renaissance, le plâtre en statuaire est employé par Donatello, notamment pour la production des séries de *Vierge à l'Enfant*⁶ (Fig. 4), puis par Francesco Primaticcio, dit Le Primatice, en préparation des fontes pour Fontainebleau⁷, ainsi que par Leone Leoni, dit Leone Aretino, qui constitue une collection d'œuvres moulées à Milan.

D'après Crocquevieille⁸, la connaissance de l'Antique passe par le moulage et la gravure, reflétant le goût de cette époque, ces supports reproduisant les œuvres les plus admirées, comme en témoigne la présence d'œuvres moulées chez les collectionneurs tels que François I^{er}, Léon X ou encore chez certains artistes.

¹ REHHOFF Lea, *et al.* (dir.), « Plasters: Gypsum or Calcite? A Preliminary Case Study of Syrian Plasters. », *Paléorient*, 16 / 2 (1990), p. 79-87.

AKKERMANS Peter M.M.G., *et al.* (dir.), *Excavations at late neolithic Tell Sabi Abyad, Syria: the 1994-1999 field seasons*, Turnhout, Brepols, (Papers on archaeology of the Leiden Museum of Antiquities), 2014, p.38

² FREDERIKSEN Rune *et* MARCHAND Eckart (dir.), *Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present*, Berlin, Walter de Gruyter, (Transformationen der Antike), 2010.

³ *Ibid.*

⁴ Le stuc est défini sur le site du Centre national de ressources textuelles et linguistiques (CNRTL), d'après le dictionnaire informatisé Trésor de la langue française (TLFi), comme un enduit composé de marbre blanc pulvérisé, de chaux éteinte et de craie gâchés dans l'eau, ou de plâtre très fin dissous dans une colle forte, pouvant prendre les nuances colorées de divers marbres, acquérant une grande dureté et un beau poli. De très nombreuses recettes peuvent être fabriquées, en fonction des usages et des besoins.

⁵ *Ibid.*, p.52.

⁶ *Ibid.*, p.64.

⁷ PRESSOUYRE Sylvia, « Les fontes de Primatice à Fontainebleau », *Bulletin Monumental*, 127 / 3 (1969), p. 224.

⁸ CROCQUEVIEILLE Guillaume, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitrée de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, Mémoire de master, Paris, École du Louvre, 2008.

Pour Marchand⁹, la pratique des copies par moulage était « nouvelle » en Italie à cette période, et particulièrement rare au XV^e siècle. Elle devait répondre à la fois à l'intérêt porté aux œuvres antiques récemment découvertes ou re-découvertes, dans ce « revival » de l'Antiquité classique, mais aussi à un héritage des traditions médiévales et à une transmission des pratiques techniques, notamment de l'usage des matériaux à mouler ou à modeler.



Figure 1 : *Tête de Nefertiti*, plâtre, milieu du XIV^e siècle av. n.-è., provenant d'Amarna, Neues Museum, Berlin ; tirée de Frederiksen et Marchand, 2010.

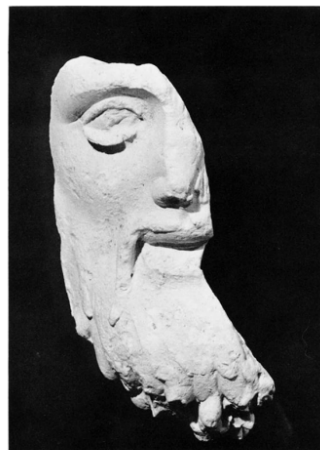


Figure 2 : fragment de *Tête d'Aristogiton*, plâtre, provenant de Baïes, Museo archeologico nazionale di Napoli ; tirée de Richter, 1970.



Figure 3 : Tiziano Minio, devant d'autel dédié à Saint Roch, Sainte Barbara et Sainte Lucie, plâtre ou stuc doré, v. 1535, Museo Civico, Padoue ; tirée de Frederiksen et Marchand, 2010.



Figure 4 : Donatello, *Vierge à l'Enfant*, plâtre, v. 1450-1475, Victoria and Albert Museum, Londres ; tirée de Frederiksen et Marchand, 2010.

⁹ MARCHAND Eckart, « Material distinctions: plaster, terracotta and wax in the Renaissance artist's workshop » dans ANDERSON, Christy, DUNLOP, Anne, SMITH, Pamela H. (dir.), *The matter of art: materials, practices, cultural logics, c.1250-1750*, Manchester, Manchester University Press, (Studies in design), 2015, p. 160-179.

À la période classique, du XVII^e au XVIII^e siècles, les collections de moulages d'après l'Antique deviennent progressivement des échanges à part entière. Frederiksen cite notamment la mission attribuée à Velázquez par la cour royale d'Espagne pour acquérir à Rome des statues moulées d'après des sculptures romaines. Il précise que l'existence de contrats et leur conservation témoignent de l'importance de la demande, avec des mentions sur la qualité attendue des artefacts, le reflet des connaissances techniques, ou encore les moyens financiers attribués¹⁰. Les usages se multiplient et se diversifient sans discontinuité jusqu'au XIX^e siècle où l'utilisation du sulfate de calcium dans la construction se perd¹¹ (Fig. 6), contrairement au milieu artistique où les pratiques de moulage en plâtre sont poursuivies voire intensifiées¹² (Fig. 5).



Figure 5 : Claude Firmin, *Atelier du mouleur Sadaune*, 1901, coll. privée.



Figure 6 : La Bergerie de la Pommeraye, Rambouillet, enduits au plâtre ; tiré de Le Dantec, 2019.

¹⁰ Frederiksen et Marchand, *Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present*, *op.cit.*

¹¹ LE DANTEC Tiffanie, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2019, [En ligne : 1^{er} avril 2019 ; URL: <https://www.theses.fr/2019SACLV001>].

¹² PINGEOT Anne (dir.), *La sculpture française au XIX^e siècle* [exposition] ; Galeries nationales du Grand Palais, Paris, 10 avril-28 juillet 1986, Paris, Éd. De la Réunion des musées nationaux, 1986, p.67.

2. Collections muséales étudiées

Le plâtre est un matériau très présent dans les collections muséales et d'une façon plus générale dans le domaine de l'héritage culturel. Dans nos travaux, deux typologies d'artefacts sont étudiées : une collection de statues, moulées uniquement en plâtre, et une collection de cadres aux ornements moulés, avec des formulations variables pouvant comporter du sulfate de calcium. Ces deux typologies peuvent être observées au musée du Louvre, au sein de la gypsothèque exposée à Versailles, et au sein de la collection de cadres du XIX^e siècle, exposée en salles et conservée en réserves. Les typologies sont obtenues par la même technique et peuvent varier en formes et en dimensions. Des altérations et des variétés de problématiques de conservation-restauration communes aux deux types d'artefacts sont présentées dans ce chapitre. Dans un premier temps, les aspects historiques et techniques sont abordés afin de saisir les spécificités de chaque typologie.

a. Historique de la gypsothèque du Louvre

La gypsothèque du musée du Louvre est une collection d'artefacts moulés, mêlant statuaire, ordres architecturaux, médailles et intailles, ainsi que des moules s'élevant à environ 5500 pièces et figurant de célèbres modèles antiques. La collection est conservée dans les galeries des Petites Écuries à Versailles, sous l'administration du département des Antiquités grecques, étrusques et romaines du musée du Louvre (AGER) depuis 2001 (Fig. 7). Elle résulte de la réunion de trois collections différentes : celle de l'École nationale supérieure des Beaux-Arts de Paris (ENSBA), de l'Institut d'art et d'archéologie de l'université de la Sorbonne (Institut Michelet) et celle du musée du Louvre provenant des collections royales françaises (transférées à l'ENSBA)¹³. L'origine de la collection du Louvre remonte à 1648, avec la création de la Réunion de moulages d'antiques, fondée pour l'Académie royale de Peinture et de Sculpture au Louvre. Dès les années 1660, elle bénéficie de l'arrivée de modèles en plâtre provenant d'Italie, et ce afin de constituer un répertoire ou corpus d'étude destiné aux artistes. À partir de 1666, les envois de modèles sont plus fréquents grâce à la création de l'Académie de France à Rome¹⁴. Puis, des ordres architecturaux sont probablement commandés pour compléter les collections de moulages, avec l'établissement de l'Académie royale d'Architecture en 1671 et son installation au Louvre en 1692. En parallèle, les collections royales sont elles aussi enrichies de nombreuses épreuves moulées, ainsi que de moules, dits « creux », comme en témoigne l'inventaire de Félibien en 1692. Exposée dans la salle des Antiques au palais du Louvre, la collection royale de moulages et ses plâtres sont mêlées aux œuvres originales, et notamment aux marbres. Plusieurs fonds d'artefacts moulés sont donc conservés au Louvre au fil du temps : la collection royale, celle de l'Académie royale de Peinture et de Sculpture, puis les collections de Léon Dufourny, de Martin Couture et de Jacques Legrand, rassemblées ensuite à la Révolution dans le but de constituer un musée d'Architecture¹⁵.

¹³ PINATEL Christiane, « La formation de la collection de moulages d'après l'antique à Versailles. », *Bulletin de la Société Nationale des Antiquaires de France*, 1996 / 1 (1996), p. 318-327.

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ MARTINEZ Jean-Luc, « La gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *Comptes-rendus des séances de l'année - Académie des inscriptions et belles-lettres*, vol. 153 / 3 (2009), p. 1127-1152.

L'enrichissement des collections est poursuivi tout au long du XVIII^e siècle¹⁶ et un atelier de moulage est créé au Louvre en 1794¹⁷. En plus des acquisitions et des réalisations en atelier, des plâtres sont offerts au roi de France par les cours européennes. Au XIX^e siècle, le Louvre étant devenu un musée et le goût pour l'art antique favorisent l'exposition des artefacts moulés. Les œuvres issues des fouilles, grecques notamment, désormais protégées et ne pouvant plus être acquises, sont alors substituées par des reproductions en plâtre commandées massivement, illustrant les nouvelles découvertes et servant d'outils pédagogiques¹⁸, pour aboutir en 1898 à la création du musée des Moulages dans l'ancienne salle du Manège du Louvre (Fig. 8), et ce jusqu'en 1927.



Figure 7 : deux vues de la gypsothèque, dans les galeries des Petites Écuries à Versailles, © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

¹⁶ En 1715, Nicolas Guérin mentionne la reproduction de 31 sculptures et morceaux d'architectures. En 1793, un autre inventaire fait état d'une collection d'environ 100 œuvres en plâtre. D'autres inventaires sont établis par Antoine Nicolas Dezallier d'Argenville en 1781 et Luc Vincent Thiéry en 1778 puis en 1795-1796.

¹⁷ RIONNET Florence, *L'atelier de moulage du musée du Louvre : 1794-1928*, Paris, Réunion des musées nationaux (Notes et documents des musées de France), 1996.

¹⁸ MARTINEZ Jean-Luc, « Exposer des moulages d'antiques : à propos de la gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *In Situ*, 28 (2016) [En ligne : 19 novembre 2018 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/12537>].

Le fonds de l'École nationale supérieure des Beaux-Arts de Paris provient de l'École royale des Beaux-Arts¹⁹, des anciennes collections académiques et du musée d'Architecture (fondé pendant la Révolution) initialement installés au Louvre. De nombreuses statues, des moules et des ordres architecturaux proviennent de Rome, envoyés par les directeurs de l'Académie de France. Entre le XIX^e siècle et les années 1950, le Louvre procède à des dépôts d'artefacts moulés, enrichissant ainsi les collections d'autres institutions tout en « désencombrant » ses salles richement ornées. C'est également le cas à l'ENSBA où les modèles majeurs étaient exposés de façon à permettre aux étudiants l'étude, l'observation ainsi que la pratique du dessin (Fig. 9 et 11) ; mais la saturation des espaces a rapidement été ressentie et a probablement participé au désintérêt général, les plâtres ayant perdu leur caractère précieux.

L'Institut d'art et d'archéologie, créé en 1932 et installé rue Michelet, hérite de la collection de Maxime Collignon commencée à partir des années 1890-1895. Les artefacts sont transférés à l'étage du bâtiment avant 1935 pour y être présentés aux étudiants, sous la direction de Charles Picard, chargé des collections²⁰ (Fig. 10). Environ 330 pièces de l'Institut d'art et d'archéologie rejoignent ensuite les plâtres du Louvre à Versailles²¹.

Les collections de plâtres, notamment de l'ENSBA et de l'IAA, bénéficient d'une nouvelle considération à la suite des événements survenus à l'IAA lors des manifestations de mai 68. Le directeur des musées de France, M. Chatelain (1962-1974) prend la décision de créer une gypsothèque ou « musée des Monuments antiques », réunissant ainsi les artefacts « sauvés ». En 1970 et en 1973, deux transferts d'œuvres sont organisés par la Direction des musées de France au cours desquels les artefacts les plus volumineux ont dû être découpés ou démontés afin d'être transportés dans les espaces des Grandes et des Petites Écuries à Versailles, où était prévu l'aménagement d'un espace d'accueil²² (Fig. 12 et 13). Le démontage a entraîné des dégradations importantes, en particulier lors des coupes des armatures métalliques. Entre 1973 et 1978, des campagnes de moulage sont programmées avec la réalisation de nouveaux plâtres ainsi que des surmoulages, et certaines œuvres sont remontées, comme la tribune de l'*Érechthéion* et la base de la *colonne Trajane*. Mais en 1978, les projets sont arrêtés, faute de budget. Il faut alors attendre le début des années 2000 pour voir une reprise des travaux, avec l'affectation de la collection de la Gypsothèque au département des AGER du Louvre en 2001²³ et la prise en charge de la collection par Jean-Luc Martinez, assisté d'Élisabeth Le Breton. En 2004, une première campagne de restauration et de réaménagement est entreprise. Les œuvres sont déplacées, mises sur palettes quand cela est possible, puis disposées selon un classement par période et par style. Des campagnes d'étude et de conservation-restauration sont engagées.

¹⁹ Installée dans l'ancien couvent des Petits Augustins sous Louis XVIII.

²⁰ *Ibid.*

²¹ Martinez, « La gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *op.cit.*

²² Pinatel, « La formation de la collection de moulages d'après l'antique à Versailles. », *op.cit.*

²³ Martinez, « Exposer des moulages d'antiques : à propos de la gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *op.cit.*

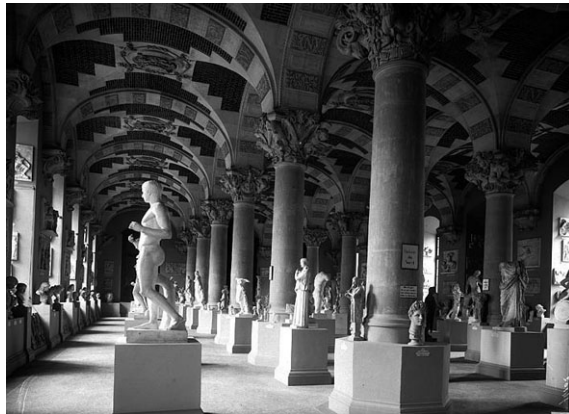


Figure 8 : photographie du « Musée des Moulages », salle du Manège, au Louvre
© Musée du Louvre, AGER.



Figure 9 : photographie de la Cour vitrée, éd. Giraudon, v. 1929, (Ph 14) ; tirée de Crocquevieille, 2008.



Figure 10 : carte postale, salle d'Art ancien, La Sorbonne, ND Phot., RBA3 = 163-1, pièce 69
© Cliché Bibliothèque de la Sorbonne.



Figure 11 : photographie d'une séance de copie, Cour vitrée, Laure Albin-Guillot, 1930, Ph 8445 ; tirée de Crocquevieille, 2008.

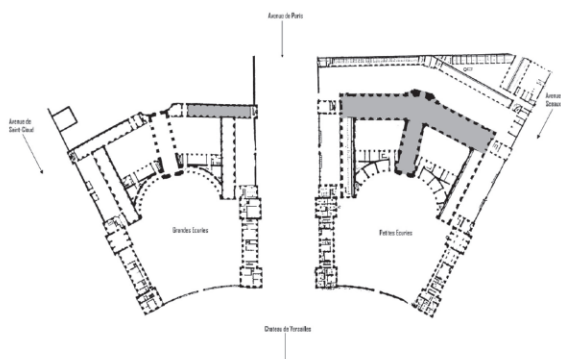


Figure 12 : plan des Écuries du roi, Versailles, espaces occupés par la gypsothèque en gris ; tirée de Martinez, 2009.



Figure 13 : vue des galeries des Petites Écuries ; tirée de Pinatel, 1996.

b. Collection des cadres du Louvre et histoire générale

Collection du Louvre

La collection de cadres du musée du Louvre est très riche et variée avec près de 9000 pièces (pour environ 12000 peintures) : environ 6000 cadres encadrant des peintures et 3000 cadres vides déposés en réserves, variables en styles et techniques, époques et provenances (Fig. 14). Elle est composée d'un fonds de cadres historiques anciens, ayant probablement été en usage pendant un certain temps mais « désaffectés au fil des réencadrements²⁴ ». Le musée du Louvre a également procédé à des acquisitions et a bénéficié de dons et de legs, comme celui du marchand de cadre Ernest Dalbret, qui a transmis ainsi plus de 600 cadres en 1941. Toutefois, la documentation ancienne étant limitée, une histoire précise de cette collection est difficile à retracer. Elle est considérée en cours d'écriture²⁵ avec d'importantes recherches menées en parallèle des travaux de récolement, d'inventaire et de réorganisation (l'ensemble de la collection des cadres vides a été déplacé dans les nouvelles réserves du musée du Louvre à Liévin entre 2020 et 2021). Plus généralement, les collections de cadre sont mal connues, notamment en raison du statut de l'artefact : les cadres ont longtemps été considérés comme des objets fonctionnels et esthétiques, des éléments mobiliers nommés « bordures », destinés à protéger et à mettre en valeur l'œuvre qu'ils entourent. Les savoir-faire passés, les différents courants stylistiques, ainsi que les évolutions historiques et sociales, permettent l'émergence des cadres du XIX^e siècle, aux aspects techniques spécifiques²⁶.

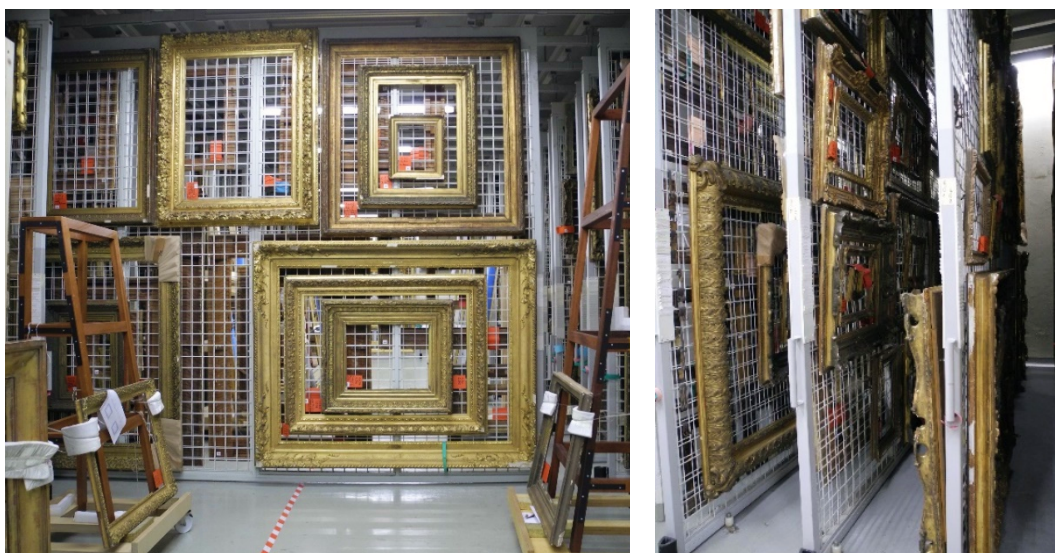


Figure 14 : deux vues des anciennes réserves du musée du Louvre, collection des cadres,
© Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

²⁴ CHASTEL-ROUSSEAU Charlotte, « Les yeux emplis de l'or des cadres », *Grande Galerie, Le Journal du Louvre* (La recherche au Louvre), 2018, p. 55.

²⁵ *Ibid.*, p.56.

²⁶ Présentation de la technique, p. 43 et 44.

Évolution des cadres

L'histoire du cadre débute aux XII^e et XIII^e siècles²⁷, avec les retables mêlant peintures et supports architecturés en bois, les plats d'ivoire taillés ainsi que les autels en métal. Les panneaux en bois étaient évidés à la gouge, recouverts de *gesso* (mélange de sulfate de calcium hydraté et de colle animale) et de dorure. Des moyens picturaux servant à délimiter les espaces tels que des bordures, des tracés et autres éléments dessinés ou peints, existent toutefois dès l'antiquité égyptienne. Sur les retables médiévaux, les éléments de cadre sont en volume et reproduisent des motifs architecturaux tels que des colonnes, des chapiteaux ou encore des frontons. L'agrandissement des dimensions implique de procéder à l'assemblage de matériaux : les planches de support sont jointes, fixées par de la toile, des chevilles et des traverses. Les éléments décoratifs sont alors rapportés et les ornements de plus en plus élaborés²⁸. Les répertoires ornementaux architecturés sont inspirés par les modèles antiques comme le rappelle Claus Grimm²⁹.

Aux XIV^e et XV^e siècles, en Italie, « la silhouette du cadre apparut³⁰ » inspirée par les édifices religieux et leur répertoire gothique. L'apparition du cadre comme objet indépendant arrive par la suite, avec notamment la création du modèle de type *cassetta*³¹, en Italie d'abord, dès le XIV^e siècle, pour encadrer des œuvres aux sujets simples, avant de rayonner dans d'autres pays avec l'émergence de nouveaux motifs ornementaux à partir du XV^e siècle³².

Du XVI^e au XVIII^e siècle, de grands centres comme la France, l'Angleterre et l'Allemagne sont renommés pour leur fabrication et leur création d'artefacts aux styles et aux identités propres³³. Au début du XIX^e siècle, les décors semblent mis en œuvre uniquement avec de la composition³⁴ ou des formulations de type « pâtes » dans des moules finement réalisés. Les artisans sont de moins en moins nombreux, alors que la demande de cadres est croissante notamment pour l'encadrement des œuvres rapportées des campagnes napoléoniennes³⁵.

À cette période, des retours aux styles antérieurs, comme le style néo-classique, sont observés, parfois en associant différentes influences comme pour le style Barbizon qui utilise des répertoires et des séries de motifs des périodes antérieures de façon très ordonnée, tels que les motifs floraux et naturalistes du style Louis XIII et les formes abstraites des styles Louis XIV et rocaille. Les profils ont des courbes caractéristiques avec des bordures extérieures très en relief et une succession de moulures alternant entre les plats, les concaves et les convexes, en s'approchant de l'intérieur du cadre. Des règles techniques sont indiquées par le Salon telles que les formes ou la hauteur maximale des profils. Les ornements de ces cadres sont faits en composition ou moulés en plâtre.

²⁷ MITCHELL Paul et ROBERTS Lynn, *A history of European picture frames*, London, Merrell Holberton, 1996.

²⁸ Mitchell, Roberts, *A history of European picture frames*, *op.cit.*

²⁹ GRIMM Claus, « Histoire du cadre : un panorama », *Revue de l'Art*, vol. 76 / 1 (1987), p. 16.

³⁰ Mitchell, Roberts, *A history of European picture frames*, *op.cit.*

³¹ Un cadre dit *a cassetta* est composé d'un plat principal central et de deux moulures en bordures intérieures et extérieures, rappelant les profils architecturés.

³² *Ibid.*

³³ *Ibid.*

³⁴ La composition est une pâte modelable constituée principalement de carbonate de calcium et de colle animale, pouvant être additionnée de liants et de charges variés.

³⁵ *Ibid.*

À partir du milieu du XIX^e siècle jusqu'au XX^e siècle, diverses influences artistiques conditionnent les répertoires formels des cadres, comme le style des peintres Nazaréens, le goût néo et la rémanence des cadres anciens, le remplacement des motifs de l'Antiquité grecque ou romaine par des inspirations égyptiennes ou arabes. L'esthétique minimaliste du Japon est aussi source d'inspiration avec notamment l'usage de larges bordures planes sans ornement. Un nouvel usage de la polychromie est fait, non plus comme élément de décoration figurant un motif, mais plutôt employé par aplats de couleurs sur l'ensemble du cadre. Les Préraphaélites ravivent le goût pour les techniques anciennes de qualité, avec un désir d'expérimentation dans les registres d'ornements et de décorations. Ils abandonnent les formulations de type « pâte » et des moulures en plâtre au profit du bois sculpté et de matériaux jugés « nobles ». Des cadres associés aux peintures de style symboliste sont conçus en même temps que l'œuvre picturale, de façon à former un tout, offrant alors des cadres uniques. Ces pratiques ont eu une grande influence en Europe grâce à la diffusion par les expositions et les liens tissés entre les artistes de différents pays³⁶.

Les XIX^e et XX^e siècles voient donc une grande diversité de styles et de types d'encadrement (Fig. 15), ne permettant pas de définir un nombre conscrit de « concepts directeurs » selon Grimm³⁷.



Figure 15 : Alexandre Brun, *Vue du Salon Carré*, v. 1880, RF 1987 29
© Musée du Louvre.

³⁶ Mitchell, Roberts, *A history of European picture frames*, *op.cit.*

³⁷ Grimm, « Histoire du cadre : un panorama », *op.cit.*

3. Techniques et mises en œuvre

Le plâtre est l'un des matériaux les plus adaptés pour le moulage, notamment en raison de ses caractéristiques techniques de prise et de son réseau cristallin présentés dans le chapitre II. Il sert également dans le cas d'autres techniques comme dans la fabrication d'enduit (extérieur et intérieur sur du bâti) ou de couches préparatoires pour des techniques de peintures (à fresque, peintures italiennes...), en modelage lorsque le matériau est à l'état frais et très concentré, ou encore en sculpture lorsque le matériau a déjà fait prise et que la mise en œuvre est faite par retrait de matière à l'aide d'outils. Le moulage est un procédé technique en plusieurs étapes permettant de reproduire un modèle. Ce modèle est d'abord moulé afin de fabriquer un moule, qui sert ensuite au tirage et à l'édition de la reproduction. Plusieurs techniques ont été développées au fil des siècles afin d'optimiser les étapes et les rendus. Les sources bibliographiques techniques témoignent d'une passation de connaissances du matériau et des techniques appliquées.

a. Références techniques

Les premières références bibliographiques mentionnant la technique du moulage en statuaire sont des manuels tels que le *Nouveau manuel du mouleur ou l'art de mouler en plâtre* de Lebrun³⁸ dès 1850, avec de nombreuses rééditions, ainsi que l'ouvrage *Clay modelling and plaster casting* de Hasluc³⁹ de 1905, détaillant les techniques, les propriétés des matériaux ainsi que des conseils spécifiques comme les outils adaptés. Des ouvrages plus généraux comportent des chapitres dédiés au plâtre et à ses techniques, comme l'important ouvrage *Sculpture, méthode et vocabulaire*, faisant référence depuis sa première publication en 1978⁴⁰.

À partir des années 1980 d'autres publications voient le jour, oscillant entre du contenu générique, des sujets aux thématiques précises (moulage en statuaire, en architecture), et des cas d'études sur des sites ou des lieux. Puis, des publications comme l'*Encyclopédie des métiers, La plâtrerie, le staff et le stuc* éditée par les Compagnons du Devoir en 1994⁴¹, l'ouvrage de Festa⁴² en 1998, la publication du GRPA *Le plâtre, l'art et la matière* aux thématiques diverses, jalonnent les années 1990 et 2000, en France.

Les ouvrages techniques sur les cadres semblent apparaître plus tôt, toutes techniques confondues, dès le XVIII^e siècle, avec les manuels Roret traitant des cadres, de la dorure et les recouvrements de surface⁴³.

³⁸ MAGNIER M.- Désiré et LEBRUN, *Nouveau manuel complet du mouleur... par M. Lebrun. Nouvelle édition, revue par M.-D. Magnier*, Paris, Roret, 1850.

³⁹ HASLUCK Paul Nooncree, *Clay Modelling and Plaster Casting: With Numerous Engravings and Diagrams*, Philadelphia, David McKay, 1905.

⁴⁰ BAUDRY Marie-Thérèse et BOZO Dominique (éd.), *Sculpture : méthode et vocabulaire*, Paris, Édition du Patrimoine, 2011 [1978].

⁴¹ Compagnons du devoir et du tour de France (éd.), *La plâtrerie, le staff et le stuc*, Paris, Librairie du Compagnonnage (Encyclopédie des métiers), 1994, 2 vol.

⁴² FESTA Jean, *Techniques et pratique du plâtre : applications traditionnelles et modernes*, Paris, Eyrolles, 1998 [1995].

⁴³ STAHL E.-E., et al., *Nouveau manuel complet du fabricant de cadres, passe-partout, châssis, encadrements, etc. : suivi de la restauration des tableaux et du nettoyage des gravures, estampes, etc.*, Paris, L. Mulo (Encyclopédie Roret), 1896.

Au cours du XX^e siècle, des publications dédiées à des collections ou des catalogues d'exposition présentent des ensembles de cadres, alors étudiés et décrits principalement stylistiquement mais comportant aussi des détails techniques, comme l'article de van Asperen de Boer en 1975 sur l'étude technique de cadres du XVI^e siècle⁴⁴. La publication sur l'exposition des cadres italiens à Munich est considérée comme l'un des premiers ouvrages comportant une véritable étude technique des matériaux et des artefacts, avec notamment une analyse du bois⁴⁵.

Plus tard, dans les années 1980-1990, d'autres publications mêlant études historiques, stylistiques et techniques apparaissent, souvent en lien avec une exposition comme celle sur les cadres des Pays-Bas du XVII^e siècle au Rijksmuseum⁴⁶, celle de Chicago⁴⁷, celle sur les *Cadres de peintres* à Orsay⁴⁸, et le guide de la collection de peintures Thyssen-Bornemisza de 1989⁴⁹, l'essai sur les cadres dans le catalogue d'exposition *Wright of Derby*⁵⁰, l'exposition *Italian Art Renaissance Frames* en 1990 au Metropolitan Museum⁵¹, celle sur *Le cadre et le bois doré à travers les siècles* à Paris en 1991⁵², ainsi que l'exposition *In Perfect Harmony : Picture + Frame 1850-1920* au Van Gogh Museum à Amsterdam en 1995⁵³, celle intitulée *The Art of the Picture Frame* à Londres en 1996⁵⁴, ou encore plus récemment, vers 2015, les expositions de la National Gallery de Londres⁵⁵, du Dordrechts Museum aux Pays-Bas⁵⁶, et du J. Paul Getty Museum de Los Angeles⁵⁷.

Certaines références sont dédiées à la technique de « l'encadrement », et non pas seulement au cadre en tant qu'artefact ou à sa fabrication, mais plutôt sur l'action et les techniques de mise en valeur d'une peinture ou d'une production graphique, comme l'essai de José Ortega y Gasset⁵⁸.

⁴⁴ ASPEREN DE BOER J. R. J. Van, « A technical examination of the frame of Engebrectsz's "Crucifixion" and some other 16th-century frames », *Netherlands Yearbook for History of Art / Nederlands Kunsthistorisch Jaarboek*, vol. 26 / 1 (1975), p. 73-87.

⁴⁵ CREMER Leo et EIKEMEIER Peter, *Italienische Bilderrahmen des 14. - 18. Jahrhunderts: München 6. Mai - 31. Okt. 1976 [Sonderausstellung Alte Pinakothek]*, Munich, Bayerische Staatsgemäldesammlungen, 1976.

⁴⁶ THIEL P. J. J. van et BRUYN KOPS C. J. de, *Prijst de lijst: de Hollandse schilderijlijst in de zeventiende eeuw*, Amsterdam: Den Haag, Rijksmuseum; Staatsuitgeverij, 1984.

⁴⁷ BRETTELL Richard Robson, et al., *The art of the edge, European frames, 1300-1900*, Chicago, Art Institute of Chicago, 1986.

⁴⁸ CAHN Isabelle, *Cadres de peintres*, Paris, Réunion des musées nationaux Flammarion, 1989.

⁴⁹ WATTEVILLE Caroline de, *Collection Thyssen-Bornemisza: guide des oeuvres exposées*, Lugano, Fondation Thyssen-Bornemisza, 1989.

⁵⁰ EGERTON Judy (éd.), *Wright of Derby [exposition] Tate Gallery, Londres : 7 Février - 22 Avril 1990 ; Grand Palais, Paris : 17 Mai - 23 Juillet 1990 ; Metropolitan Museum of Art, New York : 6 Septembre - 2 Décembre 1990*, Londres, Tate Publishing Ltd, 1990.

⁵¹ NEWBERY Timothy J., BISACCA George et KANTER Laurence B., *Italian Renaissance frames*, New York, Metropolitan Museum of Art: H.N. Abrams, 1990.

⁵² CAHN Isabelle et GAUTIER Jean Jacques, *Le cadre et le bois doré à travers les siècles*, Levallois-Perret, HM Editions, 1991.

⁵³ MENDGEN Eva, *In perfect harmony: picture & frame, 1850-1920*, Vienne, Van Gogh Museum/Kunstforum, 1995.

⁵⁴ SIMON Jacob, *The art of the picture frame: artists, patrons and the framing of portraits in Britain*, Londres, National portrait gallery, 1996.

⁵⁵ PENNY Nicholas, et al. (éd.), *The Sansovino frame, [exposition "Frames in Focus: Sansovino Frames", Londres, National Gallery, 1er avril- 13 septembre 2015]*, London, National Gallery Company, 2015.

⁵⁶ FUHRI SNETHLAGE Henriëtte et NOORTWIJK Liesbeth van, *Van de kunst en de rand : de lijst centraal, [exposition « Van de kunst en de rand : de lijst centraal », Dordrechts Museum, 24 mai 2015-15 février 2016]*, Dordrechts, Dordrechts Museum, 2015.

⁵⁷ *Louis Style : French Frames, 1610-1792, [exposition "Louis Style : French Frames, 1610-1792" 15 septembre 2015-3 janvier 2016, Getty Center]*, Los Angeles, The J. Paul Getty Museum, 2015.

⁵⁸ ORTEGA Y GASSET Jose et BELL Andrea L., « Meditations on the Frame », *Perspecta*, 26 (1990), p. 185-190.

Les mentions techniques sur les éléments moulés ou pressés peuvent être faites ponctuellement dans des ouvrages plus généralistes sur les cadres, d'époques et de styles variés, comme ceux de Thornton⁵⁹, Karraker⁶⁰, ou Glover⁶¹, et dans des articles, comme celui de Bruno Pons en 1987 sur les cadres en composition⁶².

b. Techniques de la statuaire et des artefacts de la gypsothèque

Les moules pour statuaire peuvent être fabriqués avec différents matériaux : de la terre, du plâtre, de la gélatine. Deux types de moules en plâtre sont couramment cités : les moules à creux perdus, ou les moules à bons creux appelés aussi moules à pièces. Les moules à creux perdus sont bien souvent constitués d'une à deux coques, et ne sont pas destinés à être conservés, d'où leur appellation indiquant la destruction du moule. Le moule à bon creux est quant à lui constitué de pièces, plus ou moins nombreuses selon le degré de complexité et de finition, et d'une structure de maintien appelée chappe. Cette construction par assemblage de pièces démontables le rend réutilisable (Fig. 16 et 17).



Figure 16 : détail d'un moule à pièces pour un relief,
© musée Rodin, J. Robin Dupire.



Figure 17 : détails du moule
et de l'épreuve en plâtre,
© J. Robin Dupire.

⁵⁹ THORNTON, Jonathan, « The use of nontraditional gilding methods and materials in conservation », dans BIGELOW Deborah (dir.) *Gilded wood: conservation and history*, Madison, Sound View Press, 1991, p. 217-228 ; THORNTON Jonathan, « Minding the gap: filling losses in gilded and decorated surfaces », dans BUDDEN Sophie (dir.), *Gilding and surface decoration: papers given at a conference held by the UKIC Restoration 91, 16 October 1991*, Londres, United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works of Art, 1991, p. 12-17 ; THORNTON Jonathan, « A Brief History and Review of the Early Practice and Materials of Gap-Filling in the West », *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 37 / 1 (1998), p. 3-22.

⁶⁰ KARRAKER D. Gene, *Looking at European Frames, A guide to terms, styles, and techniques*, Los Angeles, Getty Museum, 2014 [2009].

⁶¹ GLOVER Hugh, « Care and use of 19th-century American gilded picture frames », *Art Conservator*, 1 / 1 (2006), p. 19-22; GLOVER Hugh, « A Description of 19th-century American Gilded Picture Frames and an Outline of Their Modern Use and Conservation », *WAG (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation) postprints*, Washington D.C., AIC, 2006, p. 72-92.

⁶² PONS Bruno, « Les cadres français du XVIII^e siècle et leurs ornements », *Revue de l'Art*, 76 / 1 (1987), p. 41-50.

Ces deux types de moules peuvent être utilisés conjointement dans le cas d'une même production d'artefact au cours de laquelle plusieurs étapes de moulage sont nécessaires. Dans un premier temps, le modèle est mis en œuvre (modelage à la terre, pâte à modeler, à la cire) et préparé (recouvert d'un agent démoulant, matériau isolant type huiles ou savons). Dans un second temps, un moule simple en plâtre est réalisé : le modèle est recouvert de couches épaisses de plâtre, en deux coques au minimum autour d'un modèle en trois dimensions ou une seule coque pour un relief. Le modèle en matériau malléable est ensuite retiré du moule (il est bien souvent détruit à cette étape puisque l'empreinte obtenue par le biais du moule est prioritaire). Dans certains cas, le moule est rincé et recouvert d'un agent isolant pour préparer la future coulée. Après la prise du plâtre dans ce premier moule, il faut récupérer l'artefact moulé en ouvrant le moule et en le cassant pour dégager l'artefact sans l'altérer. A ce stade, le modèle original et le moule à creux perdu sont détruits ; il ne subsiste que le premier plâtre, parfois appelé « original », puisqu'il est le plus proche du modelage initial. Le premier modèle en plâtre, plus résistant qu'un modèle en matériau malléable, peut alors servir à la mise en œuvre d'un nouveau moule, cette fois-ci à bon creux. Dans la production de certains artistes tels que Rodin, dès le XIX^e siècle, les possibilités techniques qu'offrent ces matériaux du moulage ont été largement exploitées, en réalisant des séries de modèles les uns après les autres, issues d'un même moule à pièces.

Au cours du XIX^e siècle, de la gélatine a été utilisée pour remplacer les pièces, en raison de son élasticité⁶³. Il est alors possible de fabriquer des moules simplifiés même pour des éléments saillants présentant des reliefs. Toutefois, ces moules avaient une longévité limitée : en effet la gélatine sèche et ne conserve pas ses propriétés élastiques très longtemps, rendant son usage impossible. Plus récemment, le même procédé a été reproduit à l'aide d'élastomères.

Une autre technique ancienne pour fabriquer des moules a été l'estampage à la terre. Des plaques de terre modelable sont appliquées sur un modèle, recouvert d'un agent démoulant, bien souvent une poudre comme du talc, puis rassemblées et ajustées de façon à reconstituer l'ensemble en entier. Dans cet assemblage de terre, il est ensuite possible de couler du plâtre. Ce moule en terre est fragile et ne permet d'obtenir que quelques éditions seulement avant le séchage de la matière. Certains plâtres de la gypsothèque, les artefacts les plus anciens, pourraient avoir été fabriqués selon ce procédé⁶⁴.

⁶³ Baudry et Bozo, *Sculpture : méthode et vocabulaire*, op.cit., p. 123.

⁶⁴ LE BRETON Élisabeth, « Gypsothèque du musée du Louvre. Les apports de la restauration à la datation des tirages en plâtre anciens », *In Situ*, 28 (2016) [En ligne : 25 novembre 2019 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/12581>], p.6.



Figure 18 : détail du torse du *Gaulois mourant*, Gy 0249, présentant des coutures irrégulières et décalées,
© Musée du Louvre, P. Roumegoux.

La présence des coutures et leurs aspects visuels sont de bons indicateurs pour identifier la technique de mise en œuvre, le type de moule utilisé ou encore la chronologie de mise en œuvre. Les plâtres issus des moules à pièces comportent toujours des coutures, en général fines et régulières (Fig. 17), qui correspondent à l'interstice entre chaque pièce alors qu'un plâtre issu d'un moule à creux perdu ne présente pas de couture généralement, ou bien une seule marquant la jointure des deux coques. Bien souvent, les raccords des plaques d'argile dans le cas d'estampage forment des coutures irrégulières, bien distinguables (Fig. 18).

La statuaire en plâtre peut être faite de plusieurs façons : une coulée pleine ou une coulée creuse dite à *la volée*. Selon ce procédé, le matériau est déposé de façon à tapisser le moule. Pour les éléments en ronde-bosse, le moule est manipulé en le faisant tourner de façon à répartir le plâtre fluide sur l'ensemble de la surface du moule avant sa prise. Une ou plusieurs couches successives peuvent être déposées, selon les besoins structurels et la dimension de l'artefact. Dans certains cas, une seule couche épaisse de plâtre est coulée, alors que dans d'autres, la superposition de plusieurs couches aux textures différentes est bien visible. La matrice en plâtre peut être renforcée par le dépôt de toile de fibre végétale, entre deux coulées de plâtre ou par des armatures en bois ou en métal.

Le nombre de coulées et la texture des plâtres peuvent, là encore, être indicateurs d'époques ou de pratiques spécifiques. Plusieurs statues conservées à la gypsothèque, comme l'*Hercule Farnèse* (Gy 1300), le *Gaulois mourant* (Gy 0249), le *Commode en Hercule* (Gy 0247), *Tigrane* (Gy 0208) et *Tiridate* (Gy 0206) présentent des caractéristiques de mise en œuvre ancienne et, après confirmation par des recherches en archives et leur identification dans les inventaires anciens, sont datées du XVII^e siècle⁶⁵. Les statues sont pleines, avec des couches différentes aux granulométries variables et distinguables à l'œil nu. Certains matériaux de remplissage peuvent être utilisés, comme des briques ou des fragments de pierre. Les couches de surface sont généralement de granulométrie plus « fines » et semblent plus régulières. Les couches de remplissage sont plus grossières, avec des granulométries très hétérogènes, des cristaux bien visibles (des grains de tailles, formes et couleurs différentes) pouvant être estimés : des incuits et des surcuits de plâtre, mais aussi d'autres natures comme des charbons et des fragments d'autres roches (calcaire et carbonate de calcium, quartz et silice...) (Fig. 19).

⁶⁵ LE BRETON Élisabeth, « Un conservatoire des plâtres antiques, 1 », *In Situ*, 43 (2021) [En ligne : 28 février 2022 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/28626>], p.13.

Par conséquent, avec un moulage en plein, des matériaux de charge variés, et avec bien souvent des éléments structurels de renforts tels que des boisages ou des armatures métalliques, ces plâtres anciens sont généralement très lourds, de l'ordre de plusieurs centaines de kilogrammes, comme par exemple le *Gaulois mourant* (Gy 0249) dont la masse est d'environ 430 kg et l'*Hercule Farnèse* (Gy 1300) pesant 1200 kg. Cela représente, par estimation, entre quatre et cinq fois plus qu'une statue plus récente sans remplissage et moulée avec un plâtre homogène⁶⁶. Le plâtre des statues plus récentes paraît plus pur et plus régulier (Fig. 20). Cette différence technique et matérielle est liée aux changements de production du plâtre entre le XIX^e et le XX^e siècle⁶⁷. Enfin, dans de nombreux cas, les modèles sont moulés en plusieurs parties assemblées. Ces parties saillantes, trop difficiles à mouler avec la pièce principale sont découpées ou modelées à part et sont appelées « abattis ». Il s'agit bien généralement des bras, des jambes, et des accessoires, dans le cas de figures. Cette étape technique supplémentaire permet principalement d'éviter la casse lors du démoulage. Après moulage de toutes les parties, les fragments sont assemblés et scellés à l'aide d'agrafes métalliques et/ou collés au plâtre.



Figure 19 : détail de la terrasse du *Gaulois mourant*, Gy 0249, XVII^e siècle, © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.



Figure 20 : détail de la terrasse d'une statue dite *Laomédon*, Gy 1587, XIX^e siècle (estimation), © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

⁶⁶ Pour comparaison, en rapportant les dimensions à une même échelle, la statue d'*Auguste* (Gy 0198), présentant les aspects techniques des plâtres anciens de la collection et pesant 691 kg pour les mesures de 286 x 140 x 95 cm, correspond alors à presque cinq fois la masse d'une statue plus récente, comme celle représentant *Vénus* (Gy 1315) aux dimensions deux fois plus petites de 151 x 46 x 48 cm mais avec une masse estimée à 70 kg. Les masses sont indiquées dans Le Breton, « Gypsothèque du musée du Louvre. Les apports de la restauration à la datation des tirages en plâtre anciens », *op.cit.*, p.31, et sur les fiches d'œuvres de la base de données du musée du Louvre [En ligne ; URL : <https://collections.louvre.fr/>]

⁶⁷ Le Dantec, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, *op.cit.*, p.224.

c. Techniques des cadres du XIX^e siècle

Entre le XVII^e et le XVIII^e siècle, la plupart des ornements des cadres étaient sculptés dans le bois puis recouverts de nombreuses couches d'apprêt, de couches de préparation adaptées au type de dorure⁶⁸, et de feuilles d'or, pouvant ensuite être laissées mates ou brunies à l'aide d'outils. Le travail des couches préparatoires et de la dorure peut être d'une grande finesse, avec une maîtrise technique exceptionnelle et une grande variété dans le répertoire des formes et des effets décoratifs. Les cadres dits « du XIX^e siècle » se distinguent des cadres antérieurs par leur technique de mise en œuvre par moulage d'ornements⁶⁹. Il semblerait que la matière, appelée *compo* ou composition, soit développée dès le début du XVIII^e siècle, en mélangeant de la craie et de la colle animale très concentrée. D'autres matériaux comme des huiles ou des résines peuvent être ajoutés pour modifier la texture, selon la dimension de l'ornement et l'usage ; par exemple, une formulation plus « plastique » est préférable dans le cas d'ornements très fins. D'après Karraker, le matériau est employé pour la première fois en France en 1722. Dès le premier quart du XVIII^e siècle, en France, le matériau est bien identifié, notamment parce qu'il a été l'objet d'une poursuite en justice en 1723 lorsqu'un marchand a tenté de vendre un cadre en composition en tant que cadre sculpté. À la suite de cet événement, il a été réglementé de mentionner le matériau aux clients. Ainsi, certains cadres portent la mention « ornement de composition⁷⁰ » (Fig. 21). D'après Hubert Baija⁷¹, la *compo* est déjà répandue dans toute l'Europe dans les années 1720. Son usage serait toutefois encore « anecdotique » et peu utilisé jusqu'à l'ère des « cadres empire⁷² ». Des cadres du XVIII^e siècle, comme certains cadres Louis XVI, sont fabriqués en techniques mixtes, avec des ornements sculptés et d'autres en composition moulée, afin de réduire les coûts de fabrication⁷³.



Figure 21 : mention « ornement de composition », au revers d'un cadre daté du XVIII^e siècle
© Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

⁶⁸ Les dorures peuvent être faites à l'eau ou à l'huile, selon les supports et les besoins esthétiques et techniques. Des préparations spécifiques sont alors nécessaires, avec des bols rouges ou jaunes constitués de couche d'argile pigmentées pour les dorures à l'eau ; des mixtions composées d'huile cuite, colorées ou non, pour les dorures à l'huile.

⁶⁹ L'usage du moulage pour la production de cadre a été particulièrement développé dans un contexte social et économique spécifique du XVIII^e siècle, mais il ne s'agit pas des premières occurrences. Dans un autre contexte historique et technique, des cadres moulés étaient déjà produits dans les années 1500 en Italie, à Florence, avec notamment des exemples de *tondi* similaires au cadre original du *Tondo Doni* de Michel-Ange, conservé au musée des Offices à Florence et daté de 1507.

⁷⁰ Pons, « Les cadres français du XVIII^e siècle et leurs ornements », *op.cit.* ; un cadre daté du XVIII^e siècle et portant cette mention a été analysé, les résultats sont présentés dans l'encadré au chapitre II, p. 154-157..

⁷¹ BAIJA Hubert, *Picture Frames in Europe - 15th-21st century*, Continuing Professional Development Programme, Département de Conservation-restauration, Université d'Amsterdam, séminaire en ligne, suivi du 31 mars au 30 avril 2021.

⁷² Karraker, *Looking at European Frames, A guide to terms, styles, and techniques*, *op.cit.*

⁷³ *Ibid.*

La fin du XVIII^e siècle et le début du XIX^e siècle voient d'importants changements sociaux et culturels⁷⁴, amorcés par la Révolution française et liés aux guerres napoléoniennes (1792-1815), et à la révolution industrielle. Dans ce contexte de bouleversements et de mobilisation des ressources économiques et humaines, les historiens constatent un déplacement des artisans ainsi qu'une perte de production artisanale luxueuse, entraînant selon certains, le « déclin de la profession » dans le domaine de l'encadrement⁷⁵. Les critiques font état d'une baisse de prix mais aussi de qualité des artefacts mis en œuvre, tout en cherchant à imiter les anciens cadres de belles factures⁷⁶. Les cadres sont rendus « accessibles à tous⁷⁷ » afin de répondre à la demande croissante du marché de l'art⁷⁸. La production de cadre semble alors presque uniquement constituée d'ornements moulés en composition, matériau « populaire » selon Thornton⁷⁹. Rapide et peu coûteuse, elle est décrite comme « quasi-industrielle » et présente également une grande variété de formes et de styles (Fig. 22).



Figure 22 : détails de trois cadres du XIX^e siècle, conservés en réserve
© Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

⁷⁴ MIKABERIDZE Alexander, *Les Guerres napoléoniennes*, Paris, Flammarion, 2020, p. 11.

⁷⁵ Mitchell, Roberts, *A history of European picture frames*, *op.cit.*, p. 34.

⁷⁶ BONNARD Bénédicte, *La dorure sur bois dans le mobilier français des XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles*, Mémoire de master, École du Louvre, Paris, 2010, p. 12-14.

⁷⁷ Mitchell, Roberts, *A history of European picture frames*, *op.cit.*

⁷⁸ À partir du XIX^e siècle, les cadres entrent dans les intérieurs bourgeois, les tableaux décorant salons et cabinets de travail. Grimm précise que « la présentation de tableaux encadrés est le privilège des couches sociales supérieures ». La décoration des classes moins aisées « est restée médiévale jusqu'à la fin du XIX^e siècle ». Voir Grimm, « Histoire du cadre: un panorama », *op.cit.*

⁷⁹ Thornton, « A Brief History and Review of the Early Practice and Materials of Gap-Filling In the West », *op.cit.*

En effet, à cette période, les artisans mettent au point des procédés sériels de fabrication d'ornements par moulage à l'aide de formulations variées et parfois de plâtre. Il s'agit de cadres faits d'une structure en bois sur laquelle sont appliquées des couches préparatoires et des ornements rapportés. Les couches préparatoires sont constituées d'un encollage à la colle animale afin de boucher les pores du bois et de préparer l'accroche pour les couches suivantes. Les couches de préparation ou d'apprêt, faites d'un mélange de colle diluée et de charge, sont appliquées finement. Elles servent à homogénéiser la surface et à préparer l'application des ornements ou le dressage des moulures simples au gabarit. Les ornements sont réalisés avec des matériaux pâteux et malléables, pressés dans un moule, ou des matériaux suffisamment fluides pour être coulés.

Selon la bibliographie, plusieurs formulations ont été développées, en fonction des ateliers et des zones géographiques, avec des matériaux variés. Les termes « pâte » ou en « composition », servent bien souvent à mentionner tout cadre aux ornements non sculptés dans le bois, sans connaître véritablement la nature chimique des matériaux constitutifs. Le terme *compo* est parfois utilisé dans un contexte plutôt international ou anglophone. Par exemple, Karraker⁸⁰ mentionne le *whiting*, constituée de *gesso*, qui est lui-même un mélange de colle animale et de charge, de type carbonate de calcium en Europe du Nord ou sulfate de calcium en Italie, additionné de résine et d'huile de pin, puis chauffé de façon à former une pâte. Les moules peuvent être en bois (Fig. 23), bien souvent du buis, dont la dureté, la faible porosité et le grain fin permettent la taille de motifs en creux, mais aussi en soufre, en résine, en cire, ou en gélatine, ces matériaux de moule ayant l'avantage d'être refondus et donc réutilisables. Plus tardivement, des moules en plâtre sont utilisés (Fig. 24). Ils sont constitués de plusieurs pièces présentant des portions entières d'ornements, et d'une chappe de maintien, pour les ornements les plus saillants ou les plus complexes. L'ornement est appliqué sur le support pendant ou après son séchage, avec parfois des ajouts de colle ou d'apprêt à l'interface, d'après le *Gilder's Manual*⁸¹ de 1876.



Figure 23 : exemples de moules en buis
© Richard Christie Framemaker 2017.



Figure 24 : exemples de moules en plâtre
ornementation, RFML.HL.2019.o.1.2538
en haut, et RFML.HL.2019.o.1.1454 en bas,
© Musée du Louvre.

⁸⁰ Karraker, *Looking at European Frames, A guide to terms, styles, and techniques*, op.cit.

⁸¹ *The gilder's manual: a complete practical guide to gilding in all its branches: designed for all trades in which gilding is used, including silvering, together with picture framing, picture repairing, and much other useful information, valuable receipts*, New York, Excelsior Publishing House, 1876, p. 20.

Les plus gros ornements pouvaient être fixés à l'aide de clous, de pointes métalliques ou de fibres⁸². Les ornements sont généralement pleins et bien souvent d'épaisseurs importantes, supérieures à 2,5 cm, afin de pallier leur fragilité. Sur certains cadres étudiés, il a pu être conclu que les ornements avaient été ajoutés simultanément sur la structure recouverte de préparation puisqu'aucun joint n'a été observé entre les quatre traverses ni entre les différentes portions d'ornements⁸³. Dans certains cas, la pâte servait également à assembler ou à solidariser les traverses en bois de la structure.

Les surfaces sont ensuite retravaillées à l'aide d'outils, comme lors de la réparation des apprêts de bois sculptés, poncées avec des joncs, des peaux de poisson, des tissus mouillés, ou encore divers abrasifs⁸⁴. Puis, elles sont recouvertes des couches de finitions de polychromie telle que la dorure.

L'expression « pâte anglaise » est fréquemment citée lorsque sont mentionnés les cadres en pâte ou autres cadres du XIX^e siècle. La « pâte anglaise » semble aussi connaître quelques variations de compositions, mais il est admis qu'elle contient généralement de la craie (carbonate de calcium), de la colle animale, de l'huile de lin, de la colophane et de l'essence de térébenthine, lui conférant bien souvent une couleur verdâtre, grâce à laquelle une identification visuelle est possible.

Une autre formulation est composée de colle forte, de terre argileuse, de carbonate de calcium, de papier mâché et d'huile de lin⁸⁵.

Les analyses du cadre ICMO 190⁸⁶, restauré par Elise Lopez, révèlent la présence de sulfate de calcium dihydraté, c'est-à-dire d'hémihydrate de calcium additionné d'eau ayant fait prise, confirmant ainsi une mise en œuvre faite au « plâtre⁸⁷».

Dans ses recherches sur les matériaux, Lopez précise qu'il existe d'autres formulations telles que la « pâte coulante », mélange de sulfate de calcium et d'une petite quantité de carbonate de calcium ou blanc de Meudon, additionné de colle de peau de façon à obtenir un mélange fluide utilisé pour les ornements épais ou de grandes dimensions. Une « pâte blanche » est également décrite dans ces recherches, composée de carbonate de calcium, de papier, de colle forte de nerf et d'huile de lin⁸⁸.

⁸² Glover, « A Description of 19th-century American Gilded Picture Frames and an Outline of Their Modern Use and Conservation », *op.cit.*, p. 78.

⁸³ *Ibid.*, p. 80.

⁸⁴ *Ibid.*

⁸⁵ LOPEZ Elise, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Etude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2016, p. 73.

⁸⁶ La méthode de fabrication étudiée par Lopez est décrite dans l'encadré p. 51 et 52.

⁸⁷ *Ibid.*, p. 88.

⁸⁸ *Ibid.*, p. 75.

d. Polychromies et couches superficielles

En comparant les deux corpus étudiés, la polychromie est présente essentiellement sur des cadres du XIX^e siècle. À la gypsothèque, seulement quelques exemples de restitution de polychromie concernent des ordres architecturaux ou des éléments de décors. La surface des cadres était généralement dorée à la mixtion, avec des détails dorés à l'eau, brunis ou laissés mats. Des exemples tardifs montrent des dorures à la feuille de cuivre ou à l'or en poudre⁸⁹. Sur certains cadres tardifs des ajouts de pigments rouges ont pu être notés. Ceci rappelle également les pratiques de pose de bols sous les dorures à l'eau, modifiant l'aspect de la dorure finale. Il est reconnu également que l'or parfois employé est de moins belle qualité. Dans certains cas, des techniques de « fausses dorures » sont développées, remplacées par des alliages⁹⁰.

REMARQUES

Les artefacts étudiés sont en relief et en volume, en trois dimensions, jusqu'à la ronde-bosse dans le cas de la statuaire et de certains ornements. Ils sont faits de matériaux similaires, utilisés purs ou avec des additifs, de fabrication plus ou moins artisanale, pouvant comporter des impuretés à des taux variables. Les techniques de mise en œuvre sont aussi équivalentes. Dans les deux cas, la technique principale utilisée est celle du moulage, à creux perdus ou à bon creux en sculpture, à bons creux monocoque pour les ornements des cadres. Des ajouts de matières fraîches, liquides ou en pâte, sont également possibles pour les deux typologies d'œuvres. Communes aux deux spécialités, les mises en œuvre étaient réalisées par des artisan-es et des praticien-nes, et non pas par des artistes. En effet, au moins au XIX^e siècle, les sculptures en plâtre étaient réalisées par des mouleurs, à la demande du commanditaire. Les cadres en composition étaient mis en œuvre par des artisans ou des encadreur-s ayant suivi un apprentissage spécifique. Ce point est important puisqu'il semble avoir aussi conditionné l'approche de la conservation-restauration de ces typologies, jusqu'à une certaine période. Pour une meilleure compréhension des techniques de mise en œuvre des cadres, un atelier de pratique a été mené et est décrit dans l'encadré qui suit, aux pages 49 et 50. Ces données techniques peuvent être comparées à la description de la mise en œuvre du cadre ICMO 190 du musée du Louvre restauré par Élise Lopez à l'INP en 2016, présentée aux pages 51 et 52.

⁸⁹ Glover, « A Description of 19th-century American Gilded Picture Frames and an Outline of Their Modern Use and Conservation », *op.cit.*, p.82.

⁹⁰ Bonnard, *La dorure sur bois dans le mobilier français des XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles*, *op.cit.*, p. 12-14.

Mise en œuvre des formulations

Un atelier de pratique des matériaux de mise en œuvre et de restauration des cadres et des dorures a été mené avec Stéphanie Courtier le 22 janvier 2021, à l'atelier Dorure du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF).

Les formulations couramment utilisées en atelier ont été testées : le « blanc liquide » (apprêt), le « gros blanc » (pâte), avec le « blanc marqué » ou « blanc Aliénor », mélange contenant 2 % de dioxyde de titane, mis au point par les professionnel·le·s du C2RMF. Les matériaux utilisés sont de la colle de peau de lapin en granulés, du carbonate de calcium ou blanc de Meudon et du dioxyde de titane. De la craie de Bologne, mélange naturel contenant du carbonate de calcium et du sulfate de calcium hydraté, a été testée en comparaison, pour identifier le comportement des mélanges en modifiant la charge. Les matériaux et les formulations ont été préparés en suivant les protocoles couramment utilisés en atelier.

Préparation de la colle

Les granulés de colle sont réhydratés dans l'eau froide, avec un ratio de 15 g de granulés pour 75 g d'eau. Quand les granulés sont entièrement réhydratés, avec un phénomène de gonflement, le mélange doit être chauffé pour être fondu. La colle devient alors liquide, avec une texture épaisse, homogène, de couleur brun foncé (Fig. 25 b). Elle doit être maintenue à température tiède à chaude, sans dépasser 50-60 °C au risque de la faire brûler, lui faisant perdre ses propriétés. En refroidissant, la colle fige et gélifie (Fig. 25 a).

Cette colle dite « pure » est utilisée pour l'encollage des surfaces et pour la préparation du « gros blanc ». Diluée à l'eau froide (environ 60-40 % colle-eau en volume), la colle est plus fluide et de couleur brun clair (Fig. 25 c). Elle est utilisée pour le « blanc liquide » qui sert à la réalisation des couches d'apprêt.

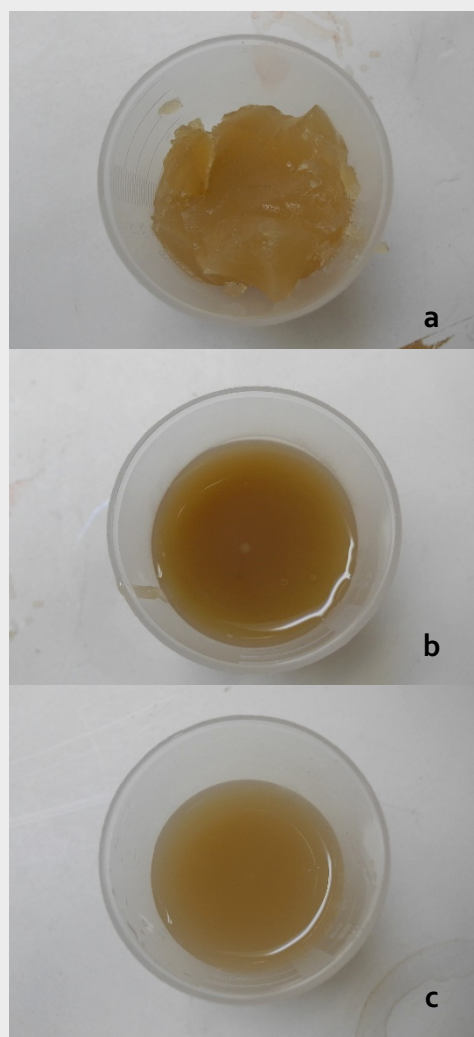


Figure 25 : colle animale à trois moments de préparation : état froid et gélifié (a), état chaud ou colle « pure » (b), et état chaud et dilué (c).

Préparation des « blancs »

Le « blanc liquide » est obtenu en déposant du carbonate de calcium, marqué ou non, en pluie fine dans la colle diluée (Fig. 26), jusqu'à obtenir une consistance plus épaisse, suffisamment fluide pour être appliquée en couche fine au pinceau (Fig. 28). Avec 2 % de dioxyde de titane, le mélange garde la même consistance, mais avec 4 %, le mélange devient plus dense, la texture est plus épaisse et presque mousseuse lors du



mélange.

Figure 26 : préparation du « blanc liquide », © S. Courtier.

La pâte de « gros blanc » est préparée selon la quantité nécessaire pour éviter qu'elle ne perde ses propriétés malléables. La poudre est mise dans un support propre de type creuset, puis la colle pure est déposée au milieu. Une boule de pâte est formée en tournant la colle au centre du creuset et en absorbant de fine quantité de poudre. Lorsque la boule de pâte a absorbé suffisamment de charge, elle ne tourne plus, ou commence à tourner en sens inverse. Il faut alors récupérer la pâte, tout en gardant de la poudre dans les mains, puis, en travaillant par légère adjonction de poudre, jusqu'à ce que la pâte soit souple et ne soit presque plus collante (Fig. 27).

La portion de pâte peut alors être façonnée, estampée dans un moule, le motif de comblement obtenu peut être ajusté à frais dans la lacune et collé avec de la colle pure.

Figure 27 : boule de « gros blanc »



obtenue par mélange très concentré en poudre et malaxage.

La craie de Bologne a été testée en « blanc liquide » avec 2 % de dioxyde de titane. Par comparaison avec le « blanc marqué », il semble que le mélange soit plus « lourd », plus « dense », avec une consistance plus épaisse et une couleur blanche plus intense. Le sulfate de calcium hydraté modifie donc les propriétés du carbonate de calcium seul.

Figure 28 : deux « blancs liquides »



marqués, préparés au carbonate de calcium à gauche et à la craie de Bologne à droite.

Mise en œuvre des ornements du cadre ICMO 190

Cette fiche présente les informations et les descriptions faites par Elise Lopez, dans son mémoire de conservation-restauration mené à l'INP en 2016 au sujet d'un cadre en plâtre de style Barbizon, ayant servi à l'encadrement du tableau Le Passeur de Camille Corot, du musée du Louvre (Fig. 29).



Figure 29 : Camille Corot, *Le Passeur*, 1873, RF 2670 © Musée du Louvre.

Support et structure

Le cadre est fait d'une structure en bois avec différents assemblages de pièces débitées sur quartier (Fig. 30).

Préparation

Le bois est recouvert d'une couche d'encollage, de nature protéinique d'après les analyses.

Préparation des moulures sans motif

Deux couches d'apprêt sont appliquées, composées de colle protéinique, de carbonate de calcium, et d'une faible quantité de sulfate de calcium monohydraté, identifié dans la partie supérieure de l'apprêt. Ces deux couches d'apprêt semblent avoir été travaillées au « traînard », gabarit adapté à la forme des moulures qui permet de dresser les surfaces sans ornement.

Préparation des frises d'ornements

Les frises comportant des motifs végétaux et décoratifs, tels que des feuilles d'acanthe, des fleurons, des lauriers et des frises de perles, ont été moulées en plâtre d'après les analyses identifiant du sulfate de calcium dihydraté. Les ornements saillants des angles pourraient avoir été moulés dans des moules à la gélatine, plus souples, permettant un démoulage adapté, alors que les frises régulières et les ornements en faibles reliefs ont probablement été moulés dans des moules en soufre. Des pointes métalliques ont servi à renforcer la fixation sur la structure en bois. Les ornements ont pu être appliqués « à frais », c'est-à-dire juste après leur démoulage, avec un risque de casse du plâtre humide, ou après séchage par collage sur l'apprêt.

Traitement des surfaces

Le cadre a entièrement été doré, en alternant des effets de brillant et de mat, avec des zones dorées à la détrempe sur assiette rouge et brunies, et des mixtions sur fond ocre.



Figure 30 : cadre ICMO 190, vue de face et de revers, avant les interventions de conservation-restauration de 2016 © INP, G. Vanneste.

4. Statuts et fonctions : de la valorisation à la patrimonialisation

Les artefacts patrimoniaux sont soumis aux évolutions et aux changements du goût, qui influencent leur usage, leur conditionnement et leur restauration. La statuaire en plâtre, typologie plus ancienne que celle des cadres moulés, exemplifie donc la première partie de la chronologie présentée ici. Divers facteurs ont participé à la dévalorisation des artefacts, mais les qualités techniques du matériau ont probablement joué un rôle important dans la persistance de leur usage et, avec le temps, d'autres valeurs ont été attribuées, participant à la revalorisation du plâtre et à la patrimonialisation des artefacts.

a. Premiers statuts et dévalorisation

La compréhension de la perception des artefacts en plâtre aux périodes antiques et médiévales n'est ni aisée, ni certaine. Pendant l'Antiquité, l'œuvre moulée a pu être perçue comme valeureuse, « traduction de l'Idée du Beau en soi saisie par l'artiste¹ », sans dénigrement pour les aspects matériels, comme l'indique Crocquevieille en s'appuyant sur la pensée d'Erwin Panofsky (1924) et la théorie platonicienne des Idées et en rapportant que « ce qui est visé dans le modèle antique n'est pas ce que l'œuvre matérielle enseigne mais bien plutôt l'idée qui a présidé à sa conception ».

À la Renaissance, dans le domaine de la sculpture, les matériaux utilisés pour la reproduction tels que la cire, la terre et, plus particulièrement le plâtre, sont en bas de la hiérarchie, comme l'explique Eckart Marchand². Le plâtre n'est pas considéré comme précieux en raison de son faible coût et de sa facilité de mise en œuvre. De plus, le matériau est fragile et casse facilement contrairement à la pierre.

À la période classique, l'usage du plâtre est limité aux étapes de fabrication d'une œuvre plus pérenne, réalisée en matériaux durables tels que le bronze ou le marbre, et le plâtre sert à la fabrication de moules, d'épreuves moulées intermédiaires et d'épreuves copiées sur lesquelles il est possible de marquer les repères sans risque pour un travail d'agrandissement ou de réduction. Sa fonction est donc celle d'un outil de travail.

À partir du XVII^e siècle et jusqu'au XIX^e siècle, les plâtres servent à diffuser des modèles antiques récemment mis au jour, remplaçant les originaux inaccessibles, voire disparus. Ces répliques ont été considérées comme des substituts de grande valeur et exposées au sein des collections et des musées. Des projets de musées d'artefacts moulés apparaissent en Europe, avec par exemple le Musée de Sculpture Comparée du Trocadéro (Fig. 31) à l'initiative d'Eugène Viollet-le-Duc dès 1855, qui souhaite réunir en un même

¹ « Ainsi conçue, l'œuvre d'art dans sa matérialité est la traduction de l'Idée du Beau en soi saisie par l'artiste, lequel s'efforce de la rendre communicable par une réalisation matérielle » dans Crocquevieille, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitrée de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, *op.cit.*

² Marchand, « Material distinctions: plaster, terracotta and wax in the Renaissance artist's workshop », *op.cit.*

lieu les copies des monuments français les plus importants, et plus tard, en 1873, les *Cast Courts* au South Kensington Museum (Fig. 32), l'actuel Victoria and Albert Museum, à Londres, mêlant avec éclectisme des œuvres célèbres désormais accessibles à tous les visiteurs londoniens³. Ainsi, les collections sont porteuses de discours historiques et méthodologiques⁴.



Figure 31 : Musée de la Sculpture comparée d'après Hubert Clerget, *Le Journal illustré*, 8 juin 1882
© Cité de l'architecture et du patrimoine.



Figure 32:
Henry Edward Tidmarsh,
View in the Cast Courts, 1883,
n° E.2384-1983,
© Victoria and Albert Museum.

À la fin du XIX^e siècle, des gypsothèques sont créées dans de nombreuses villes européennes telles que Berlin, Copenhague ou Rome, parallèlement à l'ouverture de chaires universitaires en histoire de l'art et en archéologie, comme en Sorbonne, à Lyon et à Bonn⁵, reflétant « l'anticomanie » de cette époque, par le biais de supports visuels en plâtre. À partir du XX^e siècle, les goûts et les conceptions changent. La notion d'original, d'un point de vue matériel, est préférée et les épreuves moulées, considérées comme des « répliques » et de « simples copies », ne présentent plus d'intérêt et perdent de leur valeur⁶.

³ Frederiksen, Marchand, *Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present, op.cit.*

⁴ Crocquevieille, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitree de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles, op.cit.*

⁵ THERRIEN Lyne, *L'histoire de l'art en France : genèse d'une discipline universitaire*, Paris, Editions du C.T.H.S., 1998, p. 493-527. À Lyon, le ministère de l'Instruction publique créé en 1893 un musée implanté directement dans l'université, aux caractéristiques qui en font un modèle architectural au début du XX^e siècle. Il est au dernier étage du bâtiment et bénéficie d'un éclairage zénithal. Les dernières découvertes archéologiques, principalement issues des fouilles de Delphes ou de l'Acropole d'Athènes (1885), y sont présentées chronologiquement. À Bonn, les plâtres sont présentés dans le musée d'art académique de l'université. La collection a débuté en 1820, et comprend notamment des moulages mis en œuvre dans l'atelier du Louvre, parmi les célèbres figures de l'*Apollon du Belvédère*, la *Vénus Médicis*, et *Germanicus*.

⁶ Frederiksen, Marchand, *Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present, op.cit.*

En plus des considérations techniques et d'une hiérarchie liée aux matériaux et aux savoir-faire, les cadres, toutes techniques confondues, ont également souffert de leur aspect fonctionnel. Ils sont fabriqués pour servir l'œuvre qu'ils entourent et protègent : ils sont secondaires. Karraker écrit que « l'encadrement a été négligé dans l'histoire de l'art⁷ », bien que selon Grimm l'histoire des cadres soit intimement liée à la fonction des tableaux. Ainsi, au XVII^e siècle, l'encadrement prestigieux était limité principalement aux peintures religieuses, en conséquence d'une forme d'évolution du retable, alors que à quelques exceptions pour des portraits ou des peintures d'histoire, les sujets non religieux étaient plus généralement accompagnés de cadres simples. Puis au fil du temps, ils ont été généralisés et sont « finalement devenus des meubles⁸ ». Le statut des fabricants est un autre paramètre à relier à la dévalorisation. Plusieurs spécialistes de l'histoire des cadres tels que Glover, Grimm, et Karraker, rappellent que les encadreurs et les artistes partagent une histoire commune, avec des rôles mêlés et interdépendants selon les périodes. Les retables médiévaux mis en œuvre par les sculpteurs, les peintres et les menuisiers, ont en effet eu pour résultat l'émergence de véritables dynasties d'encadreurs à la Renaissance en Italie. Puis, des artisans hautement qualifiés et considérés, ont œuvré sur le territoire européen, notamment les fabricants de cadres français au XVII^e siècle. Mais les changements techniques opérés au XIX^e siècle ont conditionné la perte de certains savoir-faire ou de qualités techniques exceptionnelles, malgré la présence croissante des cadres dans les intérieurs (Fig. 33). Façonnés par des artisans aux compétences jugées moins bonnes par les historiens et les critiques artistiques, en comparaison aux productions de « chefs-d'œuvre » antérieurs, les cadres du XIX^e siècle ont été dévalorisés. Ce même constat s'applique à la statuare moulée. La période de dévalorisation, au début du XX^e siècle, correspond pourtant à une fabrication intensifiée, avec des besoins en équipements d'écoles et autres lieux de savoirs nécessitant la constitution de collections de copies. Ces artefacts étaient réalisés par des mouleurs et des artisans qualifiés, mais également des « ouvriers » travaillant pour les artistes ou pour des commanditaires. L'artisan-mouleur n'était pas autant valorisé que l'artiste, dont le statut et la valeur sont d'importance croissante depuis la Renaissance et plus particulièrement au XX^e siècle.



Figure 33 : Albert André, *La Musique*, vers 1900, musée Paul Dini (dépôt du musée d'Orsay), RF 1991 9 © Musée d'Orsay, Dist. RMN-Grand Palais / Patrice Schmidt.

⁷ Karraker, *Looking at European Frames, A guide to terms, styles, and techniques*, *op.cit.*

⁸ Grimm, « Histoire du cadre : un panorama », *op.cit.*

b. Études et revalorisation

« Exemples intemporels et utiles à la recherche » d'après Pinatel, les plâtres de la collection de l'ENSBA connaissent un regain d'intérêt dans les années 1970, en parallèle de leur sauvetage. La sauvegarde des collections françaises, et plus particulièrement des collections formant l'actuelle Gypsothèque du Louvre, montre l'intérêt porté par quelques « défenseurs des moulages en plâtre ». Leurs arguments sont que les artefacts étaient des outils d'enseignement, des moyens de représenter des œuvres disparues : ce sont des témoins historiques et documentaires qui doivent être rendus accessibles au public⁹, en perpétuant la fonction éducative d'une partie des œuvres de la collection.

À partir des années 1980, l'organisation d'expositions et de conférences, associées à des publications, sur le thème des collections de plâtres est significative d'un véritable regain d'intérêt. Dans l'étude de Haskell et Penny, *Taste and the Antique*, publiée en 1981, les plâtres moulés d'après l'antique sont présentés comme des outils incontournables de la formation du goût des élites du XVI^e au XIX^e siècle¹⁰. Le premier colloque international consacré au moulage est organisé en 1987 au musée des Monuments Français et suivi d'une publication¹¹, traitant notamment du statut des « moulages » de diverses collections¹². D'autres travaux suivent cette dynamique avec l'organisation de colloques suivis de publications¹³, et ce jusqu'à récemment, en ouvrant les sujets à des thématiques adjacentes, comme « Le plâtre en construction », colloque tenu à Rambouillet en février-mars 2019, ou encore les stucs avec la conférence « Stuc et variations » organisée au Louvre et au C2RMF en juin 2019.

Les cadres, en tant qu'objet de réflexion et de théorie, connaissent un intérêt croissant à partir du XX^e siècle. Bien que les premières réflexions sur les cadres semblent apparaître avec les écrits de Bode en 1898, puis de Roche en 1931, il faut attendre les années 1960-1970 pour constater un véritable intérêt, avec notamment les publications de Heydenryk¹⁴ et *Alte Bilderrahmen* de Grimm¹⁵. Au cours des années 1975-1990, plusieurs expositions¹⁶, documentées par des catalogues ainsi que des publications importantes, jalonnent la recherche, l'étude et la mise en valeur de cette typologie d'artefacts.

⁹ Selon Pinatel, la collection est « un très riche héritage culturel » et il « convient que cette richesse soit mise complètement à la portée de tous les publics en quête d'informations dans le domaine de l'art ». Pinatel, « La formation de la collection de moulages d'après l'antique à Versailles. », *op.cit.*

¹⁰ HASKELL Francis et PENNY Nicholas (dir.), *Pour l'amour de l'Antique : la statuaire gréco-romaine et le goût européen, 1500-1900*, Paris, Hachette, 1999 [1981].

¹¹ *Le moulage, Colloque international, Musée des Monuments français, 10-11 avril 1987*, Paris, la Documentation française, 1988.

¹² Crocquevieille, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitree de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, *op.cit.*

¹³ Montpellier, 1997 (actes 1999) ; Paris, 1997 (actes 2000) ; Possagno, 2006 (actes 2008) ; Reading, 2005 et 2007 (publication 2010) ; Londres, 2010 ; Bruxelles, 2011.

¹⁴ HEYDENRYK Henry, *The art and history of frames: an inquiry into the enhancement of paintings*, London, Nicholas Vane, 1964.

¹⁵ GRIMM Claus, *Alte Bilderrahmen. Epochen, Typen, Material*, Munich, Callwey, 1978.

¹⁶ Références mentionnées p. 38.

Pourtant, même de nos jours, leur statut d'œuvre d'art est difficilement reconnu, hormis pour les cadres anciens de la Renaissance et des XVII^e et XVIII^e siècles, ainsi que pour ceux porteurs d'estampilles¹⁷. À ces cadres sont attribuées des valeurs artistiques et historiques, justifiées par leur fabrication au degré technique très élevé. Mais les cadres en pâte ou en composition sont encore peu considérés en raison des matériaux et de leur technique de mise en œuvre. Ces artefacts, relativement contemporains, ne bénéficient même pas de la valeur d'ancienneté et ne sont donc toujours pas valorisés comme ils le devraient¹⁸.

c. Patrimonialisation

La patrimonialisation des artefacts étudiés dans nos travaux, s'est produite grâce à divers facteurs et à l'évolution des considérations. La statuaire connaît une première phase de commandes et d'acquisitions en remplacement des originaux, puis un usage comme objet de travail (dessin et histoire de l'art), puis de nouveau comme artefact artistique, avec cette fois-ci une dimension historique et documentaire supplémentaire. Outre son intérêt pédagogique et archéologique, la collection porte aussi un intérêt historiographique d'après Crocquevieille, donc une fonction patrimoniale qui justifie la conservation des épreuves moulées¹⁹. Les cadres connaissent une première phase de commandes et d'acquisitions en tant qu'objet fonctionnel pour encadrer des œuvres, suivie de modifications selon l'évolution du goût avec des conservations en salles ou en réserves, et un intérêt en tant qu'artefact indépendant relativement récent. Les deux typologies ont subi des phases de déclin avant de connaître des regains d'intérêt plus récemment. L'intérêt porté aux collections de la gypsothèque du Louvre a permis de conserver les artefacts, de les installer dans des espaces dédiés, d'affiner les connaissances sur leurs historiques, leurs techniques, et leurs datations²⁰ ou encore de les exposer²¹ (Fig. 34). La gypsothèque est fréquemment citée comme exemple de collections d'œuvres moulées en plâtre, au regard de la richesse et de la qualité des artefacts. Elle est considérée comme « pionnière » dans la constitution d'une collection de modèles antiques, du fait de l'ancienneté des premiers plâtres, notamment ceux commandés par François I^{er}, et de la création des Académies royales à Paris et à Rome²². Mais elle n'est pas la seule collection bénéficiant d'une mise en valeur : les gypsothèques des universités françaises comme celle de Montpellier, de Lyon ou de

¹⁷ CHASTEL-ROUSSEAU Charlotte et LOPEZ Elise, « S'unir « très doucement avec les couleurs sans les offenser » : redécouverte et restauration d'un cadre des collections du musée du Louvre », *Patrimoines*, 13 (2017), p. 140-145.

¹⁸ Jacques Foucart dit que « Les purs cadres des tableaux romantiques et naturalistes de l'École française du XIX^e siècle et d'ailleurs aussi bien des autres écoles nationales de l'époque répondent, eux, à de subtils impératifs formels, mais ils ont été en règle générale parfaitement négligés ». FOUCCART Jacques, « Étude critique de l'encadrement », *Revue de l'Art*, 76 / 1 (1987), p. 7-14.

¹⁹ Crocquevieille, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitree de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, *op.cit.*

²⁰ Lebreton, « Gypsothèque du musée du Louvre. Les apports de la restauration à la datation des tirages en plâtre anciens », *op.cit.* ; Martinez, « Exposer des moulages d'antiques : à propos de la gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *op.cit.* ; Pinatel, « La formation de la collection de moulages d'après l'antique à Versailles. », *op.cit.*

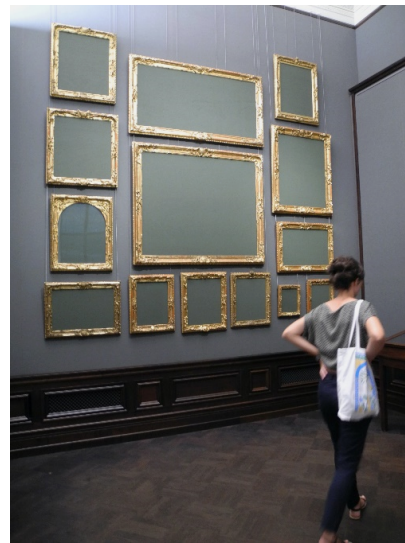
²¹ À Rome, l'exposition « Une Antiquité moderne » a été organisée par l'Académie de France à Rome et le musée du Louvre, à la Villa Médicis, sous le commissariat d'Elisabeth Le Breton et de Luc Martinez, entre le 8 novembre et le 1^{er} mars 2020. À Paris, l'exposition « Paris - Athènes. Naissance de la Grèce moderne 1675 - 1919 » s'est tenue au musée du Louvre, du 30 septembre 2021 au 7 février 2022, sous le commissariat d'Anastasia Lazaridou, de Marina Lambraki-Plaka, et de Jean-Luc Martinez.

²² Crocquevieille, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitree de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, *op.cit.*

Bordeaux, ou encore le Museo Gypsotheca Antonio Canova à Possagno en Italie sont d'autres exemples notables. Le processus de patrimonialisation des cadres, toutes techniques confondues, n'est pas autant abouti que celui des statues moulées. Les cadres ne sont pas encore inscrits aux inventaires, du moins en France, et cette question semble encore faire débat. Mais, depuis quelques années, les cadres sont restaurés en suivant des principes déontologiques. Ils ne sont plus modifiés structurellement et ils sont stockés dans des réserves adaptées, bénéficiant donc des dispositions conservatoires appliquées aux typologies d'œuvres muséales²³. Ils sont même mis en valeur par des expositions de cadres vides, au musée du Louvre²⁴ ou encore à la Gemäldegalerie Alte Meister de Dresde (Fig. 35). Lorsqu'un artefact est valorisé, du temps et des budgets lui sont dédiés, offrant des réflexions adaptées, de meilleures réponses face aux problèmes conservatoires, résultant donc en une précision des procédés de conservation-restauration et une spécialisation des professionnel·le·s, sensibles aux spécificités des artefacts et aux nouvelles valeurs qui conditionnent les interventions²⁵. Matériaux, techniques ou encore fonctions des artefacts ont été des causes de la dévalorisation des typologies étudiées. Puis, attestant d'un regain d'intérêt, de nouvelles valeurs leur ont été attribuées. En changeant notamment la fonction de l'artefact par l'association de valeurs historiques, artistiques et documentaires, ces nouvelles considérations ont conduit à la patrimonialisation et à la possibilité de traitements de conservation-restauration affinés²⁶.



**Figure 34 : entrée de l'exposition
Une antiquité moderne dédiée aux
collections du Louvre et de l'Académie de
France à Rome (Gy 0228, Gy 0229, Gy 0249,
2015.0.317)
© Villa Médicis, J. Robin Dupire.**



**Figure 35 : vue d'une galerie présentant des
cadres vides et une vitrine dédiée aux
matériaux de la dorure, à Dresde
© Gemäldegalerie Alte Meister,
J. Robin Dupire.**

²³ Chastel-Rousseau et Lopez, « S'unir « très doucement avec les couleurs sans les offenser » : redécouverte et restauration d'un cadre des collections du musée du Louvre », *op.cit.*

²⁴ Une exposition temporaire de cadres vides est présentée en 2018 au musée du Louvre ; depuis deux salles du musée accueillent de façon permanente une série de cadres vides, dans l'aile Sully, au niveau 2.

²⁵ BOURDON Michel, « Le moulage aujourd'hui », dans *La Sculpture du XIX^e siècle, une mémoire retrouvée*, Paris, La Documentation française, 1986, p. 66.

²⁶ LEVEAU Pierre, « Les dilemmes philosophiques de la conservation-restauration », *E-conservation*, 12 (2009), p. 47-58.

II. Conservation-restauration des artefacts en plâtre

Que le matériau soit moulé pour obtenir une œuvre en relief ou des éléments ornementaux, il présente des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques identiques et, par conséquent, des altérations qui peuvent être similaires. En raison de la technique et des matériaux employés, ces œuvres sont fragiles. En étudiant les procédés anciens et actuels de conservation-restauration, il est possible de faire un bilan sur les matériaux et les types d'interventions. Le développement de procédés peut ainsi répondre à de nouvelles problématiques. Mais il n'est pas uniquement question de trouver une réponse technique et matérielle satisfaisante. La nature de l'intervention et les choix techniques doivent être faits tout en respectant l'intégrité de l'objet. C'est avec la prise de conscience des différentes valeurs à associer aux artefacts que de nouvelles approches techniques ont été observées. En considérant d'autres valeurs telles que la valeur historique, artistique ou encore documentaire, un changement des fonctions et parfois même des identités s'est opéré. La patrimonialisation offre une nouvelle considération et de nouveaux traitements.

1. État de la recherche générale

En conservation-restauration des sculptures en plâtre, les premières publications semblent apparaître dès la fin des années 1970, avec entre autres l'article de Beale, Craine et Forsythe²⁷. En France, à la fin des années 1980, les premiers mémoires d'écoles diplômantes en conservation-restauration de sculpture sont rédigés. Ils posent des jalons dans le domaine de la conservation-restauration des épreuves moulées en plâtre, en s'intéressant à des problématiques très précises, comme le nettoyage ou le collage. En particulier le travail d'Agnès Cascio et de Dominique Biesel²⁸, soutenu en 1984, a porté sur les matériaux de restitution des sculptures en plâtre en interrogeant les critères nécessaires à la sélection du matériau de restitution²⁹. Les travaux de Céline Klarer en 1997 portaient sur la restauration de l'œuvre *Au passage du mur*, de Sonia Garelli, réalisée en 1980, statue composée de plâtre, de métal, de carton et de papier journal, de filasse et de tissu et, enfin, de polystyrène³⁰. Les travaux réalisés à l'École des Beaux-Arts de Tours, par Astrid Lorenzen et Bertrand Porte, sur deux modèles monumentaux en plâtre de François Sicard, en 1989, puis ceux de Guylaine Mary sur un atlante de Rodin en stuc peint et ses deux moulages en plâtre, au début des années 1990, ont posé des jalons importants pour les méthodes de nettoyage par « gel pelable », constitué notamment d'attapulgite (argile), de carboxyméthylcellulose, de poudre de cellulose et d'eau, permettant un nettoyage homogène, encore très généralement utilisé actuellement.

²⁷ BEALE Arthur, *et al.*, « The Conservation of Plaster Casts », dans *Preprints of papers presented at the Fifth Annual Meeting of the AIC, Boston, Massachusetts, 30 mai – 2 juin 1977*, Washington, American Institute for Conservation, 1977, p. 18-26.

²⁸ BIESEL Dominique et CASCIO Agnès, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, Mémoire de master, Paris, IFROA, 1984.

²⁹ Présentation détaillée dans la partie III, 1, a., p. 70.

³⁰ KLARER Céline, *Au passage du mur de Sonia Garelli : Les stylos Choses d'Arman : Etude du vieillissement d'une inclusion d'Arman*, Mémoire de Master, Saint-Denis, ENP-IFROA, 1997.

Les travaux de diplôme de l'Institut national du patrimoine et de l'École supérieure d'art et de design de Tours témoignent de la diversité des problématiques en lien avec la statuaire en plâtre comme les travaux de Fujiwara en 1996 sur le nettoyage au laser, ceux de Lambert et de Roux en 1998 sur des problématiques de patine et de polychromie, de Rigaut en 2005 s'intéressant à la conservation des moules, de Chantepie en 2006 sur les questions de moulage et d'agent de démoulage réversible, ceux de Courtiade en 2011 sur les modèles de fonderie, de Gaget en 2012 également sur des plâtres polychromés, de Hueber en 2013 sur les fossiles et les modèles en plâtre ou encore ceux de Carel en 2015 sur les interactions plâtre, cire et armatures métalliques. À l'étranger, un travail général et de synthèse a été effectué en 1992, par Annette Schulz³¹. Intitulé *Gipsplastiken - Geschichte - Materialkunde - Reinigung von Ungefassten Gipsoberflächen*, il s'intéresse à l'histoire et aux spécificités techniques du matériau ainsi qu'aux problématiques de nettoyage et de traitement des surfaces. Les problématiques de nettoyage ont également été abordées et traitées au cours de projets diplômants, comme celui d'Aurelia Badde sur la poussière en 2009³². Depuis plusieurs années, les publications du GRPA (Groupe de Recherche sur le Plâtre dans l'Art) regroupent des articles traitant de sujets divers comme les plâtreries, les techniques, ou encore la conservation-restauration. Dernièrement, un intérêt a été porté sur la polychromie des artefacts en plâtre. Entre 2010 et 2013, une étude a été menée aux Pays-Bas dans le cadre du projet « Conservation of Plaster Collections » entreprise par le Netherlands Institute for Cultural Heritage (ICN) en association avec le Musée national des antiquités de Leiden et du Allard Pierson Museum of the University of Amsterdam, s'intéressant tant à la matérialité du plâtre en statuaire³³ qu'aux méthodes et aux matériaux de collage³⁴.

Les premières publications ayant une approche conservatoire dans le domaine des cadres apparaissent à partir des années 1990, comme celle de Hackney³⁵ qui relie la conservation des peintures et les cadres en exposant des techniques d'encadrement mises en œuvre à la Tate Gallery ou encore celle de Ciatti³⁶ en 1994 qui expose le problème de manque de reconnaissance artistique des cadres empêchant des traitements conservatoires véritablement adaptés. À partir des années 2000, les publications reflètent un changement de paradigme pour la conservation-restauration des cadres, portée par des professionnels tels que Jonathan Thornton, Malgorzata Sawicki, Hubert Baija et Behrooz Salimnejad. « Leurs réflexions se sont autant portées sur le statut des cadres que sur la remise en cause des techniques de restauration utilisées jusqu'alors³⁷ ». Certaines publications sont rendues accessibles et mises en ligne, comme celles du Victoria and Albert Museum et du carnet *The Frame Blog*³⁸.

³¹ SCHULZ Annette, *Gipsplastiken: Geschichte - Materialkunde - Reinigung von ungefassten Gipsoberflächen : Diplomarbeit am Institut für Technologie der Malerei der Staatlichen Akademie der bildenden [bildenden] Künste Stuttgart*, Stuttgart, Institut für Technologie der Malerei, 1992.

³² BADDE Aurelia, *Dusts on busts: dust on plaster surfaces: focussing on the portrait busts in the Rococo Hall of the Duchess Anna Amalia Library in Weimar*, Diplôme de Master, Newcastle, Northumbria University, 2009.

³³ MEGENS Luc, *et al.*, « The composition of plaster casts », *Preprints of the ICOM-CC Conference (Lisbon, 19-23 September 2011)*, 2011.

³⁴ BEEMEN Roosmarijn van, *et al.*, « Suitable Bonding Methods for the Conservation of Large Broken Plaster Casts of Ancient Sculptures », 2013.

³⁵ HACKNEY Stephen, « Framing for conservation at the Tate gallery », *The Conservator*, 14 / 1, (1990), p. 44-52.

³⁶ CIATTI Marco, « Problemi di conservazione e di presentazione dei dipinti : le cornici », *OPD Restauero, Rivista dell'Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di restauro di Firenze*, 6 (1994), p.114-127.

³⁷ Chastel-Rousseau et Lopez, « S'unir « très doucement avec les couleurs sans les offenser » : redécouverte et restauration d'un cadre des collections du musée du Louvre », *op.cit.*

³⁸ The Frame Blog, [En ligne ; URL : <https://theframeblog.com/>].

Dans la revue *Conservation Journal* en 2005, Powell et Allen présentent un aperçu de la méthode employée pour traiter les cadres de peintures et de miroirs au Victoria and Albert Museum, affranchie des hiérarchies de matériaux ou de techniques, chaque artefact étant traité en appliquant les principes déontologiques, notamment de réversibilité et de lisibilité, ainsi que des mesures de conservation préventive spécifiques de façon à assurer la bonne fonction d'encadrement, comme la mise en place de vitres, de protections UV ou encore de caisson climatique³⁹. Un article est publié en 2009 dans la revue *Technè* afin de présenter l'important travail de conservation-restauration de cadres pour le musée de l'Orangerie⁴⁰. Une première série d'une vingtaine d'artefacts avait déjà été étudiée et traitée entre 1997 et 1999, puis l'étude a été poursuivie dans les années 2000 pour l'ouverture du musée en 2006. Les méthodes de restauration y sont décrites, adaptées à chaque cadre selon les besoins. Les méthodes sont toutefois similaires, peu importe la technique de mise en œuvre du cadre, qu'il soit fait en bois sculpté ou moulé en matériau de type « pâte ».

Sur les restaurations anciennes de cadres, quelques mentions sont faites dans des ouvrages consacrés aux collections de peintures et de mobilier en bois doré, comme dans les mémoires de recherche en histoire de l'art de l'École du Louvre de Barbet en 2008, Davrinche en 2009, Bonnard en 2010, et Phan en 2016.

D'une façon générale, on constate un manque d'informations techniques sur les cadres en composition et en plâtre, ainsi que sur leur restauration. Des travaux récents ont toutefois centré leur attention sur ces cadres. En 2016, une communication à Melbourne et un article publié notamment sur *The Frame Blog* ont présenté les travaux du restaurateur Mark Searle sur le traitement d'un cadre du XIX^e siècle en composition anglaise, faite de colle animale, de carbonate de calcium, d'huile de lin et de colophane⁴¹. Les interventions de restauration sont décrites comme « méthode traditionnelle flexible », employant les techniques et les matériaux similaires à la mise en œuvre originale, pour garantir une bonne compatibilité, mais également des matériaux contemporains, synthétiques, permettant de distinguer les parties restaurées.

Il y a également le travail de diplôme soutenu par Élise Lopez en 2016 au sujet de la conservation-restauration d'un cadre « Barbizon » du XIX^e siècle, pour le tableau *Le Passeur* de Corot, fait par assemblage d'ornements moulés en plâtre sur une structure en bois⁴². Le cadre a été étudié⁴³, analysé et restauré, en tâchant de lui redonner une cohésion structurelle et esthétique tout en limitant les interventions invasives et en pratiquant une restauration lisible. Des étapes de nettoyage, de retrait d'anciennes restaurations, de comblement et de restitution ainsi que de la retouche ont permis de redonner une première cohérence à ce cadre resté néanmoins très fragile.

³⁹ POWELL Christine, ALLEN Zoë, « Picture and mirror frames: Reflections on treatment past, present and future », *Conservation Journal*, 50 (2005), p.43-45.

⁴⁰ LAUWICK Béatrice et FÉVRIER Roland, « La restauration des cadres du musée de l'Orangerie », *Technè*, 29 (2009), p. 94-100.

⁴¹ SEARLE Mark, « A 19th century British compo frame: a flexibly traditional approach to conservation », *The Frame Blog*, (2016) [En ligne : 08 décembre 2021 ; URL: <https://theframeblog.com/2016/10/29/a-19th-british-century-compo-frame-a-flexibly-traditional-approach-to-conservation/>].

⁴² Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Etude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op.cit. ; Chastel-Rousseau et Lopez, « S'unir « très doucement avec les couleurs sans les offenser » : redécouverte et restauration d'un cadre des collections du musée du Louvre », op.cit.

⁴³ Voir la fiche de présentation de la mise en œuvre p. 50-51.

Les premiers intérêts portés au matériau plâtre concernent surtout le matériau d'un point de vue technique. Les considérations de conservation-restauration sont plus tardives. La typologie des cadres du XIX^e siècle n'est pas immédiatement mise en lien avec les corpus habituels d'artefacts en plâtre. Ceci peut s'expliquer par le fait que la nature chimique des ornements n'est généralement pas connue. Bien souvent, les cadres sont estimés être fabriqués en bois sculpté, apprêté et doré, ou en plâtre, alors qu'il s'agit plutôt d'un mélange type « composition », fait de carbonate de calcium et de colle.

Les deux typologies du corpus, statues moulées et cadres du XIX^e siècle, reflètent des développements d'intérêts similaires mais à des époques différentes. Les premières mentions des interventions de conservation-restauration des sculptures interviennent vers les années 1980 (archives C2RMF, premiers diplômes d'école). Ceci correspond également aux moments où la profession de la conservation-restauration est véritablement définie. Les pratiques évoluent. Dans les années 1990, on voit apparaître les premières publications traitant de méthodologies de conservation-restauration des collections de cadres. À la fin des années 1990 et au début des années 2000, les diplômes réalisés sur des artefacts moulés et les publications générales sur la conservation-restauration des deux typologies d'objets sont de plus en plus nombreux. Entre les années 2000 et 2010, d'autres publications voient le jour ainsi que des projets de recherches avec analyses et caractérisations. Ces dernières années, plusieurs études scientifiques visent à améliorer les connaissances du plâtre dans un but de conservation. Cette chronologie correspond bien au regain d'intérêt pour le matériau en général et pour ces collections en particulier.

Il semblerait qu'il n'existe pas d'étude générale synthétisant les différentes altérations du matériau, comme le glossaire des altérations de la pierre mis en œuvre par l'ICOM et l'ISCS en 2008⁴⁴, ou proposant des méthodologies de conservation-restauration. Jusqu'à maintenant les études semblent plutôt réalisées au cas-par-cas.

2. Pratiques générales en conservation-restauration

L'action de « réparer » un objet semble avoir été entreprise très tôt. Les premiers usages étaient très certainement ceux de réparer un simple objet fonctionnel pour prolonger son usage, et de façon tout à fait logique, selon les techniques et les matériaux de la mise en œuvre. Il n'est donc pas étonnant que ceci ait été appliqué à des objets culturels ou artistiques. Les pratiques dans la société occidentale⁴⁵ ont connu une véritable transformation avec l'émergence des textes de référence, l'étendue des réflexions et les échanges entre les différentes typologies et spécialités du patrimoine culturel.

⁴⁴ Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, ICOM-ISCS [En ligne ; URL : http://openarchive.icomos.org/id/eprint/434/1/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf.

⁴⁵ La démarche présentée ici n'est pas universelle, des pratiques variées ont été adoptées dans d'autres sociétés et cultures, avec leurs propres évolutions, sans être de moindre importance.

a. Évolution et méthodes actuelles

La pratique de la conservation-restauration actuelle hérite des prémices de théorisations du XIX^e siècle, appliquées aux monuments et aux sites, avec notamment l'opposition entre John Ruskin (1819-1900), pour qui une architecture préservée dans son état est plus authentique, et Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879), architecte et archéologue français, considéré comme « reconstruteur », suivie d'une synthèse des positions anglaise et française, réalisée par l'architecte italien Camillo Boito (1836-1914)⁴⁶. Au début du XX^e siècle, Aloïs Riegl met en place une méthode objective, encore considérée comme modèle de nos jours qui, par une grille de valeurs à attribuer à l'œuvre étudiée, doit servir à la réflexion et aux choix des traitements de conservation-restauration. Les valeurs correspondent aux caractéristiques essentielles et spécifiques qu'il est nécessaire de préserver pour respecter l'intégrité d'une œuvre ou d'un artefact patrimonial. Dans les années 1930, les textes fondateurs de Brandi, Philippot et Huygues ou encore la Charte d'Athènes⁴⁷, font émerger de nouvelles conceptions de la conservation-restauration et établissent les fondements d'une déontologie de la discipline. Entre les années 1960 et 1980, plusieurs textes fixent les principes déontologiques adaptés au patrimoine architectural⁴⁸ puis, plus généralement, à la conservation-restauration, ainsi que les impératifs de formations et de pratiques professionnelles et surtout la définition de la profession⁴⁹. Dans les années 1980, parallèlement au développement de la conservation préventive, les traitements de conservation-restauration sont de moins en moins interventionnistes et les travaux sont documentés par des fiches d'interventions ou des rapports qui intègrent les archives et les dossiers d'œuvre. Cette période voit également la revalorisation des éléments statuaires moulés en plâtre, désormais restaurés de façon déontologique, avec des recherches de traitements spécifiquement adaptés à la physico-chimie du matériau. Au cours des années 2000, la restauration des cadres est de plus en plus documentée et des questionnements sur les traitements émergent. En 2003, l'association professionnelle des conservateurs-restaurateurs européens E.C.C.O. publie une nouvelle définition de la profession de conservateur-restaurateur qui est toujours employée de nos jours. La différenciation et la précision des grands domaines de la conservation-restauration tels que la conservation préventive, curative et la restauration, sont poursuivies et la terminologie fixée lors du colloque de l'ICOM-CC en 2008 à New Delhi.

La patrimonialisation tardive des artefacts en plâtre, dans les années 1980 pour la statuaire, à partir des années 2000 pour les cadres, explique les différences de chronologies des traitements déontologiques mais exemplifie très bien le processus de transmission et d'échanges entre spécialités et typologies qui a façonné la discipline de la conservation-restauration. Toutefois, l'avenir de la profession et les possibilités, ou non, de conserver une déontologie commune malgré les approches très spécifiques des différentes spécialités sont interrogés.

⁴⁶ BERGEON Ségolène et BRUNEL Georges, *La restauration des œuvres d'art : vade-mecum en quelques mots*, Paris, Hermann, 2014.

⁴⁷ « La Charte d'Athènes pour la Restauration des Monuments Historiques - 1931 - International Council on Monuments and Sites » [En ligne : 20 octobre 2019 ; URL : <https://www.icomos.org/fr/chartes-et-normes/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/425-la-charte-dathenes-pour-la-restauration-des-monuments-historiques-1931>].

⁴⁸ Charte de Venise (1964), voir GOVEN François (éd.), *Monumental. La charte de Venise*, 2 (2021).

⁴⁹ Textes de l'E.C.C.O. [En ligne ; URL : <https://www.ecco-eu.org/home/ecco-documents/>] et de l'ICOM France [En ligne ; URL : <https://www.icom-musees.fr/index.php/toutes-les-ressources>].

Selon Pierre Leveau, un fil directeur général est nécessaire à l'unité de la profession et des professionnel·les mais cela pourrait restreindre les possibilités d'extension et d'approfondissement de la discipline, précisant « [qu'il] faut espérer que les théories puissent s'unifier sans uniformiser leurs objets⁵⁰ ». En effet, chaque typologie d'artefacts, chaque spécialité ou chaque matériau possède ses critères propres qui ne doivent pas être négligés ou effacés. Il convient plutôt de procéder à l'approfondissement des connaissances sur les artefacts et les méthodes, en utilisant un langage commun, pour mieux répondre aux spécificités de chaque artefact. La recherche spécialisée dans le patrimoine est enrichie depuis plusieurs années avec un grand nombre de thématiques variées, précises et multidisciplinaires dans le but d'améliorer les connaissances sur les matériaux des œuvres d'art. Plus récemment, des travaux aux problématiques conservatoires ont été engagés et permettent à des professionnel·les de la conservation-restauration de mener à bien des recherches dédiées à leurs pratiques et leurs métiers.

b. Les praticiens des deux spécialités

Statuaire

Jusque dans les années 1980, la statuaire en plâtre était traitée par des mouleurs et des techniciens du plâtre. Déjà évoqué par Bourdon en 1986⁵¹, et désormais préconisé par la loi musée de 2002, les œuvres en plâtre inventoriées et conservées dans des musées doivent être restaurées par des membres de la conservation-restauration, diplômés et habilités à travailler sur les collections des musées de France. Ainsi, les artefacts moulés des collections muséales sont restaurés par des professionnel·les indépendant·es, de la spécialité Sculpture et diplômé·es de l'Institut national du patrimoine, de l'école supérieure d'art et de design de Tours et de l'école supérieure d'art d'Avignon ou de l'Université Paris I Panthéon-Sorbonne.

Cadres

Les professionnel·les sont généralement des praticien·nes, des artisan·es ou des maîtres d'art, formé·es à la fabrication de cadres et d'objets en bois doré, et spécialisé·es en conservation-restauration, qui maîtrisent un véritable savoir-faire technique des pratiques anciennes et actuelles. Certains ateliers travaillent essentiellement pour les musées tels que les ateliers « arts décoratifs » (comprenant une spécialité « mobilier » et une spécialité « dorure ») du Centre de recherche et de restauration des musées de France, à Paris et à Versailles, l'atelier Encadrement-dorure du musée du Louvre, ainsi que l'atelier Dorure du Château de Versailles. Des professionnel·les indépendant·es, dont quelques diplômé·es de la conservation-restauration, travaillent également pour les musées.

⁵⁰ Leveau, « Les dilemmes philosophiques de la conservation-restauration », *op.cit.*

⁵¹ « La restauration d'un plâtre suppose des questionnements déontologiques, particulièrement dans le cas des moulages de la Cour Vitrée. En effet, l'ancienneté de cette collection suppose que l'on s'interroge sur la manière dont aujourd'hui on doit concevoir cette distance chronologique. » dans Bourdon, « Le moulage aujourd'hui », *op.cit.*, p. 66.

c. Documentation des interventions

La pratique de la documentation a été instaurée récemment dans la profession, aux alentours des années 1980, afin de conserver une trace des méthodes et matériaux utilisés et afin de préciser la démarche conservatoire, dans un but de transmission des données et des informations. Ceci a pour avantage de confirmer les interventions antérieures lorsqu'une œuvre est de nouveau constatée et de préciser ce qui a été fait et comment. Actuellement, la pratique est « réglementée » pour les sculptures et pour la collection de la Gypsothèque. Ainsi la remise de rapports d'études et de restauration (fiches, dossiers) est obligatoire. Les plus anciens dossiers concernant les œuvres en plâtre, consultables sur la base de données Eros (C2RMF), sont datés de la fin des années 1980. La prestation de documentation est prévue au moment de la commande (marché, devis). Pour les cadres, les pratiques sont moins réglementées.

Cette différence de traitement s'explique principalement par l'application de la loi musée de 2002⁵², qui impose la documentation de tous travaux sur des artefacts patrimoniaux, à condition que ceux-ci soient soumis à cette même loi. Les cadres, non inventoriés, ne bénéficient donc pas de cette application. L'étape de documentation requiert du temps. Dans certaines conditions (chantiers importants, durée limitée, artefacts sans dossier et considérés comme « mineurs ») il est parfois impossible, ou estimé non nécessaire, de documenter les interventions. Cette situation pourrait toutefois changer rapidement, lorsque le statut des cadres sera établi et clarifié, la documentation étant déjà une pratique habituelle pour une partie des professionnel·les. Les intervenant·es indépendant·es semblent documenter leurs travaux, de la même façon que pour la gypsothèque, la démarche est certainement requise et mentionnée lors de la commande des travaux. Les professionnel·les de l'atelier du C2RMF réalisent eux aussi des fiches ou des dossiers d'interventions. Ces documents sont consultables sur la base de données du C2RMF. Les interventions importantes effectuées par l'atelier du Louvre sont documentées par une couverture photographique et l'ajout d'informations dans un répertoire du service de documentation du département des peintures est en cours d'actualisation (base de données, dossiers d'œuvre...).

3. Altérations et problématiques du plâtre

Afin de mieux appréhender le propos ultérieur sur les interventions de comblement, il convient de faire le point sur les altérations couramment observées sur les artefacts en plâtre et les problématiques spécifiques. Le premier constat qui peut être fait est que les altérations des divers artefacts en plâtre sont très similaires, comprenant des altérations de structure ou du matériau constitutif de support, et des altérations de surface, des couches de revêtement ou de l'épiderme du matériau constitutif. Les artefacts en plâtre présentent bien souvent des altérations du matériau même, de la structure de l'œuvre ou encore de la surface. Elles sont liées d'une part à la nature fragile du matériau, mais aussi à une certaine incompatibilité avec des matériaux utilisés en renforts comme des armatures ferreuses, en bois ou en fibres végétales ou encore à un manque de soin et de mesures conservatoires adaptées.

⁵² LOI n° 2002-5 du 4 janvier 2002 relative aux musées de France

[En ligne ; URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000769536>]

a. Structure

Diverses altérations du matériau ou du substrat original peuvent être constatées sur les artefacts en plâtre, comportant des degrés de dangerosité variés. Dans de nombreux cas, ces altérations conduisent à la perte de matière, plus ou moins importante, résultant donc en une zone lacunaire qu'il peut être nécessaire de combler.

En raison de la structure cristalline du matériau, des ouvertures peuvent se produire, indiquées alors par des fissures ou des fentes. Ceci peut ensuite provoquer une mobilité, un déplaçage ou encore un soulèvement de matière. Les zones déformées présentent dans certains cas des déformations, soit par la déformation du matériau de renfort inclus dans le substrat en plâtre, soit par l'action de l'eau qui tend à modifier les propriétés physico-chimiques du plâtre. En présence d'éléments de renfort, comme des boisages, des armatures métalliques, fibres végétales, il est souvent constaté des déplaçages aux interfaces de contact : une dissociation ou une séparation se produit en raison des différences de comportements mécaniques de ces matériaux, et notamment des différences de dilatation, gonflement, retrait, lors de changements climatiques. Ces altérations peuvent ensuite résulter en une cassure puis en la perte de l'élément désolidarisé, résultant alors en une zone lacunaire ou manquante dont les formes, dimensions et localisations peuvent être variées.

Les lacunes des artefacts en plâtre concernent le plus souvent les zones fragiles, saillantes, de faibles épaisseurs ou comportant des reliefs contrastés. Les zones de préhension ou de pose sont également des zones à risques. Pour les cadres, les pertes de matières sont bien souvent des lacunes d'ornements ou de morceaux de moulures et des manques d'éléments structurels types traverses, éléments de fixation, clefs... Pour la statuaire, on peut constater des lacunes d'éléments saillants (tels que le nez, les mains ou les bras, des portions de jambes ou de drapés, des éléments de décor) ainsi que des manques d'éléments porteurs tels que les socles, les terrasses, les assises, les armatures ou encore le matériau dans les zones non visibles (intérieurs, revers).



Figure 36 : lacune et fissure sur la terrasse et les chevilles d'une statue de la gypsothèque (Gy 0203)
© Musée du Louvre, J. Robin Dupire.



Figure 37 : lacunes et fissures des ornements d'un cadre (réserve, cartel mentionnant « Le C^{te} de Forbin »)
© Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

b. Surface

La surface des artefacts, qui correspond donc à la partie visible comme la couche d'impression des statues ou encore les différents revêtements décoratifs des ornements de cadre, est également bien souvent altérée de multiples façons. Certains types d'altérations, comme des changements chromatiques, des taches, des dépôts notamment de salissures et de poussière, décrits comme encrassement et empoussièrément dans les documents de conservation-restauration, sont gênants pour certains car ils perturbent les aspects esthétiques et la bonne appréciation de l'artefact, mais aussi, pour les aspects conservatoires à long terme. La poussière est ainsi fréquemment citée comme cause de développement de micro-organismes. Néanmoins, ces altérations ne créent pas de lacune et ne nécessitent donc pas d'intervention de comblement. En revanche, d'autres altérations de la surface peuvent être incluses dans les préoccupations de ce sujet, avec notamment des pertes de matière surfacique, les griffures, abrasions, érosions ou encore les soulèvements et les écaillages. Ces altérations résultent bien souvent d'accidents et de conditions de conservation inadaptées. Dans certains cas et selon les critères de restauration, il peut être nécessaire de procéder à des comblements de ces altérations par un apport de matière, de façon à les masquer et à préserver ainsi la bonne lecture et l'esthétique de l'artefact.



**Figure 38 : salissures et griffures (torse) d'une statue de la gypsothèque (Gy 0191)
© Musée du Louvre,
J. Robin Dupire.**



**Figure 39 : salissures, lacune de dorure et des couches de préparation, retouches à la bronzine (?), et taches sur le cadre du tableau
Les pyrénées de Narcisse Diaz de la Pena, R.F. 180
© Musée du Louvre,
J. Robin Dupire.**

c. Problématiques

Les artefacts en plâtre présentent des problématiques de conservation-restauration variées, nécessaires à évaluer lors de la réalisation des constats d'état puis lors des traitements. Ainsi, le plâtre et les autres matériaux constitutifs des collections étudiées ont des sensibilités variables en fonction des conditions de conservation (température, taux d'humidité relative et lumière) et des conditions d'exposition et de présentation (accrochage, dispositifs de maintien ou de suspension).

Les matériaux étudiés sont sensibles à l'eau, bien que leur solubilité soit considérée comme faible par rapport à d'autres matériaux. Un contact prolongé avec un fort taux d'humidité tend à « ouvrir » la porosité, à la rendre plus visible sur l'épiderme du plâtre et occasionne des phénomènes d'expansion. Un contact prolongé avec l'eau liquide provoque une érosion de la matière. À l'inverse, en cas de baisse trop importante du taux d'humidité, des sels solubles pouvant être présents dans le substrat risquent de cristalliser au sein du matériau, l'affaiblissant, lui faisant perdre sa structure granulaire cohésive, et entraînant des phénomènes de désagrégation⁵³.

La présence d'autres matériaux au sein du substrat en plâtre, comme des armatures en métal ou en bois ou des renforts en fibres végétales telles que de la filasse ou des toiles tramées, impliquent également des précautions spécifiques. Il s'agit là encore de limiter l'apport d'eau pour éviter d'occasionner des mouvements différentiels entre les matériaux lors des phases de dilatation et de dessiccation, des accentuations de la corrosion des éléments métalliques (souvent des alliages ferreux), ou encore pour ne pas provoquer la solubilisation et la migration des tanins présents dans les éléments en fibres végétales, qui ont tendance à tacher le matériau d'auréoles ou de plages colorées, difficiles à atténuer ou à retirer intégralement. Déjà évoquées, les altérations structurelles liées à la présence d'armatures ou de renforts sont des problématiques importantes qui conditionnent l'intégrité matérielle d'un artefact.

La nature du matériau et son réseau cristallin poreux, traité dans le chapitre II, implique que la surface a une forte propension à retenir les salissures et les dépôts divers. Ainsi, les surfaces des artefacts sont bien souvent encrassées ou empoussiérées, et des dispositifs spécifiques sont nécessaires pour désincruster la microporosité du matériau. Les surfaces polychromées, recouvertes de dorure pour les cadres par exemple, sont plutôt électrostatiques et ont également tendance à attirer les poussières qui peuvent alors se tasser dans les creux des ornements ou dans les altérations de surface. Là encore, des interventions spécifiques pour ce type de problématique sont nécessaires.

⁵³ Le dessalement du plâtre n'étant pas une pratique très étudiée ni même attestée, les traitements de conservation-restauration doivent alors prendre ce paramètre en compte et il est bien souvent nécessaire de recourir à des solutions d'interventions spécifiques à cette problématique, comme l'utilisation de méthodes non aqueuses, de façon à limiter la création de nouveaux cycles de solubilisation et cristallisation des sels présents.

REMARQUES

Chaque typologie d'artefact dans le milieu de l'héritage culturel présente ses caractéristiques techniques et ses spécificités, avec des altérations et des problématiques particulières. Il est ainsi nécessaire de comprendre ces caractéristiques et de réfléchir à des solutions de traitement permettant de répondre aux besoins avec justesse. Les artefacts en plâtre ne font pas exception. Bien que leur « résistance » aux altérations soit relativement élevée, par rapport à d'autres matériaux dans les mêmes conditions, il est impératif de procéder à des traitements véritablement adaptés, prenant en compte tous les critères inhérents aux matériaux, ainsi que les problématiques spécifiques à chaque situation, collection ou artefact. Bien souvent, des pertes de matière sont constatées et nécessitent un traitement, de façon à stabiliser la structure et le matériau et afin d'améliorer la lisibilité et les aspects esthétiques.

4. Traiter les pertes de matière

a. Pertes de matière : lacune et manque

Le problème de la perte de matière fait partie des interrogations des professionnel·les. Quel(s) terme(s) attribuer ? Quelles sont les implications ? Observe-t-on des différences selon les spécialités ou les typologies d'artefact ? Et, après sa définition et sa compréhension, comment la traiter ?

La définition des termes et du vocabulaire de la conservation-restauration permet de préciser les objectifs de la profession et des interventions⁵⁴, avec une meilleure compréhension, une adaptation des traitements et la recherche d'une objectivité technique encore plus aboutie. Les définitions adaptées à l'altération ciblée dans cette recherche peuvent donc être évaluées. Le terme « lacune », souvent employé pour parler des pertes de matière, est défini pour les artefacts présentant des couches picturales, tel qu'une « perte locale de la matière du bien culturel qui entraîne l'interruption de l'image et laisse une marge d'interprétation lors de la réception de l'œuvre⁵⁵ ». Il est précisé que la lacune ne doit pas être confondue avec le terme « manque », « manque » étant plutôt une perte de matière non située sur une zone dite esthétique (par exemple au revers) ou bien sur une surface étendue, comme en peinture murale⁵⁶. Les définitions proposées sont très argumentées et compréhensibles mais adaptées aux œuvres en deux dimensions et plus particulièrement aux peintures et aux arts graphiques. Qu'en est-il dans le domaine des œuvres ou artefacts en relief ?

Au cours de ma formation dans l'atelier de restauration des sculptures à l'INP, les termes « lacune » et « manque » ont également été employés, en suivant une distinction similaire. Ainsi, le terme « lacune » semble plus souvent employé pour identifier une perte formelle, par exemple un élément de visage, une main ou un ornement. Alors que le terme « manque » désigne plutôt une perte de matière non formelle, un élément structurel nécessaire pour la cohésion de l'œuvre, sans aspect esthétique mais qui peut être visible.

⁵⁴ Bergeon et Brunel, *La restauration des œuvres d'art : vade-mecum en quelques mots*, op.cit.

⁵⁵ *Ibid.*

⁵⁶ *Ibid.*

Dans le cas des deux types d'artefacts étudiés, la perte de matière constitutive crée une instabilité structurelle, qu'elle soit de petite dimension ou de plus grande importance (morceau figuratif ou ornemental conséquent), sans inclure ici les lacunes des revêtements de surface (couches polychromées, dorure...). Cette altération, bien souvent non isolée et associée à des réseaux de fissures par exemple, rend l'artefact instable puisque l'ensemble n'a plus la cohésion originale qu'il avait, avec par exemple une mauvaise répartition des contraintes ou un appui manquant. La conservation à long terme est limitée dans la plupart des cas.

Ces pertes de matière induisent des transformations visuelles et donc un changement dans la perception. Pour les cadres, par exemple, une perte de matière correspond à un « blanc », à l'apparition du bois ou des couches préparatoires. Elle est donc bien visible dans une zone dorée. Selon la dimension et la profondeur, elle peut aussi apparaître plus sombre que la couleur environnante. En statuaire en plâtre, la couleur blanche et ses nuances sont majoritaires. Ainsi, de la même façon que pour certains cadres, une perte de matière apparaît plus sombre. Elle crée une zone noire qui contraste fortement avec les teintes claires du plâtre alentour. Une perte de matière provoque donc une impression de déséquilibre visuel, gêne le regard et l'appréciation esthétique de l'artefact⁵⁷. Au-delà des contrastes inesthétiques et sans préoccupation de stabilité structurelle, il faut rappeler qu'une lacune ne permet pas la lecture de l'artefact comme un tout. C'est cette perception de l'artefact par l'observateur qui conditionne en partie les choix du traitement. Le degré d'intervention, de la non-intervention à la restitution à l'identique, ainsi que les choix techniques, offrent de multiples possibilités de conservation-restauration, qui doivent être opérées en respectant la démarche déontologique⁵⁸.

« Enfin, le moulage étant la reproduction mécanique d'une œuvre d'art, la possibilité de combler ou non les lacunes doit nécessairement être pesée. Nous avons suffisamment insisté pour mettre en évidence le statut d'objet archéologique qu'avait le moulage dans le cas de la Cour Vitrée ; or, toute lacune, à notre sens, doit être évaluée à l'aune de la signification qu'elle convoque, de la consistance historique qu'elle suppose, et son possible comblement débattu en regard de son apport pour le moulage et de l'état de nos connaissances sur l'œuvre originelle. C'est en dernier lieu la perception qu'on a de tel ou tel moulage qui est débattue : est-ce que sa consistance patrimoniale provient de son unicité ou de sa valeur de substitut ?⁵⁹ ». Cette citation de Crocquevieille confirme l'importance de procéder à l'analyse des valeurs en fonction du statut de l'artefact afin de définir le plan de traitements le plus adapté et respectueux, une fois les considérations structurelles évaluées.

⁵⁷ « Les lacunes peuvent rendre un sujet illisible, insupportable, incompréhensible, inesthétique » BUYLE Marjan (Éd.), *La problématique des lacunes en conservation-restauration*, Bruxelles, Vlaams instituut voor het onroerend erfgoed, (Postprints des journées d'étude internationales APROA-BRK) 2007, p.4.

⁵⁸ « La perception des lacunes varie pour chaque observateur et dépend de nombreux éléments : est-il religieux, historien d'art, restaurateur, perfectionniste, connaisseur dans le domaine de l'art... La réintégration des lacunes peut soulever de nombreuses critiques : elle fait paraître l'original plus complet qu'il ne l'est en réalité ; elle dissimule des usures, des traces d'usage ou de vandalisme, des imperfections, des dégâts. La main du restaurateur n'est pas celle de l'artiste. », *ibid.*

⁵⁹ Crocquevieille, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitrée de l'École des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, op.cit.

b. Traitement : intervention de comblement

Le terme « comblement » est défini comme un « apport sur un objet d'un matériau destiné à emplir le volume d'une lacune⁶⁰ ». Il a remplacé le terme « bouchage », plus employé dans les années 1980, qui a pris depuis un sens péjoratif. Selon Bergeon-Langle et Brunel, ce terme ne devrait pas servir à désigner le « complément d'une figure » même s'il convient parfaitement aux objets en trois dimensions où l'on définit un comblement « en retrait », c'est-à-dire à un niveau inférieur à celui de l'original dans le cas d'une intervention visible, un comblement « à niveau » ou encore un comblement « débordant », qui se pratiquait autrefois lorsque le but était de « faire passer » une lacune par une intervention visible ; la texture du matériau de comblement, proche ou différente de la texture originale, peut permettre de déterminer un degré de réintégration plus ou moins élevé. Le mot comblement est aussi utilisé dans le cas du textile, des papiers et du parchemin où l'œuvre est peu stratifiée. En peinture murale et en peinture de chevalet le mot comblement, abstrait, est en général remplacé par « mortier de réintégration » et « mastic de réintégration » qui désignent les matériaux avec lesquels se fait le comblement⁶¹. Dans la publication *La problématique des lacunes en conservation-restauration*⁶², une différence de vocabulaire et de terminologie entre les différentes spécialités est notable. La communication de Bergeon-Langle⁶³ est très précise et argumentée mais adaptée à la peinture et aux arts graphiques, comme indiqué dans le titre de la communication. Un peu plus loin, dans la communication de Serck-Dewaide⁶⁴, spécialisée en conservation-restauration de sculpture polychromée, l'emploi d'autres termes comme « remplacement » est utilisé pour mentionner les éléments non originaux mis pour combler les pertes structurelles. À la variété des altérations et des subtilités de chaque artefact doivent répondre les interventions de conservation-restauration⁶⁵. Serck-Dewaide conclut en ce sens au sujet de la retouche, mais le discours peut être étendu aux interventions de comblement : « En guise de conclusion, il convient d'insister que les retouches ne doivent pas se faire au « feeling », mais au contraire être réfléchies et programmées en fonction du but à atteindre et selon un processus de travail défini, testé et justifié. Retoucher au minimum, avec une grande sensibilité et un grand respect des matériaux originaux à valoriser, à l'aide des techniques les plus réversibles possibles, sera le meilleur choix dans l'art de la conservation future⁶⁶ ». Ce même discours est appuyé par Jeghers au sujet des techniques de retouche en dorure : « Les techniques de retouches et les degrés d'interventions sont nombreux et il appartient au restaurateur d'en prendre connaissance afin de faire un choix judicieux en fonction de l'œuvre à traiter⁶⁷ ». Lorsqu'un manque ou une lacune sont constatés, les restaurateur·rice·s évaluent l'impact sur l'intégrité structurelle et esthétique et procèdent à des comblements, partiels ou entiers⁶⁸. Le choix des matériaux de comblement n'est ni évident, ni anodin.

⁶⁰ Bergeon et Brunel, *La restauration des oeuvres d'art : vade-mecum en quelques mots*, *op.cit.*

⁶¹ *Ibid.*

⁶² Buyle, *La problématique des lacunes en conservation-restauration*, *op.cit.*

⁶³ Bergeon-Langle, dans Buyle, *La problématique des lacunes en conservation-restauration*, *op.cit.*, p. 5-16.

⁶⁴ Serck-Dewaide, dans Buyle, *La problématique des lacunes en conservation-restauration*, *op.cit.*, p. 36-43.

⁶⁵ « Ces exemples rapidement évoqués de lacunes formelles, reconstituées ou non, montrent la diversité des attitudes, des méthodes et des matériaux utilisables pour réaliser ces travaux de restauration en sculpture », *ibid.*, p. 38.

⁶⁶ *Ibid.*, p. 42.

⁶⁷ Jeghers, dans Buyle, *La problématique des lacunes en conservation-restauration*, *op.cit.*, p. 44.

⁶⁸ D'un point de vue esthétique, plusieurs types de comblements peuvent être choisis. Ceci est l'affaire de discussions entre le commanditaire et le conservateur-restaurateur.

Chaque artefact présente des altérations et des problématiques qui lui sont propres : il existe autant de contextes différents de comblements qu'il existe d'œuvres. Cela implique des conditions de chantiers spécifiques et des décisions de traitements adaptées. Ainsi, les conservateur-rices-restaurateur-rices ont développé et affiné les formulations au fil du temps pour composer leur gamme de matériaux. Les premiers matériaux utilisés étaient identiques aux matériaux originaux. Le critère de lisibilité des restaurations a modifié considérablement la pratique. Des matériaux différents chimiquement mais aux propriétés physico-chimiques proches de celles de l'original, comme le carbonate de calcium, sont employés, ainsi que des formulations combinant matériau original et additif (charge, pigment, adhésif) ou encore à des matériaux du commerce. Ces divers matériaux sont connus et maîtrisés par les professionnel-le-s. Si le plâtre est bien étudié dans le domaine de l'ingénierie, où ses propriétés particulières permettent une bonne exploitation du matériau (résistance au feu, isolation...), il existe peu d'études spécifiques sur le matériau et encore moins sur le matériau seul ou en formulation comme produit de restauration. Les autres formulations de comblement, sans plâtre, souffrent également d'un manque d'études et de recherches. Les professionnel-le-s appuient leurs connaissances sur leur approche expérimentale, sur des tests menés en ateliers et sur des rapprochements avec les données théoriques et bibliographiques des autres spécialités. Ils peuvent ainsi déjà estimer les formulations selon la composition, l'inertie et la compatibilité avec l'original, la dureté, la porosité, l'aspect esthétique après séchage, le bon vieillissement dans le temps...

c. Méthodes, approche théorique, mise en œuvre des matériaux de comblement

Les matériaux, originaux et de comblements, peuvent être employés selon différents états, comme décrits précédemment en fonction des techniques employées de moulage à l'état fluide ou de sculpture à l'état solide.

Matériaux à l'état fluide

Des tendances générales sont dégagées et différenciées ici selon leur comportement rhéologique et leurs textures : liquide / fluide et pâteuse / dense. La texture fluide permet la coulée dans un moule, avec une répartition facile dans un support comportant des anfractuosités, comme les moules pour la statuaire ou pour les ornements des cadres. Cela permet essentiellement de fabriquer des pièces de comblement à part, qui sont ensuite rapportées sur l'artefact. La texture pâteuse doit avoir une tenue suffisante sur une spatule et permet plutôt un travail de modelage du matériau à l'état frais, mis en place directement sur l'artefact. Elle doit ainsi « rester en place » et ne pas s'écouler avant la prise. Une troisième texture intermédiaire peut être envisagée, qui balance fluidité et viscosité, donc plus polyvalente. Elle peut être employée dans des zones aux reliefs difficiles, où la nécessité d'avoir un matériau fini relativement dense, dur et plus résistant, s'équilibre avec l'écoulement.

Après la prise, à l'état solide

L'état solide du matériau correspond à l'état après sa prise ou son séchage, et à l'interaction avec le matériau original de l'œuvre sur le long terme. Le matériau est mis en œuvre directement sur l'original et a séché ou durci, ou bien il a été façonné à part et rapporté par collage une fois solidifié⁶⁹. Les caractéristiques à l'état solide sont entre autres : la dureté, la porosité (lien direct avec la résistance mécanique et avec la masse), la résistance mécanique (à la compression et à la flexion), l'élasticité.

Ces caractéristiques ont des valeurs différentes selon les modalités de préparation et selon les formulations. Il suffit de faire varier la proportion d'eau de gâchage avec le plâtre pour constater une influence sur les propriétés du matériau. En théorie, un gâchage contenant beaucoup d'eau augmente fortement la porosité. Ceci implique donc une baisse des valeurs de résistance mécanique et de la dureté. Lorsqu'un additif est apporté au mélange, par exemple un adhésif, la résistance mécanique et la dureté augmentent, la porosité baisse. Ces propriétés doivent être évaluées et comparées d'une formulation à l'autre afin de proposer des valeurs précises, adaptées aux diverses conditions de comblement rencontrées par les professionnel·les.

Les deux corpus présentent des caractéristiques similaires. Certains aspects techniques sont communs et il semble intéressant de mettre les deux sujets en comparaison. Tout d'abord, il s'agit d'artefacts en relief et en volume, en trois dimensions, jusqu'à la ronde-bosse dans certains cas. Ensuite, les artefacts sont faits du même matériau, utilisé pur ou avec des additifs, de fabrication plus ou moins artisanale, pouvant comporter plus ou moins d'impuretés. Les techniques de mise en œuvre sont aussi similaires. Dans les deux cas, la technique principale utilisée est celle du moulage, à creux perdus et à bon creux, ou moules à pièces, en sculpture, et à bons creux monocoque pour les ornements des cadres. Des ajouts de matières fraîches, liquides ou en pâte sont également possibles pour les deux typologies d'œuvres.

L'évaluation des propriétés à l'état fluide et à l'état solide permet d'avoir une vision très générale sur les matériaux et leurs usages, depuis les étapes de mise en œuvre jusqu'à la mise en place et le vieillissement du matériau à long terme⁷⁰. Pour rappel, les matériaux de restauration doivent toujours avoir des propriétés mécaniques inférieures aux originaux, être compatibles, inertes, réversibles ou re-traitables. Ainsi, en cas de dommage, le matériau de restauration rompt avant le matériau original. La rupture se produit dans le matériau de restauration, et non pas dans le matériau original ou à l'interface des deux.

Une synthèse des critères et des textures adaptées est présentée dans le tableau 1.

⁶⁹ Cas spécial des cadres en pâte sur lesquels des pièces peuvent être coulées ou pressées à part, puis ajustées sur l'artefact avant la prise complète quand le matériau est entre l'état frais et l'état durci, ce qui permet de l'adapter aux profils et au relief du support.

⁷⁰ Le vieillissement s'entend ici comme la bonne adéquation et la compatibilité des matériaux originaux et de restauration. Une étude de vieillissement accéléré serait tout à fait complémentaire, afin de garantir la stabilité des matériaux dans le temps, mais elle nécessite des dispositifs et un planning qui ne rentrent pas dans le cadre de notre recherche.

Problématiques		Critères techniques et indications	Type rhéologique
But	Structurel	Matériau à résistance égale à l'original ou légèrement inférieure	Texture pâteuse préférable
	Esthétique	Sans critère de résistance spécifique	Texture pâteuse à texture fluide
Dimensions à combler	Petites à moyennes	Bonne tenue pour application à la spatule	Texture pâteuse
	Moyennes à grandes	Bonne tenue pour application à la spatule / matériau coulable pour réaliser une grande pièce	Texture pâteuse à texture fluide
Nature du manque et localisation	Élément figuratif visible	Facilité d'application et aspects esthétiques similaires à l'original	Texture pâteuse à texture fluide (moulage puis collage)
	Support, renfort, non visible	Commodité de mise en œuvre, résistance suffisante, bonne tenue modelable	Texture pâteuse
Zones lacunaires altérées (ex. pulvérulence, déplaquages, fissures...)		Matériau inerte, léger (porosité élevée), peu d'accroche,	Texture fluide à viscosité moyenne (matériau plus poreux, moins lourd)
Présence de matériaux sensibles à l'eau (filasse, armatures en bois ou en métal)		Matériau à formulation non aqueuse Pièce mise en œuvre à part et rapportée par collage après séchage	Texture pâteuse ou fluide si pièce coulée et rapportée
Finition spécifique (selon la demande du commanditaire et le projet scientifique) /	Illusionniste	Reproduction très précise (moulage), facilité à être retravaillé ou modelé	Texture fluide (moulage puis collage) ou texture pâteuse
	Minimaliste	Facilité à l'application et aux finitions	Texture pâteuse
Conditions spécifiques d'interventions (durée du chantier, maniabilité et position de l'artefact)		Matériau avec une tenue très cohésive pour travailler à la spatule sur un plan de cisaillement vertical ou matériau adapté à la coulée pour un travail sur un plan horizontal.	Texture pâteuse à texture fluide

Tableau 1 : synthèse des types rhéologiques selon différentes problématiques et leurs critères techniques.

III. Interventions de comblement : étude des sources et des collections

Afin de poursuivre et d'alimenter nos travaux de recherche, les méthodes employées par les professionnel·les ont été étudiées. Des prospections en salles et ou en réserve, suivant une méthodologie inspirée des chantiers dits « de collection », ont pu être effectuées et fournir des informations sur le traitement des artefacts. Ces informations ont été complétées par une recherche bibliographique ciblée, la consultation de dossiers de restauration et de fiches d'intervention, ainsi que par des échanges et la diffusion d'une enquête auprès des professionnel·les. Ces sources complémentaires permettent dès lors de dégager de grandes tendances techniques et matérielles.

1. Étude des sources

a. Références bibliographiques sur les pratiques de comblement du plâtre

Les pratiques de comblement sur les œuvres en plâtre sont documentées de la même façon que les autres traitements, restitués dans les rapports ou les fiches d'interventions, et renseignant les méthodes et les matériaux. Ces documents sont donc des sources importantes pour mieux connaître les usages depuis la fin des années 1980. Toutefois, la documentation « ancienne », antérieure ou contemporaines aux années 1980 à 2000, n'est pas dense et les informations sont relativement rares, la quantité de restauration d'artefacts en plâtre étant plus restreinte qu'actuellement.

Le mémoire de Biesel et Cascio⁷¹ est un outil précieux qui permet de constater les interrogations et les problématiques traitées dès le début des années 1980. Le sujet portait sur la recherche d'un matériau de comblement d'une sculpture en plâtre dont les lacunes étaient causées par l'oxydation des armatures métalliques. Différents matériaux ont été envisagés, comprenant pour les liants des substances naturelles de type cérides, protides, ou terpènes, des liants minéraux, des dérivés celluloseux, des dérivés vinyliques, des produits siliconés, des résines époxydes, ainsi que des résines polyesters. Les charges retenues, de couleur blanche, comprenaient du carbonate de calcium (ou craie), du carbonate de calcium et de magnésium (appelé aussi dolomie), du sulfate de calcium et du dioxyde de titane ou blanc de titane. Les critères déontologiques, comme les notions de compatibilités physiques et chimiques, de durée dans le temps, d'innocuité, et de réversibilité, ont permis l'évaluation des propriétés des matériaux et ont guidé la sélection. Les paramètres physico-chimiques ont été évalués, tels que la viscosité (élevée, elle permet d'éviter une trop grande pénétration du matériau de comblement dans la porosité du substrat original et favorise donc la réversibilité du comblement), la valeur du pH, le coefficient de dilatation (qui est considéré ici comme équivalent à celui du substrat

⁷¹ Biesel et Cascio, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, op.cit.

original afin de présenter les mêmes caractéristiques mécaniques), les températures (ramollissement, transition vitreuse, fusion), la mouillabilité et les tensions de surface. Le mélange final suivant a été retenu : de la cire d'abeille, additionnée de Paraloid® B67 à 10 %, chargé de blanc de titane. Ce travail considérable et dédié à un type d'intervention spécifique est pionnier et constitue un jalon pour la restauration de la statuaire en plâtre.

Plus tard, différents travaux de diplôme mentionnent des interventions de comblements avec des essais de mise en œuvre de produits adaptés. Les comblements effectués par Céline Klarer⁷² ont été faits en utilisant du Modostuc®, décrit comme mastic fait de carbonate de calcium et d'acétate de polyvinyle, facilement réversible, d'usage aisé et d'apparence satisfaisante en comparaison au plâtre. Un autre matériau, décrit dans la partie sur les consolidations et utilisé entre le bois et le plâtre, a toutefois été mis en œuvre à partir d'adhésif d'acétate de polyvinyle (Pattex®) chargé de carbonate de calcium. En 2001, Marine Nicolas⁷³, travaillant à la restauration de l'*Ébauche Bacchante* du musée Bourdelle, avec la problématique spécifique de matériau brûlé, a réalisé des comblements avec un mélange de Pioloform® BM18 (polybutyral de vinyle) en solution dans l'éthanol et chargé de carbonate de calcium. Lucie Pieri en 2010 a procédé à des réintégrations et des comblements avec du mastic du commerce, le Polyfilla® *stucco per interni* constitué de sulfate de calcium et de liant polyvinylique. Elle précise dans son travail de diplôme que des comblements, du début du XX^e siècle, et d'autres plus récents, ont probablement été faits en plâtre.

Quelques dossiers d'œuvres archivés au C2RMF renseignent les méthodes et les matériaux utilisés pour les interventions de comblement de statuaire en plâtre, les plus anciens étant datés de 1974, 1978, 1984, puis des années 2000. Ces dossiers sont succincts mais ils précisent la technique de mise en œuvre, l'état de conservation avant traitement et les interventions. Les comblements les plus anciens renseignés sont faits avec du plâtre (dossiers C2RMF 62082 de 1974, FZ26356 document 11378 daté de 2002 mentionnant des « bouchages au plâtre fin » d'une intervention antérieure, qui correspond au document 11379 et probablement à dater vers 1975-1980). Du Polyfilla® seul (dossiers FZ26536 de 1983, C2RMF61275 et C2RMF61276 de 2006, C2RMF61229 de 2008) ou en mélange avec du plâtre (FZ36823 daté de 2000, C2RMF 60691 daté de 2008) ainsi que du Modostuc® (C2RMF 64334 daté de 2008) ont également été employés.

Dans le domaine des cadres, toutes techniques confondues, il semble qu'il faut attendre la fin des années 1990, avec les travaux de Salimnejad Behrooz et de son équipe américaine pour constater une recherche uniquement dédiée aux matériaux de comblements⁷⁴. Vers 1997, des essais sont déjà menés par cette équipe afin de produire des matériaux discernables, par l'ajout de sulfate de baryum dans les formulations de comblement des artefacts mobiliers et arts décoratifs comme des bois dorés.

⁷² Klarer, *Au passage du mur de Sonia Garelli : Les stylos Choses d'Arman : Etude du vieillissement d'une inclusion d'Arman*, op.cit.

⁷³ NICOLAS Marine, *L'Ébauche Bacchante d'Émile-Antoine Bourdelle (Paris, musée Bourdelle). Etude et conservation-restauration d'une sculpture en plâtre brûlée. Recherche sur la consolidation du plâtre*, Mémoire de Master, Saint-Denis, INP, 2001.

⁷⁴ SALIMNEJAD Behrooz, "Formulating gesso fills for discrimination by X-radiography", *WAG Postprints (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation)*, Miami, AIC, 2002, p. 81-84 ; SALIMNEJAD Behrooz, "Formulating gesso fills with bismuth oxide for discrimination by X-radiography", *WAG Postprints (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation)*, Minneapolis, AIC, 2005, p. 71-76.

Les articles de 2002⁷⁵ et 2005⁷⁶ documentent les essais de mise en œuvre de matériaux de comblement identifiables lors de radiographie sous rayons X des artefacts. Des mélanges qualifiés de *gesso* ont été préparés à partir de colle de peau de lapin concentrée à 45 % et de charges variables en proportions et en formulations comprenant du carbonate de calcium, de l'oxyde de bismuth et de l'oxyde de zinc. Les formulations présentant la meilleure radio-opacité contenaient des pourcentages élevés d'oxyde de bismuth et d'oxyde de zinc. Elles ont ensuite été testées en application à différentes épaisseurs afin de vérifier le comportement au séchage. Après les séries d'essais, une formulation de *gesso* à 55 % de carbonate de calcium, 35 % d'oxyde de zinc et 10 % d'oxyde de bismuth a été retenue, pour sa visibilité en radiographie, sa manipulation aisée au pinceau, son séchage homogène et la possibilité de la retravailler après séchage. Il a également été évalué qu'une couche d'apprêt, à la colle diluée, contenant 10 % d'oxyde de bismuth permettait d'accentuer la radio-opacité, et donc la détection des zones comblées sous radiographie de rayons X. L'article mentionne également qu'un traitement sur un artefact a pu être évalué cinq ans après et qu'il ne présentait aucune altération spécifique. Dans l'article de 2005, la même équipe a souhaité identifier les différentes radio-opacités des charges blanches, pouvant constituer des matériaux de comblements, mais aussi des charges de substrats originaux, et les comparer aux mélanges de comblement, en utilisant cette fois-ci uniquement l'oxyde de bismuth afin d'éviter le blanchiment produit par l'oxyde de zinc. Il a été constaté qu'un ajout de 5 à 20 % d'oxyde de bismuth dans un *gesso* de carbonate de calcium est suffisant pour distinguer les zones restaurées des zones originales, même les plus radio-opaques comme dans le cas de matrice originale en sulfate de calcium, sans impact sur les propriétés mécaniques et physiques.

Les publications sur les matériaux de comblement en objets d'art et dorure sont rares. Des mentions de matériaux de comblement sont toutefois faites dans des publications plus générales, sur des artefacts recouverts de dorure. Dans un ouvrage de 1997 présentant la restauration de la peinture de Véronèse *Le repas chez Simon* et de son cadre réalisé par Antoine-François Vassé (1681-1734), les lacunes ont été comblées avec du « gros blanc » réparé et l'ensemble a été redoré et mis au ton⁷⁷. D'anciennes restaurations ont été constatées, et notamment l'emploi de cire et de feuille d'or, appliquées directement sur des zones lacunaires sans comblement de l'apprêt. Dans un article de Powell, Mallisson et Allen⁷⁸ sur les traitements d'œuvres des galeries anglaises au Victoria and Albert Museum, un mélange de colle animale, de carbonate de calcium, de pigment ocre et de microballons de verre ou encore un « faux » *gesso* composé d'Aquazol® 500 (résine soluble à l'eau de famille Poly(2-ethyl-2-oxazoline)), de carbonate de calcium, de kaolin et de sulfate de baryum ont été mis en œuvre pour traiter divers éléments mobiliers en bois dorés.

Les mélanges d'apprêts, de gros blanc ou encore la résine époxy sont cités dans la publication de Lauwick et Février⁷⁹, présentant la campagne de restauration des cadres de l'Orangerie, dont les dossiers et fiches de restauration sont également consultables au centre de documentation du C2RMF.

⁷⁵ Salimnejad, "Formulating gesso fills for discrimination by X-radiography", *op.cit.*

⁷⁶ Salimnejad, "Formulating gesso fills with bismuth oxide for discrimination by X-radiography", *op.cit.*

⁷⁷ GICQUEL Claudette et Pierre, SALMON Xavier, « La restauration de la bordure », dans *Le Repas chez Simon, Véronèse, Histoire et restauration d'un chef-d'œuvre*, Paris, Alain de Gourcuff, 1997, p. 135-137.

⁷⁸ POWELL Christine, *et al.* « Overview of the gilded objects treated for the British Galleries », *Conservation Journal*, 39 (2001), p. 10-11.

⁷⁹ Lauwick et Février, « La restauration des cadres du musée de l'Orangerie », *op.cit.*

La restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle, conçu spécifiquement par l'artisan Bern pour la peinture *Femme nue couchée* de Karl Stauffer daté de 1893, est documenté par Véronique Greco dans un article du blog du Musée d'Art et d'Histoire de Genève en 2012⁸⁰. Le cadre est fait d'ornements moulés en creux, très probablement en plâtre au regard de l'aspect du matériau, et présente de nombreuses cassures et parties lacunaires. Les restitutions sont faites par la restauratrice en employant les « matériaux traditionnels », c'est-à-dire de la colle de peau de lapin et de la craie de Champagne, soit du carbonate de calcium. La pâte est pressée dans un moule fait à partir des frises originales, puis appliquée pour combler les lacunes, en utilisant un support temporaire en ballon de baudruche, permettant de conserver le creux de la moulure tout en facilitant l'application de l'ornement frais. Après jointement du comblement et le séchage, le ballon est dégonflé puis retiré et les restitutions sont redorées et retouchées. Cette restauration est un bon exemple d'usage de technique « ancienne » ou « traditionnelle » sur un support d'origine différente, permettant donc une distinction entre l'original et la restauration.

Dans les travaux de Searle⁸¹, employant une « méthode traditionnelle flexible », les comblements ont été faits en « composition anglaise » en suivant une recette de l'époque victorienne, avec un pressage dans des moules en silicone, reproduisant les motifs des frises du cadre. Les matériaux contemporains, non traditionnels, ont été utilisés pour les étapes de préparation des couches de dorure et la retouche, avec notamment une couche de préparation faite à la peinture acrylique Golden® additionnée de Primal® WS24. L'or a été posé à l'eau, puis fixé avec une solution de Paraloid® B72 à 5 % dans de l'acétone. Les retouches et mises au ton ont été faites avec le même mélange de peinture acrylique et de Primal®. Les zones restaurées sont ainsi supposées être identifiables par la différence de traitement de surface par rapport à l'original.

Le mémoire d'Élise Lopez⁸² a constitué un jalon important en France puisqu'il a fait la synthèse des méthodes et des recherches et qu'il a permis de tester de nouvelles formulations de comblement dédiées à un cadre en plâtre. Lopez a ainsi testé 18 formulations de plâtres, additionnées de fibres naturelles et synthétiques, de charges radio-opaques telles que l'oxyde de cérium et le sulfate de baryum. La radio-opacité des mélanges a présenté un bon contraste avec le plâtre seul. Cependant, les propriétés mécaniques n'étaient pas suffisantes pour garantir la bonne conservation des comblements. Ainsi, le mélange de restitution des grandes lacunes d'ornements a été composé de plâtre β additionné de 0,5 % en masse de fibres de verre, permettant la distinction entre l'original et le matériau de restauration. Les ornements moulés secs ont ensuite été collés au Paraloid® B72. Les petites lacunes ont été comblées à la spatule avec un gros blanc modifié constitué de carbonate de calcium lié avec un mélange de colle animale et de Klucel® G à 3 % dans l'éthanol. Les restitutions ont été retouchées à l'aquarelle pour les petites zones ou avec une couche de préparation à la peinture acrylique, recouverte d'adhésif acrylique en suspension aqueuse (Plextol® B500) puis de feuille d'or, brunie ou non selon les besoins et mise au ton à la peinture acrylique.

⁸⁰ GRECO Valentine, « Regard sur une restauration de cadre », *Blog du Musée d'Art et d'Histoire de Genève*, (2012) [En ligne : 16 juin 2019 ; URL : <https://core.ac.uk/download/pdf/43667933.pdf>].

⁸¹ Searle Mark, « A 19th century British compo frame: a flexibly traditional approach to conservation », *op.cit.*

⁸² Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Etude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, *op.cit.*

En 2017, une autre publication est entièrement dédiée à la restauration d'un cadre en pâte anglaise, par le restaurateur Alastair Johnson⁸³. Les lacunes ont été restituées et les comblements ont été faits à partir d'un moule en élastomère mis en œuvre sur les frises d'ornement, puis tirés en plâtre afin d'être différenciable du matériau original. Les comblements ont été collés et jointoyés avec un « mastic » composé de craie et de colle animale.

b. Enquête

Afin d'appréhender les pratiques actuelles et de compléter les informations collectées lors de l'étude des sources, un travail de recueil d'éléments techniques a été mis en place par le biais d'une enquête proposée aux professionnel·le·s des deux spécialités, statuaire et mobilier/dorure. Le formulaire a été transmis par mail, en fichier Word et par un lien de questionnaire en ligne, créé sur la plateforme Framafoms, et présenté aux pages 79 et 80.

Méthode

Le formulaire a été organisé de façon à renseigner des méthodes générales communes aux spécialités Sculpture et Mobilier et Dorure, en essayant d'obtenir des réponses les plus objectives possibles, pouvant être comparées⁸⁴.

La partie I permettait de renseigner les informations générales, telles que le nom, les coordonnées, les titres, profession et spécialité, les types d'artefacts en plâtre habituellement traités et le nombre d'années d'expérience.

La partie II s'intéressait aux aspects techniques, plus en détails, aux matériaux utilisés pour traiter les artefacts en plâtre lors d'interventions de comblement ou de restitution. Il était demandé si les matériaux provenaient du commerce ou étaient de formulation spécifique. Les modalités du mélange telles que le choix des matériaux, des additifs, les pesées, les textures, ainsi que les méthodes et les choix de mise en œuvre, par tirage à part ou modelage *in situ*, étaient à préciser et à expliquer. Un tableau récapitulatif permettait de renseigner les méthodes par types d'intervention allant du petit comblement de surface à la réintégration de taille importante et au renfort structurel. La nature des sources et des références techniques était à préciser dans une liste de cases à cocher, comprenant par exemple les méthodes apprises en formation, les sources bibliographiques ou encore les échanges entre professionnel·les.

La partie III était ensuite concentrée sur les résultats souhaités par les professionnel·les et praticien·nes. Il était demandé de détailler les propriétés mécaniques et esthétiques voulues, ainsi que leurs remarques sur les produits habituellement utilisés. Les critères de choix d'un produit étaient questionnés, avec des exemples comme la maniabilité, l'ouvrabilité et les conditions d'intervention, ou encore l'effet sur la santé et l'environnement.

⁸³ JOHNSON Alastair, « Restoring pressed-composition ornament to the frame around Arthur Melville's 'Audrey and her Goats' », *Picture restorer*, 51, (2017), p. 20-25.

⁸⁴ Les formulaires complétés par les professionnel·les sont consultables en annexe I, p. 470 à 491.

Des questions portant sur la finalisation d'un traitement de comblement, comprenant donc la retouche, la mise au ton, étaient également posées, de façon à mieux connaître les méthodes choisies en fonction des matériaux de comblement.

Enfin, un retour d'expérience a été demandé, en interrogeant sur d'éventuelles observations ou reprises d'interventions et constats de changements ou de vieillissements particuliers.

Une dernière question a été posée sur le type de documentation permettant d'identifier les zones restaurées afin d'identifier des types de pratiques et leurs raisons. Certaines questions étaient fermées, nécessitant une réponse par « oui » ou « non », ou présentant des choix multiples à cocher. Des questions ouvertes permettaient de développer les réponses avec parfois des exemples destinés à aiguiller le sujet ou la thématique.

Résultats

L'enquête a été complétée par 21 professionnel-le-s, sur environ 200 entités contactées, comprenant des personnes ciblées directement ainsi que des adresses mail types d'organisations muséales, en France et à l'international. Une majorité de spécialistes en restauration de sculpture et de statuaire a répondu, avec 17 personnes, et 4 personnes spécialisées en restauration de dorure, de cadre et de mobilier. Sur cet ensemble, il est intéressant de noter que 7 personnes ont débuté leur carrière entre les années 1970 et 2000 et 14 personnes entre 2000 et 2019, année de communication de l'enquête, pouvant donc fournir des informations spécifiques selon les générations et les années d'expérience.

L'échantillon n'est pas assez grand, ni assez varié, pour avoir une véritable étude statistique. Cependant, les réponses et les données chiffrées permettent d'avoir une vue générale sur les pratiques actuelles, les tendances et les raisons et, ainsi, de compléter les sources et les références, en évaluant et en y situant également la pratique personnelle.

Matériaux

Les matériaux couramment employés et cités en nombre pour les interventions de complements sont le plâtre seul (cité 13 fois, avec trois mentions précisant la mise en œuvre par pièce rapportée et deux mentions détaillant l'usage pour des raisons structurelles). Des produits du commerce ont été cités de nombreuses fois : 8 mentions du Modostuc®, 8 du Polyfilla®, et 2 autres (Toutprêt® et Woodmastic®). Divers mélanges d'adhésifs et de charges variées ont été cités, pour un total de 7 mentions, avec une mention citant l'usage de charges radio-opaques. L'usage de résine époxy modelable est mentionné 3 fois, dont deux précisant l'usage pour les pièces rapportées, mises en œuvre à part puis collées après séchage. Des mélanges tels que du plâtre et du carbonate de calcium sont cités 6 fois et le gros blanc (pâte faite de colle animale et de carbonate de calcium) est mentionné 3 fois, par les spécialistes de la restauration de dorure.

Raisons

Ces matériaux, produits et mélanges sont argumentés en majorité pour leur accessibilité et leur commodité d'usage (12 mentions), les besoins en aspects de surface adaptés à l'original (10 mentions), les besoins structurels (7 mentions), la résistance mécanique inférieure souhaitée (6 mentions), la réversibilité ou la possibilité de retraiter (5 mentions), la compatibilité et la différenciation entre le substrat original et la partie restaurée (3 mentions chacune) et, enfin, les propriétés connues et testées de certains matériaux (2 mentions).

Préparations

Les formulations personnelles, surtout celles de plâtre et de carbonate de calcium sont généralement formulées aux ratios volumiques à parts égales, c'est-à-dire un volume de plâtre pour un volume de carbonate de calcium. Pour des besoins renforcés, deux parts de plâtre et une part de carbonate de calcium sont mélangés et pour une baisse de résistance, une part de plâtre est mélangée avec deux ou trois parts de carbonate de calcium. Des additifs peuvent être employés, comme des adhésifs utilisés comme liants, des charges telles que du carbonate de calcium ou des microballons de verre, ou encore de la filasse composée de fibres végétales servant à renforcer l'intervention. Ces additifs servent dans le but d'obtenir des textures spécifiques et variables (11 mentions), choisies en fonction des besoins, avec une prédominance de texture épaisse ou pâteuse (mentionnée 6 fois), facilement modelable ou pouvant être travaillée à la spatule. Les mélanges sont pour la plupart faits à l'œil, par habitude et expérience (12 mentions) ou moins fréquemment par mesure des volumes ou par pesée (8 mentions). Il est ajouté que les pesées sont effectuées spécifiquement pour des matériaux ou des mélanges nécessitant une grande précision.

Pratique

Les comblements sont la plupart du temps mis en œuvre *in situ* ou directement en place, par modelage (17 mentions). Il y a également la fabrication de pièces à part (8 mentions), par coulée ou moulage, qui sont ensuite rapportées par collage sur la zone à combler. Elles sont bien souvent réalisées en matériaux spécifiques comme de la résine époxy ou du plâtre, de façon à assurer un véritable rôle structurel. Les adhésifs utilisés sont variés, avec une tendance plutôt aux adhésifs acryliques (8 mentions du Paraloid® et 8 mentions d'adhésifs acryliques autres comme le Plextol® B500 ou l'Acryl®), vinyliques (9 mentions) puis époxy (5 mentions précisant des conditions spécifiques).

Les mises en œuvre et les matériaux sont différents selon le but de l'intervention.

- Une lacune de petite dimension, de surface par exemple, est traitée avec des produits du commerce, prêts à l'emploi et en application directe, *in situ*.
- Un comblement de dimension importante, nécessitant un renfort de la structure, est traité avec des produits variables, le plâtre étant souvent cité en mélange, avec une mise en œuvre directe ou l'usage de pièce rapportée.
- Les restitutions formelles sont réalisées par modelage ou par prise d'empreinte et tirage à part d'une pièce à rapporter.
- Des renforts sont parfois appliqués, et généralement des fibres synthétiques (verre, carbone) ou naturelles (fibres végétales, filasse) sont utilisées, collées avec des résines et des adhésifs variés.

Les plans de cassure peuvent être isolés avant la mise en place des comblements (13 mentions « oui » et 11 mentions « non ») et les zones alentours protégées (10 mentions « oui » et 11 mentions « non »), soit des pratiques employées par environ une personne sur deux. L'isolation est dans la plupart des cas faite avec du Paraloid® (9 mentions), plus rarement un autre adhésif acrylique (2 mentions) ou vinylique (3 mentions).

La question sur le comblement des plans d'assemblage (dont le but était de savoir quel matériau est préféré pour jointoyer les comblements) a manqué de clarté et n'a pas eu beaucoup de réponse. Toutefois, il est possible de voir des tendances d'usages de matériaux avec deux tendances égales pour les matériaux du commerce prêts à l'emploi (6 mentions), déjà cités, ainsi que les formulations personnelles (6 mentions), également citées. Le plâtre seul est cité plus rarement, avec 3 mentions.

Finitions

Les méthodes de retouches citées sont assez variables, avec une plus grande majorité de citation de l'aquarelle et de pastels secs avec ou sans fixation. D'autres méthodes comme les résines Gamblin®, les peintures acryliques, puis la gouache, et enfin la dorure sont citées moins fréquemment. De nombreuses citations d'autres méthodes, très spécifiques, sont également précisées, comme l'usage d'un adhésif particulier ou d'un type de mélange.

Sources

Les méthodes (mises en œuvre et matériaux) sont très majoritairement apprises en formation (20 mentions) et échangées entre professionnel·les (19 mentions). Environ la moitié des mentions citent les sources bibliographiques (11 mentions), surtout dans le domaine de la statuaire et de la sculpture. Il est néanmoins remarqué que les références bibliographiques sur le sujet sont rares et pourtant nécessaires. D'autres contextes (9 mentions) sont cités pour apprendre les méthodes de comblement, comme l'expérience professionnelle ou encore les journées d'études.

Attentes

Les propriétés mécaniques et esthétiques que les professionnel·les souhaitent obtenir sont des aspects esthétiques similaires à l'original, le respect de critères déontologiques comme la réversibilité, la stabilité, l'innocuité et la compatibilité, mais aussi des aspects « pratiques » comme une bonne tenue à la mise en œuvre et des textures et couleurs permettant des retouches aisées. Enfin, la stabilité structurelle et des rapports adaptés de résistance mécanique sont visés, c'est-à-dire une résistance égale ou inférieure au matériau original.

Les facteurs qui conditionnent les choix sont variés : les exemples proposés sont validés par 6 mentions, les conditions de travail, la maniabilité de l'artefact et la mise en œuvre des produits sont mentionnées 12 fois, l'innocuité ou la non toxicité pour la santé est mentionnée 8 fois et pour l'environnement 6 fois, l'innocuité ou la stabilité pour l'artefact est citée 4 fois, les besoins spécifiques structurels ou de surface sont mentionnés 4 fois, la réversibilité 3 fois et enfin le prix ou les aspects esthétiques sont mentionnés 2 fois chacun.

Les conditions et les durées de traitement sont aussi des critères de choix de méthodes et de matériaux pour certain-es professionnel·les. Par exemple en conservation-restauration de cadre, il est précisé que les traitements sont bien souvent à effectuer de façon sérielle, rapide et efficace, sans documentation imposée, ces artefacts ne bénéficiant pas des mêmes couvertures patrimoniales que les statues pour lesquelles les propositions de traitement sont évaluées au préalable et la documentation obligatoire.

Expériences et documentation

Les professionnel·les confirment la reconnaissance de qualités diverses dans les gammes de produits dont ils disposent, permettant des usages variés et adaptés aux différents besoins. Des avantages et des inconvénients sont observés ; les professionnel·les peuvent s'approprier les matériaux, et adapter les textures, les couleurs et les aspects de surface notamment.

Plusieurs professionnel·les mentionnent des réticences face aux peintures acryliques et à l'aquarelle, en raison des risques de pénétration des retouches dans le substrat, menaçant donc la bonne réversibilité de l'intervention. De plus, des changements chromatiques ont été constatés avec le vieillissement, surtout pour les acryliques. Une fois de plus, les techniques sont à adapter au cas par cas et il est précisé que la retouche des comblements seuls ne pose pas de problème, le matériau n'étant pas original.

Environ un·e professionnel·le sur deux a eu l'occasion de revoir des artefacts précédemment restaurés et cinq mentionnent avoir observé des changements chromatiques des zones retouchées. Une seule mention évoque un changement physique, avec un léger affaiblissement, du matériau de retouche. Une mention fait état d'un traitement complexe dans des conditions expérimentales visant à tester un produit spécifique, n'ayant pas permis d'obtenir le résultat souhaité.

Enfin, une grande majorité des professionnel·les procède à des relevés précis des interventions, permettant de renseigner et de documenter précisément les restaurations de l'original. Les traitements sont le plus souvent photographiés, des prises de vues avant et après traitement de détails et de vues générales, avec ou sans annotation, sont majoritaires. Des relevés par schémas sont encore pratiqués par la moitié des professionnel·les de l'enquête, en précisant que cette démarche longue et donc coûteuse n'est effectuée que dans certaines conditions spécifiques, de traitements importants, de demande exprimée par le ou la commanditaire. Il est aussi précisé par six mentions que le détail des interventions est rédigé dans les rapports et la documentation post traitement.

Conclusions de l'enquête

Enfin, il ne semble pas exister de véritable différence générationnelle dans les pratiques, les professionnel·les utilisant les mêmes gammes de produits pour les mêmes raisons. Les grandes tendances à retenir sont des usages de plâtre, de produits du commerce, souvent prêts à l'emploi, ainsi que des mélanges et des formulations de liants et de charges. Ces matériaux et formulations sont adaptés aux cas traités et ajustés, les mélanges et les textures étant familières et maîtrisées par les professionnel·les. Il semble qu'il est préféré une mise en œuvre *in situ* avec une texture pâteuse et un intérêt pour une mise en œuvre facilitée. La zone restaurée est presque toujours documentée afin d'être identifiée, en plus du choix de certains matériaux pouvant être différenciés.

Questionnaire

I. Informations générales

Nom :

Acceptez-vous d'être recontacté.e si nécessaire ?* oui - non

Coordonnées :

Titre, profession, qualité *:

Spécialités (typologie d'œuvres et objets, matériaux) : *

Types d'œuvres ou de collections en plâtre traités : *

Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : *

II. Technique

- Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblements, « restitution formelle » ou complément d'une forme) ? *

Ex. produits du commerce prêts-à-l'emploi, mélanges ou formulations...

- Pour quelle(s) raison(s) ? *
- De quel(s) fournisseur(s) ? *

Si formulation(s) personnelle(s) :

- Dans quelles proportions ?

- Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?

Ex. charges type carbonate de calcium, fibres diverses, autre liant que l'eau, modificateur de prise ...

- Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?

- Quelle(s) texture(s) souhaitez-vous obtenir ?

- Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :

Ex. directement en place, pièces amovibles rapportées... Par coulée, modelage, collage ...

Selon l'intervention :

Types d'intervention	Méthodes employées et raisons
Petit comblement (surface ou faible profondeur).	
Gros comblement	
Restitution formelle	
Renfort (ex. doublage au revers)	

- Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? * oui - non

Si oui, avec quel(s) produit(s):

Ex. adhésif en solution (à préciser)

- Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?

Ex. en présence d'une couche polychromée, dorure...

Dans le cas de pièces rapportées :

- Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?
- Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (raccord comblement et zone originale) ?

- Références des méthodes utilisées : *
 - Méthodes apprises lors des formations professionnelles
 - Sources bibliographiques
 - Échanges entre professionnels
 - Autres
- Si autres, pouvez-vous préciser ? *

III. Résultats

- Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ? *
- Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ? *
- Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ? *

Ex. maniabilité de l'œuvre, support horizontal ou vertical, durée de travail, conditions de chantier en extérieur/en atelier, commodité des produits et de leur accès, innocuité pour la santé et l'environnement ...

- Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ? *
- Y-a-t-il selon vous des méthodes adéquates ou inadéquates ? *
- Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ? *
 - oui - non
- Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?
Si oui, pouvez-vous préciser de quel(s) type(s) ?
- Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ? *
 - oui - non
 - De quel(s) type(s) ?

Ex. liste détaillée dans le rapport d'intervention, photographie annotée, schéma...

- Si non, pour quelle(s) raison(s) ?

Ex. non demandé par les commanditaires, délais trop courts...

Fin du questionnaire

Autre information ou commentaire ?

2. Étude des collections

a. Méthodologie type « chantier des collections »

À partir de septembre 2020, il a été possible de mener une campagne de prospection d'œuvres au sein des deux collections, en salles et en réserves du musée du Louvre pour les cadres, à la gypsothèque dans les Écuries à Versailles. Des visites ont été programmées avec un accompagnement et/ou en autonomie. Les visites étaient organisées de la façon suivante. Une zone d'observation était sélectionnée pour la séance. Toutes les œuvres ont été rapidement observées afin de noter les éventuelles zones restaurées et la présence de comblements. Des critères⁸⁵ ont permis de cibler les œuvres potentielles.

Après ce premier repérage, les artefacts ont pu être inspectés plus en détail et les informations relevées. La prise de note comprenait : l'identification selon les informations du cartel ou de l'étiquette, de brèves descriptions stylistique et technique afin de faciliter l'identification, un constat d'état général synthétique avec la notation des altérations et un diagnostic (si pertinent), puis une description des comblements selon leur aspect (texture, couleur, degré de finition, traces de vieillissement). Des relevés photographiques avec des vues générales et des détails ont complété les observations. Les informations ont été reportées dans deux tableaux Excel⁸⁶ et synthétisées dans les tableaux 2 à 6. Une sélection de 35 artefacts a été faite dans chacune des deux collections pour constituer le corpus d'étude.

b. Corpus de la gypsothèque

À la gypsothèque, les œuvres exposées dans les quatre galeries des Petites Écuries ainsi qu'une partie des œuvres facilement accessibles de la réserve aux Grandes Écuries ont pu être observées. Les séances de travail se sont déroulées en présence d'équipes de restauration et/ou des équipes de la conservation. Une sélection de 35 artefacts présentant des interventions de comblements a été faite afin d'établir des tendances générales. Les statues comportent des lacunes et des manques habituels en statuaire. Les parties saillantes, comme les bras, les mains ou encore les nez, sont plus facilement altérées que les zones planes. La plupart des comblements (± 30) semblent anciens et liés aux interventions « d'assemblage » et de « remontage » (Tabl. 2), lors de l'installation des artefacts aux Petites Écuries à Versailles après le déménagement dans les années 1970. Ils ont eu un véritable rôle structurel et esthétique mais ils sont souvent de facture rapide, parfois grossière, avec des traces d'outils, comme des rides, très visibles et des stries de ponçage débordant sur le plâtre original. Très certainement faits en plâtre, ils sont généralement de couleur blanche, parfois grisé par la poussière, et ils présentent souvent

⁸⁵ Pour rappel, les critères étaient les suivants : présence d'altérations et d'interventions de restauration, dimensions raisonnables (statue en pied grandeur nature, cadre au dimension maximale de 2 à 3 m de côté), bonne accessibilité (par exemple : pas de cadre exposé en hauteur nécessitant l'usage d'un escabeau pour les observations).

⁸⁶ Présence de comblements d'aspect ancien ou récent ; altérations de l'original ou du comblement ; accessibilité : observation à vue d'œil possibles.

des bordures noires à la jonction avec le matériau original. Les auréoles ou les taches de couleur ocre à orange sont dues à la migration des tanins contenus dans les renforts en bois ou en fibres végétales, qui se produisent lors d'un apport d'eau, comme lors de la mise en place de comblements en plâtre frais directement sur l'artefact.

Une dizaine d'artefacts présentent des comblements de textures et d'aspects esthétiques proches du plâtre, avec des finitions très soignées (Tabl. 3). Ils sont généralement de couleur blanche à crème clair, en fonction de la zone environnante. Plusieurs sont faits avec un léger retrait, indiquant qu'il s'agit bien d'une zone restaurée et non pas de l'original. Ces comblements ont pu être réalisés en plâtre, en mélange de plâtre et de carbonate ou peut-être en produit prêt-à-l'emploi, comme du Modostuc®. Ces comblements correspondent très certainement à des interventions récentes, lors des différentes campagnes d'études et de conservation-restauration menées à la gypsothèque depuis les années 2000.

Actuellement, la restauration par le comblement et la restitution de la forme lacunaire ne sont pas systématiques. Les lacunes de plus petites dimensions, qui n'entraînent pas de déséquilibre structurel ni de gêne visuelle, ne sont pas toujours comblées. Parfois, un ou plusieurs types de comblements sont visibles sur un même artefact. Des comblements plus disparates ont également été réalisés sur plusieurs statues, avec des matériaux divers et éloignés des critères esthétiques.

Sur trois artefacts, des comblements minces, en plaque, de couleur ocre, de texture dure et « plastifiée⁸⁷ », ont été observés (Tabl. 4).

Sur deux artefacts, des comblements gris foncé à la texture granuleuse ont été constatés (Tabl. 5). La matrice semble faite de grains fins, avec des irrégularités, donnant un aspect friable au matériau. Ce matériau est probablement un enduit ou un mortier, peut-être du ciment gris.

Enfin, deux artefacts ont présenté des comblements faits d'un matériau d'aspect cireux (Tabl. 6), relativement « mou », qui pourrait être une pâte à modeler de type mélange de cires, d'huiles et de charges minérales blanches (ex. carbonate de calcium), comme de la Plastiline®⁸⁸. Ces divers matériaux sont difficiles à dater avec précision, mais leur facture et leur état d'empoussièrement laissent penser qu'ils sont relativement anciens, antérieurs aux considérations esthétiques et techniques des critères déontologiques actuels.

⁸⁷ La sonorité claire produite en tapotant la zone laisse penser à l'emploi d'un matériau au liant synthétique.

⁸⁸ La Plastiline® est une pâte à modeler créée en 1989 et composée de cires, d'huiles et de différentes charges minérales. Elle existe en plusieurs duretés et plusieurs teintes.


Type « assemblage »	
<p>Blanc à gris, fronts noirs, taches ou auréoles ocre-orange environnantes, lisses ou striées, traces de ponçage, finitions rapides. Souvent fonction de remontage et d'assemblage. Faits au plâtre (?)</p>	
± 30	
<p>Gy 0265, Gy 0202, Gy 0261, Gy 0257, Gy 0474, Gy 0945, Gy 0873, Gy 0236, Gy 0194, Gy 0563, Gy 0600, Gy 0601, Gy 0211, Gy 0185, Gy 0581, Gy 0204, Gy 1419, Gy 0959, Gy 0276, Gy 0879, Gy 0249, Gy 1300, Gy 0206, Gy 0191a, Gy 0275, Gy 0253, Gy 0902, Gy 1484, Gy 0247, Gy 0904</p>	
<p>Détails de Gy 0202 (en haut) et Gy 0185 (en bas) © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>	

Tableau 2 : présentation des comblements de type « assemblage ».

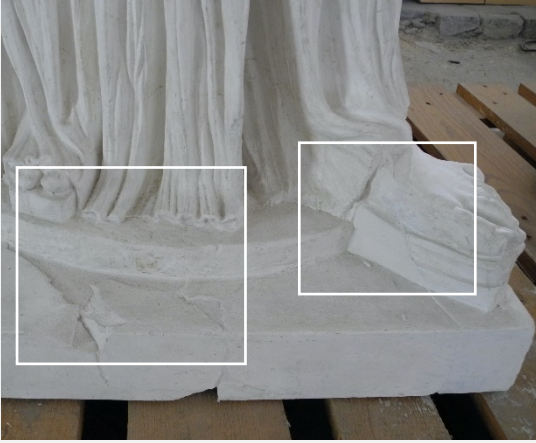
Blancs	
<p>Blanc très pur, texture lisse, travail soigné. Plâtre avec ou sans carbonate, Modostuc® (?)</p>	
± 10	
<p>Gy 0280, Gy 0236, Gy 0194, Gy 0600 (?), Gy 1419 (?), Gy 0879 (?), Gy 0249, Gy 1300, Gy 0247, Gy 0904</p>	
<p>Terrasse de Gy 0280, comblements blancs en retrait (encadrés) © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>	

Tableau 3 : présentation des comblements blancs.


Ocre	
<p>Texture lisse, homogène, aspect d'un liant synthétique, sonorité du plastique en tapotant. Enduit synthétique (?)</p>	 <p>Détail de Gy 0206 © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>
± 3	
Gy 0265 (?), Gy 0206, Gy 1484	

Tableau 4 : présentation des complements ocres.


Gris foncé	
<p>Texture granuleuse, irrégulière, grains fins, aspect friable, application rapide. Mortier de ciment (?)</p>	 <p>Détail de Gy 0265 © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>
± 2	
Gy 0265, Gy 0185 (?)	

Tableau 5 : présentation des complements gris foncé.


Cireux	
<p>Aspect cireux, couleur beige clair, texture molle, retrait (?) Cire chargée (?)</p>	 <p>Détail de Gy 0265 © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>
± 2	
Gy 0265, Gy 0581 (?)	

Tableau 6 : présentation des complements à l'aspect cireux.

c. Corpus des cadres du XIX^e siècle

Des visites au musée du Louvre ont été organisées, en salle et en réserve, avec Cristina Arlian (chargée de la régie et de la documentation du département des Peintures) pendant les jours de fermeture du musée. Des visites en autonomie ont pu être faites dans les salles du parcours permanent, lors de journées d'ouverture au public, notamment avant la fermeture du musée à la fin du mois d'octobre 2020. Les cadres non restaurés ne sont que très rarement exposés. La plupart du temps, les manques ou lacunes sont comblés, ou au moins retouchés. L'aspect esthétique est ainsi satisfaisant et les altérations du cadre n'attirent pas le regard au détriment de l'appréciation de l'œuvre encadrée. Une sélection de 35 cadres a été faite, présentant des altérations de type lacune et des interventions de comblement, principalement dans les galeries de peinture française du XIX^e siècle, ainsi que dans la Grande Galerie, en ciblant préférentiellement des cadres aux ornements moulés. Au cours des observations et des discussions avec Cristina Arlian, des zones d'altérations et de lacunes fréquentes ont été identifiées, comme sur les frises au niveau des raies de cœur⁸⁹. Ces frises, sur lesquelles sont fixées des attaches de maintien de l'œuvre picturale au revers, sont pourtant très fragiles en raison de leur faible épaisseur. Il n'est pas rare d'y constater des accidents lors d'interventions d'encadrement lorsque les vis de fixation traversent l'épaisseur de la frise, provoquant fissures et déplaquages sur la face visible. Les angles des cadres connaissent aussi de nombreuses cassures provoquées par des chocs lors de manipulations ou d'appuis. C'est donc sur ces zones de fragilité que les comblements peuvent être plus facilement observables.

La nature des matériaux de comblement sous les couches de polychromie, et surtout sous la dorure, étant difficile à distinguer à l'œil nu sans analyse complémentaire, les observations et les hypothèses de matériaux ont été classés en deux catégories selon leur texture et leur aspect : de type « pâte » ou mortier et de type « fluide ». De même, la datation n'est pas possible avec un simple examen visuel. Toutefois, les caractéristiques esthétiques et certains usages de matériaux peuvent aiguiller sur des périodes de mise en œuvre. Par exemple, la présence de couches de « bronzine », un matériau à base de poudre métallique, le plus souvent un alliage de cuivre imitant l'or, datant de la fin du XIX^e ou du début du XX^e siècle, permet de situer l'intervention à ces périodes.

Une trentaine de comblements de type « pâte » ont été constatés (Tabl. 7). La texture après prise ou séchage semble dure, les aspects sont parfois souples ou mous, plus ou moins similaires au plâtre ou à la composition, avec une granulométrie relativement fine et une homogénéité de la matière. Ce type est très probablement composé d'un liant et d'une charge minérale, comme du gros blanc fait de colle animale concentrée et de carbonate de calcium, ou alors mis en œuvre avec de la résine modelable (résine époxy par exemple), ou un mortier prêt à l'emploi. L'ornement est modelé ou mis en forme dans un moule, par pressage ou estampage. Les finitions sont plus ou moins travaillées avec finesse. Sept comblements de type « fluide » ont été observés (Tabl. 8). Les matériaux s'apparentent à de la cire ou à de l'adhésif, par leur texture et leur aspect, relativement visqueux, plus ou moins translucide. La présence d'une charge minérale est possible, en petite quantité, de façon à former un mélange de type « apprêt ». Dans ce cas, l'intervention est probablement double, alliant collage et comblement.

⁸⁹ Les raies de cœur sont des frises aux motifs arrondis, souvent en méplat, qui se situent sur la baguette la plus proche de l'image bordée, et donc sur la partie la plus fine du cadre.



Type « pâte »	
<p>Textures souples à dures, aspects d'un mélange liant et charge, modelé ou pressé dans un moule.</p> <p>Finitions plus ou moins fines.</p> <p>Faits en gros blanc, en résine, en mortier prêt-à-l'emploi (?)</p>	
<p>± 30</p>	
<p>R.F. 2041, R.F. 769, R.F. 2319, R.F. 692 bis, R.F. 1710, R.F. 1390, R.F. 2046, R.F. 1447, R.F. 1667, R.F. 1658, R.F. 1659, R.F. 1660, R.F. 1609, R.F.1636, R.F. 1628, R.F. 1623, R.F. 1697, R.F. 1615, R.F. 1621, R.F. 1642, R.F. 260, R.F. 1965, INV. 20028, INV. 5343, R.F.1698, INV. 562, INV. 175, INV. 176 (N° d'inventaire de la peinture encadrée)</p>	 <p>R.F. 1659 (en haut) et R.F. 2046 (en bas) © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>

Tableau 7 : présentation des complements de type « pâte ».



Type « fluide »	
<p>Matière appliquée liquide ou fluide, avec une viscosité probablement élevée, translucide, aspect relativement mou après prise ou séchage. Présence de charges minérales possible.</p> <p>Double fonction de collage et de comblement.</p> <p>Cires, adhésifs concentrés (?)</p>	
<p>± 7</p>	
<p>R.F. 1667, R.F. 1658, INV. 20028, R.F. 1698, R.F. 1961-31, R.F. 1943, INV. 124 (N° d'inventaire de la peinture encadrée)</p>	 <p>R.F. 1667 (en haut) et R.F. 1961-31 (en bas) © Musée du Louvre, J. Robin Dupire.</p>

Tableau 8 : présentation des complements ou collages épais de type « fluide ».

REMARQUES

Les deux typologies présentent des caractéristiques esthétiques et techniques, ainsi que des fonctions et des statuts qui diffèrent. Les statues ne présentent que très rarement des traitements de surface alors que les cadres sont presque toujours recouverts de dorure ou d'autres couches de polychromie. Les statues sont en trois dimensions, les cadres en deux dimensions. Le plâtre est le principal matériau de la première typologie, alors que la seconde peut connaître plusieurs types de matériaux de mise en œuvre comme le plâtre, le « gros blanc », ainsi que diverses formulations de pâtes incluant des résines et des huiles. Toutefois, les artefacts sont altérés de la même façon et les matériaux constitutifs sont soumis à des fragilités identiques comprenant une importante proportion de cassures et, par conséquent, des zones lacunaires nécessitant des interventions de comblement afin de renforcer la structure et de redonner une bonne lisibilité à l'ensemble. Évaluer des lots d'artefacts et procéder à des séries de constats d'état de deux collections de typologies différentes est possible en retenant des critères comparatifs tels que les aspects techniques et esthétiques. Ainsi, des éléments descriptifs simples comme les couleurs ou les teintes, les textures, la nature du matériau, le degré de finition, l'aspect « ancien » par la présence de salissure ou de poussières peuvent alors être analysés et classés. Bien qu'ils ne permettent pas d'établir des datations précises, il est possible de déterminer des tendances de traitement et de situer certaines campagnes d'intervention. Ce type de description, plutôt concentré sur la matérialité de l'artefact et des interventions, est tout à fait adaptable à d'autres matériaux ou à d'autres typologies d'artefacts.

3. Synthèse des pratiques

Les différents matériaux, observés lors de l'étude des deux collections, renseignés dans les sources documentaires, ou mentionnés dans les réponses des professionnel·les à l'enquête, sont variables, selon au moins deux critères facilement identifiables qui sont la typologie d'artefacts et l'époque de l'intervention. Afin de mieux comprendre la répartition de ces matériaux, trois périodes ont été distinguées : les pratiques « anciennes », c'est-à-dire antérieures aux débuts des années 1980, celles des années 1980 aux années 2000 et des années 2000 à nos jours.

a. Pratiques « anciennes »

Il est difficile de connaître les méthodologies antérieures à la fin du XX^e siècle autrement qu'à travers les observations faites par les professionnel·les lors des études techniques ou des interventions de conservation-restauration. D'après les dossiers d'œuvres consultés et les discussions menées avec des professionnel·les des deux spécialités, les restaurations « anciennes » semblent avoir été effectuées avec des matériaux similaires aux matériaux originaux. En statuaire, le plâtre frais est utilisé, appliqué à l'outil puis repris après la prise : le comblement est poncé pour être mis à niveau, ou aplani à la ripe, laissant des marques de dentelure. Ceci permet de rendre moins visible le plan d'assemblage, mais occasionne la perte de l'épiderme du plâtre original ou des griffures à la surface. Les choix de matériaux de comblement sont similaires pour les cadres aux ornements moulés, mais la situation est plus complexe que celle de la statuaire.

En effet, comme présenté dans la partie I de ce chapitre, les ornements des cadres du XIX^e siècle peuvent être fabriqués à partir de plâtre seul, mais aussi à partir de mélanges de divers matériaux, comme le « gros blanc » ou la pâte anglaise. Les matériaux du « gros blanc », c'est-à-dire le carbonate de calcium et la colle animale non diluée étaient déjà employés dans la mise en œuvre des cadres en bois sculpté en couches de finitions, sculptées finement, recevant ensuite les polychromies dont la dorure. Ces matériaux et leurs préparations étaient donc parfaitement maîtrisés par les professionnel·les fabricant ou restaurant les cadres du XIX^e siècle. Il apparaît donc normal que les interventions de comblements aient été menées en employant le matériau de mise en œuvre le plus fréquent et connu de la spécialité.

Ainsi, des ornements au plâtre ont très bien pu être comblés ou restitués avec du « gros blanc » ou de l'apprêt, en considérant cela comme techniques traditionnelles ou pratiques « ancienne », soit par manque de discernement du matériau, soit par habitude, expérience et commodité technique, les apprêts et les « gros blancs » présentant les avantages d'une importante malléabilité, d'une adaptabilité aux irrégularités du support, de reprises aisées après séchage, du pouvoir collant garantissant la bonne accroche sur la structure. À l'inverse, des comblements au plâtre ont aussi pu être pratiqués sur des cadres du XIX^e siècle en plâtre, en composition, mais aussi sur certains cadres en bois sculpté et doré, comme évoqué lors d'échanges avec des professionnel·les. Ces comblements au plâtre sont parfois recouverts de bronzine ou autres imitations de dorure.

b. Des années 1980 aux années 2000

À partir des années 1980, d'autres pratiques apparaissent. Des essais et des expérimentations sont menés avec des matériaux chimiquement différents des originaux dans le but de répondre à des critères spécifiques comme la lisibilité de l'intervention, l'adéquation visuelle et esthétique ainsi que la commodité à l'usage. En statuaire, le plâtre et des produits du commerce tels que des enduits de rebouchage prêts à l'emploi sont utilisés (exemple du Modostuc[®] utilisé par Klarer⁹⁰). Certaines œuvres bénéficient de recherches approfondies comme lors du travail de mémoire de Biesel et Cascio⁹¹, dans lequel différents liants tels que des cires, des matériaux protéiques, des liants minéraux ou encore des matériaux synthétiques, et des charges de couleur blanche (comme du carbonate et du sulfate de calcium ou du dioxyde de titane) ont été évalués et comparés afin de sélectionner un type de mélange compatible avec la présence d'armatures métalliques oxydées. En restauration de cadres, les formulations « traditionnelles » déjà mentionnées semblent majoritairement utilisées, mais certains rapports de restauration et témoignages de restaurateur·rices mentionnent l'usage d'autres matériaux comme des cires teintées, dorées ou encore des résines époxy modelables, matériaux appréciés car différents du substrat original et aisés à mettre en œuvre.

⁹⁰ Klarer, *Au passage du mur de Sonia Garelli : Les stylos Choses d'Arman : Etude du vieillissement d'une inclusion d'Arman*, op.cit.

⁹¹ Biesel et Cascio, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, op.cit.

c. Depuis les années 2000

Dans le domaine de la statuaire, d'après les sources documentaires et les résultats de l'enquête, les professionnel·les semblent utiliser la même gamme de produits que ceux décrits précédemment, comme des produits du commerce prêts à l'emploi, qui permettent là encore une distinction des substrats, ou bien des formulations personnelles telles que des mélanges de sulfate et de carbonate de calcium. Des additifs tels que de la poudre de pierre, des pigments ou encore des adhésifs acryliques et vinyliques peuvent être employés. Les formulations sont adaptées selon les besoins de l'œuvre en distinguant systématiquement les matériaux. En restauration de cadres, le « gros blanc » et les autres matériaux sont toujours employés. Du sulfate de calcium et du gros blanc additionnés de pigments, de la résine époxy modelable, des mélanges d'adhésifs et de charges sont parfois choisis. Dans les travaux de Lopez⁹², des comblements de petites dimensions ont été formulés avec du gros blanc additionné d'hydroxypropylcellulose. Le travail de restauration mené par Johnson sur un cadre en pâte anglaise a intégré des restitutions moulées uniquement en plâtre afin de les différencier du matériau original⁹³. La spécialité semble bénéficier de nouvelles recherches, notamment sur le développement de matériaux détectables lors de la prise de radiographie des rayons X en raison de la différence de densité des matériaux. Cette propriété est particulièrement intéressante puisque les comblements recouverts de feuilles métalliques sont impossibles à identifier à l'œil. Des charges radio-opaques telles que les oxydes de zinc, de bismuth et de baryum ont été testées et utilisées dans certains cas. En restauration de cadres, les méthodes « traditionnelles » et les méthodes « non traditionnelles » sont considérées comme complémentaires. Les matériaux traditionnels offrent une bonne compatibilité physico-chimique et mécanique avec le substrat original. Ils peuvent être utilisés par exemple quand le cadre est fortement endommagé et très fragile ou quand différents matériaux des restaurations antérieures sont déjà présents. Les matériaux non traditionnels, quant à eux, permettent une différenciation très claire des substrats en cas d'analyses.

⁹² Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Etude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, *op.cit.*

⁹³ Johnson, « Restoring pressed-composition ornament to the frame around Arthur Melville's 'Audrey and her Goats' », *op.cit.*

REMARQUES

Dans les deux spécialités, les pratiques semblent dépendre des œuvres et de différents facteurs ou critères. Ainsi, l'étendue des altérations, l'expérience et les savoirs des professionnel·les, mais aussi les conditions et les durées de traitement ou encore les questions de santé et d'écologie peuvent participer à la sélection et au choix d'une formulation. Une lacune de petite ou de grande dimension n'est pas traitée avec le même matériau car dans un cas ou l'autre, il peut être nécessaire d'utiliser un matériau à la résistance mécanique élevée ou basse, jouant un rôle de renfort structurel ou non. La dimension du comblement est également à mettre en lien avec le temps de travail d'un matériau, son ouvrabilité, permettant un travail confortable sans perte des propriétés du matériau de comblement. Cette notion est également à rapprocher des conditions de travail puisque dans un cas de chantier à effectuer dans des délais serrés, certains matériaux, à prise rapide ou en une étape au lieu de plusieurs, sont préférables. Enfin, certains matériaux synthétiques tombent en défaveur chez des professionnel·les en raison de leur toxicité ou de leur impact néfaste sur l'environnement, comme les résines époxy (manipulations nécessitant des équipements de protection, particulièrement lorsque la pâte est reprise après séchage par ponçage ou abrasion).

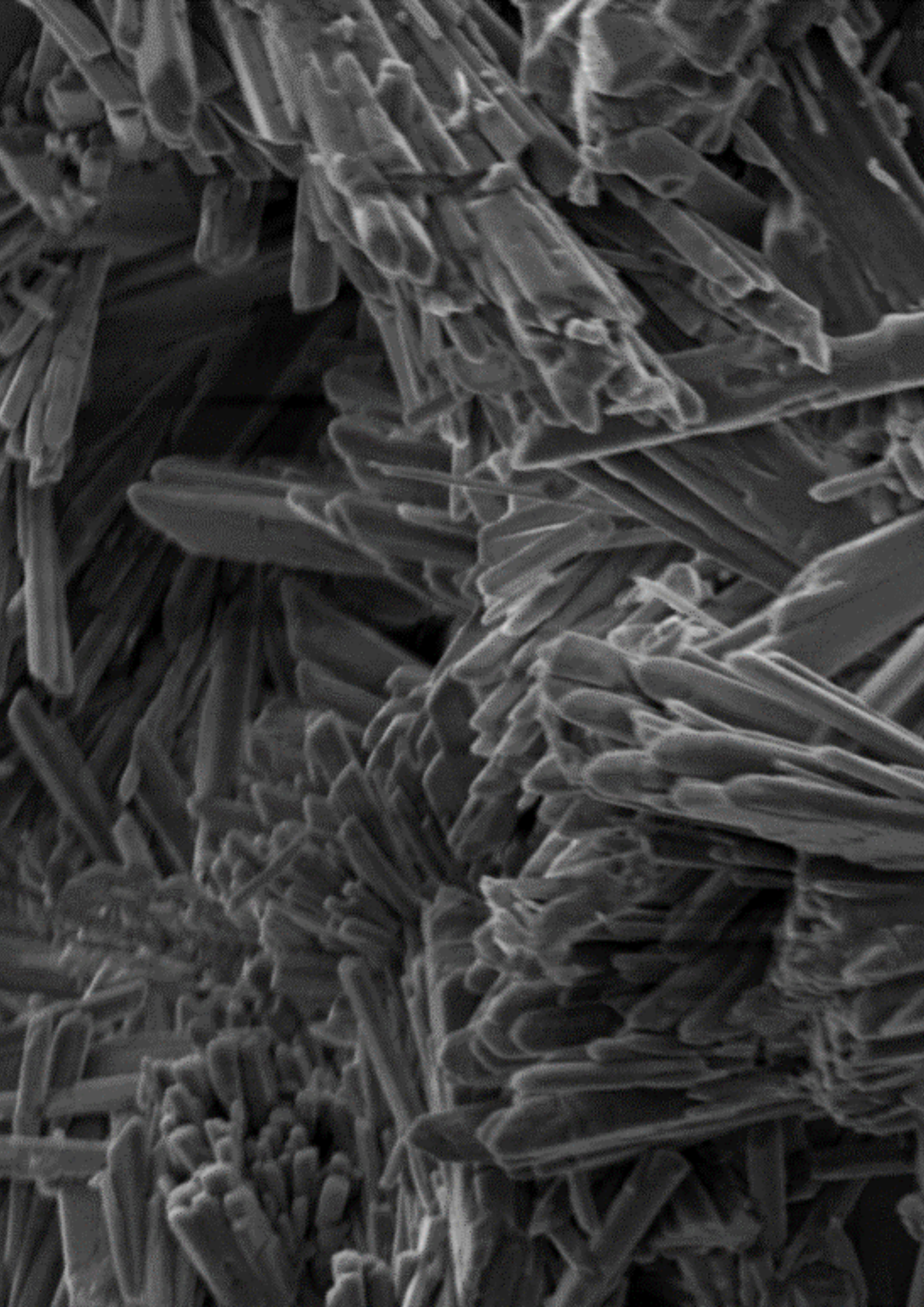
Les deux typologies ont connu des changements de pratiques avec la volonté d'améliorer les méthodes de restauration des lacunes, tout en prenant en compte les nombreux paramètres évoqués qui doivent satisfaire les exigences déontologiques. Un décalage de chronologies est toutefois observable entre les deux typologies, le domaine de la statuaire ayant été patrimonialisé plus tôt que celui des cadres, il a bénéficié de réflexions et d'études antérieurement et donc les gammes de méthodes et de matériaux semblent plus abouties actuellement. La classification des artefacts joue aussi un certain rôle : la restauration des cadres peut être effectuée par des artisan·nes de la dorure ainsi que des conservateur·rices-restaurateur·rices, diplômé·es d'État, qui n'ont pas toujours les mêmes formations et les mêmes expériences. Enfin, les pratiques poursuivent une certaine évolution, les besoins étant sans cesse questionnés, il n'est pas improbable de constater des changements techniques dans les prochaines années alors qu'un nouveau matériau aura été testé et aura prouvé ses qualités et son intérêt dans les conditions recherchées.

Matériaux et applications	Époques	Raisons	Collections	Références
Plâtre seul	Antérieurs aux années 80 - actuellement	Adéquation des substrats, pratiques « traditionnelles », compatibilité, différenciation des substrats.	Statuaire et cadres	Observations des professionnel-le-s, réponses à l'enquête Publication Johnson 2017 Dossiers C2RMF 62082 et FZ26356
« Gros blanc » (colle de peau de lapin + carbonate de calcium)	Antérieurs aux années 80 - actuellement	Adéquation des substrats, pratiques « traditionnelles », compatibilité, différenciation des substrats.	Cadres	Observations des professionnel-le-s, réponses à l'enquête Dossiers FZ34158, FZ36405 FZ36408 Publications Greco 2012, Gicquel et Salmon 1997, Lauwick et Février 2009
« Composition » ou « pâte »	Antérieurs aux années 80 - actuellement	Adéquation des substrats, pratiques « traditionnelles », compatibilité.	Cadres	Observations des professionnel-le-s, réponses à l'enquête Publication Searle 2016.
Plâtre et carbonate de calcium	À partir des années 80 (?)	Adéquation des substrats, différenciation des substrats originaux et de restauration, dureté et résistance inférieures.	Statuaire	Réponses à l'enquête
Polyfilla® seul *En mélange avec du plâtre	À partir des années 80	Commodité, accessibilité du produit, différenciation des substrats.	Statuaire	Réponses à l'enquête Mémoire Pieri 2010 Dossiers FZ26536, C2RMF61275 et C2RMF61276, C2RMF61229 *FZ36823, C2RMF 60691
Modostuc®	À partir des années 80	Commodité, accessibilité du produit, se retravaille facilement, dureté et résistance inférieures, différenciation des substrats.	Statuaire	Réponses à l'enquête Mémoire Klarer 1997 Dossier C2RMF 64334
Résine époxy modelable Araldite® (type Renpaste HV/SV 36 ou 427)	À partir des années 80	Commodité, différenciation des substrats.	Cadres	Discussions avec les professionnel-le-s, réponses à l'enquête Dossiers FZ36406, FZ36407, FZ36408 Lauwick et Février 2009
Cires	À partir des années 80	Commodité et bons résultats esthétiques – bouches et retouches en même temps).	Cadres	Discussions avec les professionnel-le-s Dossiers FZ36405 et FZ36408
Ajouts de pigments, poudres de pierre, microbilles de verre ou autres charges, liants (acryliques, vinyliques...)	À partir des années 80 / 2000 (?)	Personnalisation des produits et adaptations aux contraintes spécifiques des œuvres, différenciation des substrats.	Statuaire et cadres	Discussions avec les professionnel-le-s, réponses à l'enquête Mémoire Nicolas 2001 Publication Powell, Mallinson, Allen 2001.
Ajouts de charges radio-opaques	À partir des années 2000	Différenciation des substrats.	Cadres	Réponse à l'enquête Publications Behrooz 2002 et 2005, Lopez 2016, Spini 2017, Powell, Mallinson, Allen 2001.

Tableau 9 : tableau récapitulatif des matériaux de comblements et de restitution utilisés au fil du temps en restauration de cadres et de statuaire en plâtre.

Synthèse

La conservation-restauration des artefacts muséaux en plâtre est bien représentée à travers les deux typologies étudiées : les statues de la gypsothèque et les cadres du XIX^e siècle du musée du Louvre. Produits par la même technique du moulage, les artefacts présentent des altérations de la structure et de la surface, spécifiques au matériau. Le matériau étant fragile et réactif sous certaines conditions, il est très fréquent de constater des pertes de matières de dimensions plus ou moins importantes qui nécessitent dans la plupart des cas de procéder au comblement. Ceci permet d'éviter l'aggravement de l'altération et de prévenir les cassures, les pertes de fragments, ou encore les dépôts de poussières ou de salissures. Ces typologies d'artefacts ont connu des changements de statuts au fil des siècles et un processus de patrimonialisation plus ancien pour la statuaire que pour les cadres. Le rôle d'objets fonctionnels et d'étude, la mise en œuvre par la technique du moulage permettant la reproduction et le multiple, les matériaux considérés comme non nobles, sont les principaux éléments ayant conditionné l'absence de considération en tant qu'artefacts patrimoniaux nécessitant des soins et une véritable préservation. Pour mieux connaître les matériaux de comblement, des sources comprenant des références bibliographiques et des archives de conservation-restauration telles que les dossiers ou les fiches d'interventions ont été consultées. Relativement récentes et peu nombreuses, elles doivent être complétées par d'autres moyens. L'observation d'une sélection d'artefacts au sein des deux collections du musée du Louvre et l'évaluation des différents types de comblements ont permis de compléter les données en inspectant directement les artefacts comme lors d'études techniques ou de constats d'état. Ces processus, familiers en conservation-restauration, permettent d'estimer les méthodes et les matériaux sur des périodes chronologiques plus vastes. Une enquête transmise aux professionnel·les des deux spécialités a également fourni des informations précieuses sur les méthodes actuelles et la justification des choix. La synthèse de ces approches a permis de dresser un historique des interventions de comblement. Les artefacts ont d'abord été « réparés », avant d'être « restaurés » à partir des années 1980 pour la statuaire, et des années 2000 pour les cadres. Les considérations déontologiques ont été appliquées à ces typologies suivant les théories appliquées aux spécialités patrimonialisées et valorisées depuis plus longtemps, comme la peinture ou la sculpture. Ainsi les méthodes de traitement ont évolué et connu différentes phases, synthétisées dans ces travaux en trois périodes : celle antérieure aux années 1980, celle de 1980 à 2000 et celle à partir des années 2000. La première phase comprend l'usage de matériaux de comblement identiques aux matériaux originaux, la deuxième correspond à une recherche de différenciation physique et chimique avec l'expérimentation de matériaux variés, et la troisième fait la synthèse des deux premières périodes, en réutilisant les matériaux identiques aux originaux et en y associant des éléments de différenciation. Avec l'association d'un liant à une ou deux charges, ces tendances techniques de traitement des lacunes sont donc plutôt simples et ont souvent le même objectif d'assurer la bonne compatibilité physico-chimique et esthétique, en répondant également à d'autres critères plus singuliers comme limiter les interactions en cas de présence de renforts métalliques ou organiques (bois, fibres végétales). Cependant, tous les traitements de conservation-restauration sont adaptés aux problématiques spécifiques de chaque artefact et des contextes d'intervention, ainsi, des particularités coexistent avec les grandes lignes développées ici. Les méthodes et matériaux ayant été précisés, il convient désormais de procéder à la caractérisation des formulations à différentes échelles en s'appuyant sur le plâtre comme matériau de référence, de façon à mieux en connaître les spécificités techniques.



Chapitre II

Matériaux et caractérisations
physico-chimiques à l'échelle
microscopique

Sommaire

Après avoir constaté les évolutions matérielles des comblements au fil du temps dans le chapitre précédent, les matériaux retenus et étudiés sont présentés, en concentrant le propos sur le plâtre : matériau original et de restauration. Les caractéristiques techniques ainsi que physico-chimiques sont décrites en faisant état des connaissances actuelles. Les méthodes d'étude et d'analyses sont détaillées. Les observations à l'échelle microscopique permettent une meilleure connaissance des matériaux grâce aux critères d'identification et aux analyses élémentaires.

I.

Matériaux de l'étude

p. 103

1. Présentation

p. 103

a. Sélection p. 103

b. Critères p. 105

2. État de l'art

p. 106

a. Plâtre p. 106

b. Autres matériaux p. 108

II.

Caractéristiques et descriptions techniques

p. 114

1. Fabrication et production

p. 114

a. Nature, phases p. 114

b. Cuisson et battage p. 118

c. Gâchage et cristallisation p. 119

2. Descriptions structurelles

p. 122

a. Réseau cristallin p. 122

b. Liaisons chimiques p. 126

c. Porosité p. 127

3. Caractéristiques des additifs et autres matériaux	p. 128	2. Résultats de l'étude en microscopie	p. 136
a. Carbonate de calcium	p. 128	a. État brut	p. 136
b. Dioxyde de titane	p. 130	b. Formulations pures	p. 140
c. Craie de Bologne	p. 131	c. Formulations à charges différenciables	p. 144
d. Colle animale	p. 132	3. Résultats des analyses EDS	p. 148
III.			
Caractérisations physico-chimiques	p. 134	Analyse d'un cadre du XVIII ^e siècle	p. 153
1. Méthode	p. 134	Synthèse	p. 157
a. Matériaux et formulations	p. 134		
b. Microscope optique	p. 135		
c. Microscope électronique à balayage	p. 135		
d. Analyse élémentaire	p. 136		

I. Matériaux de l'étude

1. Présentation

a. Sélection

Les matériaux de l'étude ont été sélectionnés à partir des recherches, des documents bibliographiques et des sources variées, telles que l'enquête et les échanges avec les professionnel·les¹. Le plâtre, matériau de référence de ces travaux, est testé à différents états : brut ou préparé, et seul ou en mélange avec des additifs (Tabl. 1 et 2). Les principales caractéristiques techniques des différentes formulations sont ainsi étudiées et comparées.

Le plâtre Molda® 3 Normal, un hémihydrate β du producteur et fournisseur Saint-Gobain (Placo® ou Formula®), a été retenu comme plâtre principal, étant couramment cité par les professionnel·les du patrimoine en raison de sa disponibilité sur le marché et de ses qualités esthétiques et techniques comme la finesse, la blancheur, l'homogénéité, ou encore son temps de prise confortable et sa polyvalence. Selon les essais de rhéologie ou de mécanique à l'état solide, présentés aux chapitres suivants, un à deux autres plâtres ont été testés afin de mettre en parallèle les comportements physico-chimiques et mécaniques. Un second hémihydrate β a été sélectionné et examiné dans les parties microscopie et mécanique, à l'état fluide et solide, pour comparaison. Plus souvent employé dans les applications du génie civil, le plâtre Ibérica de la marque EXTHA® a été retenu. Un troisième plâtre, cette fois-ci un hémihydrate α , FG100, de la marque Knauf® a été ajouté à l'étude. Obtenu par un mode de cuisson différent, il bénéficie de propriétés mécaniques spécifiques, comme une grande dureté et une résistance mécanique élevée.

Deux additifs ont été ajoutés au plâtre Molda® 3 Normal : du carbonate de calcium et du dioxyde de titane, appelé blanc de titane, tous deux fournis par Kremer®. Le carbonate de calcium est constitué de calcite, dont la provenance n'est pas connue. Une granulométrie fine a été choisie pour les travaux, avec une moyenne de taille de grain de 1 μm . Le blanc de titane est issu du rutile, une espèce minérale stable². Il est indiqué comme pur dioxyde de titane, TiO_2 , contenant un minimum de 89 % en masse de titane, 3,3 % d'alumine et 5,5 % de silice. La taille moyenne des particules est de 0,5 μm . Ces matériaux ont fréquemment été cités par les professionnel·les ayant répondu à l'enquête et leurs usages ont également été confirmés par des sources bibliographiques, présentées au chapitre I. Dans ce chapitre, les observations et les analyses à la micro-échelle ont pour but de permettre l'identification visuelle et analytique de ces matériaux, utilisés comme charges de distinction ou de différenciation pour les matériaux de comblements non originaux.

¹ L'enquête présentée au chapitre I, a été transmise par mail et par le biais d'un formulaire en ligne. Durant la totalité des travaux doctoraux. Des rencontres ont pu être établies avec des professionnel·les, dans les musées ou dans les ateliers Dorure et Sculpture du C2RMF, au cours desquelles des informations techniques ont pu être échangées et transmises.

² Le rutile est une des espèces minérales de TiO_2 avec l'anatase, la brookite et l'ilménite.

Enfin, une dernière formulation a été ajoutée à l'étude afin de tester un mélange similaire aux matériaux traditionnels de type gros blanc utilisés pour les cadres³. Constituée naturellement de sulfate de calcium (95 à 100 % d'après la fiche de données de sécurité, mais environ 40 % selon la fiche technique) et de carbonate de calcium et autres minéraux, la craie de Bologne liée à la colle animale⁴ fournis par Kremer®, a été étudiée à la micro-échelle à l'état solide et sous forme d'apprêt fluide. La granulométrie moyenne est de 50 à 60 µm, en qualité dite « légère », soit deux fois plus fines qu'en qualité normale.

Matériau	Fournisseur	Formule	Caractéristique
Molda® 3 Normal	Placo® – Saint-Gobain®	CaSO ₄ · ½ H ₂ O	Hémihydrate β, 91 % de pureté minimale
Ibérica	EXTHA®	CaSO ₄ · ½ H ₂ O	Hémihydrate β
FG 100	Knauf®	CaSO ₄ · ½ H ₂ O	Hémihydrate α
Carbonate de calcium	Kremer®	CaCO ₃	Issu de la calcite, moyenne de taille de grain de 1 µm
Dioxyde de titane		TiO ₂	Constitué de 89 % de titane, 3,3 % d'alumine et 5,5 % de silice ; moyenne de taille de grain de 0,5 µm
Craie de Bologne		CaSO ₄ · nH ₂ O*	FDS : 95 à 100 % de CaSO ₄ FT : 48,37 % de CaCO ₃ , de 16,98 % de CaO, de 23,45 % de SO ₃ , de 0,86 % de SiO ₂ , de 0,34 % de Al ₂ O ₃ , de 0,12 % de Fe ₂ O ₃ , de 1,07 % de MgO, de 0,90 % de bentonite et de 7,91 % d'eau ; moyenne de taille de grain de 50 à 60 µm
Colle de peau de lapin		/	Colle animale en granulés

Tableau 1 : matériaux étudiés et leurs caractéristiques.

* Le sulfate de calcium contenu naturellement dans la craie de Bologne n'est pas déshydraté par processus de cuisson comme le plâtre. Il est donc indiqué « nH₂O », car son degré d'hydratation n'est pas connu. Toutefois, à l'état naturel, le matériau est considéré comme partiellement ou totalement hydraté.

Les fiches techniques des matériaux sont consultables en annexe II, p. 504.

³ Cette formulation a été développée plus tardivement dans ces travaux, de façon à étudier un matériau apparenté au mélange de carbonate de calcium et de colle animale, principalement utilisés pour les traitements des artefacts dorés. Les formulations traditionnelles françaises, telles que l'apprêt et le gros blanc, sont décrites dans la note sur l'atelier de pratique réalisé avec Stéphanie Courtier, au chapitre I, p. 48. La craie de Bologne, contenant naturellement du sulfate de calcium, peut être mise en lien avec les matériaux utilisés dans certaines zones géographiques telles que l'Espagne et l'Italie, où le *gesso* est traditionnellement utilisé et mis en œuvre à partir du gypse.

⁴ La colle est vendue comme étant de peau de lapin, mais des analyses menées dans une étude par Bridarolli sur ce même produit ont confirmé qu'il s'agit d'une colle de mammifère, sans pouvoir en préciser l'origine ; BRIDAROLLI Alexandra, et al., « Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity », *Journal of Cultural Heritage*, 53 (2022), p. 226-235.

Formulation	Préparation
Plâtre : Molda® 3 Normal, EXTHA Ibérica® et Knauf®, selon essais	Taux de gâchage hémihydrate β : E/P = 0,45 à 1,05 Taux de gâchage hémihydrate α : E/P = 0,3 à 0,5
Plâtre : Molda® 3 Normal + carbonate de calcium	Taux de gâchage E/P = 0,7 ; 0,9 ; 1,05 + ratio plâtre- CaCO ₃ 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5
Plâtre : Molda® 3 Normal + carbonate de calcium + dioxyde de titane	Taux de gâchage E/P = 1,5 + ratio plâtre-CaCO ₃ 1-2 + 2 % en masse de TiO ₂ (en addition) <i>n.b. : des formulations additionnelles à E/P = 0,7 ; 0,9 ; 1,1 ; à ratio plâtre-CaCO₃ 1-1 et à 2 % de TiO₂ (en substitution) ont été testées en fin de travaux pour compléter les données de résistance mécanique solide en compression et ne figurent donc pas dans le plan d'expérience général.</i>
Craie de Bologne + colle animale	En pâte : mélange à ratio colle-poudre 1-3 (volume) En apprêt : mélange à colle-eau-poudre 1-1-2 (volume) <i>Colle préparée à 15 % en masse</i>
Craie de Bologne + colle animale + dioxyde de titane	En pâte : mélange à ratio colle-poudre 1-3 (volume) à 2 % de TiO ₂ (en substitution) En apprêt : mélange à colle-eau-poudre 1-1-2 (volume) à 2 % de TiO ₂ (en substitution) <i>Colle préparée à 15 % en masse</i>

Tableau 2 : formulations de l'étude et détails des préparations.

b. Critères

Les formulations remplissent les critères nécessaires pour les interventions de comblement. Les formulations de plâtre et additifs peuvent être mises en œuvre selon les deux techniques : par coulée ou par modelage ; les formulations de craie de Bologne peuvent être préparées en pâte comme du gros blanc, ou liquide comme de l'apprêt. Ces matériaux semblent respecter les critères déontologiques tels que la compatibilité et l'innocuité, la stabilité, la possibilité de réintervenir ou la « réversibilité », en raison des propriétés physico-chimiques et mécaniques *a priori* similaires. Avec une durée de préparation convenable et une ouvrabilité satisfaisante offrant une plage d'intervention de plusieurs dizaines de minutes à l'état frais, ces formulations peuvent être mises en œuvre facilement en atelier ou sur site de chantier. De plus, les matériaux ont des coûts bas et ils sont facilement accessibles dans le commerce. Ils ne présentent pas de danger particulier pour l'environnement ou le professionnel.

2. État de l'art

a. Plâtre

Les mentions du plâtre dans les traités anciens sont relativement rares et limitées. Dans le chapitre III du livre VII de Vitruve, le matériau *gypsum* est cité dans des descriptions de mortiers ou d'enduits⁵ destinés à l'architecture et à la construction. Cennini dans son traité sur les arts, considérant plus particulièrement la peinture, décrit les procédés de préparation des panneaux de bois polychromés, avec ou sans relief, qui rappellent très fortement les techniques de préparation des cadres encore utilisées actuellement. La technique présentée est spécifique à la région italienne, avec l'usage du *gesso*⁶, composé de sulfate de calcium hydraté et non réactif, traduit dans les versions françaises du traité par *plâtre*⁷. Les premiers travaux de recherche sur le plâtre sont ceux de Lavoisier à partir de 1765, notamment sur la déshydratation du gypse⁸, ouvrant la voie aux publications techniques sur le sulfate de calcium à partir du XIX^e siècle. La nature du plâtre, sa composition, ses procédés de fabrication, ses caractéristiques principales, ainsi que ses usages, sont décrits dans des traités sur le moulage⁹, ou sur la construction¹⁰. Les publications sur le plâtre dans le bâti ou en architecture sont les plus fréquentes, avec une précision des sujets et des thématiques au fil des années.

En 1977, une publication de la RILEM entièrement dédiée au matériau et à ses additifs considère les données géologiques, les aspects structurels et les propriétés physico-chimiques, ainsi que les aspects mécaniques à l'état fluide et solide¹¹. Certaines problématiques ou caractéristiques sont examinées, comme le phénomène de prise, la résistance au feu, le rôle des additifs, ou encore la corrosion des alliages ferreux au contact du plâtre. À la même période, des synthèses techniques sont publiées et mettent en relation les aspects historiques, physico-chimiques et techniques, pour faire un état des connaissances sur le matériau, telles que l'ouvrage de Guy Benhamou¹², publié en 1981 et fréquemment cité dans les références bibliographiques des travaux de conservation-restauration, ainsi que l'ouvrage de Jean Festa¹³, plus tardif. Traitant de thématiques variées et spécifiques, d'autres travaux sont développés et enrichissent les connaissances sur le matériau. Par exemple, l'étude de Karmazsin et Murat datée de 1978¹⁴ démontre que le mécanisme de prise débute dès les premiers instants de l'hydratation, en cristallisant continuellement jusqu'à la transformation totale des cristaux d'hémihydrate.

⁵ VITRUVÉ, *L'architecture*, Paris, C.L.F. Panckoucke, 1847, volume 2.

⁶ CENNINI Cennino, *Il Libro dell'arte*, Florence, Felice Le Monnier, 1859.

⁷ CENNINI Cennino, *Traité de la peinture*, Paris, Renouard, 1858.

⁸ LAVOISIER Antoine-Laurent, « Analyse du gypse », dans *Mémoire de mathématique et de physique*, vol. 5, Paris, Imprimerie Royale, 1768, p. 341-357.

⁹ MAGNIER M.-Désiré et LEBRUN, *Nouveau manuel complet du mouleur...*, Paris, Roret, 1850.

¹⁰ BISTON Valentin, *Manuel théorique et pratique du chaudronnier : contenant l'art de calciner la pierre à chaux et à plâtre, de composer toutes sortes de mortiers ordinaires et hydrauliques, cimens...*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1836 ; Compagnons du devoir et du tour de France (éd.), *La plâtrerie, le staff et le stuc*, Paris, Librairie du Compagnonnage (Encyclopédie des métiers), 1994, 2 vol.

¹¹ MURAT Michel et FOUCAULT Michel (éd.), *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions], Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977*, RILEM Publications, 1977.

¹² BENHAMOU Guy, *Le Plâtre*, Paris, J.B. Baillièrre, 1981.

¹³ FESTA Jean, *Techniques et pratique du plâtre : applications traditionnelles et modernes*, Paris, Eyrolles, 1998 [1995].

¹⁴ KARMAZSIN Etienne et MURAT Michel, « Study of a "solid + liquid → solid" reaction (hydration of calcium sulfate hemihydrate) by simultaneous isothermal calorimetry and electrical resistivity measurement », *Cement and Concrete Research*, 8 / 5 (1978), p. 553-557.

Les travaux de Coquard¹⁵ en 1992 et 1994 sur les propriétés du matériau à l'état solide établissent un lien fonctionnel reliant les modules d'élasticité et la porosité. Dans les années 2000-2010, un regain d'intérêt dans l'industrie conduit à de nouvelles recherches. Certains travaux évaluent les propriétés de résistance au feu¹⁶, le comportement à l'humidité¹⁷, ou encore l'interaction avec des matériaux fibreux¹⁸, indiquant, de nouveau, la richesse technique du plâtre ainsi que la variété de sujets à approfondir. Dans les travaux de thèse de Meille¹⁹, le comportement mécanique est évalué en fonction de la microstructure, mettant en avant les types de liaisons existantes au sein des substrats, ou encore les effets de la porosité comme sites de rupture mécanique. La formation du gypse et les différentes étapes de la cristallisation sont étudiées depuis la fin du XIX^e siècle selon différents paramètres, offrant alors plusieurs théories aux étapes plus ou moins complexes. Plus récemment, un modèle « universel » a été proposé par Van Driessche²⁰, en compilant toutes les recherches et les données sur le sujet. L'eau, la température de la solution, la salinité globale, ainsi que la qualité des hémihydrates sont des paramètres essentiels à la formation du gypse et conditionnent la qualité des cristaux hydratés²¹.

Plusieurs travaux s'intéressent dès la fin des années 1970 aux matériaux des constructions patrimoniales et au plâtre²². Les problématiques s'affinent au fil des années, avec des thématiques centrées sur les mortiers, les enduits, ainsi que les éléments de décors de type moulure fabriquée en « stuc » et en « staff » à partir de formulation de sulfate de calcium. Plus récemment, les phénomènes d'altération et les procédés de conservation des bâtis anciens ont également été étudiés²³, ainsi que les compositions et la micro-structure²⁴.

¹⁵ COQUARD Philippe, *Résistance mécanique des plâtres secs et humides*, Thèse de doctorat, Aix-Marseille 3, 1992; COQUARD Philippe, *et al.*, « Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster », *Journal of Materials Science*, vol. 29 / 17 (1994), p. 4611-4617.

¹⁶ ROJO Amandine, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2013.

¹⁷ MARTIAS Céline, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, Thèse de doctorat, Université de Toulon, 2011.

¹⁸ BETENE EBANDA Fabien, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand 2, 2012.

¹⁹ MEILLE Sylvain, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2001.

²⁰ VAN DRIESSCHE Alexander E. S., *et al.*, « Calcium sulfate precipitation pathways in natural and engineered environments », *Chemical Geology*, 530, (2019), p.1-22.

²¹ OSSORIO Mercedes, *et al.*, « The growth morphology of gypsum crystals: an experimental study », *Acta Crystallographica Section A Foundations of Crystallography*, vol. 67 C462 (2011).

²² SAYRE Edward V., « Deterioration and restoration of plaster, concrete and mortar. », dans *Preservation and conservation: principles and practices. Proceedings of the North American International Regional Conference, Williamsburg, September 10-16 1972*, Washington, The Preservation Press, 1976, p. 191-201; TORRACA Giorgio, *Porous Building Materials: Materials Science for Architectural Conservators*, Rome, ICCROM, 1988 [1981]; ICOM, *Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments: international colloquium, Rome, 19-21 June 1995; preprints*, Rome, ICCROM, 1995.

²³ ROSATO Luisa, *et al.*, « Study and evaluation of nano-structured cellulose fibers as additive for restoration of historical mortars and plasters », *Materials Today: Proceedings*, 4 / 7 (2017), p. 6954-6965; FREIRE Maria Teresa, *et al.*, « Studies in ancient gypsum-based plasters towards their repair: Physical and mechanical properties », *Construction and Building Materials*, 202 (2019), p. 319-331.

²⁴ FREIRE Maria Teresa, *et al.*, « Studies in ancient gypsum-based plasters towards their repair: Mineralogy and microstructure », *Construction and Building Materials*, 196 (2019), p. 512-529; DUCASSE-LAPEYRUSSE Jean et VERGÈS-BELMIN Véronique, « Traditional gypsum renders in the Paris area: focus on a particular typology », *Materials and Structures*, 54 / 2 (2021), p.1-15.

Les études menées entre 2010 et 2013 au Pays-Bas, mentionnées au chapitre I, ont permis d'approcher le plâtre sous différents angles. Dans l'étude de 2011²⁵, des liens et des filiations étaient recherchés entre les compositions de statues conservées dans différentes collections européennes telles que Berlin, Rome, Londres et Paris, grâce à l'analyse des éléments traces comme le strontium, et l'observation de la microstructure et des traitements de surface. Il n'a pas été possible de relier les différents artefacts en raison des grandes différences de structures et de composition en éléments secondaires, à part deux groupes d'artefacts conservés à Berlin qui présentaient des caractéristiques similaires. Dans la seconde étude, plus conservatoire, il a été constaté qu'une série d'adhésifs, couramment employés pour la réalisation de collages et appliqués avec une pré-consolidation par imprégnation, pouvait avoir une résistance à la rupture équivalente à celle du plâtre, permettant ainsi des interventions structurelles robustes²⁶.

Enfin, des sujets transversaux considérant le sulfate de calcium dans d'autres typologies d'artefacts sont également des sources d'informations sur les caractérisations chimiques et micro-structurelles. Par exemple, les travaux de Gariani²⁷, sur un ensemble de reliefs italiens dits *Vierge à l'Enfant* en stuc, ont établi que le matériau de composition est constitué de sulfate de calcium en phase hydratée, présentant une microstructure très dense similaire à celle d'un plâtre ayant fait prise. Cela pourrait indiquer un apport minimal de liant organique tel que la colle utilisée dans les techniques de stucs traditionnels. L'analyse des éléments traces et, notamment, l'identification du strontium²⁸, peut aider à identifier les provenances géographiques, les centres de production du matériau brut ou les ateliers de création. Ainsi dans cette étude, il a été estimé que le plâtre et les ateliers pouvaient être de la région de Florence.

b. Autres matériaux

Carbonate de calcium

Les carbonates, dont le carbonate de calcium, représentent les matériaux les plus fréquemment rencontrés à la surface de la Terre, sous des formes variées (roches, coquilles, squelettes). La diagénèse²⁹, la formation cristalline, les différentes phases minérales ainsi que le comportement de précipitation observé dans les phases aqueuses ont été étudiés dès le XIX^e siècle, de façon à exploiter les propriétés physico-chimiques du matériau mais aussi afin d'améliorer les connaissances, notamment sur la formation naturelle des différentes phases hydratées ainsi que sur leurs cristallisations³⁰.

²⁵ MEGENS Luc, *et al.*, « The composition of plaster casts », dans *ICOM-CC Glass and Ceramics working group, 16th Triennial ICOM-CC Conference (19-23 September 2011, Lisbon, Portugal): preprints*, Almada, Critério, 2011, p. 1-9.

²⁶ BEEMEN Roosmarijn van, *et al.*, « Suitable Bonding Methods for the Conservation of Large Broken Plaster Casts of Ancient Sculptures », dans LOOKEREN CAMPAGNE Kate van, et ROEMICH Hannelore (éd.), *Recent advances in glass, stained-glass, and ceramics conservation 2013*, Zwolle, SPA Uitgevers, 2013, p. 77-85.

²⁷ GARIANI Gianluca, *et al.*, « First insights on the mineral composition of "stucco" devotional reliefs from Italian Renaissance Masters: investigating technological practices and raw material sourcing », *Journal of Cultural Heritage*, 34 (2018), p. 23-32.

²⁸ *Ibid.*, p. 31.

²⁹ La diagénèse est définie comme une série de processus permettant la transformation des sédiments en roche sédimentaire.

³⁰ BROOKS R., *et al.*, « Calcium carbonate and its hydrates », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243 / 861 (1950), p. 145-167.

L'importante publication en deux volumes de Milliman, Müller et Förstner³¹, datée de 1974, présente la collecte de plusieurs décennies de recherches sur les carbonates marins et non-marins de l'Holocène³².

Le carbonate de calcium est un matériau à la polyvalence de formes et d'utilisation, couramment étudié dans les domaines scientifiques, comme en biologie³³, en génie civil, ainsi qu'en science des matériaux, ou encore en patrimoine et en conservation-restauration. Les spécialités sont donc variées comptant le patrimoine bâti avec les enduits et les mortiers de chaux³⁴, ou encore la peinture et notamment l'étude des couches de préparations et des pigments³⁵. Le matériau est bien généralement associé au domaine de la statuaire souvent composée de matériaux à phase de calcium carbonaté comme les pierres calcaires, les marbres, et certaines formulations de stuc.

L'appellation « blanc de Meudon » sert souvent à mentionner le carbonate de calcium, comme dans certains ouvrages du XIX^e siècle tel le *Dictionnaire du commerce et des marchandises*³⁶ ou le *Dictionnaire raisonné d'architecture et des sciences et des arts*³⁷, qui décrivent le matériau, les procédés de préparation et ses usages divers.

Le rôle de l'ajout de carbonate de calcium dans des matrices de plâtre ne semble pas étudié dans le domaine patrimonial mais il est étudié en cristallographie et en chimie³⁸, et bien que les conditions de tests soient différentes des protocoles expérimentaux développés ici, les résultats de ces études permettent d'obtenir des informations très spécifiques sur les matériaux et leurs associations.

Il semblerait que la présence de carbonates provoque un ralentissement de la précipitation du sulfate de calcium³⁹. Un « effet coopératif » entre les deux composés est décrit par Pastero⁴⁰, qui met en évidence le rôle du carbonate de calcium, agissant comme substrat à la nucléation et à la germination du sulfate de calcium, mais aussi comme modificateur de la formation cristalline.

³¹ MILLIMAN John D., *et al.*, *Recent Sedimentary Carbonates*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1974, 2 vol.

³² L'Holocène est une période géologique en cours depuis environ 10 000 à 12 000 ans.

³³ GASPARD Danièle, « Les Brachiopodes de la craie blanche de Meudon (Campanien supérieur) de la collection d'Orbigny (MNHN, Paris) », *Comptes Rendus Palevol*, 1 / 7 (2002), p. 573-585.

³⁴ LORS Christine, *et al.*, « Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars », *Construction and Building Materials*, 141 (2017), p. 461-469.

³⁵ VIGUERIE Laurence de, *et al.*, « Re-Interpretation of Old Master practices through optical and rheological investigation: the presence of calcite », *Comptes Rendus. Physique*, (2018).

³⁶ GUILLAUMIN Gilbert-Urbain (dir.), *Dictionnaire du commerce et des marchandises, contenant tout ce qui concerne le commerce de terre et de mer*, Paris, Guillaumin & Cie., 1837, 2 vol., p. 287 et 477.

³⁷ BOSCH Ernest, *Dictionnaire raisonné d'architecture et des sciences et arts qui s'y rattachent*, Paris, Firmin-Didot, 1877, volume 1, p.253.

³⁸ ZARGA Yosra, *et al.*, « Study of calcium carbonate and sulfate co-precipitation », *Chemical Engineering Science*, 96 (2013), p. 33-41; PETROU Athinoula L. et TERZIDAKI Athina, « Calcium carbonate and calcium sulfate precipitation, crystallization and dissolution: Evidence for the activated steps and the mechanisms from the enthalpy and entropy of activation values », *Chemical Geology*, 381 (2014), p. 144-153.

³⁹ ZARGA Yosra, *et al.*, « Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Simple and Mixed Precipitations », *Journal of New Sciences*, 8 (2) (2014), p. 7-16.

⁴⁰ PASTERO Linda, *et al.*, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », *CrystEngComm*, 19 / 26 (2017), p. 1-21.

Diverses publications présentent les propriétés mécaniques du ciment modifiées par l'addition de carbonate de calcium sous différentes formes telles que la chaux⁴¹, des carbonates de calcium produits ou synthétisés à l'échelle micro- et nanométrique⁴², pour des usages dans la construction avec plus récemment la recherche de bénéfices écologiques et de baisses de l'impact carbone. Par comparaison des profils de comportements mécaniques, ces références peuvent fournir des données exploitables ou applicables au sujet présent, malgré les différences chimiques existantes entre le plâtre et le ciment.

Dioxyde de titane

Le dioxyde de titane est utilisé dans une large gamme d'industries : alimentaire, cosmétique⁴³, et peinture, pour laquelle il est employé comme pigment blanc intense et couvrant⁴⁴. Il est analysé dans les domaines de la construction, où il est bien souvent employé à l'état de nanoparticules pour des applications de surfaces autonettoyantes ou dépolluantes en raison de ses propriétés photocatalytiques⁴⁵. Par exemple, la publication de Lucas⁴⁶ étudie la relation entre les changements micro-structurels dans des formulations minérales telles que du ciment, de la chaux, du plâtre et du dioxyde de titane, et les effets photocatalytiques, en considérant les effets sur les propriétés mécaniques. L'addition de nanoparticules de dioxyde de titane, dès 0,5 % massique, provoque une modification de la microstructure et un accroissement de la porosité du mortier de plâtre. Les propriétés dépolluantes sont alors améliorées, notamment par la capacité du matériau à absorber les particules, mais cela provoque également une baisse de résistance mécanique.

L'influence des nanoparticules de dioxyde de titane et de silice sur la rhéologie et les propriétés mécaniques solides de mortier de ciment sont publiées par Senff en 2012⁴⁷, puis en 2018⁴⁸. Ces travaux, présentés plus en détail aux chapitres III et IV, identifient des comportements spécifiquement liés aux matrices hydrauliques comme le plâtre, en concentrant la recherche sur l'impact des nanoparticules dans un mortier de plâtre chargé de fibres de cellulose.

⁴¹ MATSCHEI Thomas, *et al.*, « The role of calcium carbonate in cement hydration », *Cement and Concrete Research*, 37 / 4 (2007), p. 551-558.

⁴² MCDONALD Lewis J., *et al.*, « The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material », *Journal of Cleaner Production*, 338 (2022), p. 1-12.

⁴³ Depuis 2021, son usage est restreint en raison de soupçon de toxicité, surtout lorsqu'il est à l'état de nanoparticules et lorsqu'il est ingéré ou inhalé. Il est désormais interdit en tant qu'additif alimentaire E171 par la Commission Européenne.

⁴⁴ PEREGO François, *Dictionnaire des matériaux du peintre*, Paris, Belin, 2005, p. 101.

⁴⁵ La photocatalyse est définie comme l'accélération d'une photo-réaction par l'activation d'un catalyseur. Bien souvent, il s'agit d'une réaction d'oxydation.

⁴⁶ LUCAS Sandra S., *et al.*, « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », *Cement and Concrete Research*, 43 (2013), p. 112-120.

⁴⁷ SENFF Luciano, *et al.*, « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *Materials Science and Engineering: A*, 532 (2012), p. 354-361.

⁴⁸ SENFF Luciano, *et al.*, « Development of multifunctional plaster using nano-TiO₂ and distinct particle size cellulose fibers », *Energy and Buildings*, 158 (2018), p. 721-735.

Le dioxyde de titane a servi à la création d'un « blanc marqué », présenté au chapitre I, en parallèle du projet Aliénor mené par le C2RMF et le fabricant Dauvet pour la mise en œuvre d'un « or marqué » identifiable par l'addition d'indium ou de palladium⁴⁹. La présence d'une faible concentration de dioxyde de titane, à 2 % en masse dans la formulation traditionnelle, a été vérifiée par spectrométrie de fluorescence X. Des tests de mise en œuvre ont été menés par les professionnels pour confirmer la possibilité d'utiliser le mélange marqué, de la même façon qu'un mélange traditionnel non marqué⁵⁰.

L'identification du pigment blanc de titane a été vérifiée dans un autre contexte de recherche, au cours du projet ColoRaman⁵¹ portant sur la détection d'une centaine de pigments sur des préparations de peintures⁵². Le matériau a été clairement identifié lors d'analyses par spectroscopie Raman et fluorescence avec excitation à trois longueurs d'ondes 531,5 ; 632,8 et 780 nm. Ces conclusions confortent l'idée que le blanc de titane est particulièrement adéquat au marquage de formulations de conservation-restauration.

Craie de Bologne

La craie de Bologne n'est pas fréquemment citée dans les publications scientifiques sur les matériaux du patrimoine ou du bâti. Quelques informations techniques succinctes sont communiquées sur divers sites et pages de fournisseurs de matériaux de Beaux-Arts ou de conservation-restauration, principalement dans les spécialités de la peinture et de la dorure, puisque la craie de Bologne semble souvent employée comme charge dans la préparation de *gesso*, et ce principalement en Italie. Elle est par exemple mélangée à de la colle et de l'alun, d'après une recette « traditionnelle », pour la mise en œuvre des sous-couches des préparations à l'huile et à *tempera* dans l'étude sur la détection de pigments par spectroscopie Raman et de fluorescence⁵³.

Dans son étude sur les couches préparatoires en peinture et en sculpture, Genestar⁵⁴ présente les aspects micro-structuraux des matériaux couramment employés par les écoles « méditerranéennes » et « nordiques », en faisant un parallèle avec les traités anciens comme celui de Cennini. La craie de Bologne y est étudiée et comparée à différentes formes hydratées de sulfate de calcium (dihydrate, hémihydrate, anhydre) ainsi qu'à des carbonates de calcium. Des observations au MEB, des analyses en diffraction des rayons X et par spectroscopie IRTF permettent de distinguer les différentes charges, de les identifier et de les caractériser.

⁴⁹ DARQUE-CERETTI Evelyne, *et al.*, « New Leaf Gilding Alloys: Physico-Chemistry, Colour, Mechanical Behavior », *International Journal of Conservation Science*, 6 / Special Issue (2015), p. 531-540.

⁵⁰ ROBCIS Dominique, *et al.*, « Gold Leaf Alloys Specifically Designed for Conservation », dans MENON Raghu, *et al.* (éd.), *Proceedings of the interim meeting of the ICOM-CC Metals working group, 26-30 septembre 2016, New Delhi, Inde*, Paris, ICOM-CC, 2016, p. 1-6.

⁵¹ BURRAFATO Giuseppe, *et al.*, « ColoRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments », *Journal of Raman Spectroscopy*, 35 / 10 (2004), p. 879-886.

⁵² Les tests ont été menés sur le pigment seul, puis lié et déposé sur des préparations spécifiques selon les techniques de la fresque, de la *tempera* à l'œuf et à la caséine, et à l'huile, en suivant des recettes documentées.

⁵³ *Ibid.*, p. 880.

⁵⁴ GENESTAR Catalina, « Characterization of grounds used in canvas and sculpture », *Materials Letters*, 54 / 5 (2002), p. 382-388.

Ce matériau est testé par Salimnejad⁵⁵ qui compare la radio-opacité de différentes formulations de *gesso* : composées de sulfate et/ou de carbonate de calcium sans charge radio-opaque, puis de carbonate de calcium avec de l'oxyde de bismuth ou du sulfate de baryum comme charges radio-opaque. Le *gesso* de craie de Bologne présente une radio-opacité similaire aux autres préparations de sulfate ou de carbonate de calcium (Fig. 1), insuffisante pour distinguer deux formulations différentes sans charge ou pigment spécifiques.



Figure 1 : radio-opacité de chaque *gesso* en radiographie de rayons X, le n° 6 est composé de carbonate de calcium et le n°7 est composé de craie de Bologne, Behrooz 2005.

Colle de peau de lapin

La colle de peau de lapin est une colle protéinique d'origine animale et constituée de collagène, obtenue par transformation. Présentée sous forme de granulés secs, elle doit d'abord être trempée puis chauffée pour être utilisée selon divers usages, en adhésif pur mais aussi en liant, comme dans les techniques de dorure.

La possibilité d'identifier le type de protéines et donc la nature du liant ou de l'adhésif d'un mélange a été évaluée par Chiavari⁵⁶, avec un protocole d'analyses par chromatographie en phase gazeuse.

Bridarolli⁵⁷ évalue et compare les propriétés mécaniques de sept adhésifs constitués de collagène, dont la colle de peau de lapin, couramment employés en conservation-restauration, en considérant des conditions climatiques variables afin d'envisager la durabilité des traitements tels que des refixages, des collages, et des consolidations. Bridarolli insiste sur le fait que les compositions et les propriétés des divers adhésifs sont très rarement connues. Certains matériaux sont vendus comme étant des colles de nature spécifique mais les analyses révèlent une nature différente.

⁵⁵ SALIMNEJAD Behrooz, "Formulating gesso fills with bismuth oxide for discrimination by X-radiography", *WAG Postprints (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation)*, Minneapolis, AIC, 2005, p. 71-76.

⁵⁶ CHIAVARI Giuseppe, *et al.*, « Analysis of proteinaceous binders by in-situ pyrolysis and silylation », *Chromatographia*, 57 / 9-10 (2003), p. 645-648.

⁵⁷ BRIDAROLLI Alexandra, *et al.*, « Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity », *Journal of Cultural Heritage*, 53 (2022), p. 226-235.

C'est le cas de la colle de peau de lapin du fournisseur Kremer, analysée comme étant d'origine mammalienne non identifiée mais différente du lapin ou en mélange. Les adhésifs sont préparés à 4 % en masse en disposant les produits secs dans de l'eau, en laissant gonfler une nuit, puis en chauffant à moins de 60 °C et en filtrant. Les essais mécaniques sont menés sur des films d'adhésif par analyse mécanique dynamique et essais de tension, de façon à identifier les phases de transition, la rigidité, les modules élastiques, et les résistances à la rupture, dans différents environnements climatiques avec des variations d'humidité.

La colle de peau de lapin a été étudiée associée à des matériaux des domaines picturaux ou décoratifs. L'étude de Mecklenburg⁵⁸ s'intéresse par exemple au processus d'altération des supports de dorure, sensibles à l'humidité, sur les artefacts de type mobilier et décoratif comme les cadres. Le *gesso* évalué dans ces travaux est constitué de colle de peau de lapin et de carbonate de calcium. Les éprouvettes sont préparées en plaquettes très fines, rappelant les couches successives des apprêts, mesurant environ 178 x 6 x 0,35 mm pour les mélanges, et d'épaisseur de 0,15 mm pour le film de colle sans charge. La colle a été préparée à concentration de 10 % en masse et chauffée à moins de 52 °C. Les fluctuations environnementales influent sur les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs des artefacts, avec des effets de forces produisant des changements dimensionnels et des ruptures au sein des matériaux. Les propriétés mécaniques de différents ratios de mélanges sont mesurées, en fonction des conditions climatiques à températures et humidités relatives différentes, avec une répétition de cycles. Des données précises ont ainsi pu être établies, en caractérisant les comportements en résistances ultimes et les rigidités. La colle seule présente une résistance élevée et une rigidité importante, avec un taux de gonflement à l'humidité important. Ces valeurs ont tendance à baisser dès qu'une charge est ajoutée, de façon proportionnelle.

Afin d'observer les propriétés mécaniques et le vieillissement d'enduits extérieur, Elert⁵⁹ a étudié les interactions entre la colle animale et le sulfate de calcium à différentes phases hydratées, en comparant la poudre et le « plâtre » d'albâtre, ainsi que la *terra alba*⁶⁰. La colle animale, concentrée à 7,5 % massique, semble augmenter la résistance mécanique du matériau (éprouvettes à ratio poudre/colle à 1 - 1 en masse) et le renforce face aux conditions climatiques extérieures (éprouvettes à ratio poudre/colle 0,5 - 1 en masse). Elle modifie également la prise, en la ralentissant et en impactant la cristallisation par un effet inhibiteur de la formation du gypse et de stabilisation des cristaux d'hémihydrate et d'anhydrite.

⁵⁸ MECKLENBURG Marion F., « Some Mechanical and Physical Properties of Gilding Gesso », dans BIGELOW Deborah (éd.), *Gilded Wood, Conservation and History*, Madison, Sound View Press, 1991, p. 163-170.

⁵⁹ ELERT Kerstin, *et al.*, « Effect of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of calcium sulfate-based composite materials », *Cement and Concrete Composites*, 96 (2019), p. 274-283.

⁶⁰ Les trois matériaux cités font prise ou sont utilisés comme charge inerte, en fonction de leur composition. Le « plâtre » d'albâtre semble uniquement constitué de sulfate de calcium hémihydrate, la poudre est indiquée comme un mélange d'hémihydrate et d'hydrate, et la *terra alba* semble uniquement être composée de gypse, donc à l'état hydraté.

II. Caractéristiques et descriptions techniques

Différents paramètres font varier les caractéristiques du plâtre final, tels que la matière brute, les types et les températures de cuisson, le degré de tamisage, ou le choix du rapport massique eau/poudre, appelé taux de gâchage. La production du plâtre a longtemps été artisanale, et l'est encore aujourd'hui dans une moindre mesure. Ces productions fournissent des plâtres qui peuvent comporter des impuretés, présentes dans les roches extraites à l'origine ou introduites lors de la mise en œuvre et des étapes de cuisson et de broyage. Les propriétés peuvent donc être sensiblement différentes. Par exemple, la présence de fragments de granulométries différentes, de charbons et de fragments dits « incuits »⁶¹ ou « surcuits »⁶² amélioreraient les propriétés de résistance du matériau présentant un avantage considérable dans le domaine du bâti, à l'inverse des plâtres très fins⁶³.

1. Fabrication et production

a. Nature, composition, phases

Le plâtre est obtenu à partir du gypse⁶⁴, une roche sédimentaire compacte saline, dite « évaporite », formée par dépôts successifs de minéraux et de petites coquilles dans des zones aquatiques comme des mers peu profondes, des lacs, ou des lagunes⁶⁵. Il est constitué d'assemblages d'ions calcium Ca^{2+} et sulfate SO_4^{2-} , séparés par des couches d'eau H_2O . Le gypse, à l'état di-hydraté ou bi-hydraté, a pour formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Le gypse naturel est très présent selon des aires de répartitions et des périodes de formations variées, comme l'illustre la carte des productions de gisements mondiaux en 2022 (Fig. 2). Les gisements de l'Hexagone, illustrés sur la carte (Fig. 3), datent de trois périodes différentes⁶⁶ :

- Gisements des Alpes, du Jura, de la Lorraine et des Pyrénées, datant du Trias (~ 220 millions d'années).
- Gisements de Charente, datant du Jurassique supérieur (~ 140 millions d'années).
- Gisements en redéposition⁶⁷ du Bassin parisien et de la région PACA, datant de l'Éocène supérieur (~ 40 millions d'années).

⁶¹ Les incuits sont définis comme « Partie d'une chaux, d'un ciment, d'un plâtre qui n'a pas été portée à la température suffisante et qui est inerte », d'après la définition du CNRTL, Centre national de ressources textuelles et lexicales.

⁶² Les surcuits sont décrits comme du « Sulfate de calcium anhydre provenant de la cuisson du gypse » d'après la définition du CNRTL.

⁶³ LE DANTEC Tiffanie, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2019, p. 406.

⁶⁴ Le gypse est aussi qualifié de « pierre à plâtre », « plâtre cru », ou plus rarement « sélénète » et « pierre de lune ».

⁶⁵ Du gypse peut aussi être produit de manière artificielle. Il est nommé désulfogypse, issu des centrales thermiques après épuración de gaz sulfurés, ou phosphogypse, issu de l'industrie des phosphates et de la production des acides phosphoriques et citrique.

⁶⁶ FAYOLLE Patrick, « Du gypse au plâtre : la géologie, les gisements en France et les techniques d'extraction », dans BARTHE Georges-Louis (dir.), *Le plâtre, l'art et la matière*, Paris, Creaphis, 2001, p. 15-21.

⁶⁷ Certaines carrières ont été formées par dissolution, transport par les eaux, et redéposition de gisements plus anciens datant probablement du Trias.

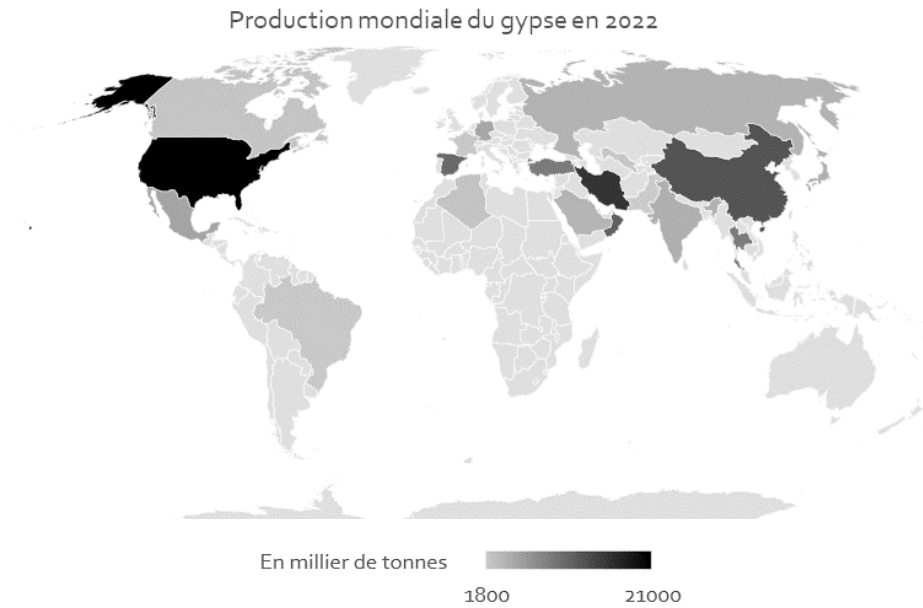


Figure 2 : carte des productions de gypse dans le monde en 2022 ; estimations tirées de Garside, 2023, Statista⁶⁸.



Figure 3 : carte des gisements de gypse de l'Hexagone, d'après les données de Fayolle, 2001.

Dans le domaine muséal et particulièrement pour le moulage de statues ou d'objets d'art, les critères essentiels sont l'homogénéité et la finesse afin d'obtenir une excellente reproduction des détails. Le plâtre généralement utilisé pour le moulage est issu de gypse naturel, de qualité fine, extra fine ou surfine, obtenu par sélection de roches les plus pures et après plusieurs tamisages afin de retirer notamment les particules supérieures à 160 μm . Actuellement, les plâtres commerciaux indiqués pour le moulage, comme le Molda® 3 Normal, produit par le groupe Saint-Gobain, ont un indice de pureté relativement élevé aux alentours de 91 % (pureté du gypse).

⁶⁸ <https://www.statista.com/statistics/264936/global-gypsum-production-by-major-countries/>

Des plâtres de pureté encore plus élevée sont commercialisés par des laboratoires, comme le sulfate de calcium hémihydrate pur, anciennement commercialisé par Sigma-Aldrich dont le degré de pureté était d'environ 97 %. Parmi les impuretés fréquemment observées il y a des grains de calcite, de quartz ou encore des particules de charbon et des argiles. Leur présence peut être liée à la composition de la roche brute utilisée qui présente naturellement des inclusions, mais aussi à des étapes de la mise en œuvre comme la cuisson pendant laquelle des fines particules de charbon de bois sont dispersées, ainsi que le battage, notamment lors du concassage par traction animale, mélangeant la poudre aux éléments du sol.

Le sulfate de calcium suit un processus de préparation cyclique, par des étapes de déshydratation et de réhydratation répétables, conférant au matériau l'intéressante propriété d'être recyclable (Fig. 4).

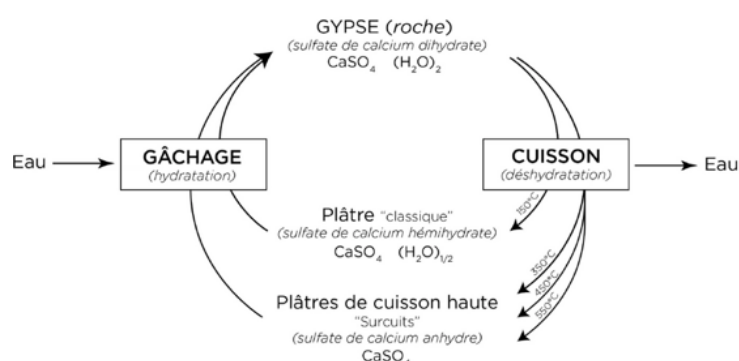


Figure 4 : illustration du cycle des plâtres, provenant du *Blog des plâtres, Plâtre Vieujot*, <https://platre.blog/2016/12/10/le-cycle-des-platres/>

Différentes phases du système $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ peuvent être obtenues en fonction des températures et des modes de cuisson⁶⁹ (Fig. 5) :

- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: gypse à l'état naturel ou sulfate de calcium dihydraté, après prise.
- $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$: plâtre hémihydrate ou semi-hydrate (appelé aussi bassanite) à l'état après cuisson et avant la prise. Obtenu par cuisson en voie sèche (de 120 à 180 °C) ou en voie humide (de 105 à 135 °C), formé dès 45 °C.
- CaSO_4 : anhydrite III (soluble). Obtenu par cuisson en voie sèche (de 150 à 300 °C) ou en voie humide (de 110 à 200 °C). Il est facilement ré-hydratable en présence d'eau ou en atmosphère humide.
- CaSO_4 : anhydrite II (surcuit). Obtenu par cuisson en voie sèche (>350 °C) ou en voie humide (>220 °C).
- CaSO_4 : anhydrite I (inerte). Obtenu par cuisson à des températures >1230 °C.

Au-delà de 1250 °C, le matériau se décompose pour former un oxyde de calcium, avec un dégagement de soufre et d'eau.

- La forme $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, nommée « sous-hydrate », est utilisée lorsque le degré d'hydratation est inconnu.

⁶⁹ Rojo, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, op.cit., p. 15 ; Le Dantec, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, op.cit., p. 89.

Deux catégories de plâtres, β et α , sont distinguées selon le mode de cuisson par voie sèche ou par voie humide (Fig. 5).

Plâtre β

Le premier mode de cuisson est le plus commun et le plus simple. Par voie sèche, à pression ambiante (pression de vapeur d'eau inférieure à 0,1 MPa), l'eau de cristallisation des pierres est éliminée sous forme de vapeur ; on obtient du plâtre β . Meille explique que « le solide obtenu garde la morphologie du gypse de base, avec de nombreux pores causés par le départ de l'eau »⁷⁰. Cette cuisson correspond à celle des fours anciens, traditionnels ou artisanaux.

Plâtre α

Le second mode de cuisson est celui par voie humide ou autoclave (pression de vapeur d'eau supérieure à 0,1 MPa). Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est dissout et recristallise sous forme d'hémihydrate α . Ce plâtre est décrit comme étant plus résistant, plus homogène, moins poreux, et nécessitant moins d'eau au gâchage que le plâtre β . Mais étant plus coûteux à produire, ses usages sont plus restreints et appliqués à certains domaines spécifiques, comme dans le milieu médical ou certaines pratiques de moulage industriel⁷¹.

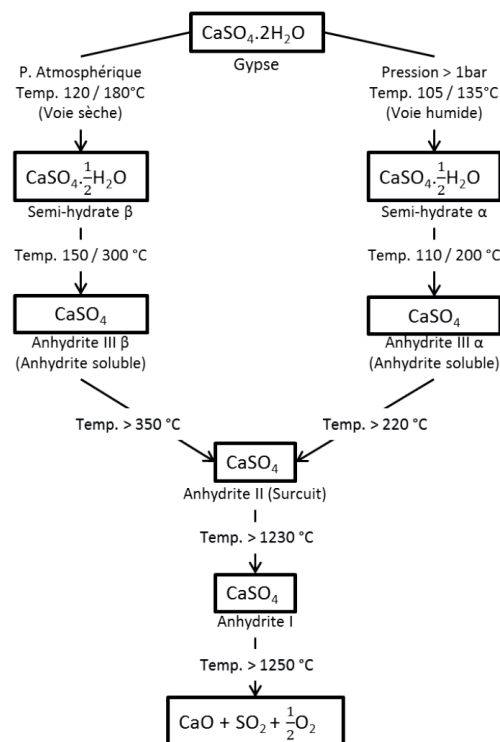


Figure 5 : illustration des produits de la déshydratation du gypse, tirée de Le Dantec, 2019, p. 91, d'après Claude Collot, 2015.

⁷⁰ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit., p. 18.

⁷¹ *Ibid.*

b. Cuisson et battage

Les roches gypseuses sont extraites des gisements, débitées en blocs, puis cuites. Dans de nombreux cas, les fours étaient installés directement sur le lieu de la carrière, ou à proximité, afin de limiter le transport de la matière brute. Une variété de fours existe, en fonction des localités et de la chronologie, comprenant les fours artisanaux, les fours traditionnels dits à culée pour la maçonnerie et les fours de boulangers pour le plâtre à mouler, puis des fours plus mécanisés à partir du XIX^e siècle⁷², impliquant des changements techniques et des modifications du matériau, plus fin, plus homogène et plus blanc. Dans les fours artisanaux et traditionnels, le principe de montage ou de disposition des pierres est similaire : les blocs sont montés par ordre de grosseur autour de foyers servant à charger la matière combustible. Les plus gros blocs sont placés à proximité de la source de chaleur, tandis que les plus petits sont les plus éloignés, de façon à obtenir une cuisson relativement homogène (Fig. 6). La cuisson dure plus d'une dizaine d'heures, afin d'atteindre des températures élevées sur toute la hauteur du four. Au cours de la cuisson, l'eau contenue dans la pierre commence à exsuder, les blocs prennent un aspect humide et la teinte semble saturée. Deux indicateurs visuels observés par les artisans-plâtriers⁷³, tels que la couleur blanche intense et la texture crayeuse des blocs, signalent que la déshydratation partielle est atteinte et que l'étape de cuisson arrive à son terme. Les pierres sont alors concassées afin d'être réduites en plus petites entités puis battues en poudre, de façon manuelle ou par traction animale. Pour calibrer le matériau, la poudre est passée dans des tamis de différentes mailles utilisés successivement⁷⁴. Les poudres sont alors stockées dans des contenants qui doivent limiter la prise d'humidité. En effet, le matériau partiellement déshydraté est réactif et la reprise d'humidité entraîne une altération du matériau qui peut le rendre inutilisable. Ce constat, déjà bien connu des artisans et des producteurs de plâtre, est présenté dans les ouvrages techniques anciens et permet de comprendre les raisons des installations de l'ensemble de la chaîne de production à proximité des carrières et l'écoulement progressif des stocks au fil de la fabrication.



Figure 6 : Un four à plâtre avant l'allumage à Noisy-le-Sec, 1925, photographie d'A. Robin, tirée de Le Dantec, 2019, p. 97.



Figure 7 : Théodore Géricault, *Le four à plâtre*, vers 1822-1823, INV 4888, © Musée du Louvre, Angèle Dequier.

⁷² Le Dantec, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, op.cit., p. 224.

⁷³ Communication orale des spécialistes au cours des ateliers du colloque « Le plâtre en construction », organisé par le LRMH et le groupement Rempart Île-de-France, du 26 février au 1^{er} mars 2019, à la Bergerie nationale de Rambouillet.

⁷⁴ *Ibid.*, p. 108.

c. Gâchage et cristallisation

Pour procéder à la mise en œuvre d'un ouvrage, il est nécessaire de réhydrater le matériau. Cette étape est appelée gâchage. La poudre est mélangée à l'eau dans des proportions variables selon un rapport massique, dit taux de gâchage, ou rapport eau/plâtre noté E/P⁷⁵. Pour que la cristallisation et la prise se produisent, une certaine quantité de plâtre est nécessaire. Ce rapport minimal entre les masses d'eau et de plâtre est estimé à 18,6 % soit un taux E/P = 0,186⁷⁶. À taux très bas, les rapports sont extrêmement concentrés rendant le mélange très difficile et la dissolution inégale. À l'inverse, à taux élevé et donc à concentration très faible, le mélange est très liquide et ne peut pas être utilisé.

Dans le domaine du moulage, par habitude, les gâchages dit « à fleur » sont effectués sans mesure. Dans un récipient contenant une certaine quantité d'eau, la poudre d'hémihydrate est déposée par poignées « en pluie » jusqu'à ce qu'un monticule se forme au centre du récipient, et qu'il dépasse le niveau de l'eau. Ce gâchage « empirique » correspond à des taux idéaux, généralement compris entre E/P = 0,6 et 0,8, et permet d'obtenir une matière homogène en limitant le malaxage ou le mélange. Autrement, des mesures peuvent être effectuées en pesant l'eau et le plâtre, avant de procéder de la même façon à une répartition progressive. L'ensemble est mélangé à l'outil ou à la main, ce qui permet dans le second cas d'apprécier la texture du mélange et de briser les éventuels grumeaux de poudre de plâtre. Le mélange doit être fait dans un temps limité et délicatement, afin de limiter l'introduction de bulles d'air dans le matériau, qui fragilisent la structure et peuvent se loger à la place de reliefs du moule, engendrant alors des cavités non voulues et des défauts dans l'épreuve démoulée⁷⁷.

Le processus d'hydratation, ou mécanisme de cristallisation du matériau qui intervient avec le gâchage, est étudié par les chercheurs depuis le XVIII^e siècle. La théorie de dissolution-cristallisation établie par Le Chatelier entre 1883 et 1887 est reconnue comme principe général. À partir du XX^e siècle, de nombreux travaux ont permis de préciser les phénomènes. Mais malgré les recherches, des inconnues demeurent encore⁷⁸. En 1988, Amathieu et Boistelle⁷⁹ ont proposé un modèle en étudiant l'hydratation dans le cas de solutions très diluées, avec un E/P = 20. Dans un premier temps, une dissolution de l'hémihydrate se produit, suivie d'une germination du gypse, avec des cinétiques variables, notamment en distinguant une vitesse élevée au début du processus, jusqu'à l'atteinte d'un seuil, avant une diminution lorsqu'il n'y a plus d'hémihydrate solide. Ces différentes étapes sont complétées par les nouvelles recherches et présentées par Rojo en 2013⁸⁰. La première phase comprend la dissolution rapide de l'hémihydrate, suivie d'une sursaturation de la solution, puis d'une cristallisation du gypse, par la germination et la croissance des cristaux, et d'un durcissement final.

⁷⁵ Le rapport plâtre/eau dit P/E est moins fréquent.

⁷⁶ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit., p. 17.

⁷⁷ Les bulles d'air s'installent sur les parois du moule et forment un vide dans lequel le matériau fluide ne se dépose pas. Après démoulage de la pièce, une cavité est visible. Parfois certains détails sont complètement absents (portions de nez, doigts, arêtes etc...).

⁷⁸ « Despite years of research, a fully convincing description of the stucco hydration reaction was not presented », p. 1 ; « Nevertheless, description of the kinetics and mechanism of the whole hydration process was not fully investigated yet », p. 2 ; RANACHOWSKI Zbigniew, et al., « Mechanical and Non-Destructive Testing of Plasterboards Subjected to a Hydration Process », *Materials*, 13 / 10 (2020), p. 1-18.

⁷⁹ AMATHIEU Loris et BOISTELLE Roland, « Crystallization kinetics of gypsum from dense suspension of hemihydrate in water », *Journal of Crystal Growth*, 88 / 2 (1988), p. 183-192.

⁸⁰ Rojo, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, op.cit., p. 24.

En 2016, un modèle plus détaillé est proposé⁸¹, considérant que lorsque le milieu arrive à sursaturation, une phase de densification des ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} , se produit, suivie d'une nucléation avec un début d'empilement de structure alignée, puis d'une réorganisation des feuilletts, et enfin d'une phase de croissance ou de cristallisation.

En 2019, un modèle « universel » est présenté à la suite de la compilation des nombreuses études et théories publiées⁸². La cristallisation du gypse est décomposée en plusieurs étapes (Fig. 8), selon un modèle plus complexe que le processus commun de cristallisation des matériaux constitués des deux phases de nucléation et de croissance. Ainsi, il est considéré que le processus commence lorsque la sursaturation de la solution est atteinte, avec la formation de particules nanométriques d'ions Ca^{2+} et de SO_4^{2-} assemblées en agrégats élancés. Ceci correspondrait à une forme de proto CaSO_4 . Quand la concentration de ces unités primaires est suffisante, les agrégats se rassemblent de façon désordonnée. Les éléments se réorganisent en formant des unités plus grandes, en fonction de la quantité d'eau disponible. Un agencement en tablette est finalement atteint, permettant alors la cristallisation finale avec l'émergence de cristaux plus grands. La phase d'hémihydrate cristallise en premier puis se redissout rapidement pour former du sulfate de calcium dihydraté ou de l'anhydrite, selon les conditions de formations⁸³.

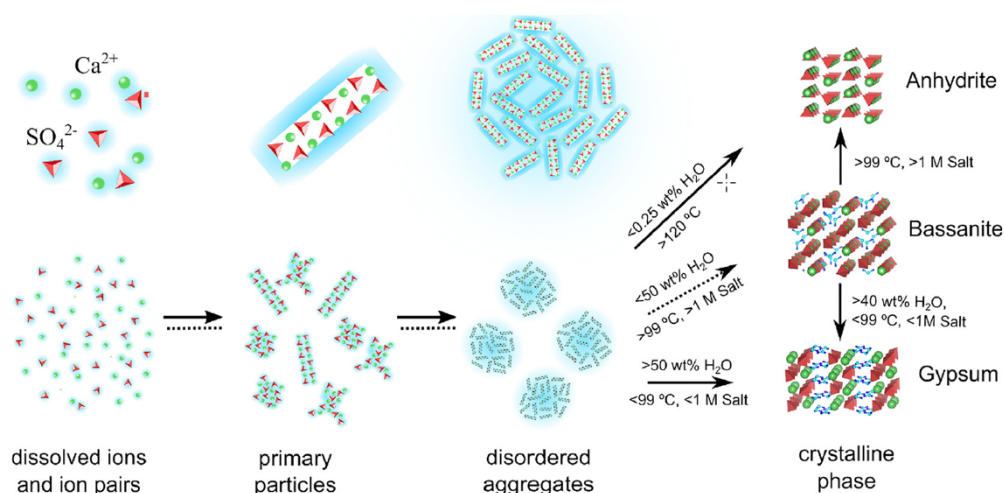


Figure 8 : schéma du modèle de formations cristallines des phases de sulfate de calcium ; en haut, une vue rapprochée ; en bas, une vue d'ensemble des espèces et de leur agencement ; à droite, les différentes phases formées, tiré de Van Driessche, *et al.*, 2019, p. 11.

⁸¹ VAN DRIESSCHE Alexander E. S., *et al.*, (éd.), « Calcium Sulfate Precipitation Throughout Its Phase Diagram », dans *New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth*, Cham, Springer, 2017, p. 227-256.

⁸² Van Driessche, « Calcium sulfate precipitation pathways in natural and engineered environments », *op.cit.*, p. 10.

⁸³ *Ibid.*, p. 11.

Le matériau fluide est utilisé, coulé dans un moule ou enduit sur un support, avant de faire prise et de durcir. La prise se fait avec une réaction exothermique et une légère expansion du volume, qui réduit lors du séchage. Le plâtre est considéré comme le matériau idéal pour le moulage grâce à cette propriété d'expansion. En effet, les cristaux nouvellement formés tapissent les parois du moule et s'enchevêtrent. L'expansion induit une faible pression, qui contraint les cristaux à épouser la surface du moule avec une grande précision. Le degré de détails est d'une grande finesse, comme le montrent les épreuves moulées sur nature et leurs rendus des aspérités de la surface de l'épiderme.

La maîtrise de la durée de prise est un facteur important dans les interventions de moulage. Elle permet à l'utilisateur d'adapter sa préparation du matériau en fonction de la tâche à effectuer. L'ouvrabilité et le temps de prise sont variables et dépendent des plusieurs facteurs de fabrication et de mise en œuvre du matériau. Ainsi des plâtres à prises rapides ou très lentes coexistent et répondent aux différentes demandes du marché du bâti, de la fonderie, du domaine médical, ou artistique.

Les paramètres modifiant la vitesse d'hydratation sont les suivants⁸⁴ :

- La température de l'eau de gâchage : accélération avec de l'eau chaude ou ralentissement avec de l'eau froide.
- L'utilisation d'additifs ayant différentes actions : des accélérateurs pour augmenter la vitesse de dissolution ou la vitesse de croissance, comme le gypse, l'anhydrite III ou le chlorure de sodium ; des retardateurs pour ralentir la dissolution par la formation de complexe, tels que les anhydrites I et II, ainsi que des acides carboxyliques comme l'acide citrique (Tabl. 3).
- L'action même de mélanger, ou malaxage, semble influencer la cinétique de prise, avec une accélération de prise provoquée par un mélange « énergétique », ou un ralentissement de prise par un mélange continu.
- Le taux de gâchage est aussi considéré comme un modificateur. Un gâchage serré, ayant un rapport massique concentré, a une prise plus rapide qu'un gâchage clair, peu concentré.

	GYPSE	SEMI-HYDRATE	ANHYDRITE III	ANHYDRITE II	ANHYDRITE I	CHAUX
Température (C°) de formation	-	45°C	200°C	220-350°C	1230°C	1250°C ou 1450°C
Formule chimique	CaSO ₄ .2H ₂ O	CaSO ₄ .½H ₂ O	CaSO ₄	CaSO ₄	CaSO ₄	CaO
Effet sur la prise du plâtre	Accélérateur	-	Accélérateur	Retardateur	Retardateur	Retardateur

Tableau 3 : phases de déshydratation du gypse et les effets sur la prise, tiré de Le Dantec, 2019, p. 89.

⁸⁴ Compagnons du devoir et du tour de France (éd.), *La plâtrerie, le staff et le stuc*, op.cit., volume 1, p. 109 ; Le Dantec, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, op.cit., p. 89 ; Martias, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, op.cit., p. 39 ; Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit., p. 20.

2. Descriptions structurelles

a. Réseau cristallin

Le plâtre est un matériau cristallin dont chaque cristal est constitué d'un empilement de feuillets d'ions calcium Ca^{2+} et sulfate SO_4^{2-} , séparés par des couches d'eau pour les phases hydratées. La forme des cristaux varie selon différents paramètres comme le degré d'hydratation, le pH, la pureté, la température et la concentration de la solution⁸⁵. Une structure de gypse, ou sulfate de calcium di-hydraté, présente généralement un assemblage de cristaux enchevêtrés en forme d'aiguilles et de plaquettes (Fig.9).

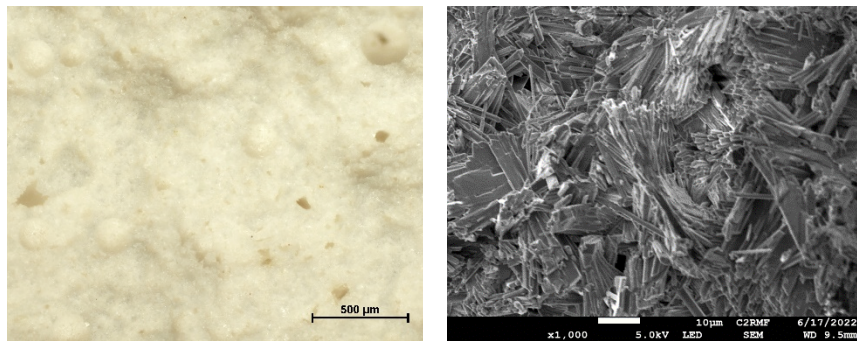
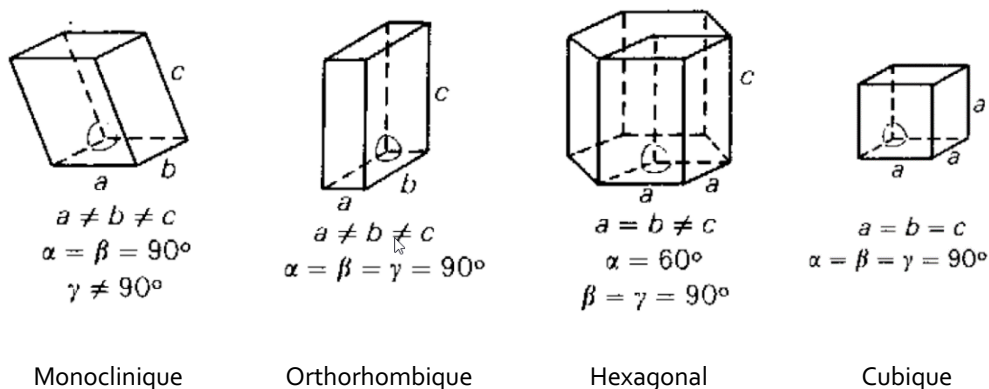


Figure 9 : matrice de plâtre Molda® 3 Normal à E/P = 0,7
vue au microscope optique (x5) et au MEB (x1000).

Systèmes cristallins des sulfates de calcium

Les cristaux de gypse, en phase di-hydratée, sont de symétrie monoclinique. Les cristaux d'hémihydrate sont orthorhombiques. Les cristaux d'anhydrite sont hexagonaux (anhydrite III), orthorhombiques (anhydrite II) et cubiques (anhydrite I) (Fig. 10).



Monoclinique

Orthorhombique

Hexagonal

Cubique

Figure 10 : systèmes cristallins des différentes phases du sulfate de calcium.

⁸⁵ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit., p. 15 et 21; Ossorio, « The growth morphology of gypsum crystals: an experimental study », op.cit.; Pastero, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », op.cit., p. 2; Van Driessche, « Calcium sulfate precipitation pathways in natural and engineered environments », op.cit., p. 1.

Morphologies des phases hydratées

La formation et la morphologie cristallines sont dépendantes des conditions de températures, de pH, de sursaturation, et des premières étapes de nucléation, formant ainsi préférentiellement des cristaux aciculaires ou des plaquettes⁸⁶ (Fig. 12). À basse température, aux alentours de 4 °C, les plaquettes sont les formes les plus courantes, avec peu de variation selon les variantes de sursaturation. À des températures supérieures à 20 °C, les cristaux aciculaires sont majoritaires⁸⁷. Cette morphologie d'aiguille élancée (Fig. 11), avec la plus grande dimension orientée selon l'axe *c*, est donc la plus fréquente⁸⁸. Les aiguilles sont généralement rassemblées en agrégats radiaux, dit en faisceaux⁸⁹ (Fig. 12), ou en sphérulites⁹⁰. Bien qu'elle paraisse désordonnée, la répartition des cristaux n'est pas aléatoire. Les cristaux sont maintenus par contact simple ou par assemblages de type tenon-mortaise⁹¹ liés chimiquement et mécaniquement par des forces de contact ou de pénétration⁹², selon les conditions de préparation. La morphologie d'une plaquette est due à un assemblage incomplet aux extrémités des cristaux⁹³.

Des cristaux doubles, appelés macles, ainsi que des plaquettes constituées de plusieurs cristaux sont aussi observés. Il existe cinq lois de macles pour le gypse. Les macles les plus fréquentes sont dites en « queue d'aronde » et ont un accolement selon le plan {100}. Celles dites « fers de lance » ou « de Montmartre », avec un accolement sur le plan {101}, sont plus rarement rencontrées⁹⁴ (Fig. 13).

Dans des conditions de solution pure, les cristaux présentent des faces achevées (Fig. 11), alors qu'en condition de mélange ou en présence d'impuretés, ces faces sont inachevées, voire modifiées, comme lors d'addition de carbonate de calcium⁹⁵ (Fig. 14) ou de copolymères⁹⁶ (Fig. 15).

⁸⁶ Ossorio, « The growth morphology of gypsum crystals: an experimental study », *op.cit.*

⁸⁷ *Ibid.*

⁸⁸ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, *op.cit.*, p. 16 ; MONTAGNINO D., *et al.*, « Growth morphology of gypsum in the presence of copolymers », *Crystal Research and Technology*, 46 / 10 (2011), p. 1012.

⁸⁹ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, *op.cit.*, p. 22.

⁹⁰ Ossorio, « The growth morphology of gypsum crystals: an experimental study », *op.cit.*; les sphérulites sont des formations de cristaux agrégés en structures rayonnantes.

⁹¹ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, *op.cit.*, p. 22.

⁹² RUBBO Marco, *et al.*, « The Five Twin Laws of Gypsum (CaSO₄·2H₂O): A Theoretical Comparison of the Interfaces of the Penetration Twins », *Crystal Growth & Design*, 12 / 6 (2012), p. 3018-3024.

⁹³ Pastero, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », *op.cit.*, p. 8.

⁹⁴ Rubbo, « The Five Twin Laws of Gypsum (CaSO₄·2H₂O): A Theoretical Comparison of the Interfaces of the Penetration Twins », *op.cit.*; LE CLÉAC'H Jean-Michel, « Quelques réflexions sur les macles du gypse », *Saga information*, 2017, p. 6-11.

⁹⁵ Pastero, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », *op.cit.*, p. 5.

⁹⁶ Montagnino, « Growth morphology of gypsum in the presence of copolymers », *op.cit.*, p. 1015-1016.

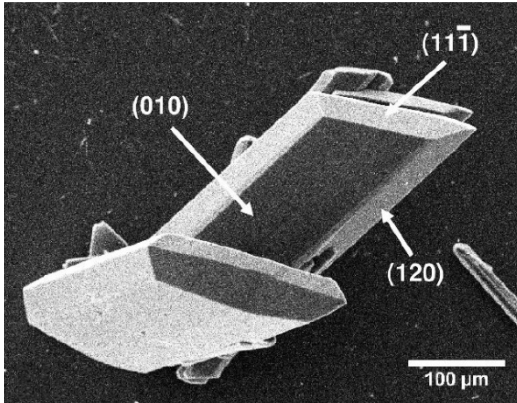


Figure 11 : cristaux de gypse formés dans des conditions normales, image tirée de Pastero, 2017.

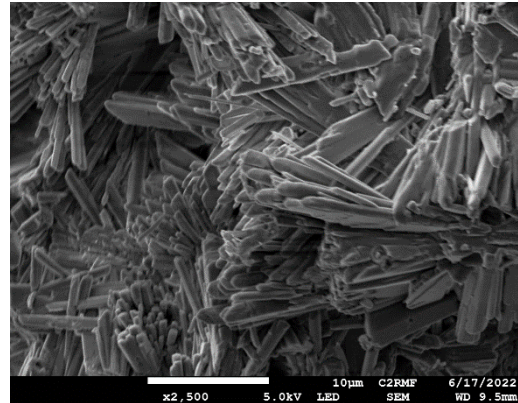


Figure 12 : matrice de Molda® 3 Normal à E/P = 0,7, image MEB, montrant des faisceaux d'aiguilles aciculaires et quelques plaquettes (angle haut à droite).

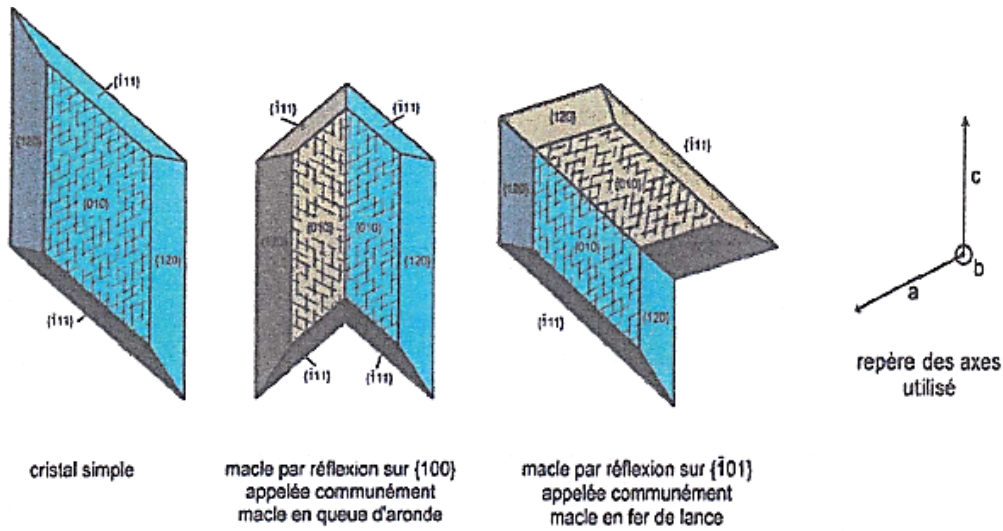


Figure 13 : schémas des cristaux de gypse simple et des macles à queue d'aronde et en fer de lance, d'après Le Cléarc'h, 2017.

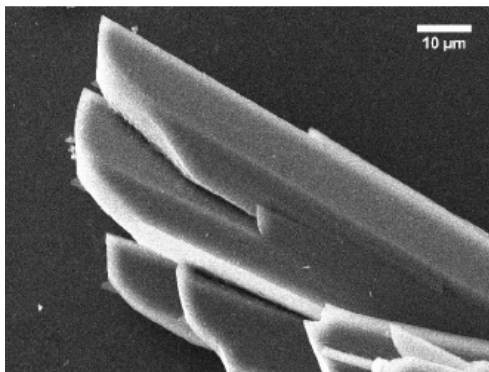


Figure 14 : cristaux de gypse et addition de carbonate de calcium, formation inachevée des extrémités, image tirée de Pastero, 2017.

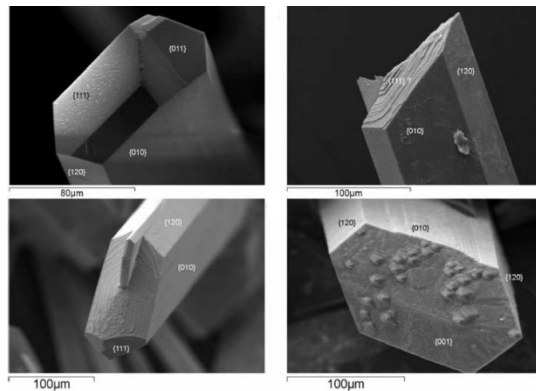


Figure 15 : cristaux de gypse additionnés de copolymères et extrémités modifiées, images tirées de Montagnino, 2011.

Dimensions des cristaux

La dimension des cristaux varie en fonction du type de plâtre α ou β , du taux de gâchage, de la présence d'adjuvants ou d'impuretés ou encore de la température de la solution⁹⁷. Généralement les aiguilles et les plaquettes sont de l'ordre de : $20 \times 2 \times 2 \mu\text{m}^3$ dans des conditions usuelles de gâchage, à 23°C sans adjuvant⁹⁸. L'augmentation de la sursaturation tend à conditionner l'élongation des cristaux aciculaires, jusqu'à un seuil de sursaturation, au-delà duquel l'effet inverse est constaté, avec la formation de cristaux de plus petites dimensions⁹⁹. Les cristaux ont aussi tendance à être plus courts dans le cas d'une cristallisation en présence de carbonate de calcium¹⁰⁰.

Autres phases

Des cristaux d'autres phases sulfatées peuvent également être rencontrés dans les structures, comme les anhydrites II, qualifiées de « surcuit ». Des anhydrites III sont souvent additionnées aux plâtres industriels. Ces phases anhydres peuvent aussi être utilisées comme charge dans une matrice de type *gesso* liée à la colle, présentant alors des cristaux d'importantes dimensions, aux formes parallélépipédiques et aux textures fibreuses¹⁰¹ (Fig. 16).

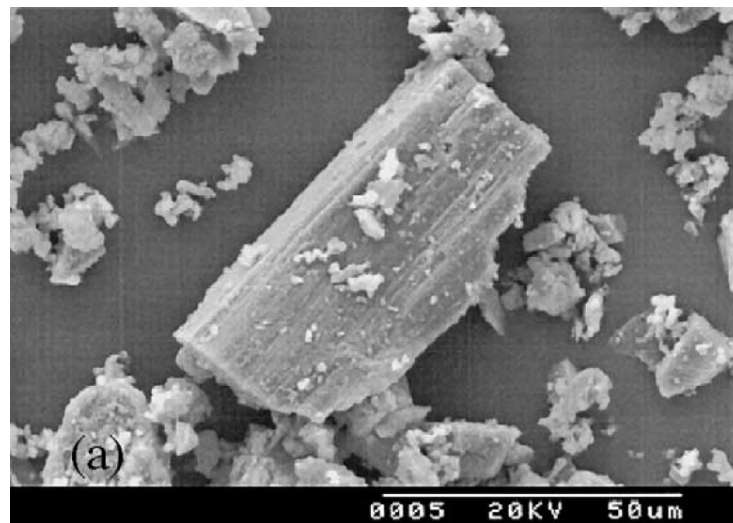


Figure 16 : détail d'un cristal d'anhydrite au MEB, tiré de Genestar, 2002.

⁹⁷ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, *op.cit.*, p. 20.

⁹⁸ *Ibid.*, p. 22.

⁹⁹ Ossorio, « The growth morphology of gypsum crystals: an experimental study », *op.cit.*

¹⁰⁰ Pastero, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », *op.cit.*, p. 11-12.

¹⁰¹ Genestar, « Characterization of grounds used in canvas and sculpture », *op. cit.*, p. 385.

b. Liaisons

Les liaisons chimiques conditionnent le comportement mécanique, les phénomènes de rupture, et donc les altérations. Différentes composantes sont responsables des liaisons entre les cristaux¹⁰² (Tabl. 4). Les forces capillaires et de Van der Waals, les plus faibles, doivent uniquement jouer un rôle dans la cohésion. Ces forces de surface sont variables et sensibles aux contacts selon les faces des cristaux. D'autres composantes influent sur les liaisons, comme l'ancrage mécanique formé par l'enchevêtrement des cristaux ainsi que les forces résiduelles provoquées par le gonflement du plâtre lors du gâchage, et enfin les contraintes produites au moment de la prise.

Liaison	Description
Ioniques	Dans les feuilletts $\text{Ca}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$; dues aux différences de charges électriques ; liaisons fortes
Hydrogènes	Entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions sulfates ; moins fortes que les liaisons ioniques
Électrostatiques	Entre les surfaces de charges opposées ; liaisons intenses
De capillarité	Plus intenses que celles de Van der Waals
De Van der Waals	Faible intensité

Tableau 4 : liaisons inter-cristallines et leurs intensités, détaillées par Meille, 2001.

D'après Meille¹⁰³, la face (010), tapissée de molécules d'eau, est décrite comme fortement réactive avec un réarrangement possible en présence d'eau liquide. Ce plan (010), aux liaisons hydrogènes, est alors un plan de clivage facile. La face (120), qui présente une densité de charge importante, peut induire des liaisons fortes. La face ($\bar{1}01$), en bout de cristal, a des charges globalement neutres et de faibles interactions de type Van der Waals, échangées avec les autres faces, sauf celles chargées négativement. Pastero¹⁰⁴ indique que les bords modifiés par la présence de carbonate de calcium, et inachevés en {111}, conditionnent une instabilité et donc des zones de ruptures préférentielles.

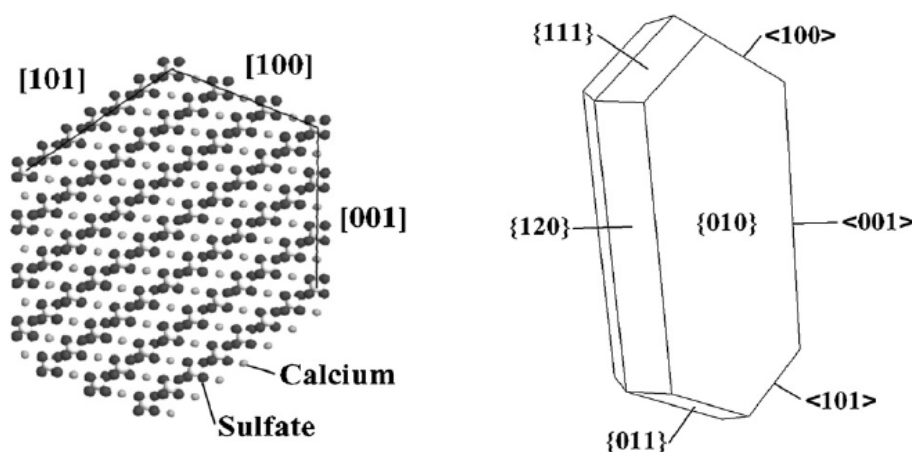


Figure 17 : structure atomique du gypse selon la face (010), en coupe, à gauche ; morphologie d'un cristal de gypse, à droite ; tirés de Singh et Middendorf, 2007, p. 65.

¹⁰² Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit., p. 24.

¹⁰³ *Ibid.*

¹⁰⁴ Pastero, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », op.cit., p. 19.

c. Porosité¹⁰⁵

Le plâtre est un matériau poreux, en raison de sa structure cristalline qui comporte des vides, ou pores, remplis d'air. Les paramètres de mise en œuvre tels que le taux de gâchage, le malaxage, et la présence d'additifs, modifient la porosité du plâtre, en densifiant ou en resserrant la structure cristalline, et en introduisant plus ou moins de bulles d'air. Ces bulles d'air sont toujours visibles dans les structures, sous forme de cavités circulaires et régulières¹⁰⁶, aux dimensions variables. Plus il y a d'eau, plus le plâtre est poreux. En effet dans un même volume, la quantité de plâtre et de cristaux est plus faible, il y a donc une répartition plus large et un enchevêtrement moins dense.

La porosité d'un matériau est évaluée selon la taille du rayon des pores et les distributions. Trois niveaux de porosité coexistent dans une matrice de plâtre¹⁰⁷. Des macropores sphériques, aux diamètres de plusieurs centaines de microns, sont produits par les bulles d'air. Des mésopores irréguliers, apparaissent lors de la dissolution des plus gros cristaux d'hémihydrate et mesurent plusieurs dizaines de microns. En enfin, un réseau de micropores est présent entre les cristaux de plâtre pris.

Martias¹⁰⁸ montre un lien fonctionnel entre la porosité et le rapport massique E/P, variant de 40 à 70 % pour des taux de 0,5 ; 0,6 ; 0,8 et 1. Les différentes granulométries de l'hémihydrate conditionnent les distributions de tailles de grains après la prise mais ne semblent pas modifier la porosité globale¹⁰⁹. Un hémihydrate β , pur à 83 - 87 %, et additionné d'un retardateur de prise, a été utilisé pour ces essais.

Meille¹¹⁰ présente l'exemple d'un taux E/P = 0,8 ayant une porosité finale proche de 55 % en volume. Par des mesures de porosimétrie au mercure, le rayon moyen de pores est évalué à environ 3 μm et la surface spécifique est de 10³ m².kg⁻¹. Les tests sont faits avec un hémihydrate β , pur à 96 %, contenant des impuretés de gypse, quartz, calcite, et magnésie¹¹¹.

Les valeurs présentées par Seck¹¹² diffèrent légèrement, avec des variations de 36 à 61 % pour des taux E/P de 0,4 à 1 (Tabl. 5). Pour un taux E/P = 0,8, la porosité est comprise entre 44 et 51 % et le rayon moyen des pores entre 1 et 2 μm . Les tests sont menés avec un hémihydrate β , à 95 % de pureté, contenant des argiles¹¹³.

¹⁰⁵ Pour des raisons d'organisation, la porosité n'a pas été mesurée dans ces travaux. En revanche, des données bibliographiques et issues de travaux parallèles ont été collectées et utilisées.

¹⁰⁶ Les cavités correspondent aux « fantômes » des bulles d'air prises dans le mélange à l'état frais.

¹⁰⁷ ADRIEN Jérôme, *et al.*, « In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting », *Cement and Concrete Research*, 82 (2016), p. 110.

¹⁰⁸ Martias, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, *op.cit.*, p. 90.

¹⁰⁹ Martias, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, *op.cit.*, p. 77 et 88.

¹¹⁰ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, *op.cit.*, p. 23.

¹¹¹ *Ibid.*, p. 64-65.

¹¹² SECK Mamadou Diaga, *Compréhension des mécanismes de séchage dans les matériaux de construction : cas du plâtre*, Thèse de doctorat, Paris Est, 2015, p. 44 ; données tirées de JAFFEL Hamouda, *Multi-scales characterization of porous materials in evolution : case of plaster*, Thèse de doctorat, École Polytechnique X, 2006.

¹¹³ Seck, *Compréhension des mécanismes de séchage dans les matériaux de construction : cas du plâtre*, *op.cit.*, p. 42.

Rapport E/P	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Porosité (%)	36	44	51	55	58	60	61

Tableau 5 : valeurs de porosité selon les taux de gâchage E/P, mesurées par porosimétrie mercure, tiré de Seck, 2015, d'après Jaffel, 2006.

Des travaux en cours, menés par Émilie Huby au LRMH, évaluent la porosité du plâtre β EXTHA Ibérica® par des mesures de porosimétrie au mercure. Un taux de 55 % de porosité a été quantifié pour un gâchage à E/P= 0,65. La distribution de la taille de pores est considérée comme uni-modale, comprise entre 0,01 μm et 3 μm , avec une majorité de rayons de pores à 1,48 μm .

Tout en étant d'ordres de grandeur similaires, les légères variations de données de porosité peuvent être expliquées par le choix de l'hémihydrate, le taux de gâchage, les conditions de malaxage, ainsi que les présences d'additifs. De façon très précise, ces paramètres de préparation influencent et déterminent les propriétés finales du matériau obtenu.

3. Caractéristiques des additifs et autres matériaux

a. Carbonate de calcium

Le carbonate de calcium est un minéral inerte composé de carbone, de calcium et d'oxygène, de formule CaCO_3 , constitué d'ions Ca^{2+} et d'ions carbonates CO_3^{2-} . Le carbonate de calcium est très présent à la surface de la Terre et est notamment représenté par trois formes différentes, l'aragonite, la calcite et la vaterite. D'autres formes de carbonate de calcium monohydraté et hexahydraté sont moins fréquentes en raison de leur instabilité. L'aragonite et la vaterite sont plus rares à l'état de minerai naturel car elles sont instables en conditions thermodynamiques usuelles, c'est-à-dire selon les conditions de pression et de température à la surface de la Terre ; elles tendent alors à se transformer en calcite. Mais, dans certaines conditions, elles présentent un mécanisme de nucléation, ou germination, rapide et une bonne stabilité après formation d'une structure. Ces phases sont constitutives notamment de certaines coquilles d'animaux marins. La calcite est fréquemment citée lorsque les compositions des roches calcaires ou marbrières sont étudiées. Le carbonate de calcium connaît divers usages comme la préparation de la chaux pour le bâti, ou en mélange à de la colle pour les couches préparatoires en peinture.

Dans les traités anciens¹¹⁴, il est appelé craie, ou chaux carbonatée, et est présenté comme un matériau de très belle qualité, au grain fin, avec peu d'impuretés d'argiles et de sables. Préparé par broyage, trempage, décantation et séchage, il est ensuite moulé en pain. Il est présenté comme une poudre blanche ou cristaux incolores, inodore, sans goût, non-soluble dans l'eau et l'alcool, soluble dans l'acide.

¹¹⁴ Guillaumin, *Dictionnaire du commerce et des marchandises, contenant tout ce qui concerne le commerce de terre et de mer, op.cit.* ; Bosc, *Dictionnaire raisonné d'architecture et des sciences et arts qui s'y rattachent*, Paris, Firmin-Didot, op.cit.

Le blanc de Meudon, couramment utilisé par les professionnel·les de la conservation-restauration, est formé à partir d'une accumulation de micro-organismes, dont les coccolithes (Fig. 18), et d'une macrofaune diversifiée composée de restes de Poissons, de Foraminifères, d'Échinodermes, d'Éponges siliceuses, de Bryozoaires, et de Brachiopodes. Ces gisements de carbonate de calcium apparaissent avec la pénétration de la « mer de la craie »¹¹⁵ en Ile-de-France à la période du Campanien supérieur¹¹⁶.

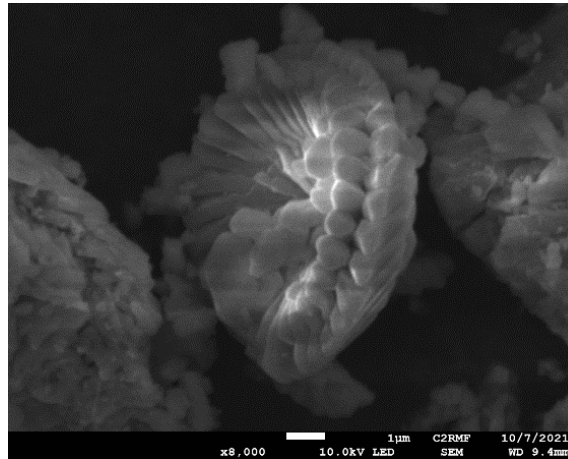


Figure 18 : vue d'un coccolithe, dans un substrat d'hémihydrate (Molda® 3 Normal), observation au MEB (grossissement x8000).

Les études associant sulfate et carbonate de calcium permettent d'obtenir des informations sur le comportement et les modifications des matériaux à l'échelle cristalline.

Zarga¹¹⁷ étudie la germination des deux composés simultanément, afin de déterminer les différentes transformations des matériaux et le rôle des composés lors des phases de précipitations cristallines. Les structures ont été observées et analysées en spectroscopie IR et au MEB. Il apparaît que la formation du gypse n'est pas entravée par la présence de cristaux de carbonate de calcium. Le sulfate de calcium est même prédominant, avec des composés carbonatés comme la calcite et la vatérite présents en plus faibles proportions, la calcite étant plus favorablement précipitée au contact du sulfate de calcium. Dans l'étude de 2014, le sulfate de calcium à l'état de monohydrate a une cinétique de précipitation ralentie par la présence de carbonates.

Un « effet coopératif » entre le sulfate et le carbonate de calcium a été démontré par Pastero¹¹⁸. Le carbonate de calcium a été utilisé comme substrat de façon à vérifier la possibilité d'un ajustement cristallographique entre les deux composés. Les cristaux des deux composés semblent s'ordonner, liés par les forces d'adhésion, ou par les forces électrostatiques qui gouvernent la cristallisation des ions Ca^{2+} , CO_3^{2-} et SO_4^{2-} , comme le suggère Petrou¹¹⁹.

¹¹⁵ Gaspard, « Les Brachiopodes de la craie blanche de Meudon (Campanien supérieur) de la collection d'Orbigny (MNHN, Paris) », *op.cit.*, p. 574.

¹¹⁶ Le Campanien supérieur, daté entre 83,6 (± 0,2) et 72,1 (± 0,2) millions d'années, est le cinquième des six étages stratigraphiques du Crétacé supérieur.

¹¹⁷ Zarga, « Study of calcium carbonate and sulfate co-precipitation », *op.cit.*; « Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Simple and Mixed Precipitations », *op.cit.*

¹¹⁸ Pastero, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », *op.cit.*

¹¹⁹ Petrou, « Calcium carbonate and calcium sulfate precipitation, crystallization and dissolution: Evidence for the activated steps and the mechanisms from the enthalpy and entropy of activation values », *op.cit.*, p. 152.

La présence de carbonate de calcium modifie la cristallisation du gypse, en influençant le taux de cristallisation et la morphologie de surface de certains cristaux de sulfate de calcium. La calcite constitue un substrat pour la nucléation et la cristallisation du gypse, en modifiant l'orientation des cristaux. En tant qu'impureté dans une solution, le carbonate de calcium peut aussi modifier la croissance spécifique du gypse et la rendre incomplète. L'augmentation de sa concentration influence la formation de doubles cristaux, et notamment des macles de Montmartre, présentées précédemment¹²⁰.

b. Dioxyde de titane

Le dioxyde de titane, appelé aussi blanc de titane, est un matériau en poudre, de couleur blanche, inodore, insoluble dans l'eau. Produit industriellement depuis le début du XX^e siècle, il est obtenu par des procédés chimiques, selon l'espèce minérale et les besoins en propriétés physico-chimiques comme la pureté et la taille des particules.

Il est chimiquement inerte et sa stabilité est avantageuse pour un usage comme additif et marqueur des matériaux de comblements dans le domaine de la conservation-restauration. Dans le projet ColoRaman¹²¹, des analyses par spectroscopie Raman et de fluorescence à l'aide de trois lasers émettant dans le visible ont permis d'identifier le dioxyde de titane de façon caractéristique selon presque tous les états testés : en poudre seule et en mélanges selon différentes techniques picturales. Les spectres en Raman sont obtenus pour les trois longueurs d'ondes excitatrices de 532, 633 et 780 nm, à l'exception des mélanges de type fresque et peinture à l'huile à 780 nm. Des spectres de fluorescences ont pu être observés à 780 nm pour le pigment seul et toutes les peintures, *tempera* à l'œuf et à la caséine et huile, à l'exception de la fresque. Le matériau peut donc être détecté par ces techniques non-invasives, à l'état de pigment seul, ou en mélange avec des liants variés.

Il est considéré que l'inclusion de nanoparticules de dioxydes de titane ou de silice augmente les surfaces spécifiques, modifie les processus d'hydratation, ainsi que le comportement rhéologique de mélanges hydrauliques comme le ciment¹²². En effet, les fines particules de TiO₂, dans une certaine mesure, occupent les pores des matrices et ont tendance à réduire la microporosité¹²³. L'addition de nanoparticules de dioxyde de titane semble modifier le comportement rhéologique, avec l'augmentation des valeurs de résistance de cisaillement et de consistance¹²⁴. Ces caractéristiques peuvent être considérées comme des exemples d'effets d'adjuvantation du dioxyde de titane, à mettre en relation avec une matrice de sulfate de calcium.

L'étude de Lucas¹²⁵ a montré que le TiO₂ ajouté à différentes concentrations dans des formulations variables de chaux, de ciment, et de plâtre, chargées de sables, modifie la porosité et la microstructure des matrices. Le dioxyde de titane semble jouer un rôle dans la distribution des tailles de pores, en lien avec le comportement mécanique.

¹²⁰ *Ibid.*, p. 19.

¹²¹ Burrafato, « ColoRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments », *op. cit.*

¹²² Senff, « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *op. cit.*

¹²³ *Ibid.*, p. 354.

¹²⁴ *Ibid.*, p. 356.

¹²⁵ Lucas, « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », *op. cit.*

Un mortier de gypse seul, avec addition de sable, a été testé et a montré une baisse de résistance de 60 % pour une addition de 0,5 % de TiO_2 ¹²⁶. Des concentrations plus élevées, de 2,5 % et 5 %, provoquent une réduction de la taille moyenne des pores, qui ne compense pas la perte de résistance mécanique observée¹²⁷. Ces données confirment les effets de « baisse » de porosité déjà constatés par Senff dans une matrice de ciment.

Il faut cependant noter qu'un effet de seuil d'addition de nanoparticules a été constaté en généralisant les résultats des autres formulations¹²⁸. Ainsi, à très faible concentration de TiO_2 , un nombre important de macropores est observé, fragilisant la structure générale. Avec des additions de 1 à 2,5 %, les macropores et les micropores sont réduits, occasionnant une amélioration de la résistance mécanique. À 5 %, la présence accrue de macropores, malgré l'association de nombreux nanopores, provoque de nouveau la baisse de résistance mécanique.

c. Craie de Bologne

La craie de Bologne est une poudre blanche, à la couleur moins éclatante que le carbonate de calcium. La craie de Bologne est majoritairement composée de sulfate de calcium dihydraté. En effet, lors d'observations au MEB et d'analyses en spectrométrie de rayons X (DRX) ou infra-rouge à transformée de Fourier (IRTF), le matériau a été identifié comme du gypse en majorité, avec une minorité d'anhydrite¹²⁹.

Au MEB, des cristaux uniformes prismatiques et aciculaires sont observés, avec des dimensions variant de 2 à 12 μm (Fig. 19). Genestar précise que les cristaux ressemblent particulièrement à ceux des échantillons de sulfate de calcium obtenu par mélange d'hémihydrate et d'eau¹³⁰.

Les comparaisons de radio-opacités des différents matériaux de fonds testés par Behrooz¹³¹ révèlent la forte ressemblance des fonds composés de carbonate de calcium ou composés de craie de Bologne, et donc l'impossibilité de discriminer une technique par rapport à une autre au moyen de la radiographie de rayons X.

Dans l'étude sur l'identification des pigments par spectroscopie Raman¹³², les différentes sous-couches et les techniques picturales testées sont difficilement discernables par des spectres caractéristiques, à l'exception du mélange de craie de Bologne¹³³, de colle de peau de lapin et de pierre d'alun¹³⁴, mis en œuvre pour les couches préparatoires des supports de la technique à *tempera* à l'œuf. Dans ce cas, un spectre caractéristique du mélange préparatoire a pu être observé à une excitation de 632,8 nm¹³⁵.

¹²⁶ *Ibid.*, p. 116.

¹²⁷ *Ibid.*, p. 119.

¹²⁸ *Ibid.*, p. 115-116.

¹²⁹ Genestar, « Characterization of grounds used in canvas and sculpture », *op. cit.*, p. 384.

¹³⁰ *Ibid.*, p. 385.

¹³¹ Behrooz, "Formulating gesso fills with bismuth oxide for discrimination by X-radiography", *op. cit.*, p. 4.

¹³² Burrafato, « ColoRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments », *op. cit.*

¹³³ *Ibid.*, p. 885 ; La craie de Bologne est identifiée comme du carbonate de calcium dans cette étude, p. 880.

¹³⁴ Composé chimique constitué de sulfate d'aluminium ou de potassium.

¹³⁵ *Ibid.*, p. 885-886.

Certaines caractéristiques de la craie de Bologne pourraient être proches ou similaires à celles du plâtre pris, en raison de leur composition et de leur nature physico-chimique semblables. Toutefois l'absence du processus de prise impacte très certainement les valeurs de résistances mécaniques, la craie de Bologne ne bénéficiant pas des liaisons ni des ancrages mécaniques, engendrés par l'enchevêtrement et la croissance inter-cristalline d'une forme di-hydratée issue de l'hémihydrate. Le matériau peut cependant être considéré en tant que charge aux aspects cristallins adéquats à certains usages : blancheur, finesse, possibilité d'être travaillé et affiné en surface.

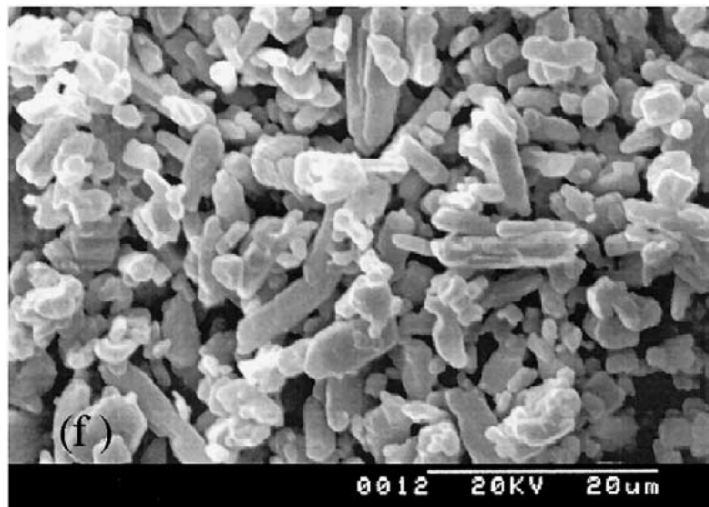


Figure 19 : détail de la craie de Bologne au MEB, tiré de Genestar, 2002.

d. Colle animale

Comme la plupart des colles animales et protéiniques, la colle de peau de lapin est obtenue par extraction du collagène par chauffage en solution aqueuse. La protéine de collagène est constituée de trois fibres, fortement assemblées par des liaisons hydrogènes entre les groupes hydroxyles d'hydroxyproline et des groupes glycines. Un long processus de chauffe permet de détériorer les fibres, qui se séparent en formant un gel. Le pouvoir adhésif est observé lors du refroidissement.

De nombreux paramètres influencent la qualité adhésive, comme la provenance du produit brut, ainsi que les étapes de transformation et les procédés finaux de préparation. Les praticien·nes et professionnel·les qui manient la colle de peau de lapin mettent en garde sur les étapes de chauffe et de maintien au chaud lors de son utilisation, indiquant qu'il ne faut pas dépasser une température de 60 °C, afin de ne pas brûler la colle. Cela risquerait de la dénaturer et de lui faire perdre ses propriétés adhésives.

La colle de peau de lapin est connue pour ses propriétés adhésives fortes, compatibles avec de nombreux matériaux organiques. En dorure, elle est utilisée comme matériau d'encollage, ainsi que comme liant pour la fabrication des apprêts, des pâtes modelables, et des bols teints sur lesquels sont appliqués les feuilles d'or.

Ses propriétés physico-chimiques varient selon les températures d'usage, avec une structure en forme de gel solide après refroidissement complet, sa possibilité de former un gel épais à température moyenne, ou encore un liquide très fluide à température élevée.

Les valeurs des études présentées correspondent à celles d'échantillons spécifiques, et de techniques analytiques particulières. Une comparaison des données pures n'est donc pas pertinente, mais cela permet de comprendre les tendances de comportement et de vérifier la résistance du matériau dans des conditions de température et d'humidité diverses. Les modifications de comportement peuvent alors être anticipées et les mécanismes d'altérations qui s'opèrent au sein de substrat en « composition » ou « gros blanc » sur les œuvres patrimoniales peuvent être expliqués.

En étudiant des films de colle concentrée à 4 %, Bridarolli¹³⁶ constate que les échantillons de colle dite « de peau de lapin » demeurent dans un état vitreux, ou phase 1, pour des températures et des taux d'humidité relative compris entre 0 et 40 °C et 0 et 40 %. Au-delà de 70 % d'humidité relative, le matériau entre dans un état caoutchouteux, ou phase 3, pour des températures allant de 20 à 40 °C. En élevant la température et le taux d'humidité relative, le changement de phase implique des modifications structurelles et donc des variations de comportement mécanique, avec, entre autres, un affaiblissement des résistances et une perte de rigidité. Toutefois, malgré les baisses de valeur liée à l'élévation du taux d'humidité relative, la colle dite « de peau de lapin » conserve des valeurs de rigidité et de résistance parmi les plus élevées, en comparaison des autres adhésifs¹³⁷.

A l'état sec, le matériau présente des valeurs très élevées de dureté, de rigidité et de résistance à la rupture selon les essais présentés par Mecklenburg¹³⁸. Des échantillons de colle chargée, de carbonate de calcium notamment, ont montré un comportement spécifique. Les résistances à la rupture et à la déformation décroissent en fonction du taux de charge ajoutée. La rigidité évolue de façon variable avec une phase de renforcement jusqu'à un certain seuil lors de l'ajout de la charge, suivie d'une baisse très importante au-delà du seuil¹³⁹. L'augmentation de l'humidité provoque des variations dimensionnelles s'élevant jusqu'à 6 % par cycle pour la colle seule. Des rétrécissements associés à des pertes de matière ont été observés au fil des cycles de variations climatiques, d'environ 5 % pour la colle seule, de 2,5 % pour l'apprêt liquide et de 1 % pour les mélanges très chargés. En augmentant la concentration en charge, les effets de gonflement et retraits sont réduits. Toutefois, une trop grande addition de charge peut provoquer des craquelures prématurées et la dégradation de la colle réduit drastiquement ses propriétés mécaniques¹⁴⁰.

¹³⁶ Bridarolli, « Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity », *op.cit.*, p. 231.

¹³⁷ *Ibid.*, p. 233 ; le détail des valeurs est présenté dans le Chapitre IV, sur les propriétés mécaniques solides.

¹³⁸ Mecklenburg, « Some Mechanical and Physical Properties of Gilding Gesso », *op.cit.*, p. 165.

¹³⁹ *Ibid.*, p. 170.

¹⁴⁰ *Ibid.*, p. 165.

III. Caractérisations physico-chimiques

Afin de mieux connaître les microstructures des matériaux et des formulations de l'étude, des observations et des analyses élémentaires par microscopie ont été intégrées. Les matériaux ont été observés à l'état brut, puis préparés, soit par gâchage eau/plâtre ou par mélange colle/craie. Des séries d'échantillons à des taux E/P variés ont été observées afin d'échelonner les différentes concentrations en poudre et les différents rapports massiques influençant l'état final.

1. Méthode

a. Matériaux et formulations

Les matériaux et formulations suivants ont été observés :

- Hémihydrate Molda® 3 Normal (noté M3N)
- Hémihydrate EXTHA®
- Carbonate de calcium
- Sulfate de calcium hydraté Molda® 3 Normal à E/P = 0,45 ; 0,7 ; 0,95
- Sulfate de calcium hydraté Molda® 3 Normal à E/P = 0,7 et 1,1 + carbonate de calcium à ratio 1-1
- Sulfate de calcium hydraté Molda® 3 Normal à E/P = 1,5 + carbonate de calcium à ratio 1-2 + 2 % de dioxyde de titane
- Mélange craie de Bologne + colle animale
- Mélange craie de Bologne + colle animale + dioxyde de titane à 2 %

Les observations préalables ont été faites au microscope optique, afin de repérer les zones d'intérêts : les caractéristiques du matériau ou certaines particularités ont été notées et associées à des schémas. Des photographies ont été faites quand cela semblait nécessaire. Les échantillons ont ensuite pu être observés au MEB. Les éléments ont été identifiés ou confirmés par analyse élémentaire à l'aide de la sonde EDS.

Les poudres ont été déposées sur les supports : lame de verre avec fond noir du plateau pour le microscope optique, support et adhésif au carbone pour les plots d'observation au MEB. Les échantillons type « fragment » ont été aplanis au scalpel sur le côté non observé, afin d'avoir un plan parallèle à l'axe des optiques pour limiter les effets de reliefs.

Les poudres ont aussi été observées tassées, afin de voir la répartition des cristaux colorés, peu visibles lorsque la poudre est libre sur le support à fond noir du microscope optique.

b. Microscope optique

Les observations sont faites avec un microscope optique Nikon Eclipse LV100 ND et le logiciel NIS Elements D (version 4.0). Les grossissements x 5 et x 10 sont les plus adaptés pour des vues générales et des détails. Le grossissement x 20 peut servir uniquement pour observer des détails très précis tels que des cristaux d'impuretés. Les reliefs des surfaces compliquent la mise au point ; il est nécessaire de faire varier la mise au point et la profondeur de champs pour avoir une bonne visibilité des caractéristiques, permettant ainsi de distinguer les reliefs les plus saillants et les diverses cavités telles que les bulles d'air, ou le fond du support. Afin d'obtenir une image photographiée satisfaisante, l'outil EDF¹⁴¹, qui permet l'assemblage et la superposition de vues, a systématiquement été utilisé en compilant huit à quatorze images manuellement.

c. Microscope électronique à balayage

Les échantillons ont été préparés pour les observations au MEB-EDS : ils ont été déposés sur plot, fixés sur une pastille adhésive en carbone, puis métallisés au platine. Les échantillons de type fragment, étant irréguliers et en saillie par rapport au plot, ont également été entourés de laque de carbone, pour limiter les effets de charge et la déviation du faisceau sur les pourtours. Les échantillons ont été métallisés quatre à cinq fois, en alternant entre une position statique et une rotation du support, de façon à optimiser la métallisation de l'ensemble de la surface et des reliefs de l'échantillon.

Les observations ont été faites avec un microscope électronique à balayage JEOL JSM 7800F, équipé d'un détecteur Bruker XFlash 6|30 et du logiciel Hitachi S-4700. Les grossissements étaient échelonnés entre x 100 et x 1000 pour des vues très générales et les repérages, de x 1000 à x 2000 pour des zones plus détaillées permettant de bien voir la répartition d'amas de cristaux, de x 2000 à x 4000 pour les détails ou les cristaux isolés, et enfin, ponctuellement, de x 4000 à x 5000 pour observer des détails spécifiques telles que les surfaces, ou des cristaux de très petites dimensions. Les prises de vue étaient généralement faites aux grossissements suivants :

- x 150, x 200, x 250, x 500, x 1000, x 1500, x 2000, x 2500, x 3000, x 4000 ...

Deux modes ont été utilisés de façon complémentaire pour les observations, l'un permettant de bien voir les cristaux, leurs formes et leurs reliefs, l'autre permettant de distinguer visuellement des compositions chimiques par la différence des contrastes en valeurs de gris.

- Mode LED (noté SE en anglais), paramètres : 5 kV, 8 probe current ≈ 143 pA
- Mode BED-C (noté BSE en anglais), paramètres : 15 kV, 11 probe current ≈ 982 pA

¹⁴¹ Extended Depth of Focus.

d. Analyse élémentaire

Le mode EDS, ou spectroscopie à dispersion d'énergie, a permis d'analyser et d'identifier les compositions élémentaires des matériaux, lors des observations en mode EDS avec le MEB, et le logiciel Bruker Esprit Spectrum. Les cristaux connus ou attendus ont pu être vérifiés, comme ceux du sulfate de calcium, du carbonate de calcium, et du dioxyde de titane. Les impuretés ont pu être analysées et identifiées.

- Mode BED-C (noté BSE en anglais), paramètres : 15 kV, 11 probe current \approx 982 pA et analyseur réglé à 60 kcps à 20 keV

Les zones à analyser ont été sélectionnées par cadrage ou par pointés, selon les dimensions des cristaux. Fréquemment, les effets de charges étaient importants et gênaient l'analyse¹⁴². Plusieurs analyses ont donc été faites successivement pour s'assurer d'obtenir un résultat fiable. Les matériaux présents étant connus et d'importants effets de charges compliquant les conditions d'analyses, il a été décidé de ne pas procéder à des quantifications élémentaires précises. Toutefois les analyses indiquent déjà, de façon relative, la quantité d'éléments présents en fonction de la hauteur du pic. Les spectres obtenus donnent des indications sur les éléments et les associations, surtout dans le cas des mélanges de sulfate et de carbonate de calcium, où les pics d'oxygène sont parfois trop élevés pour correspondre uniquement à la structure soufre-calcium du plâtre.

2. Résultats de l'étude en microscopie

a. État brut

Hémihydrate Molda[®] 3 Normal

Au microscope optique

Le M₃N est constitué de cristaux irréguliers et hétérogènes, aux amas compacts, et aux cristaux n'excédant pas 100 μ m de longueur (Fig. 21). Certains cristaux sont translucides et d'autres opaques. Ils sont de forme rhomboédrique pour la plupart, avec quelques cas aciculaires. Il y a peu de cristaux noirs, ou ocres (Fig. 20).

Au microscope électronique à balayage

Les cristaux de M₃N sont irréguliers et très variables en dimensions, en formes et en textures. Les plus petits cristaux sont de l'ordre du micron, alors que les plus gros dépassent 100 μ m. Ces gros cristaux présentent généralement une texture spongieuse et irrégulière, avec une forme générale de type prismatique ou polyédrique. Quelques cristaux aciculaires, très bien définis et à la texture très lisse, sont visibles (Fig. 22). Les petits cristaux sont pour la plupart sous forme de feuillets ou de plaquettes, plutôt tabulaires et circulaires. Des coccolites aux formes complètes et fragmentaires sont bien identifiables (Fig. 23).

¹⁴² Les effets de charge provoquent un déplacement du faisceau risquant de modifier la zone d'analyse qui ne correspond plus à la zone sélectionnée et affichée à l'écran.

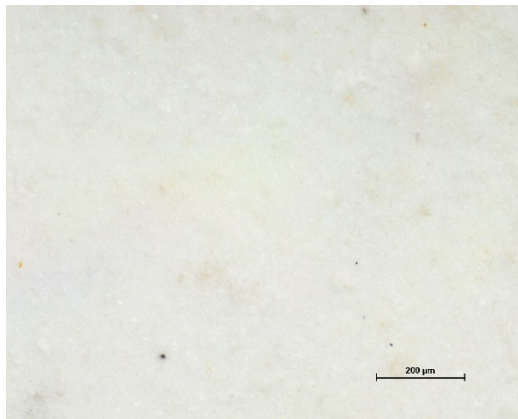


Figure 20 : hémihydrate Molda® 3 Normal, poudre tassée, MO x 10, échelle 200 µm.

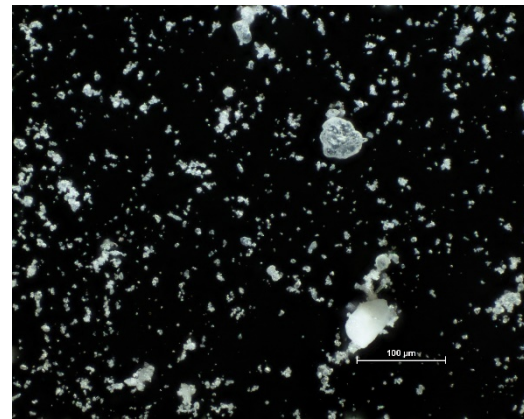


Figure 21 : hémihydrate Molda® 3 Normal, poudre libre, MO x 20, échelle 100 µm.

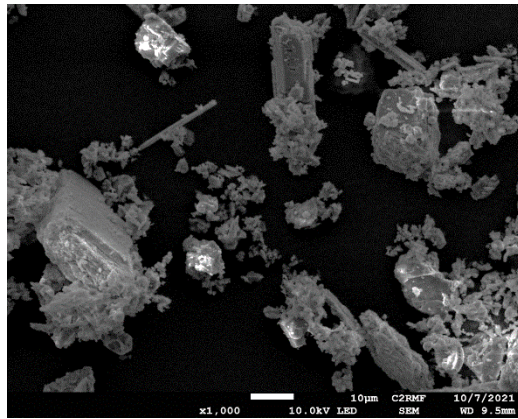


Figure 22 : hémihydrate Molda® 3 Normal, MEB x 1000, échelle 10 µm.

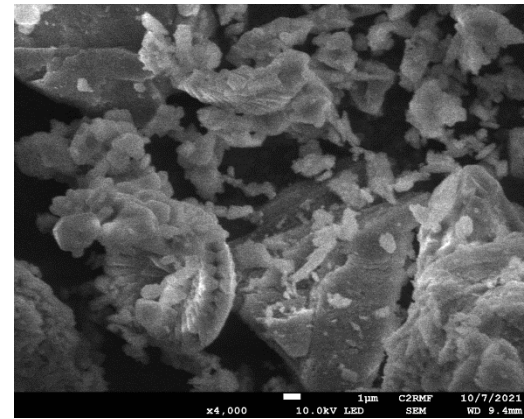


Figure 23 : hémihydrate Molda® 3 Normal, MEB x 4000, échelle 1 µm.

Hémihydrate EXTHA[®] Ibérica

Au microscope optique

Les formes et les dimensions des cristaux sont irrégulières et hétérogènes, de 1 à 100 μm . Certains cristaux sont opaques et d'autres légèrement translucides (Fig. 25). Quelques impuretés ont été observées : des cristaux rhomboédriques dans les tons brun clair à jaune. Beaucoup de cristaux noirs de forme sphérique ou aciculaire sont visibles ainsi que des cristaux translucides à la teinte ocre (Fig. 24).

Au microscope électronique à balayage

Le caractère hétérogène est confirmé, avec une importante variation des dimensions de cristaux (Fig. 26). Il y a également de nombreux cristaux de l'ordre du micron, qui se remarquent en augmentant le grossissement, ainsi que des cristaux qui avoisinent les 10 μm . Les plus gros cristaux sont supérieurs à 100 μm . Les formes très irrégulières sont prismatiques ou polyédrique, et aciculaires. Les aspects de surface varient entre des textures lisses et spongieuses. Des amas de cristaux, aux formes rappelant les macles en « fer de lance » et des assemblages en plaquettes ou en feuillets irréguliers sont observables (Fig. 27).

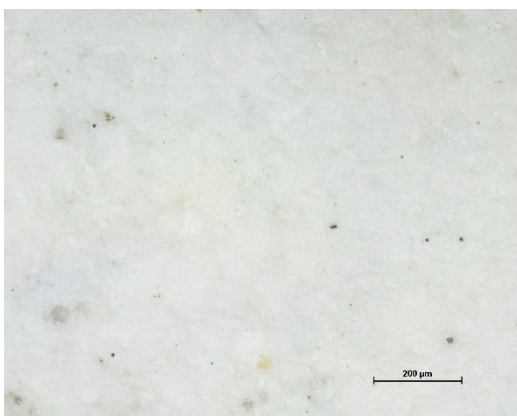


Figure 24 : hémihydrate EXTHA[®], poudre tassée, MO x 10, échelle 200 μm .

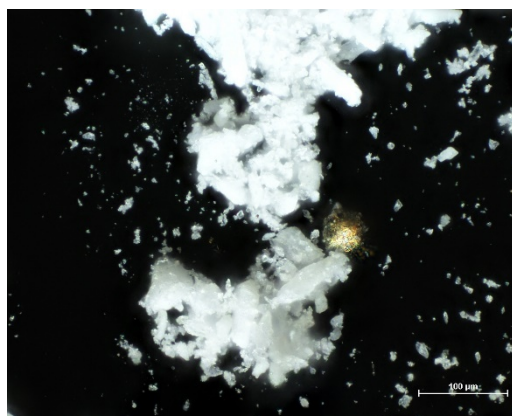


Figure 25 : hémihydrate EXTHA[®], poudre libre, MO x 20, échelle 100 μm .

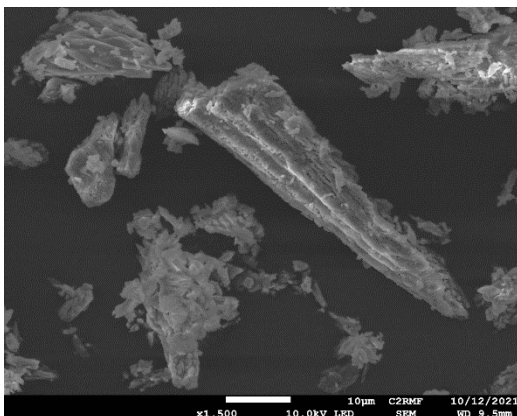


Figure 26 : hémihydrate EXTHA[®], MEB x 1500, échelle 10 μm .

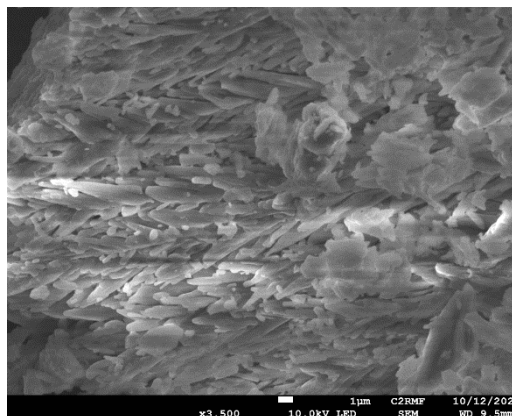


Figure 27 : hémihydrate EXTHA[®], MEB x 3500, échelle 1 μm .

Carbonate de calcium

Au microscope optique

Les cristaux sont très fins et réguliers, de couleur blanche, translucides à légèrement opaques (Fig. 29). Quelques rares cristaux noirs et orange sont visibles (Fig. 28).

Au microscope électronique à balayage

La taille des grains observée, comprise entre 1 et 10 μm , confirme les données de la fiche technique. Les cristaux ont des formes irrégulières, la plupart polyédriques, très certainement en raison du broyage et du concassage (Fig. 30 et 31). Il n'est donc pas possible de discerner des fossiles ou des coquilles caractéristiques du carbonate de calcium.

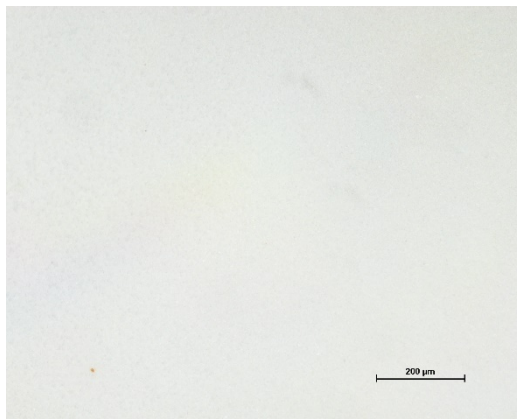


Figure 28 : carbonate de calcium, poudre tassée, MO x 10, échelle 200 μm .

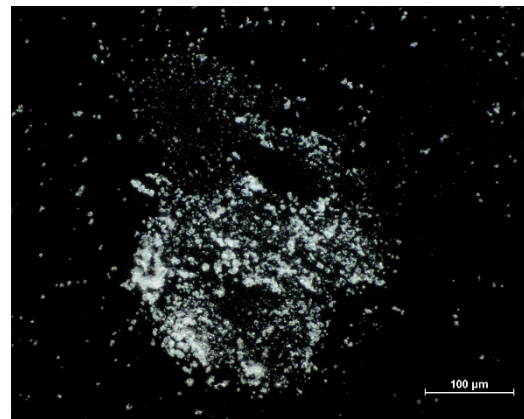


Figure 29 : carbonate de calcium, poudre libre, MO x 20, échelle 100 μm .

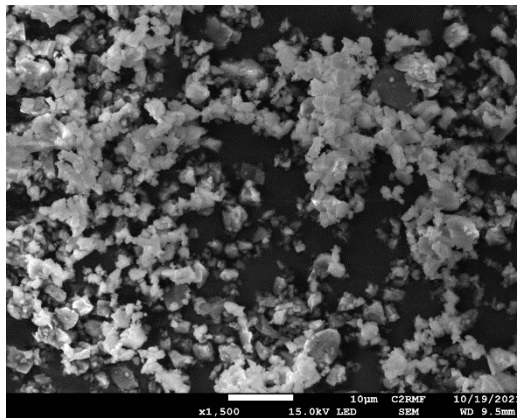


Figure 30 : carbonate de calcium, MEB x 1500, échelle 10 μm .

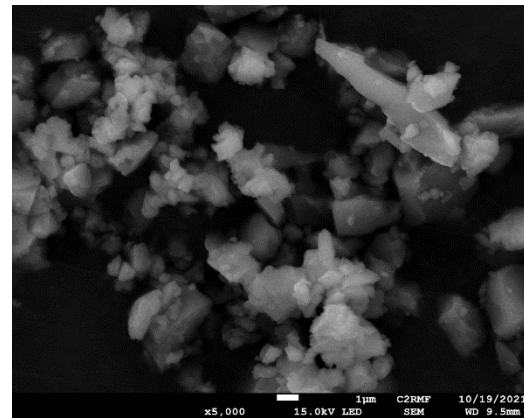


Figure 31 : carbonate de calcium, MEB x 5000, échelle 1 μm .

b. Formulations d'hydrate de sulfate de calcium et de craie de Bologne et colle

Sulfate de calcium hydraté Molda[®] 3 Normal à E/P = 0,45 ; 0,7 ; 0,95

Au microscope optique

La structure générale change selon le rapport massique et la concentration en poudre. À haute concentration (E/P = 0,45) la matière paraît très compacte et dense (Fig. 32). À faible concentration (E/P = 0,95) les cristaux sont moins serrés. Le substrat montre un aspect saccharoïde et des petits cristaux semblent prêts à se détacher (Fig. 33).

Des bulles d'air sont visibles, et semblent aussi varier selon le taux de gâchage. À E/P = 0,45, les plus grosses bulles d'air mesurent environ 400 µm et les plus petites font moins de 100 µm. À E/P = 0,95, il semble qu'elles soient moins présentes et de dimensions inférieures, les plus grosses mesurant entre 150 µm et 200 µm. Des cavités prismatiques irrégulières sont présentes et de petites dimensions.

Au microscope électronique à balayage

Après gâchage, le plâtre M3N a une structure similaire aux descriptions des références avec des amas de plaquettes et de cristaux aciculaires plus ou moins désordonnés, bien souvent rassemblés en faisceaux ou en macles, et quelques assemblages tenon-mortaise (Fig. 34 et 35). Les cavités circulaires et leurs parois aux cristaux ordonnés correspondent aux empreintes des bulles d'air (Fig. 36). D'autres cavités, polyédriques cette fois, sont des empreintes de cristaux de type anhydrite, solubilisés tardivement (Fig. 37). Les impuretés, souvent enchâssées dans les amas de cristaux, sont visibles par leur différence de contraste en mode BED-C (Fig. 38) et de formes (Fig. 39). Les taux de gâchage peuvent être distingués en fonction de l'aspect des cristaux et de l'allure générale de la structure. À E/P = 0,45, la matière est compacte et très dense, et les cristaux sont plus irréguliers (Fig. 40 et 41). Plus le plâtre est dilué, plus la structure est lâche (Fig. 42 et 43), et les cristaux mieux définis car le degré d'hydratation est plus abouti (Fig. 35, 43 et 45). Les espaces inter-cristallins sont plus ouverts, ce qui conditionnent des sites de ruptures préférentielles. Ainsi, les plans de cassure des taux dilués semblent plus en relief.



Figure 32 : Molda[®] 3 Normal E/P = 0,45, MO x 10, échelle 100 µm.



Figure 33 : Molda[®] 3 Normal E/P = 0,95, MO x 10, échelle 100 µm.

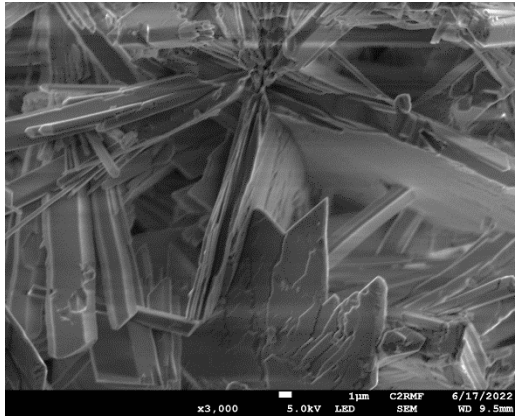


Figure 34 : Molda® 3 Normal E/P = 0,95, MEB x 3000, échelle 1 µm.

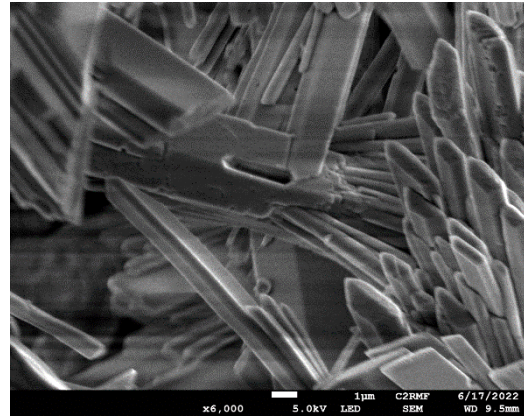


Figure 35 : Molda® 3 Normal E/P = 0,95, MEB x 6000, échelle 1 µm.

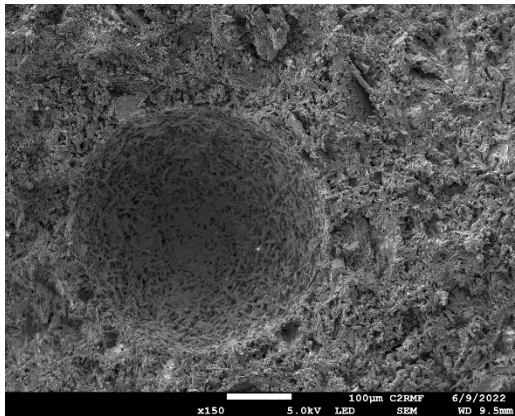


Figure 36 : Molda® 3 Normal E/P = 0,45, MEB x 150, échelle 100 µm.

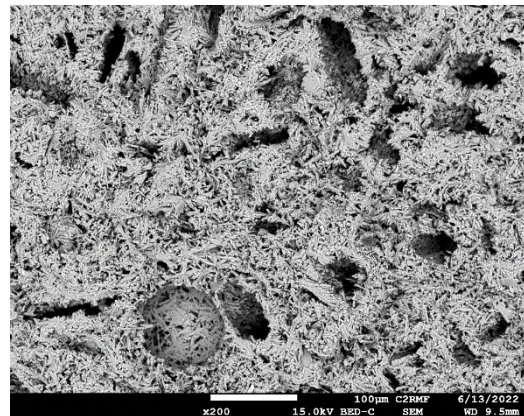


Figure 37 : Molda® 3 Normal E/P = 0,45, MEB x 200, échelle 100 µm, mode BED-C.

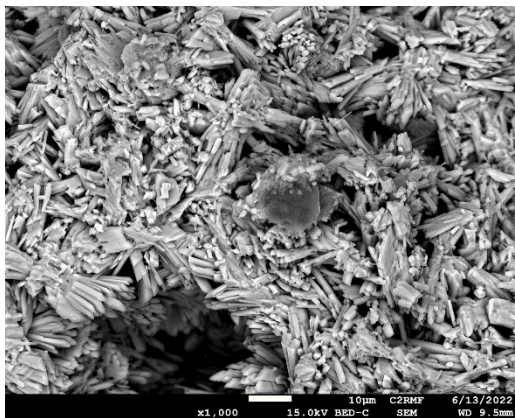


Figure 38 : Molda® 3 Normal E/P = 0,45, MEB x 1000, échelle 10 µm, mode BED-C.

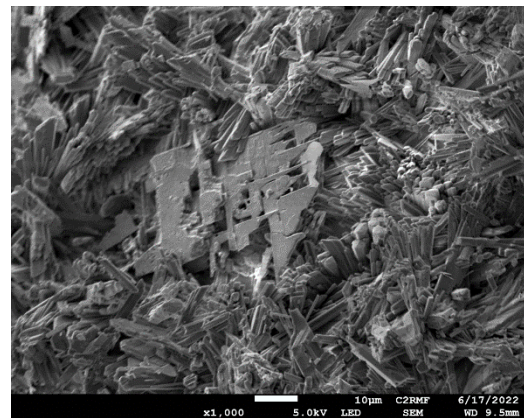


Figure 39 : Molda® 3 Normal E/P = 0,7, MEB x 1000, échelle 10 µm.

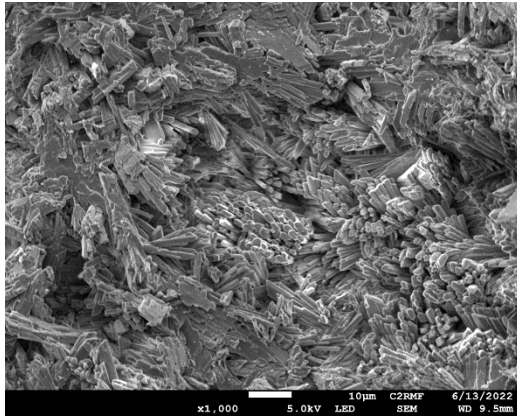


Figure 40 : Molda® 3 Normal E/P = 0,45, MEB x 1000, échelle 10 µm.

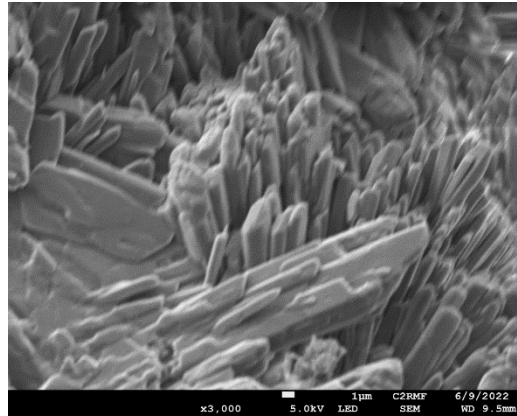


Figure 41 : Molda® 3 Normal E/P = 0,45, MEB x 3000, échelle 1 µm.

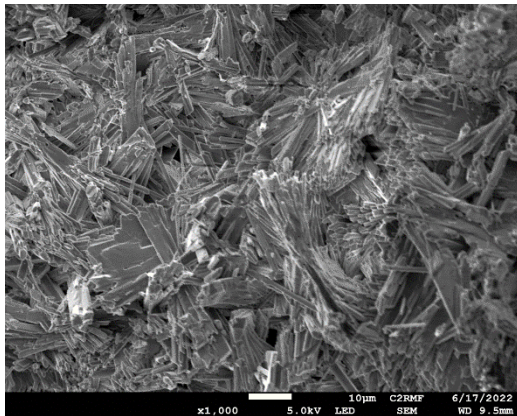


Figure 42 : Molda® 3 Normal E/P = 0,7, MEB x 1000, échelle 10 µm.

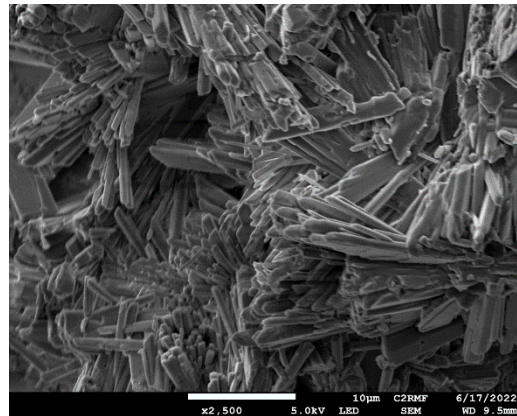


Figure 43 : Molda® 3 Normal E/P = 0,7, MEB x 2500, échelle 10 µm.

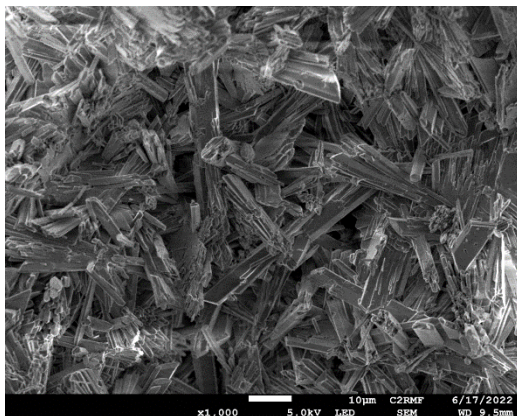


Figure 44 : Molda® 3 Normal E/P = 0,95, MEB x 1000, échelle 10 µm.

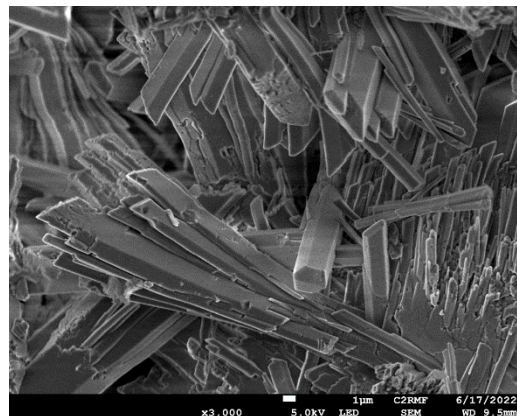


Figure 45 : Molda® 3 Normal E/P = 0,95, MEB x 3000, échelle 1 µm.

Craie de Bologne et colle animale

Au microscope optique

La structure générale est très dense et compacte. Des cavités de différentes grosseurs et des bulles d'air sont présentes (Fig. 46). Quelques cristaux ocres et noirs, de petites tailles sont visibles. Les zones plus concentrées en colle animale sont plus translucides et de teinte ocre, comme sur le fragment du haut (Fig. 47).

Au microscope électronique à balayage

La structure est irrégulière et désordonnée à fort grossissement, avec des cristaux aux formes variables, de quelques microns à plusieurs dizaines de microns. Ils sont principalement de formes polyédriques, avec des bords très irréguliers. Certaines structures tabulaires ou aciculaires sont organisées en feuillets ou en faisceaux (Fig. 48). En mode BED-C, la différence de contrastes selon l'espèce chimique révèle bien la présence de quelques impuretés, en gris foncé¹⁴³ (Fig. 49). Il n'est pas possible de distinguer visuellement les cristaux de sulfates de ceux de carbonates de calcium.



Figure 46 : craie et colle, MO x 10, échelle 100 µm.

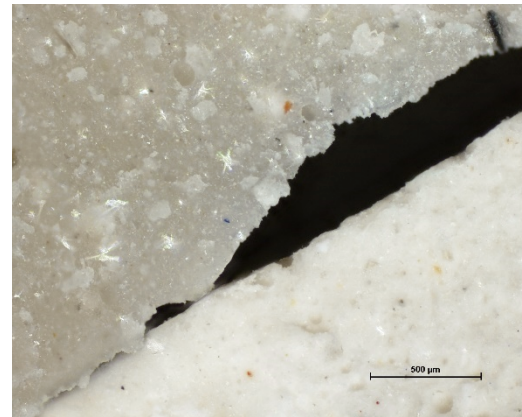


Figure 47 : craie et colle, MO x 5, échelle 100 µm.

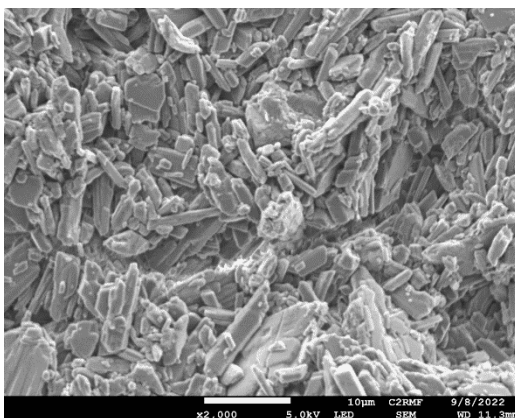


Figure 48 : craie et colle, MEB x 2000, échelle 10 µm.

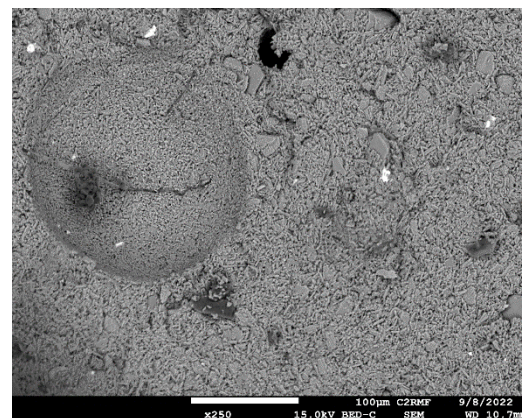


Figure 49 : craie et colle, MEB x 250, échelle 100 µm, mode BED-C.

¹⁴³ Les zones blanches sont des effets de charge.

c. Formulations à charges différenciables

Plâtre et carbonate de calcium¹⁴⁴

Au microscope optique

La structure est similaire à celle du plâtre seul, mais elle présente plus de matité. La porosité apparente semble modifiée, avec moins d'espaces intergranulaires et moins de fantômes de cristaux d'anhydrites. Les bulles d'air conservent les dimensions habituelles. La texture présente un aspect poudreux lorsque la concentration en plâtre baisse, avec des cristaux moins compacts et moins liés (Fig. 50 et 51).

Au microscope électronique à balayage

L'addition de carbonate de calcium se distingue clairement par de fins cristaux qui remplissent les espaces interstitiels et intergranulaires de la porosité (Fig. 52). De très petites dimensions, ils ne peuvent pas être confondus avec les aiguilles de sulfate de calcium dihydraté. À E/P = 1,1, la matrice est moins dense et moins compacte (Fig. 53).

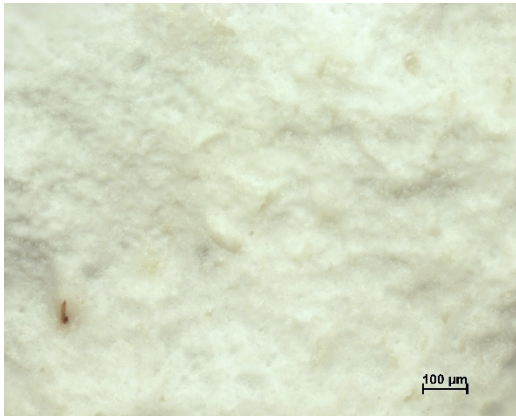


Figure 50 : M₃N E/P = 0,7 et carbonate de calcium ratio 1-1, MO x 10, échelle 100 μm.

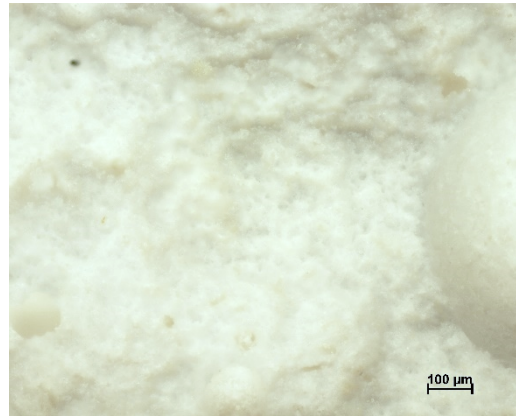


Figure 51 : M₃N E/P = 1,1 et carbonate de calcium ratio 1-1, MO x 10, échelle 100 μm.

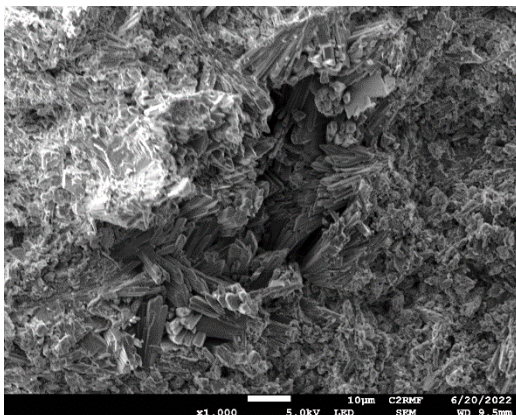


Figure 52 : M₃N E/P = 0,7 et carbonate de calcium ratio 1-1, MEB x 1000, échelle 10 μm.

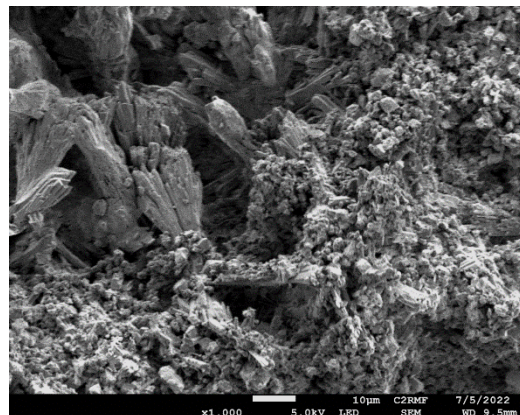


Figure 53 : M₃N E/P = 1,1 et carbonate de calcium ratio 1-1, MEB x 1000, échelle 10 μm.

¹⁴⁴ Sulfate de calcium hydraté Molda® 3 Normal à E/P = 0,7 et 1,1 + carbonate de calcium à ratio 1-1.

Plâtre, carbonate de calcium et dioxyde de titane¹⁴⁵

Au microscope optique

Le mélange est peu concentré en hémihydrate. La structure est donc peu compacte et peu liée, les cristaux sont bien visibles et l'aspect semble très poudreux, voir « floconneux » (Fig. 54). La granulométrie générale paraît très fine. Le substrat est mat et semble plus blanc que les autres échantillons observés, sans carbonate et sans blanc de titane. Les caractéristiques habituelles du plâtre sont visibles comme des cristaux d'impuretés, des bulles d'air de différentes grosseurs (Fig. 55), et quelques cavités prismatiques.

Au microscope électronique à balayage

Ce mélange, peu concentré en plâtre et très chargé en carbonate de calcium, est facilement identifiable. De très nombreux petits cristaux ou grains sont dispersés de façon irrégulière dans la structure cristalline du plâtre (Fig. 57). Ils correspondent au carbonate de calcium et au pigment de blanc de titane. Les cristaux aciculaires de sulfate de calcium sont parsemés en amas et de dimensions inférieures à ceux du plâtre seul (Fig. 56).

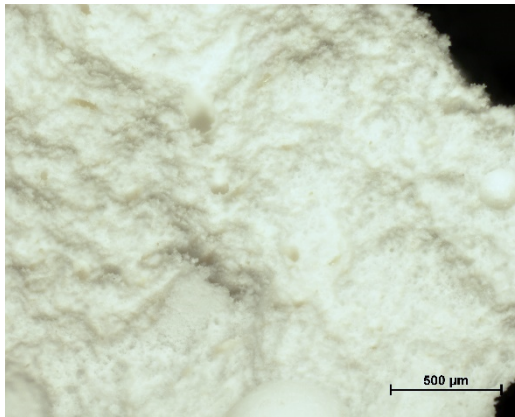


Figure 54 : M₃N E/P = 1,5, CaCO₃ ratio 1-2, TiO₂ à 2 %, MO x 5, échelle 500 μm.

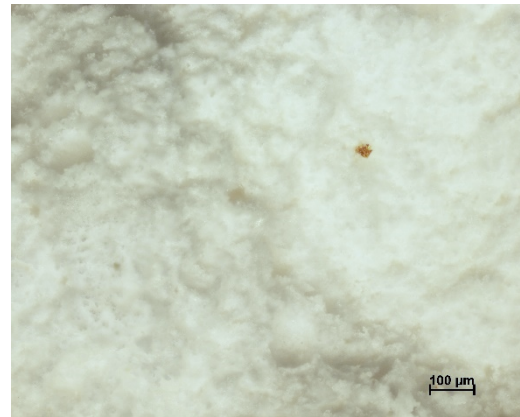


Figure 55 : M₃N E/P = 1,5, CaCO₃ ratio 1-2, TiO₂ à 2 %, MO x 10, échelle 100 μm.

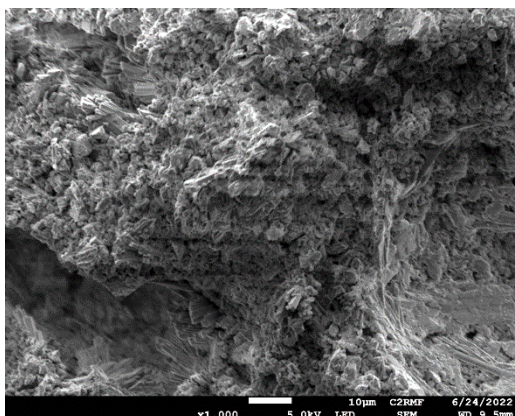


Figure 56 : M₃N E/P = 1,5, CaCO₃ ratio 1-2, TiO₂ à 2 %, MEB x 1000, échelle 10 μm.

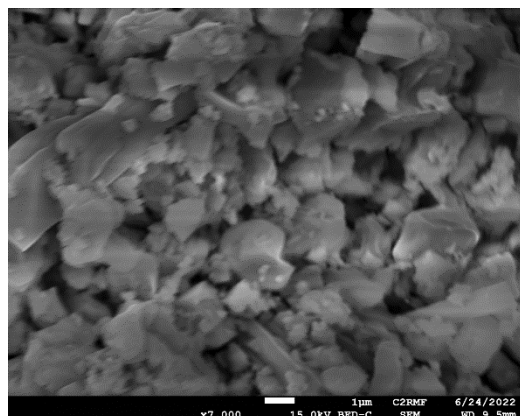


Figure 57 : M₃N E/P = 1,5, CaCO₃ ratio 1-2, TiO₂ à 2 %, MEB x 7000, échelle 1 μm.

¹⁴⁵ Sulfate de calcium hydraté Molda® 3 Normal à E/P = 1,5 à ratio plâtre-carbonate de calcium 1-2 et à 2 % de dioxyde de titane en masse additionnée.

Craie de Bologne, colle et dioxyde de titane

Au microscope optique

Les caractéristiques de ce mélange sont très semblables à la formulation sans dioxyde de titane (Fig. 58). À cette échelle, il ne semble pas possible de distinguer la présence du pigment blanc de marquage concentré à 2 % en masse.

Au microscope électronique à balayage

La structure est similaire à celle du mélange sans pigment. Toutefois, de très fines particules agrégées, inférieures à 1 μm , peuvent être observées entre les plus gros cristaux du substrat (Fig. 59). Il s'agit très certainement du dioxyde de titane. Les particules sont bien visibles dans la porosité et entre les cristaux, surtout à fort grossissement (Fig. 60), et elles présentent un contraste significatif en mode BED-C, en apparaissant plus blanches que les cristaux de craie de Bologne (Fig. 61).



Figure 58 : craie, colle, et dioxyde de titane, MO x 10, échelle 100 μm .

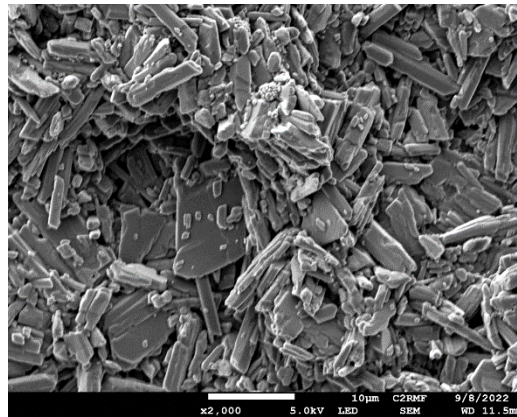


Figure 59 : craie, colle, et dioxyde de titane, MEB x 1000, échelle 10 μm .

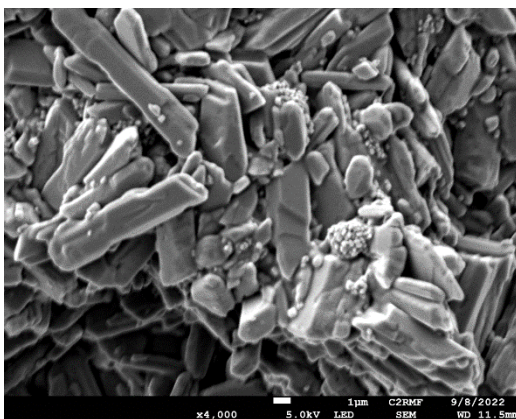


Figure 60 : craie, colle, et dioxyde de titane, MEB x 4000, échelle 1 μm .

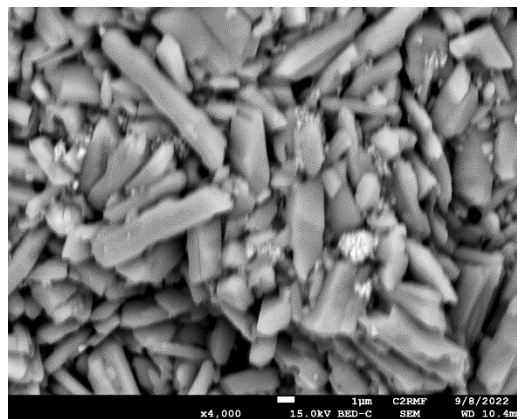


Figure 61 : craie, colle, et dioxyde de titane, MEB x 4000, échelle 1 μm , mode BED-C.

Observation de micro-organismes

Dans les mélanges de craie de Bologne et de colle, avec ou sans dioxyde de titane, des micro-organismes ont pu être observés, à l'œil nu, puis en microscopie (bord droit de la Fig. 62).

Au microscope optique

Dans certaines bulles d'air ou cavités, des filaments grisâtres, partiellement translucides à fort grossissement, sont notables (Fig. 63).

Au microscope électronique à balayage

Des filaments ainsi que des formes ellipsoïdales ont été remarqués dans la porosité, confirmant par leur faciès la présence de micro-organismes qui pourraient être de la famille *Aspergillus fumigatus* (Fig. 65). Les hyphes sont propagés dans la porosité du substrat, comme dans la bulle d'air, bien visibles en mode BED-C (Fig. 64).



Figure 62 : craie, colle, et dioxyde de titane, MO x 5, échelle 500 μm.

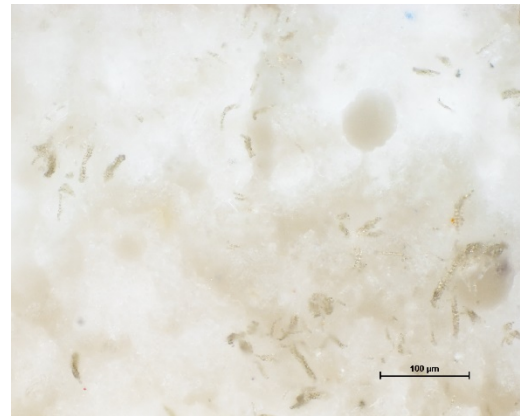


Figure 63 : craie, colle, et dioxyde de titane, MO x 20, échelle 100 μm.

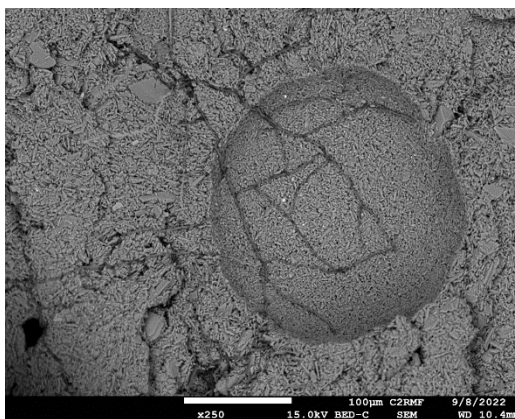


Figure 64 : craie, colle, et dioxyde de titane, MEB x 250, échelle 100 μm, mode BED-C.

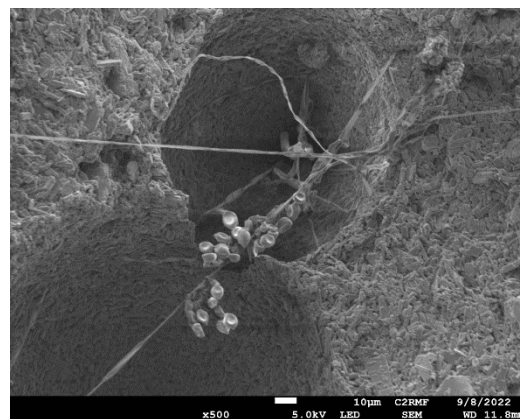


Figure 65 : craie et colle, MEB x 500, échelle 10 μm.

3. Résultats des analyses EDS

Les analyses sur des cristaux identifiés par critères visuels comme du plâtre, comme les cristaux aciculaires et les macles, ont toutes révélées la présence des éléments constitutifs du sulfate de calcium tels que Ca, S, et O (Fig. 66). À l'état d'hémihydrate, des cristaux spongieux et lamellaires sont également analysés comme du sulfate de calcium (Fig. 67). L'identification des éléments est donc vérifiée et validée par les pics clairement distincts. La variété de faciès des cristaux de sulfate de calcium a été confirmée.

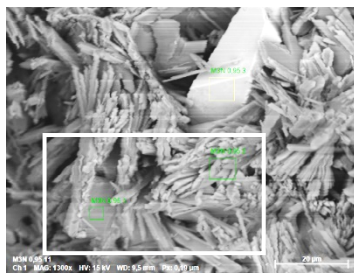


Figure 66 : M3N E/P=0,95, MEB x 1300, échelle 20 µm, mode BED-C, spectre EDS.

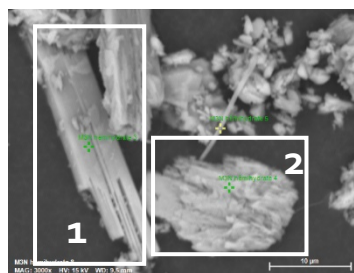
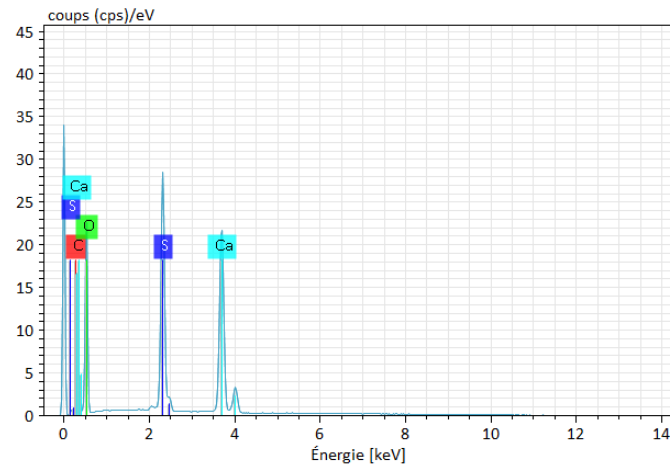
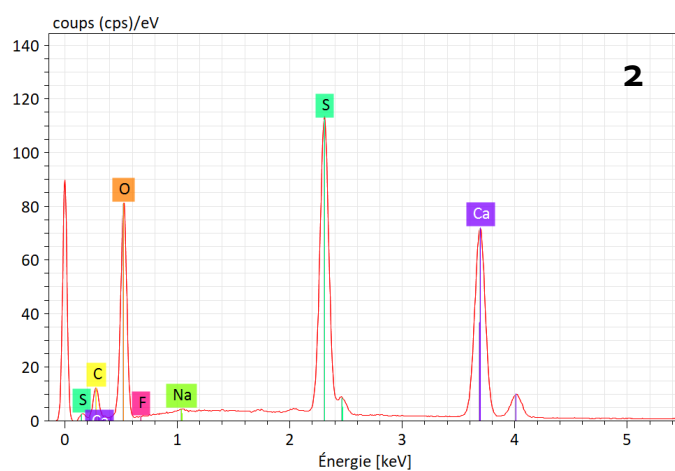
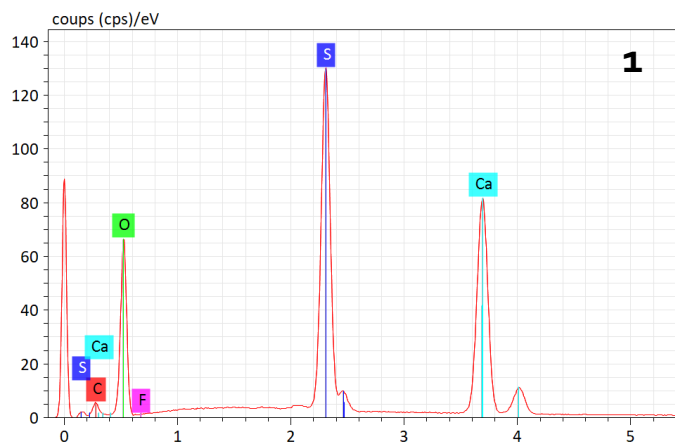


Figure 67 : M3N hémihydrate, MEB x 3000, échelle 10 µm, mode BED-C, spectre EDS, présence d'éléments caractéristiques du sulfate de calcium.



Certains cristaux ont été identifiés comme cristaux ou impuretés naturellement présents dans le gypse tels que comme la dolomie (carbonate double de calcium et magnésium), la célestine et/ou la strontianite (sulfate et/ou carbonate de strontium) (Fig. 68), ainsi que des oxydes métalliques variés (Si, Fe, Al, Mg, K, Na ...) (Fig. 69).

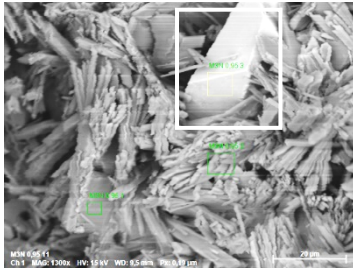


Figure 68 : M₃N E/P=0,95, MEB x 1300, échelle 20 μm, mode BED-C, spectre EDS, présence de l'élément strontium.

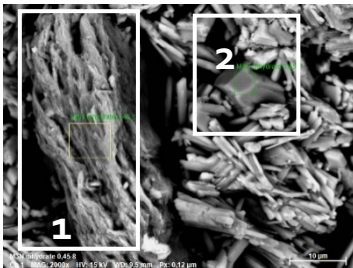
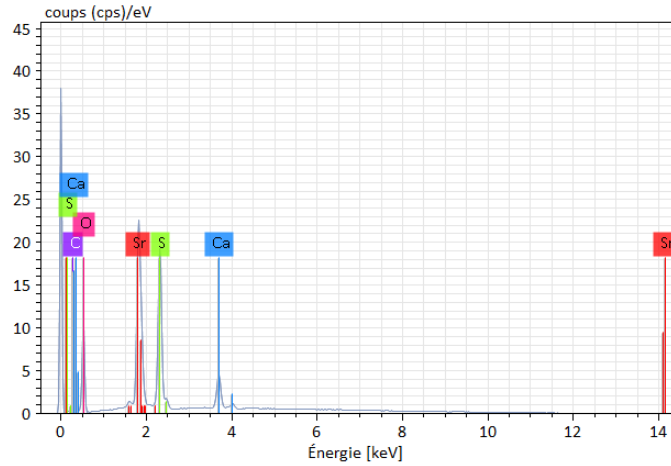
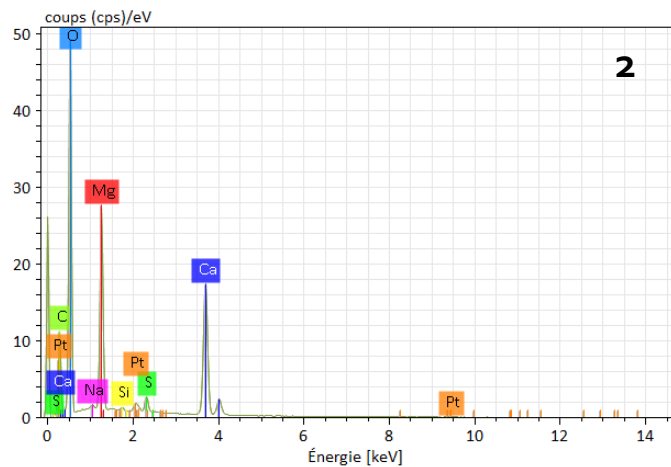
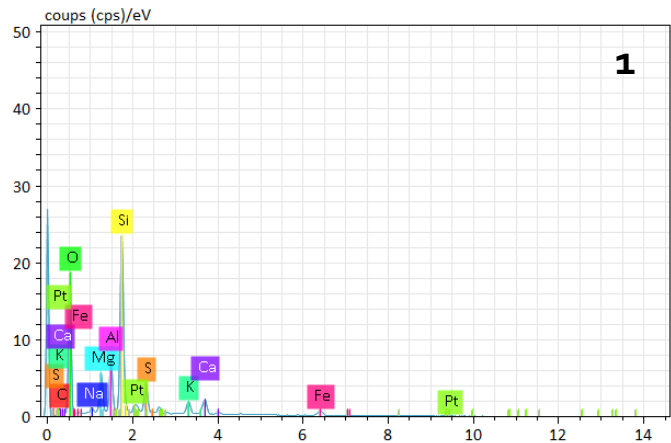


Figure 69 : M₃N E/P=0,45, MEB x 2000, échelle 10 μm, mode BED-C, spectre EDS, détection d'éléments divers.



Le carbonate de calcium, utilisé comme additif, a été identifié dans les zones supposées, avec un pic plus élevé de carbone (Fig. 70). Dans les échantillons d'hémihydrate, les coccolithes ont également montré d'importants pics de carbone, ainsi que des traces d'autres éléments comme le magnésium et le sodium (Fig. 71). Un pic de soufre est souvent associé à ces analyses, mais il est plus bas que pour les analyses ciblées de sulfate de calcium.

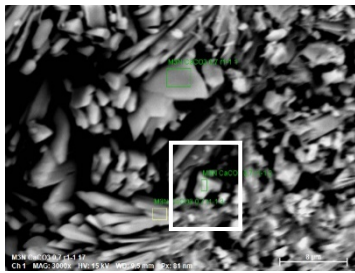


Figure 70 : M₃N E/P=0,95, MEB x 3000, échelle 8 μ m, mode BED-C, spectre EDS, détection de carbonate de calcium en additif.

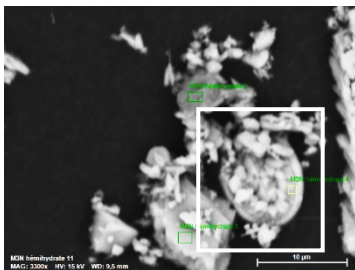
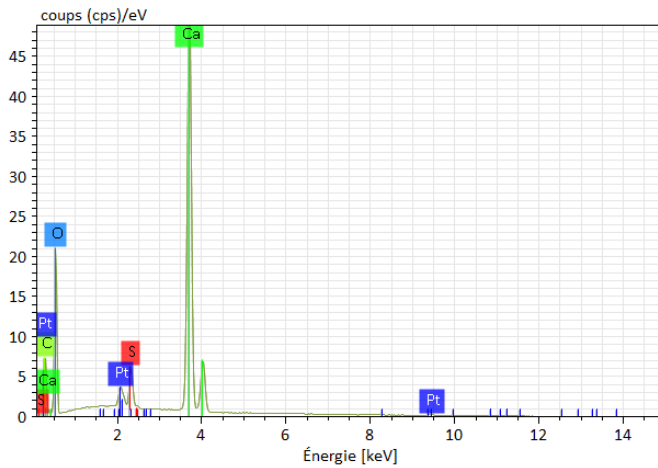
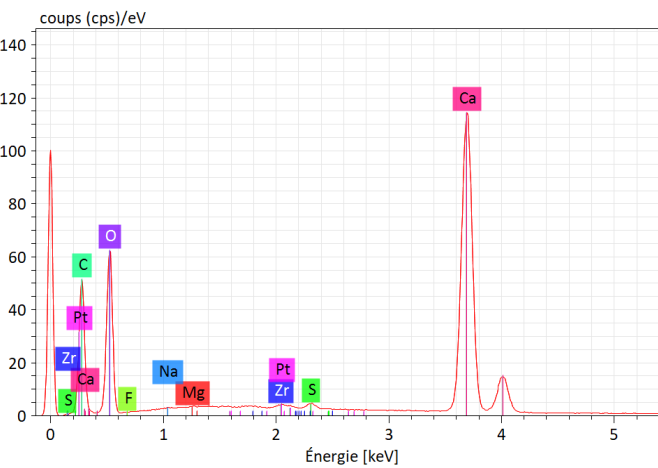
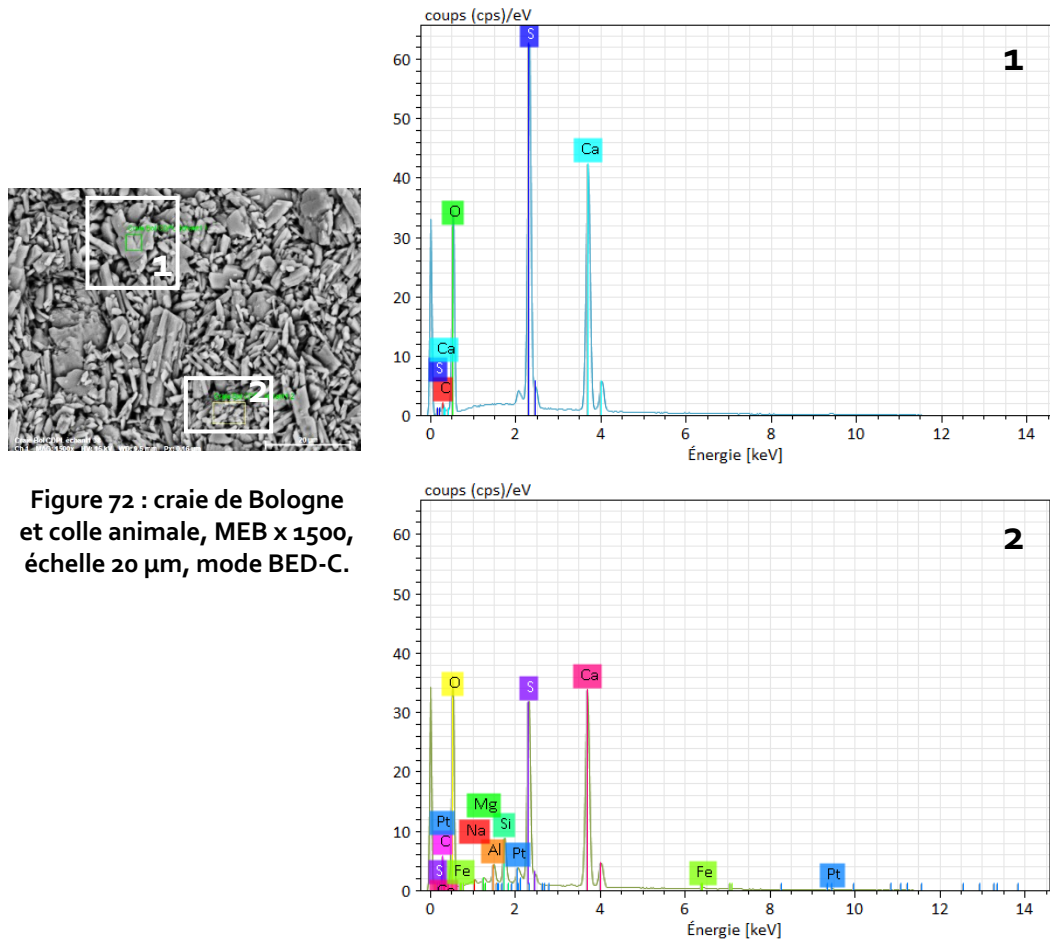


Figure 71 : M₃N hémihydrate, MEB x 3300, échelle 10 μ m, mode BED-C, spectre EDS, détection du carbonate de calcium naturellement présent.



La craie de Bologne est composée de S, Ca, C et O (Fig. 72, encadré et spectre 1). Quelques cristaux observés ont été analysés et sont constitués des éléments suivants : K, Na, Si, Mg, Fe, Al, Cl (Fig. 72, encadré et spectre 2), présents en moindre importance. Ils correspondent aux impuretés ou aux inclusions naturelles citées sur la fiche du fournisseur¹⁴⁶.



¹⁴⁶ Fiche technique du blanc de Bologne Kremer citant les autres composés : dioxyde de silicium, SiO₂ 0,86 % ; oxyde d'aluminium, Al₂O₃ 0,34 % ; oxyde de fer III, Fe₂O₃ 0,12 % ; oxyde de magnésium, MgO 1,07 % ; Bentonite 0,90 %.

Le dioxyde de titane a été facilement identifié, avec la détection des éléments Ti et O en sélection large sur l'échantillon, dans les échantillons de plâtre et de craie de Bologne. D'autres éléments ont été détectés comme l'aluminium Al et du silicium Si, qui correspondent à l'alumine Al_2O_3 et au silicium SiO_2 constitutifs du pigment d'après la fiche de fabricant. Le magnésium Mg, le cuivre Cu, et le zinc Zn semblent aussi présents mais en quantités très limitées.

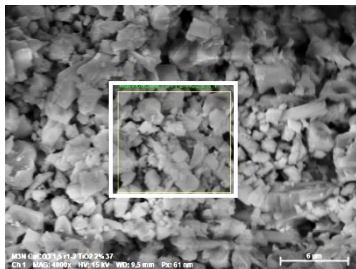


Figure 73 : M₃N E/P = 1,5 carbonate de calcium à ratio 1-2, dioxyde de titane à 2 %, MEB x 4000, échelle 6 μm, mode BED-C, spectre EDS, détection du dioxyde de titane.

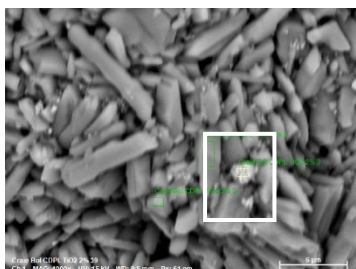
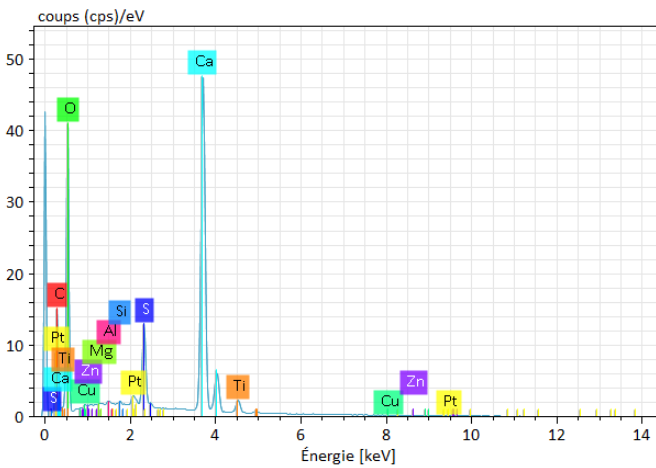
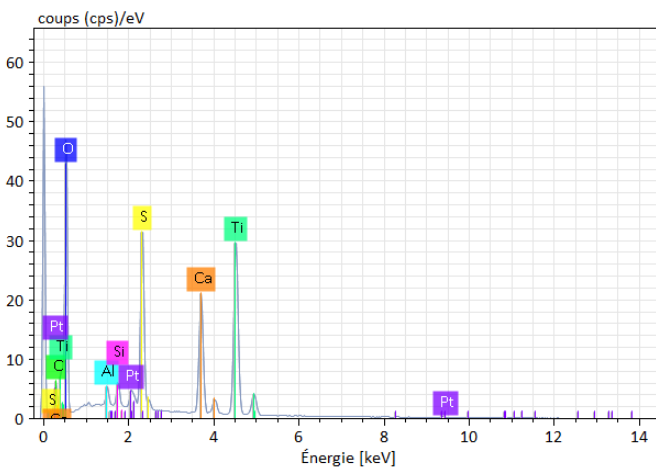


Figure 74 : craie, colle, et dioxyde de titane à 2 %, MEB x 4000, échelle 6 μm, mode BED-C, spectre EDS, détection du dioxyde de titane.



Analyse d'un cadre du XVIII^e siècle

Un cadre du musée du Louvre, daté du XVIII^e siècle, porte la mention « ornement de composition », mention rendue obligatoire à la fin du XVIII^e siècle afin de distinguer les cadres en bois sculptés et ceux en ornements moulés. Porteur de la mention et daté, il a semblé intéressant de pouvoir analyser la matière de la « composition » présente sur ce cadre. Faisant partie d'un corpus de cadres étudiés actuellement dans un projet sur les cadres français, associant le musée du Louvre et le C2RMF, le cadre a pu être observé à l'atelier Dorure en septembre 2022.



Figure 75 : cadre du XVIII^e siècle, mention « ornement de composition »,
© musée du Louvre, J. Robin Dupire.

Prélèvements

Deux fragments de matière ont été repérés dans des zones altérées et ont été prélevés. Ils proviennent des couches internes du substrat, sans salissure ni élément de surface. Un troisième fragment de localisation inconnue a été récupéré lors des manipulations.

- Echantillon a : provenant de l'angle bas senestre, moyenne dimension (non analysé)
- Echantillon b : provenant de l'angle haut dextre, grande dimension
- Echantillon c : non localisé, petite dimension

Analyses

Des observations sous microscope optique, puis au microscope électronique à balayage complétées par une analyse élémentaire par sonde EDS, ont permis de caractériser les structures, de comparer les faciès de cristaux aux échantillons de plâtre testés dans ces travaux et d'identifier les éléments présents. Les fragments ont été préparés pour les observations et métallisés au platine pour le MEB.

Résultats

Au microscope optique, la matrice est blanche avec quelques grains fins orange, des cristaux plus importants, et des bulles d'air (Fig. 76 et 77). Dans certaines zones, seule la matrice liante translucide est visible (Fig. 76, image du haut). Des résidus de poussières, d'or et de bois sont visibles sur l'échantillon c (Fig. 77, image du haut). Les deux fragments ont montré des caractéristiques similaires, avec un aspect très dense, très compact, et une translucidité plus ou moins marquée qui est caractéristique de la concentration de colle.

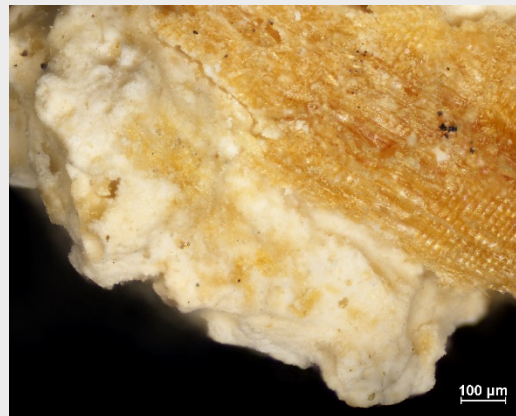
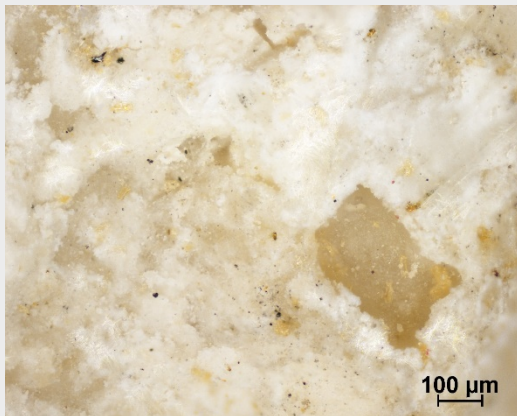
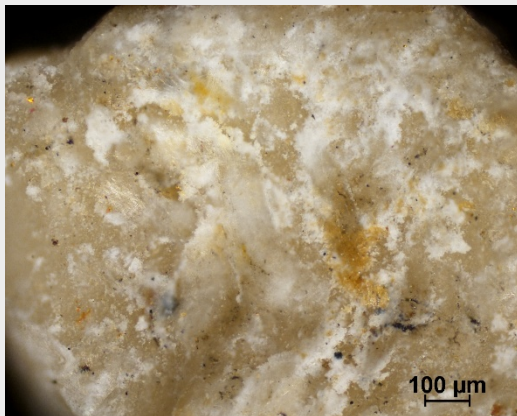


Figure 76 : échantillon b, MO x 10, parties haute et basse.

Figure 77 : échantillon c, MO x 10, parties haute et basse.

En observation MEB, aucune structure cristalline aciculaire, caractéristique du sulfate de calcium, n'a été observée. Les matrices sont denses, avec des fragments de dimensions et d'aspects variables (Fig. 78). À fort grossissement, de nombreux micro-fossiles peuvent être observés, indiquant une présence accrue de carbonate de calcium (Fig. 79). La forte concentration en colle ou des zones de matrice encollée sont bien visibles par endroit, formant une surface d'aspect lisse, englobant et recouvrant les cristaux (Fig. 80).

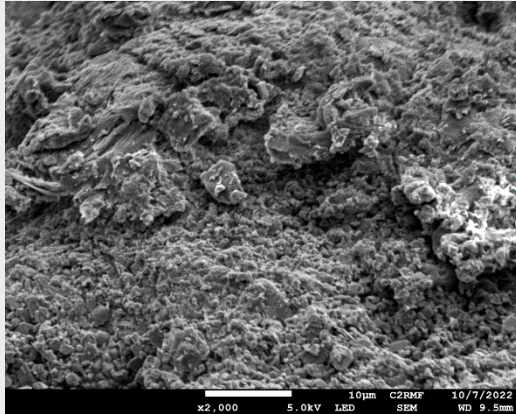


Figure 78 : échantillon b, MEB x 2000, échelle 10 μm .

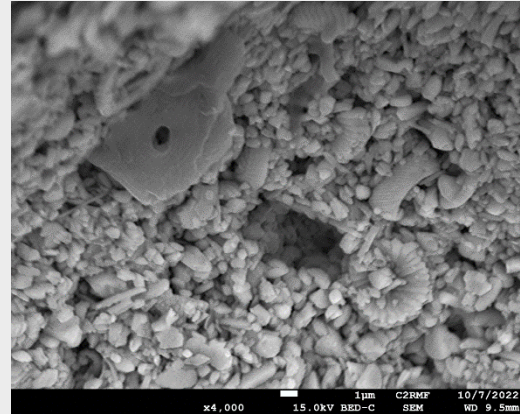


Figure 79 : échantillon c, MEB x 4000, échelle 1 μm , mode BED-C.

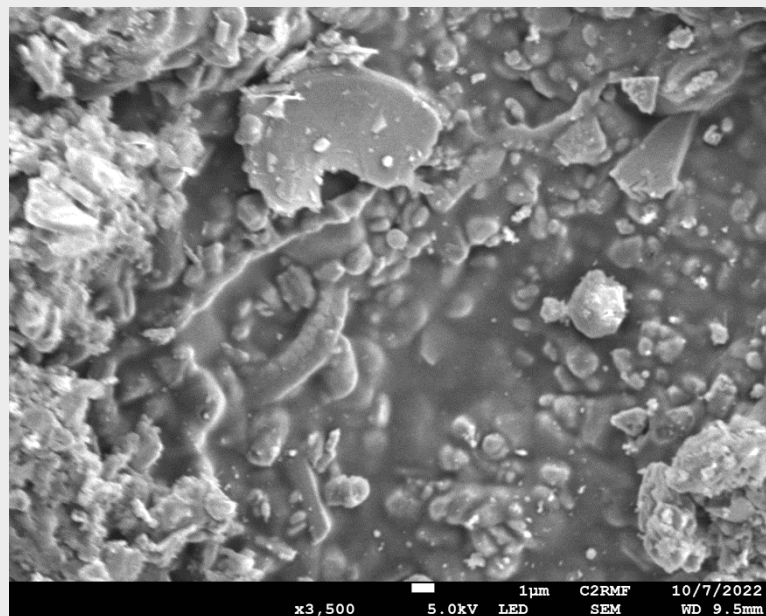
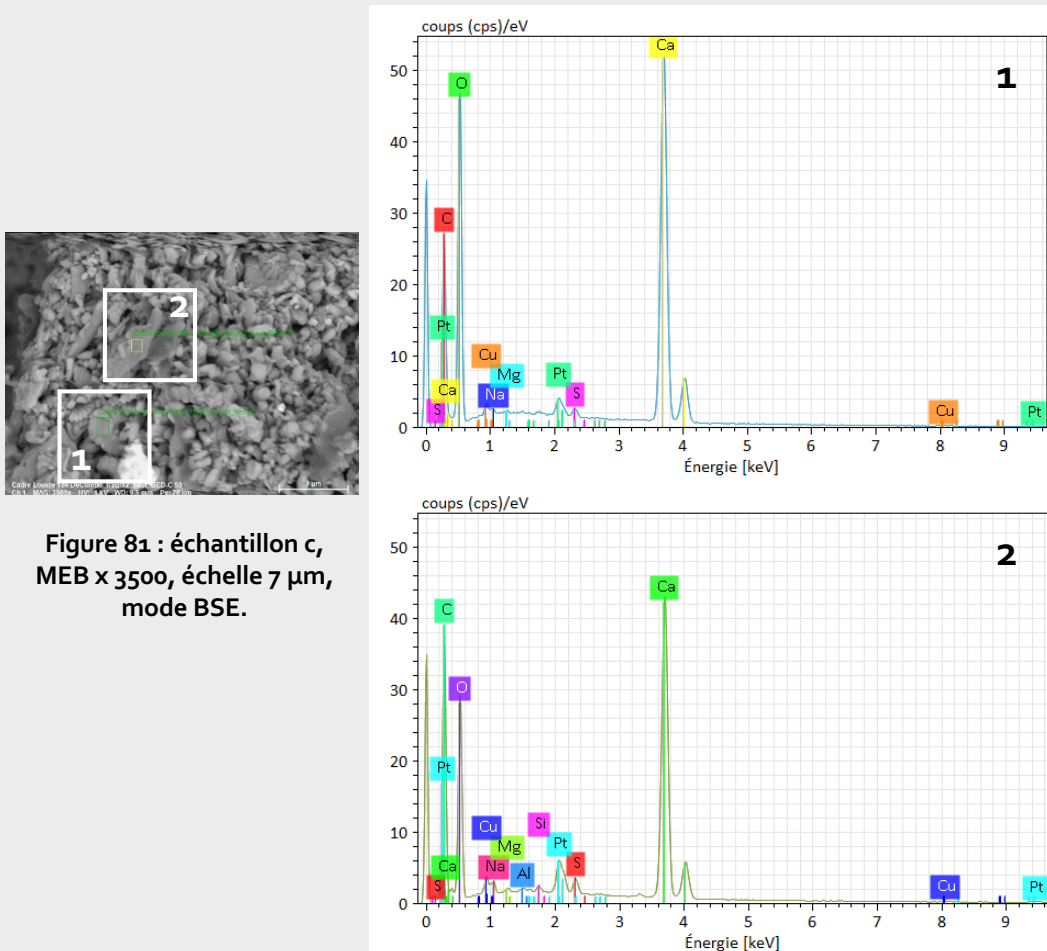


Figure 80 : échantillon b, MEB x 3500, échelle 1 μm .

Par analyse avec la sonde EDS, les différents pointés permettent l'observation des éléments Ca, C, O, K, Fe, Cu. Sur les zones de fossiles, les éléments identifiés sont principalement du Ca, C, et O avec des traces d'autres éléments comme Cu, Na, et Mg (Fig. 81, encadré et spectre 1). Certains grains irréguliers sont composés de C, O, Ca, Na, Mg, Al, S, Cu, et Si (Fig. 81, encadré et spectre 2), pouvant correspondre à des impuretés du substrat ou à des pigments ajoutés à la matrice. Les pics du soufre sont peu fréquents et peu élevés.



→ Les matériaux présents sont très probablement du carbonate de calcium mélangé à de la colle animale, caractéristiques de la principale formulation de la « composition ». Les quelques grains orange peuvent être des pigments ou des impuretés présentes naturellement dans le carbonate de calcium, qui contient toujours de faibles pourcentages de minéraux comme du quartz ou des argiles.

Synthèse

Après avoir constaté les méthodes et les matériaux de comblement dans le chapitre I, une sélection de matériaux et de formulations a été faite et développée dans ce chapitre II comprenant du plâtre, du carbonate de calcium, du dioxyde de titane, ainsi que de la craie de Bologne mélangée à de la colle animale. En étudiant les contextes techniques et les sources scientifiques générales, il a été observé que le plâtre a bénéficié de nombreuses études permettant de mieux connaître ses caractéristiques techniques depuis sa formation cristalline à l'état de roche puis d'hémihydrate jusqu'à ses propriétés mécaniques à l'échelle macroscopique. Le carbonate de calcium ou le dioxyde de titane sont des additifs courants pour l'élaboration de matériaux et leurs effets sont étudiés dans un certain nombre de références bibliographiques. La colle animale et la craie de Bologne sont moins couramment étudiées car plutôt circonscrites au patrimoine. Les informations techniques tirées des données de la littérature ont été présentées, en s'intéressant plus spécifiquement aux caractéristiques micro-structurelles et physico-chimiques, avant de procéder aux observations et à la description des résultats de l'étude.

Au microscope optique, le plâtre a une structure cristalline caractéristique, plus ou moins dense et compacte, avec une porosité variable, selon le taux de gâchage. Des bulles d'air sont systématiquement présentes. Plus il y a d'eau dans le mélange, plus la structure est aérée et les cristaux moins serrés. À fort grossissement, il est possible de distinguer des cristaux allongés, légèrement translucides ou d'aspects brillants. Selon le type de plâtre, les proportions d'impuretés varient. Le carbonate de calcium et le dioxyde de titane ajoutés au plâtre sont difficiles à différencier du plâtre à cette échelle. Toutefois, une couleur blanche plus intense, un aspect mat, une finesse des grains, et une texture poudreuse, peuvent être des indicateurs de leur présence. Plus la matière semble crayeuse et friable, plus la proportion de carbonate de calcium est élevée. Le mélange de craie de Bologne et de colle, avec ou sans blanc de titane, se distingue du plâtre car la formulation présente une teinte plus ocre et une texture plus lisse et plus dense. Les observations au microscope optique permettent donc une première estimation des matériaux en présence, qui peut ensuite être complétée et vérifiée par d'autres méthodes.

Au MEB, couplé à la sonde EDS permettant une analyse élémentaire, les cristaux de plâtre sont facilement reconnaissables par leurs formes d'aiguilles, de plaquettes, et de macles. Comme au microscope optique, les taux de gâchage peuvent être différenciés selon l'aspect général de la matière. Les taux très bas présentent une structure très compacte et dense, avec des agencements de cristaux très serrés. Les taux moyens, tels que $E/P = 0,7$, ont des structures denses mais plus aérées. Les structures des taux de gâchage les plus élevés semblent peu cohésives et sont très ouvertes. Les plans de cassure de ces échantillons sont plus en relief que ceux des taux faibles, très certainement en raison du plus libre agencement des cristaux occasionnant des ruptures irrégulières. Comme indiqué par les références bibliographiques, les différents degrés d'hydratation des cristaux sont notables selon les rapports massiques E/P . À forte concentration, avec un taux $E/P = 0,45$ ou $0,5$ par exemple, les cristaux ont souvent un aspect brut et irrégulier, laissant penser que l'hydratation est incomplète. En revanche, à des taux plus élevés et plus proches de $E/P = 1$, les cristaux sont très bien définis. Les analyses élémentaires identifient très nettement les éléments constitutifs du plâtre, c'est-à-dire S, O, et Ca. Les impuretés sont souvent bien distinguables visuellement, par leur aspect et leurs dimensions plus importantes, ainsi que par des différences de densité en mode BED-C ou contraste chimique, et par analyse élémentaire.

Le carbonate de calcium et le dioxyde de titane, utilisés comme additifs, jouent bien leur rôle de marqueurs puisqu'ils sont identifiables dans une structure de plâtre, étant de plus petites dimensions, avec des formes différentes des cristaux de sulfate de calcium, et des éléments chimiques distinguables par analyse. La différence de contrastes en mode BED-C ne permet pas de distinguer visuellement le carbonate de calcium et le dioxyde de titane du sulfate de calcium. Ceci peut être dû à leurs dimensions, à la similitude des compositions pour le carbonate de calcium, ou aux effets de charges. Mais avec l'analyse par sonde EDS, les éléments sont identifiés distinctement. Le mélange de craie de Bologne et de colle animale est aussi facilement identifiable, par les cristaux irréguliers, en formes et en dimensions, avec l'absence d'amas ou de faisceaux d'aiguilles comme une structure de gypse seul. Dans cette structure en pâte, le dioxyde de titane a également été identifié visuellement, par sa finesse et son contraste plus important, et par analyse. Ces observations rejoignent donc les données de la littérature. Les impuretés observées ont pu être identifiées comme des oxydes métalliques divers, des argiles, de la célestine ou de la dolomie, couramment observées dans les structures de gypse. Les résidus de carbonate de calcium naturel ont été observés sous la forme de coccolithe et de micro-fossiles, dans la poudre d'hémihydrate β Molda® 3 Normal.

Une analyse complémentaire d'un cadre dit « de composition », daté du XVIII^e siècle et conservé au musée du Louvre, complète ce chapitre, comme élément comparatif des techniques de mise en œuvre et de restauration des cadres aux ornements moulés. La structure s'est très clairement distinguée des autres matériaux observés dans l'étude. À l'œil et au microscope optique, la concentration en colle était bien notable et laissait donc plutôt présager un mélange de carbonate de calcium et de colle animale, comme précisé dans les recettes traditionnelles, plutôt que des ornements au plâtre, comme dans le cas du cadre ICMO 190, présenté au chapitre I. Au MEB, une grande proportion de micro-fossiles a été observée, certains à l'état fragmentaire et d'autre encore entiers, malgré la mise en œuvre. Des zones présentent une très forte concentration en colle, bien visible en mode BED-C. Les analyses élémentaires ont confirmé la présence de C, O, et Ca, et donc d'une pâte d'ornement faite au carbonate de calcium et à la colle.

Une identification visuelle au microscope optique peut être effectuée lorsqu'un fragment est détachable. Sans équipement de ce type, il est certainement possible d'estimer une partie des matériaux, en observant les plans de cassure à l'œil nu et à l'aide d'outils de type microscope portatif. L'estimation des rapports massiques du plâtre peut être faite, en considérant la masse de l'échantillon et ses dimensions, et selon les critères visuels. Si la matière semble dense et très compacte, un gâchage serré est très probable, avec des taux proches de $E/P = 0,5$ à $0,7$. Au contraire, si la structure semble aérée et peu liée, le gâchage est certainement clair, avec des taux aux alentours de $E/P = 0,8$ à 1 . Par extension, ces indices peuvent être appliqués à un artefact de la même manière pour identifier le taux de gâchage de mise en œuvre, en comparant la masse totale et le volume, ainsi que les aspects micro-structurels.

Les observations MEB sont très précieuses dès qu'il faut caractériser visuellement les matériaux et les formulations, permettant la compréhension de l'organisation micro-structurale. L'analyse EDS complète les identifications visuelles et confirment ou indiquent les matériaux présents. Même dans les zones avec des effets de charge, ou sur des cristaux de très petites dimensions de l'ordre du micron, il a été possible d'identifier les éléments présents, permettant ainsi d'estimer ou de renseigner la nature des composés.

Les aspects de surface des matériaux *in situ*, de l'artefact original ou des zones comblées, peuvent être observés et décrits, en veillant à qualifier les critères tels que la couleur, l'aspect général, les effets de brillance ou de matité, les dimensions des grains, les degrés de relief, les impuretés, ou les zones encollées. Les additifs, incorporés dans le plâtre, occupent une partie de la porosité et des espaces interstitiels. Ceci donne une texture dense au matériau, tout en créant des fragilités au sein de la structure cristalline du sulfate de calcium, en modifiant les liaisons physico-chimiques. L'effet d'abaissement de la résistance mécanique, évoqué par les professionnel-les, et confirmé par les références bibliographiques, est bien illustré par les clichés aux microscopes et doit être vérifié par les essais des chapitres suivants.

L'étude des matériaux à l'échelle micro-structurelle permet de prendre conscience de la finesse et des subtilités du matériau plâtre. La variabilité structurelle, modifiée par un simple paramètre comme celui de la proportion d'eau, reflète la grande polyvalence du matériau final. Les paramètres de mise en œuvre conditionnent directement les formations cristallines, les structures et les réseaux, la porosité, et donc les propriétés du matériau à l'état fluide, puis à l'état solide après la prise et le séchage qui sont étudiées aux chapitres III et IV.



Chapitre III

Étude des matériaux à l'état
fluide et propriétés rhéologiques

Sommaire

Ce troisième chapitre présente la caractérisation des formulations à l'état fluide. Ceci correspond au moment de la mise en œuvre du matériau de comblement lors d'une intervention menée par les professionnel·les. Un protocole d'analyse, inspiré des études rhéologiques, est mis en place pour qualifier et caractériser les formulations par leurs textures, afin d'en définir les gammes d'usage. Différents plâtres, comprenant deux hémihydrate β et un hémihydrate α , sont testés et comparés. Puis des formulations intégrant des additifs sont évaluées, de façon à proposer des matériaux alternatifs aux textures connues.

I.		II.	
Présentation	p. 167	Méthodes	p. 192
1. Définitions et principes généraux	p. 167	1. Moyens et équipements	p. 192
a. Notions de comportement	p. 167	a. Rhéomètre et traitement des données	p. 192
b. Types de fluides	p. 168	b. Préparation et mise en place	p. 193
c. Cas des suspensions minérales	p. 172	2. Essais	p. 194
2. État de l'art	p. 174	a. Caractérisation dynamique	p. 194
a. Plâtre	p. 174	b. Caractérisation quasi-statique	p. 196
b. Additifs et autres formulations	p. 181	3. Traitement des données	p. 198
3. Apports en conservation-restauration	p. 187	a. Caractéristiques calculées	p. 198
a. Buts de l'étude	p. 187	b. Comportement rhéologique et courbes d'écoulement	p. 199
b. Description des textures	p. 188	c. Modélisation	p. 200
c. Taux de cisaillement en pratique de comblement	p. 189		

III.

Résultats et modélisations

1. Comportement rhéologique général

- a. Fraction volumique solide p. 202
- b. Description du comportement rhéologique p. 204
- c. Structuration des mélanges solide-liquide, sous cisaillement simple p. 211

2. Plâtre seul

- a. Seuil limite de cisaillement p. 214
- b. Consistance p. 216
- c. Variation selon le choix de l'hémihydrate β p. 217

3. Effet du carbonate de calcium

- a. Seuil limite de cisaillement p. 220
- b. Consistance p. 223

4. Effet du dioxyde de titane

- a. Seuil limite de cisaillement p. 226
- b. Consistance p. 227

5. Formulations alternatives

p. 228

Synthèse

p. 230

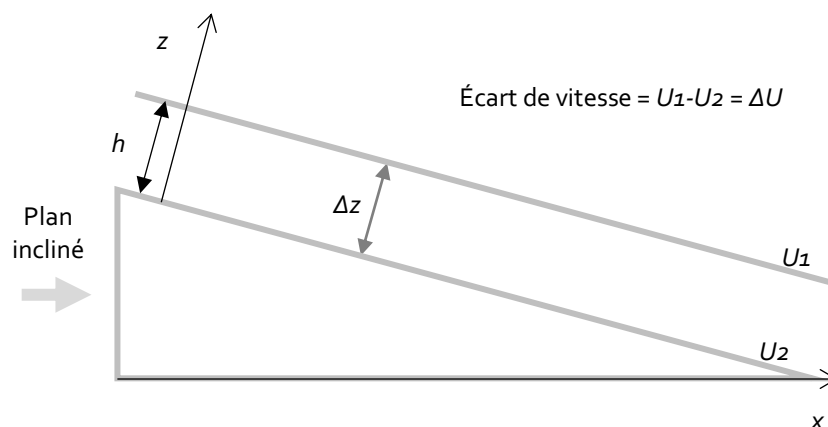
I. Présentation

1. Définitions et principes généraux

Du grec rheo et logos, qui signifient « couler » et « étude », la rhéologie est définie comme l'étude de l'écoulement et de la déformation de la matière solide ou fluide sous l'effet d'une contrainte appliquée. Elle est inscrite dans le domaine de la mécanique des milieux continus et sert à décrire le comportement de matériaux complexes (tels que les solides non-élastiques ainsi que les fluides non-newtoniens), dérivés des modèles classiques d'élasticité et de mécanique des fluides newtoniens, dits aussi fluides visqueux simples. Les propriétés rhéologiques des matériaux sont obtenues par des essais expérimentaux ainsi que par modélisation. Dans ces travaux, une sollicitation simple de type cisaillement est préférée pour étudier les formulations sélectionnées, et les fluides de type visqueux et viscoplastiques sont principalement considérés.

a. Notions de comportement

Dans un milieu solide ou liquide, des lois de comportement sont établies en reliant les contraintes exercées aux déformations subies, ou à un champ de vitesse de déformation pour un fluide en écoulement. La contrainte correspond à l'effet d'un effort appliqué sur un élément de surface d'un matériau. La notion de champs des contraintes désigne l'ensemble des actions physiques produites au sein d'un matériau et comprend la déformation, la vitesse de déformation et la température. En rhéologie, la déformation est donc le résultat d'un effort appliqué et est traduite par la notion de cisaillement (Fig. 1).



Avec h la hauteur du fluide ; x et y les coordonnées d'un repère orthonormé ;
 Δz l'écart de distance ; U_1 et U_2 les vitesses.

Figure 1 : représentation de l'écoulement gravitaire d'un fluide cisailé par un plan incliné et des paramètres associés pour sa caractérisation.

Pour une sollicitation en cisaillement, le comportement rhéologique est représenté par un lien existant entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation, tel que :

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad [1]$$

Avec τ la contrainte en Pa ; $\dot{\gamma}$, la vitesse de déformation, ou taux de cisaillement, en s^{-1} .

$$\text{suivant la relation : } \dot{\gamma} = \frac{\Delta U}{\Delta z} = \frac{\text{écart de vitesse en m.s}}{\text{écart de distance en m}} \quad [2]$$

Ces paramètres sont ensuite reliés à la notion de viscosité dynamique¹, notée dans ce document μ (Fig. 2), et permettent donc la caractérisation d'un type de fluide ou des propriétés rhéologiques. Si $\mu = 0$, la viscosité est nulle et le fluide est alors considéré comme un fluide parfait. D'autres types de fluides existent pour $\mu \neq 0$.

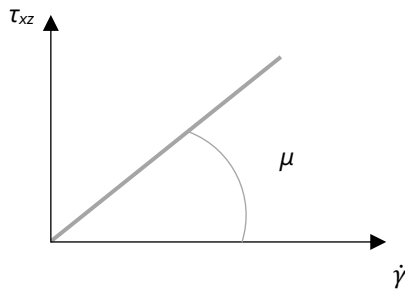


Figure 2 : représentation du lien entre la contrainte et la vitesse de déformation, illustrant la notion de viscosité.

Avec μ la viscosité dynamique du fluide en $Pa.s^{-1}$.

b. Types de fluides

Fluide newtonien

Un grand nombre de fluides présentent un comportement rhéologique newtonien, comme l'air, l'eau, des huiles ou encore des solvants. Ils sont considérés comme des fluides simples. Lorsqu'une contrainte de cisaillement est imposée, peu importe sa valeur, le fluide subit une déformation proportionnelle à la vitesse de déformation. Ce comportement, dit visqueux, est représenté par une fonction linéaire (Fig. 3 et 4 a), selon la loi de Newton [3], telle que :

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta z} \quad \text{soit} \quad \tau = \mu \frac{\Delta U}{\Delta z} \quad \text{soit} \quad \tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad [3]$$

Avec τ la contrainte en Pa, μ la viscosité dynamique en Po ou $Pa.s^{-1}$,

et $\frac{\delta u}{\delta z}$ ou $\frac{\Delta U}{\Delta z}$ ou $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation en s^{-1} .

¹ La viscosité dynamique caractérise la résistance à l'écoulement d'un fluide incompressible.

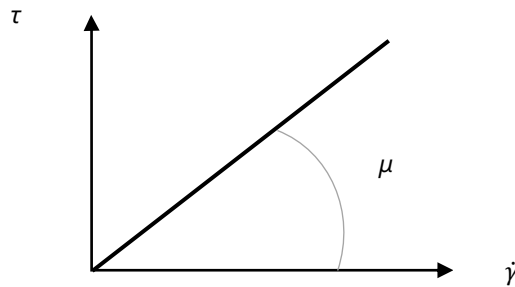


Figure 3 : représentation du comportement du fluide newtonien, dont la loi contrainte-vitesse de déformation, ou de cisaillement, est linéaire ; la viscosité traduit une constante de proportionnalité.

Il constitue le modèle de comportement d'écoulement le plus simple.

Il existe d'autres fluides aux comportements différents, en lien avec leur composition. Ces fluides, dits non-newtoniens, peuvent être caractérisés par :

- Une valeur critique de contrainte nécessaire pour initier le cisaillement, comme pour les fluides viscoplastiques, dits aussi fluides à seuil (Fig. 5 b).
- La modification de leur structure avec la variation de la vitesse de cisaillement, selon un principe de structuration, comme les fluides dits rhéofluidifiants et rhéoépaississants (Fig. 5 a et b).

Fluide viscoplastique dit à seuil

Les fluides viscoplastiques ou à seuil représentent une grande famille de fluides dont le comportement est similaire à un solide tant que la contrainte de cisaillement critique n'est pas appliquée. Lorsque cette valeur critique est atteinte, le fluide entre en écoulement (Fig. 4 et 5 b). À l'échelle macroscopique, ce seuil de déformation, dit contrainte seuil ou seuil de cisaillement et noté τ_o , correspond à la dislocation de la structure au repos ou à une rupture locale plastique, à la suite de laquelle un comportement visqueux apparaît avec l'accroissement de la contrainte. Les exemples couramment cités sont certains fluides cosmétiques et agro-alimentaires comme les crèmes hydratantes, le dentifrice, ainsi que des matériaux de construction tels que des pâtes de ciment.

Une première loi de comportement associée à la description du comportement d'un fluide viscoplastique est représentée par la relation de Bingham [4] :

$$\tau = \tau_o + \mu \text{ ou } \eta \dot{\gamma} \quad [4]$$

Avec la contrainte $\tau > 0$ en Pa, τ_o le seuil de contrainte ou de cisaillement, μ la viscosité dynamique en Pa.s⁻¹, $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation ou de cisaillement en s⁻¹.

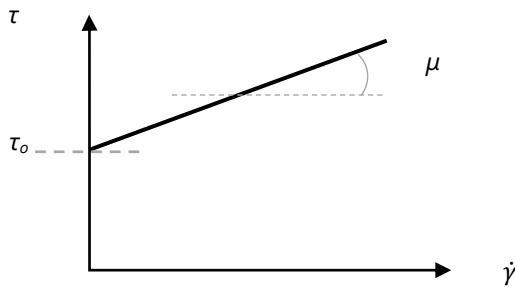


Figure 4 : représentation du comportement d'un fluide de Bingham, dont la loi contrainte-vitesse de déformation, ou de cisaillement, est linéaire au-delà d'un seuil de cisaillement, ou contrainte limite traduisant une rupture plastique.

Structuration

Pour certains fluides, la structuration est imposée par la vitesse de déformation, ou taux de cisaillement. Ainsi, une modification de cette vitesse de cisaillement induit une variation de la viscosité, selon deux types : les fluides rhéofluidifiants et rhéoépaississants.

Lors d'une augmentation de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$, une diminution de la viscosité, dite apparente, caractérise un comportement rhéofluidifiant (Fig. 5 a et b). Cet abaissement de viscosité correspond à un affaiblissement des liaisons internes, avec la rupture d'amas de particules dans le cas de suspensions minérales. Ce comportement est caractéristique de matériaux tels que les boues naturelles ainsi que les suspensions utilisées en construction comme les mortiers, les enduits ou encore les bétons.

Lorsqu'une augmentation de la viscosité dite apparente est constatée avec l'élévation de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$, le comportement est caractéristique d'un fluide rhéoépaississant. Les exemples de rhéoépaississants sont plus rares, ils comprennent notamment les suspensions de fécule de maïs, certains miels ou encore des peintures.

Pour les fluides purement visqueux, un mécanisme de structuration est décrit par le modèle d'Ostwald-de Waele [5], tel que :

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad [5]$$

Avec τ la contrainte de cisaillement en Pa, K la consistance en $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$,
 $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation en s^{-1} , et n l'indice de structuration ou d'écoulement.

La valeur de l'indice de structuration n permet de décrire le comportement d'un fluide de Newton, quand $n = 1$; d'un fluide visqueux rhéofluidifiant, quand $n < 1$; et d'un fluide visqueux rhéoépaississant, quand $n > 1$.

K est la consistance, liée à l'indice n , qui permet d'introduire la notion de viscosité apparente μ_o et de modéliser le comportement rhéologique des fluides. Dans ce cas, la viscosité prend la forme :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

Avec τ la contrainte de cisaillement en Pa, K la consistance en $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$,
 $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation en s^{-1} , et n l'indice de structuration ou d'écoulement.

Dans certains cas, un même principe de contrainte critique, nécessaire à l'écoulement du matériau, se présente pour les fluides viscoplastiques structurants sous vitesse de cisaillement (Fig. 5 b). Au-delà d'un certain seuil, par augmentation de la vitesse de cisaillement, le matériau s'écoule et sa viscosité diminue ou augmente selon le comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant du fluide. Ce type de comportement est décrit par le modèle d'Herschel-Bulkley [6] tel que :

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad [6]$$

Avec τ la contrainte en Pa, τ_0 le seuil de contrainte ou de cisaillement, K consistance en $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$, $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation en s^{-1} , et n l'indice de structuration ou d'écoulement.

Avec l'indice n qui décrit le comportement d'un fluide de Bingham, quand $n = 1$; celui d'un fluide viscoplastique rhéofluidifiant, quand $n < 1$; et celui d'un fluide viscoplastique rhéoépaississant, quand $n > 1$.

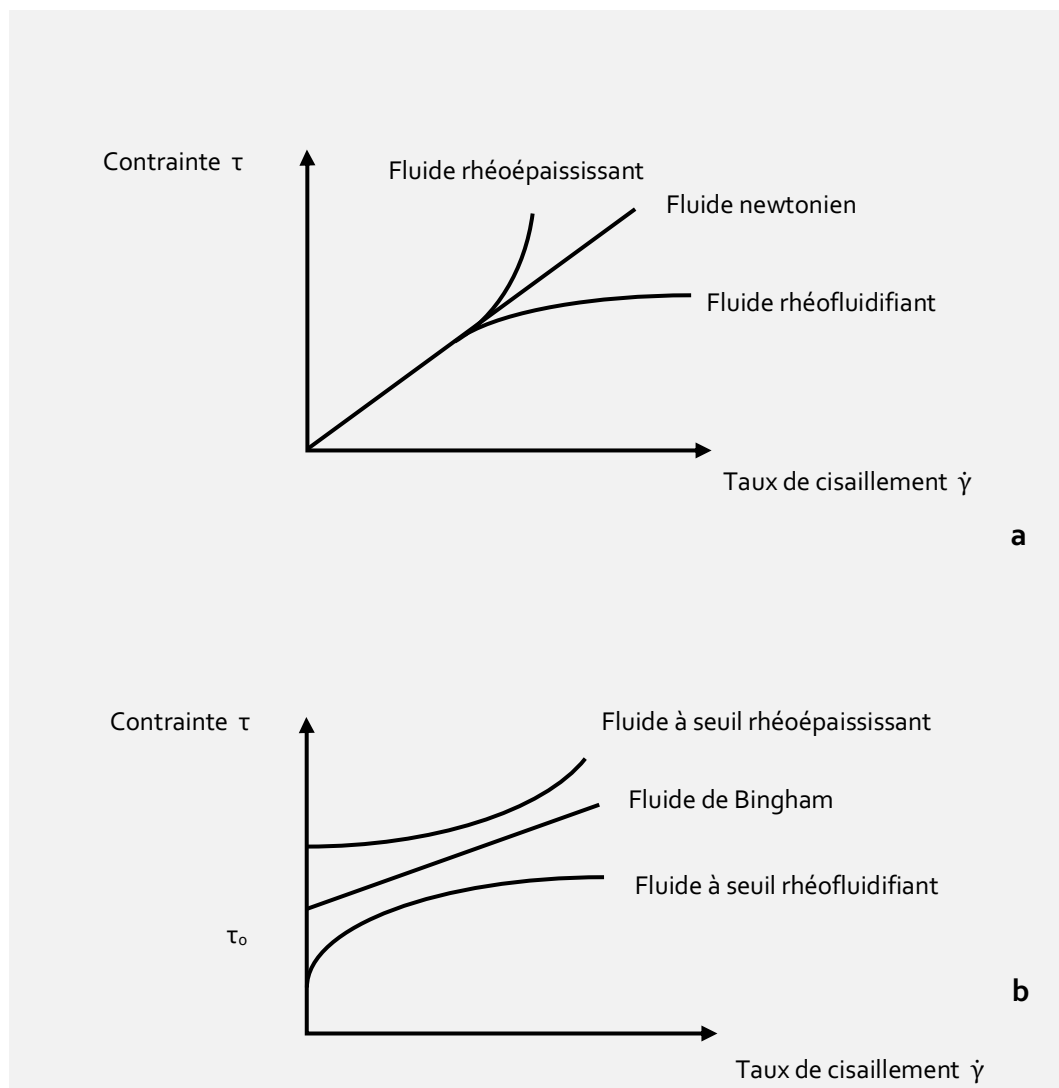


Figure 5 : modèles des fluides visqueux et viscoplastiques, sans seuil (a) et à seuil (b).

Notions d'élasticité

L'état de contrainte des fluides viscoplastiques peut être expliqué correctement à l'échelle macroscopique à partir du seuil de cisaillement, ou de la contrainte seuil. Mais en deçà du seuil, les modèles proposés ne permettent pas la description du comportement mécanique. Pour expliquer le comportement pendant cette phase qui précède le seuil de cisaillement, il est possible d'assimiler un caractère élastique, relié aux déformations locales tant que le fluide n'est pas cisailé. L'élasticité peut être définie dans le domaine des solides comme la relation proportionnelle entre la déformation et les contraintes appliquées, représentée par une fonction linéaire et réversible (Fig. 6), selon la loi de Hooke [7], telle que :

$$\sigma = E\varepsilon \quad [7]$$

Avec σ la contrainte, E le module élastique ou coefficient directeur, et ε la déformation.

Dans le cas particulier d'une sollicitation en cisaillement, la loi de Hooke est modifiée pour faire apparaître le module de cisaillement G , tel que :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Avec G en MPa, E le module élastique, et ν le coefficient de Poisson.

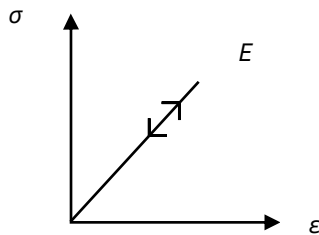


Figure 6 : représentation du comportement élastique d'un matériau et de la relation linéaire et réversible entre la contrainte et la déformation, selon la loi de Hooke.

c. Cas des suspensions minérales

Les suspensions liquide-solide, en particulier les formulations de plâtre étudiées, sont constituées d'une phase porteuse, majoritairement représentée par l'eau (ou fluide porteur), et d'une phase solide de type matériaux pondéreux² à spectre granulaire. Les formulations composées d'hémihydrate de sulfate de calcium ont un spectre granulaire de faible amplitude et la suspension formée est caractéristique d'un milieu cohésif. Lors de la préparation et du gâchage, l'effet de chute ou séparation de phase est substitué par la dissolution. Les quantités de phases et leur rapport conditionnent différentes familles de textures rhéologiques qui varient graduellement de la texture liquide à pâteuse. Le dosage massique des phases solides est donc déterminant dans l'évolution des propriétés rhéologiques.

² Matériaux dont la densité est importante, en général dépassant $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, soit d'une densité supérieure à 1.

Pendant du rapport massique eau/plâtre, noté E/P, la notion de fraction volumique solide, notée Φ , indique le volume solide par rapport au volume total de la suspension, telle que :

$$\phi = \frac{Vol_{solide}}{Vol_{total}} \quad [8]$$

Avec Vol_{solide} la masse du dosage en plâtre rapportée à la masse volumique solide et Vol_{total} la somme du volume d'eau et de plâtre.

La description du comportement rhéologique des suspensions minérales est menée dans un domaine décrit par l'équation [9]. La fonction f est à définir pour représenter au mieux le comportement rhéologique.

$$\tau = f(\dot{\gamma}, \phi) \quad [9]$$

Avec τ la contrainte de cisaillement, $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement, et Φ la fraction volumique solide.

La variation de la fraction volumique solide entraîne des mécanismes de structuration qui influencent les propriétés rhéologiques. Différents modèles de la littérature permettent des interprétations de la viscosité ou encore du seuil limite de cisaillement. Parmi les plus courants, sont cités ici le modèle d'Einstein [10], celui de Krieger-Dougherty [10], ou encore le modèle Yodel de Flatt et Bowen³ [11], qui introduisent la notion de fraction volumique solide pour exprimer les paramètres de viscosité ou de seuil des suspensions.

Modèle d'Einstein :
$$\mu = \mu_0(1 + k_1\Phi) \quad [10]$$

Avec μ la viscosité, μ_0 la viscosité du fluide saturant, Φ la fraction volumique solide, et k_1 un facteur de forme des particules.

Modèle de Krieger-Dougherty :
$$\mu = \mu_0(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{max}})^{-[\eta]\Phi_{max}} \quad [11]$$

Avec μ la viscosité, μ_0 la viscosité du fluide saturant, Φ la fraction volumique solide, Φ_{max} la fraction volumique solide maximale dite de *packing*, et $[\eta]$ la viscosité dite intrinsèque, liée à la forme des particules.

Modèle Yodel de Flatt et Bowen :
$$\tau = m_1 \frac{\Phi^2(\Phi - \Phi_0)}{\Phi_{max}(\Phi_{max} - \Phi)} \quad [12]$$

Avec $\tau = \tau_0$ la limite d'élasticité ou contrainte seuil de cisaillement, Φ la fraction volumique solide, Φ_{max} la fraction volumique solide maximale dite de *packing*, Φ_0 la fraction volumique solide seuil ou de percolation, et m_1 un facteur intégrant le comportement des particules.

Le modèle Yodel [12] permet en outre de mettre en relation les comportements macroscopiques d'écoulement avec les aspects microscopiques, tels que la fraction volumique solide, les tailles et distributions de taille des particules, associées aux notions de *packing* maximal et de percolation, et aux forces intergranulaires, dans le but de caractériser les solutions en suspensions.

³ FLATT Robert J. et BOWEN Paul, « Yodel: A Yield Stress Model for Suspensions », *Journal of the American Ceramic Society*, 89 / 4 (2006), p. 1244-1256; FLATT Robert J. et BOWEN Paul, « Yield Stress of Multimodal Powder Suspensions: An Extension of the YODEL (Yield Stress mODEL) », *Journal of the American Ceramic Society*, 90 / 4 (2007), p. 1038-1044.

2. État de l'art

Si les connaissances sur les propriétés physico-chimiques des matériaux patrimoniaux sont de plus en plus établies, les aspects rhéologiques sont, quant à eux, encore peu évalués. Toutefois, quelques programmes de recherche sont engagés pour étudier des matériaux d'artefacts patrimoniaux tels que la peinture⁴, les supports de couches picturales⁵, ou encore la cire⁶, ainsi que des matériaux de traitement de conservation-restauration, comme dans le cas de la formulation d'un gel de nettoyage adapté à différents matériaux et typologies d'artefacts⁷. Des approches générales sur les typologies de formulations, telles que des suspensions à matrices granulaires, permettent une meilleure connaissance des propriétés et des classements de formulations en fonction des comportements. Elles peuvent donc être employées pour étudier les formulations de plâtre.

a. Plâtre

Aucune étude rhéologique, à notre connaissance, ne concerne le plâtre patrimonial ni ses produits de conservation-restauration. Les références bibliographiques en lien avec les applications du génie civil sont alors précieuses, afin de mieux appréhender le matériau et de procéder à des essais adaptés. Bien que restreinte en comparaison des sources sur d'autres matériaux de construction comme le ciment⁸, la recherche sur la rhéologie du plâtre connaît un intérêt croissant depuis la fin des années 1970. À partir des années 1980, de nouveaux travaux visent à caractériser le comportement mécanique de pâtes à l'état frais en proposant des méthodes d'évaluation et des protocoles de tests. Ces références traitent généralement d'applications spécifiques avec l'évaluation d'un seul taux de gâchage ou encore la présence d'additifs pour optimiser les performances dans un but précis. Entre 1982 et 1985, une équipe italienne publie une série d'articles décrivant des propriétés rhéologiques telles que le type de fluide et son comportement en cisaillement, l'écoulement en fonction de la structure, de la composition ou de la densité, ainsi que les modèles mathématiques permettant de décrire le comportement. À partir des années 2000, de nouvelles références complètent les travaux sur la rhéologie du plâtre.

⁴ Projets VIP-1, 2019, et VIP-2, 2020, sur l'influence du verre broyé dans la peinture, soutenus par la FSP ; projet d'équipement Rhéopaint – DIM MAP – LAMS – SIMM, 2020, sous la responsabilité scientifique de Laurence de Viguerie.

⁵ BALDINO Noemi, *et al.*, « Rheological Modelling of Plaster Deposition for Painting Restoration », *Applied Rheology*, 20 / 2, (2010), p. 1-9.

⁶ Plan triennal de la recherche : Développement d'outils d'analyse, de documentation et de conservations des chartes scellées du département des Manuscrits « Trésors de cire, sceaux et actes scellés de la Bibliothèque nationale de France », 2013-2015, qui prévoyait un volet d'étude rhéologique des cires.

⁷ HENNEN RODRIGUEZ Sofia, « Les propriétés, actions et principales problématiques des gels de Pemulen®TR 2 : le choix de la base dans la formulation des gels », *CeROArt*, 6 (2017), p. 1-25.

⁸ KLIN Stanisław, « Rheological Properties of Building Gypsum Fresh Pastes », *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics*, 52 / 3 (2005), p. 267.

Par exemple, l'étude de Klin⁹, dédiée aux propriétés rhéologiques des mortiers de gypse pour la construction, compare les comportements d'un hémihydrate β selon des taux de gâchage E/P de 0,4 à 1,5. Un viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux, RHEOTEST-2, a été utilisé pour différents essais permettant d'identifier les contraintes, les seuils et la viscosité plastique, en fonction du taux de cisaillement. Une première phase a consisté en l'observation des temps de prise des formulations de plâtre pur sans retardant, identifiés par le suivi de l'évolution de la contrainte de cisaillement τ , au cours du temps, en imposant une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}_p = 16,2 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 7).

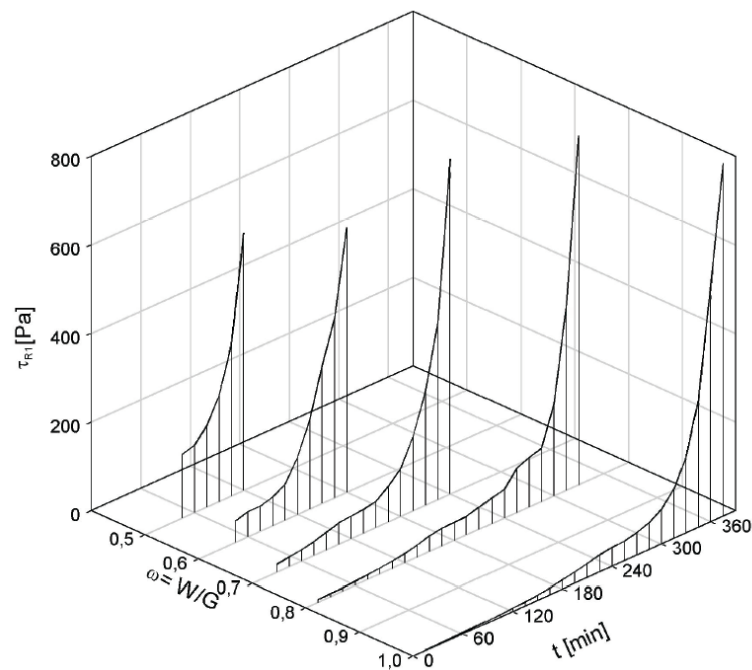


Figure 7 : représentation de l'évolution de la contrainte τ dans un espace à trois paramètres comprenant le rapport massique E/P (noté $\omega = W/G$ pour « water/gypsum »), le temps t , et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}_p$; la contrainte augmente avec le temps, illustrant le mécanisme prise du matériau ; tirée de Klin, 2005.

Il apparaît que plus la formulation est concentrée en plâtre, et plus la contrainte τ augmente rapidement pour atteindre une limite, assimilée à la prise. Les rapports massiques moins concentrés ont une prise plus lente que les mélanges très chargés en plâtre, mais les contraintes à la fin du mécanisme de prise sont plus élevées.

⁹ *Ibid.*, p. 265-282.

Indice de structuration n

L'indice de structuration, paramètre qui renseigne l'évolution de la structure du fluide induite par le taux de cisaillement, semble rarement mis en lien avec la fraction volumique solide. Il est donc difficile d'identifier une ou plusieurs valeurs spécifiques au matériau plâtre parmi les références bibliographiques. Cependant, les travaux de Colussi, Lapasin et Papo¹⁰ suggèrent une relation entre ces paramètres (Fig. 8). À partir des formulations testées, l'indice n apparaît comme une fonction décroissante des valeurs de fraction volumique solide Φ . Les suspensions de ces quatre cas évalués sont assimilables à des fluides rhéofluidifiants.

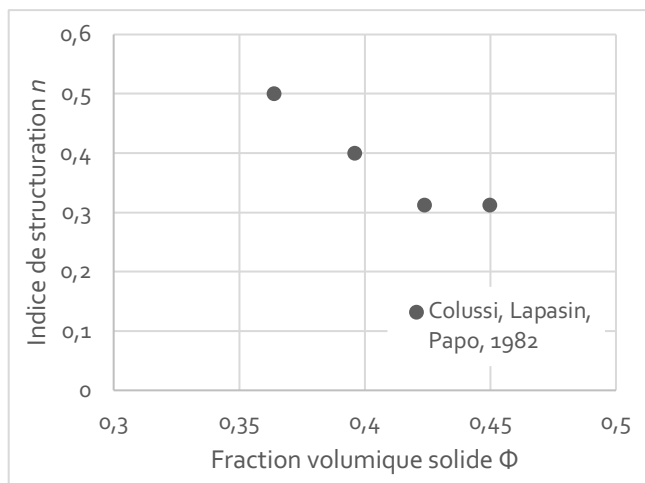


Figure 8 : représentation de l'indice de structuration n en fonction de la fraction volumique pour différentes formulations de plâtre, d'après les données de Colussi *et al.*, 1982.

Ce constat de lien entre l'indice n et le rapport massique E/P est également suggéré par Klin¹¹, qui décrit les comportements de formulations de plâtre β , à différents rapports massiques, et additionné d'un retardant (citrates de sodium ajouté à 0,04 % à 0,1 % en masse) selon les modèles de Bingham [4] et d'Herschel-Bulkley [6], en fonction de la contrainte seuil et de la viscosité plastique. Deux catégories sont alors présentées en regroupant les mélanges pâteux, à E/P < 0,7 ; et les mélanges fluides, aux E/P > 0,7. Les modélisations de la première catégorie (E/P = 0,4 à 0,6) sont optimales avec le modèle d'Herschel-Bulkley [6], alors que le modèle de Bingham [4] est plus adapté pour caractériser la seconde catégorie. Cet ajustement pour les formulations les moins concentrées en plâtre (E/P = 0,7 à 2) semble indiquer une tendance de structuration constante, suggérant une valeur d'indice proche de $n = 1$, apparentée à celle du fluide porteur.

¹⁰ COLUSSI Iginio, *et al.*, « Shear-dependent behavior of gypsum plasters », *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 21 / 3 (1982), p. 514-516.

¹¹ Klin, « Rheological Properties of Building Gypsum Fresh Pastes », *op. cit.*, p. 265-282.

Viscosité apparente et consistance K

Une évolution de la part visqueuse des formulations eau-plâtre peut être identifiée dans les travaux de Colussi, Lapasin, et Papo en 1982¹², puis de Caufin et Papo en 1983¹³. Les suspensions sont considérées comme des fluides viscoplastiques et la viscosité est interprétée selon le modèle d'Ostwald-de Waele [5]. La consistance et l'indice de structuration en sont déduits, permettant d'évaluer cette composante visqueuse, en fonction de la fraction volumique solide et à des taux de cisaillement fixés (Fig. 9)

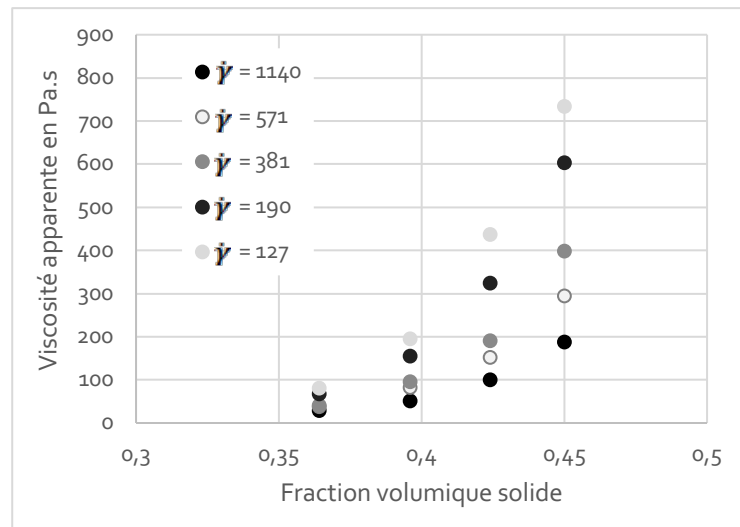


Figure 9: évolution de la viscosité apparente en fonction de la fraction volumique solide pour différentes valeurs de taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ s^{-1} ; d'après les données tirées de Colussi, *et al.*, 1982.

En considérant les valeurs de l'indice de structuration n présentées précédemment (Fig. 8), la diminution de la vitesse de cisaillement entraîne un accroissement de la viscosité. Malgré le nombre restreint de valeurs de fractions volumiques solides considérées, le lien fonctionnel entre la viscosité et Φ est bien identifiable et présente une tendance divergente avec l'élévation de la fraction volumique solide. Cette même tendance est confirmée par les travaux de Papo¹⁴. Cela suggère un mécanisme de structuration qui pourrait alors être évalué selon le modèle de Krieger-Dougherty [11].

¹² Colussi, *et al.*, « Shear-dependent behavior of gypsum plasters », *op. cit.*, p. 514-516.

¹³ CAUFIN Biagio et PAPO Adriano, « Rheological testing methods for gypsum plaster pastes », *Matériaux et Construction*, 16 / 5 (1983), p. 315-321.

¹⁴ PAPO Adriano, « Rheological models for gypsum plaster pastes », *Rheologica Acta*, 27 / 3 (1988), p. 320-325.

Seuil de cisaillement τ_0

Dans les travaux de la RILEM en 1977, Diez Reyes, Calvente Casillo et Atienza Garcia¹⁵ constatent le caractère non-newtonien des pâtes de plâtre évaluées à l'état fluide, par la non linéarité de la relation contrainte-vitesse de cisaillement.

Dans la publication de Colussi, Caufin et Papo¹⁶ en 1982, la caractérisation de la contrainte de cisaillement est recherchée en fonction du temps et pour des taux de cisaillement constants, en utilisant un viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux (Fig. 10). Un comportement transitoire est distingué avec une augmentation de τ formant un pic jusqu'à atteindre une valeur maximale, puis une décroissance de la contrainte jusqu'à un minimum, et enfin avec une augmentation de la contrainte. La décroissance est attribuée à la rupture de la structure et assimilée par les auteurs à un effet thixotropique¹⁷. La contrainte minimum correspond à une valeur d'équilibre et l'augmentation finale de la contrainte est induite par la prise du matériau. La contrainte évolue selon le temps et la structuration du matériau, mais la contrainte seuil n'est pas encore évaluée.

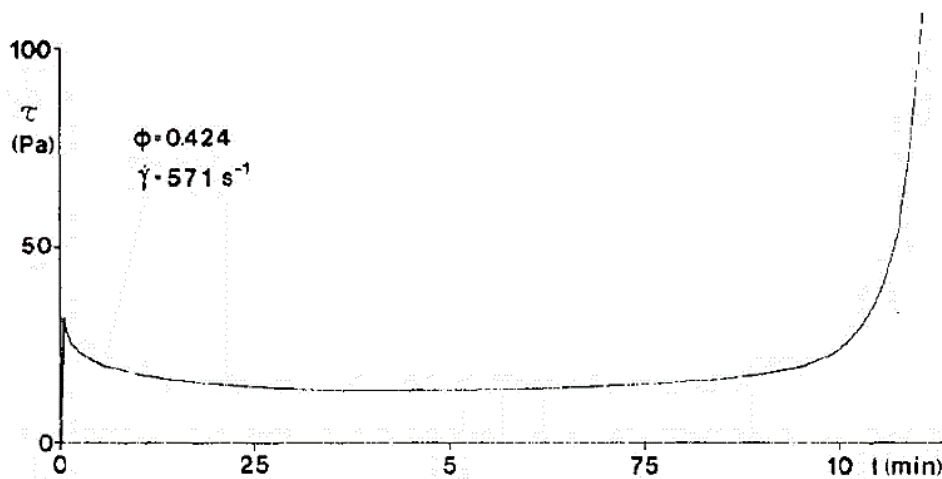


Figure 10 : représentation du comportement transitoire d'une formulation de plâtre à $\phi = 0,424$ soit $E/P = 0,56$ à taux de cisaillement $\dot{\gamma} = 571 \text{ s}^{-1}$ illustrant la variation de τ selon le temps ; tirée de Colussi, *et al.*, 1982.

¹⁵ DIEZ REYES Carmen, *et al.*, « Rhéologie des pâtes de plâtre », dans MURAT Michel et FOUCAULT Michel (éd.), *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions]*, Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977, RILEM Publications, 1977, p. 343-348.

¹⁶ Colussi, « Shear-dependent behavior of gypsum plasters », *op. cit.*, p. 514-516.

¹⁷ Un matériau thixotrope est défini comme tel lorsqu'il se déstructure sous l'action du mélange, et se restructure au repos lorsqu'aucun cisaillement ni aucun mélange ne lui est appliqué.

Dans la publication de 1983¹⁸ le comportement rhéologique est étudié en comparant différentes méthodes expérimentales pour évaluer les paramètres comme la contrainte, la consistance et l'indice de structuration. Un premier essai est fait à taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ constant, un deuxième essai consiste en un protocole en restructuration puis en déstructuration, un troisième essai correspond à une série de cycles d'hystérésis¹⁹ (réalisés à différents taux de gâchage, avec une croissance et une décroissance des contraintes et des taux de cisaillement), et enfin un quatrième essai est mené par séquence de taux de cisaillement croissant, avec un palier constant à haut taux de cisaillement, puis une séquence décroissante. Différents types de contraintes sont considérés comme la contrainte à l'équilibre τ_e en s'affranchissant de la prise, et la contrainte maximale τ_p qui correspond à la valeur maximale observée dans la première phase de comportement transitoire.

Ces valeurs sont mesurées à des taux de cisaillement élevés, qui ne permettent pas d'identifier précisément la contrainte seuil τ_o mais donnent des premières indications sur les ordres de grandeur et surtout illustrent le lien fonctionnel existant entre le rapport massique ou la fraction volumique solide du mélange, et les contraintes correspondantes²⁰ (Fig. 11).

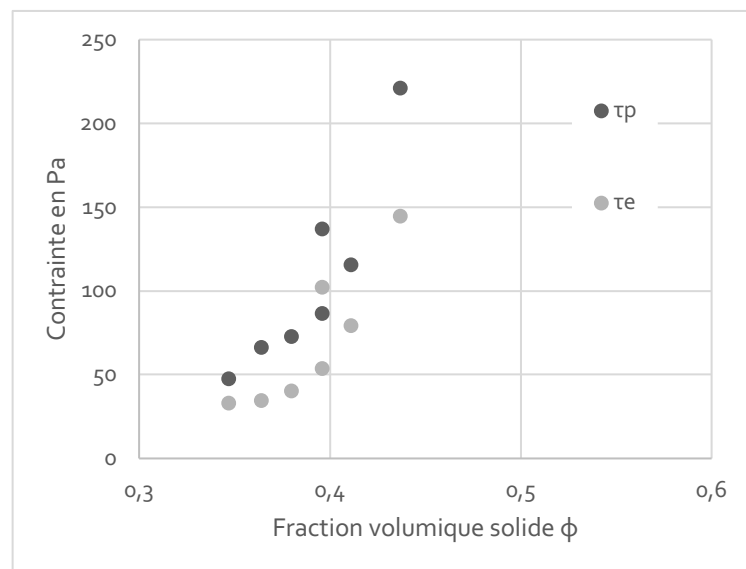


Figure 11 : représentation des valeurs de contraintes en fonction de la fraction volumique solide, en considérant les contraintes avant la prise avec τ_e , à l'équilibre, et τ_p , contrainte maximale, montrant un lien fonctionnel avec les proportions d'eau et de plâtre ; d'après les données de Caufin et Papo, 1983.

¹⁸ Caufin et Papo, « Rheological testing methods for gypsum plaster pastes », *op. cit.*, p. 315-321.

¹⁹ Propriété présentée par un système dont les propriétés à un instant donné dépendent de toute son évolution antérieure et pas seulement des paramètres décrivant le système à cet instant (dictionnaire Larousse, en ligne : 17 avril 2023, URL : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hyst%C3%A9r%C3%A9sis/41296>).

²⁰ Caufin et Papo, « Rheological testing methods for gypsum plaster pastes », *op. cit.*, p. 316.

En compilant des données selon les modèles de Bingham [4] et d'Herschel-Bulkley [6], établies par Papo et Klin²¹, un lien fonctionnel est bien identifié entre les valeurs de contrainte seuil τ_0 et les rapports massiques E/P (Fig. 12). Plus la formulation est concentrée en plâtre, et plus la contrainte seuil est élevée, avec des valeurs de $\tau_0 \approx 158$ à 0,9 Pa pour des E/P = 0,53 à 1,5. Les rapports massiques usuels en moulage d'artefacts patrimoniaux tels E/P = 0,6 à 0,8 seraient donc compris entre $\tau_0 \approx 48$ à 6 Pa.

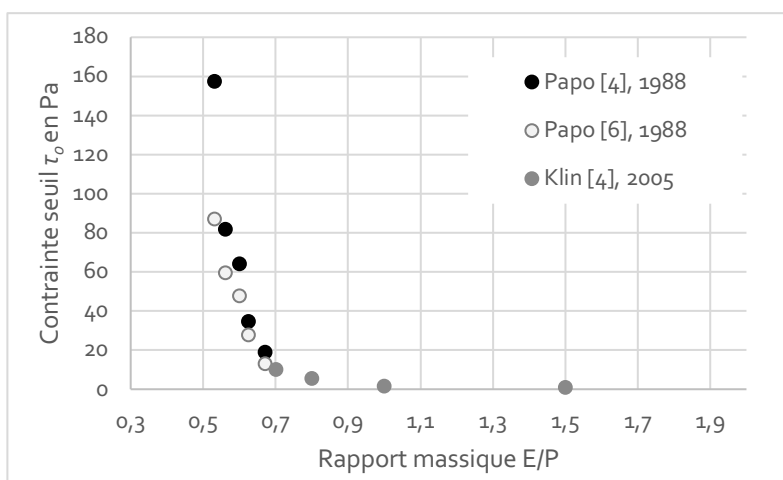


Figure 12 : représentation des contraintes τ_0 établies en fonction des rapports massiques selon les modèles de Bingham [4] et d'Herschel-Bulkley [6], illustrant le lien fonctionnel.

REMARQUES

D'après les références bibliographiques, les caractéristiques rhéologiques du plâtre seul confirment le mécanisme de prise du matériau et le lien fonctionnel existant entre le rapport massique et la fraction volumique solide. L'étude de l'indice de structuration n montre le lien fonctionnel avec le rapport massique ou la fraction volumique solide, et la déviation par rapport au comportement purement visqueux. Le plâtre est donc présenté comme un matériau de type viscoplastique, avec des valeurs générales de $n < 1$, indiquant un comportement rhéofluidifiant. Les modèles de Bingham et d'Herschel-Bulkley semblent les plus adaptés pour étudier ces formulations, avec le constat qu'à faible concentration de plâtre, et donc à fraction volumique solide basse, le seuil limite de cisaillement tend à disparaître et le comportement du fluide s'apparente au type newtonien, le fluide porteur du mélange étant l'eau. Le paramètre de consistance K , qui permet d'approcher la notion de viscosité, est confirmé comme fonctionnel de E/P ou de la fraction volumique solide, évolutif en fonction des proportions du mélange, avec une augmentation de K quand la concentration en plâtre est croissante. Enfin, la contrainte seuil τ_0 est aussi fonctionnelle de E/P ou Φ , avec des valeurs de seuil plus importante quand le fluide est plus concentré en plâtre.

²¹ Klin, « Rheological Properties of Building Gypsum Fresh Pastes », *op. cit.*, p. 265-282.

b. Additifs et autres formulations

Pour identifier l'effet des additifs sur les formulations de plâtre, d'autres types de préparations peuvent être étudiées, comme des « boues » de plâtre²² ou des mélanges adjuvantés comprenant des fluidifiants, des épaississants, des agents retardants, essentiellement pour un usage dans le bâti contemporain. Les effets d'une addition de carbonate de calcium et de dioxyde de titane sont évalués pour des formulations composées de ciment, matériau pour lequel la bibliographie est plus riche. Les aspects physico-chimiques du ciment et du plâtre sont différents, les mécanismes de prise ne sont donc pas comparables. Mais la nature des formulations, de type suspension minérale, étant similaire, les effets des additifs peuvent être constatés et assimilés, en considérant les ordres de grandeur ou les tendances observées comme des indicateurs de comportement. Enfin, dans un contexte patrimonial et conservatoire, les travaux de Baldino²³ ont permis de caractériser le comportement d'un mélange de poudre de gypse à l'état de sulfate de calcium dihydraté, sans effet de prise, et de colle animale en solution aqueuse, en fonction de l'apport d'eau et de la température. Cette caractérisation est menée pour optimiser la formulation de comblement de supports de peintures murales par application automatisée.

Indice de structuration n

Dans l'étude de Sinha-Ray²⁴, des mélanges de plâtre à taux E/P de 0,75 à 0,9 sont évalués selon des compositions formulées avec des additifs, dont des agents moussants modifiant la microstructure et la densité des matériaux. Pour comparaison, cinq formulations sont présentées suivant l'évolution de l'indice de structuration n et de la masse volumique en fonction du rapport massique E/P (Fig. 13). Les liens fonctionnels qui relient les paramètres sont bien identifiables : l'indice n tend vers 1 avec l'augmentation du rapport E/P, soit une baisse de la concentration en plâtre. L'augmentation de la densité, malgré la quantité de plâtre décroissante dans les mélanges, est peut-être liée aux additifs utilisés, non spécifiés dans la publication. Dans tous les cas, la valeur de l'indice est représentative d'un comportement de type rhéofluidifiant, comme le plâtre seul.

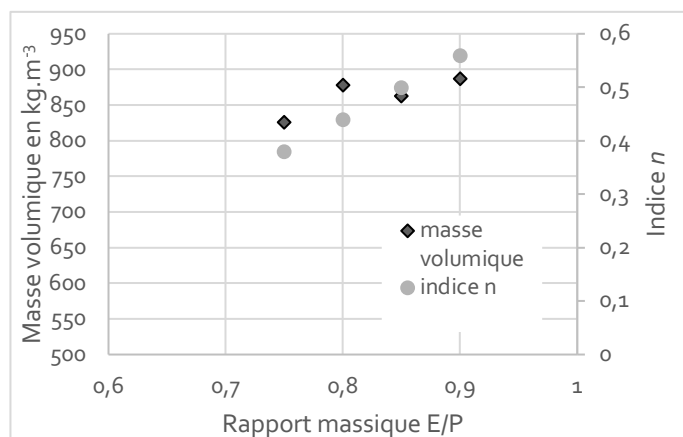


Figure 13 : représentation des valeurs de densité et d'indice de structuration n en fonction du rapport massique E/P pour des formulations de plâtre et additifs, montrant un lien fonctionnel entre les différents paramètres et caractéristiques ; d'après Sinha-Ray, 2011.

²² SINHA-RAY Suman, *et al.*, « Shear and elongational rheology of gypsum slurries », *Applied Rheology*, 21 / 6 (2011), p. 1-8.

²³ Baldino, « Rheological Modelling of Plaster Deposition for Painting Restoration », *op.cit.*

²⁴ Sinha-Ray, *et al.*, « Shear and elongational rheology of gypsum slurries », *op. cit.*, p. 2 et 4.

Un indice de structuration moyen tel que $n = 0,5$ est indiqué par Ovarlez²⁵ pour caractériser un ensemble de suspensions granulaires concentrées. Définir une valeur moyenne d'indice de structuration n est utile pour affiner la caractérisation des paramètres reliés comme la consistance K et la contrainte seuil τ_0 . Cette valeur moyenne permettrait de valider la classification des fluides à seuil, en distinguant une tendance générale, ou acceptable, pour l'ensemble des préparations avec un élément comparatif d'une formulation à l'autre.

Pour comparaison, les formulations de gypse inerte et de colle animale testées par Baldino²⁶ présentent des valeurs d'indice de structuration $n = 0,38$; $0,3$ et $0,35$ pour les trois types de mélanges à faible quantité d'eau (masse volumique = 1426 kg.m^{-3}), quantité standard (masse volumique = 1372 kg.m^{-3}) et à haute quantité d'eau (masse volumique = 1350 kg.m^{-3}) étudiés à température de 37°C . Le comportement rhéologique est identifié comme rhéofluidifiant, typique d'un mélange en suspension, malgré l'ajout de colle animale.

Consistance K

Les valeurs de consistance K proposées par Sinha-Ray²⁷ sont fonctionnelles du rapport massique et un lien exponentiel peut également être considéré en fonction des valeurs d'indice de structuration. Ces tendances de comportement pour des plâtres adjuvés concordent avec celles déjà présentées pour les formulations de plâtre seul. Un même constat d'augmentation de la consistance et de baisse de l'indice n peut être établi, lorsque que la concentration en plâtre augmente (Fig. 14).

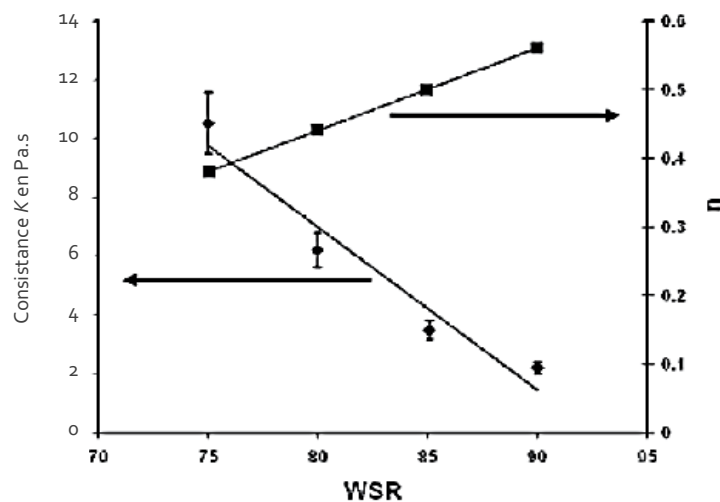


Figure 14 : représentation des valeurs de consistance K et d'indice de structuration n en fonction du rapport massique pour différentes formulations de plâtre avec des additifs tels que des agents moussants considérés selon le rapport massique (WSR = water-to-stucco ratio, indiquant la part d'eau pour 100 g de plâtre) ; tirée de Sinha-Ray, 2011.

²⁵ OVARLEZ Guillaume, « Caractérisation rhéologique des fluides à seuil », *Rhéologie*, 20, 2011, p. 28-43

²⁶ Baldino, « Rheological Modelling of Plaster Deposition for Painting Restoration », *op.cit.*, p. 5.

²⁷ Sinha-Ray, *et al.*, « Shear and elongational rheology of gypsum slurries », *op. cit.*, p. 4.

La consistance K des formulations de gypse et de colle évaluées par Baldino²⁸ est liée aux proportions du mélange. Les valeurs augmentent lorsque la formulation est plus concentrée en gypse. Testée à température de 37°C, la colle diluée semble se comporter comme le fluide porteur d'un mélange simple d'eau et de plâtre. Les valeurs K sont similaires aux ordres de grandeur pour E/P = 0,6 à 0,7 évalués par Caufin et Papo.

Dans une étude récente sur l'effet de l'addition de carbonate de calcium sous différentes formes à du ciment Portland ordinaire (OPC) et au calcaire (PLC), McDonald²⁹ constate que la différence de taille de grains des trois sortes de carbonate de calcium (micro-calcite de 1 à 11 µm, nano-calcite de 0,09 à 1,2 µm et CaCO₃ amorphe de 0,065 à 0,720 µm) et leur concentration influencent la consistance standard³⁰ des formulations. Plus les grains sont fins et plus la concentration en additif augmente, et plus la valeur de la consistance standard est élevée (Fig. 15). Par exemple, un mélange de ciment Portland ordinaire de consistance ±0,265 a une consistance de ±0,295 avec une adjuvantation de 15% de carbonate de calcium amorphe, qui correspond à l'élévation de la demande en eau pour obtenir une texture optimisée.

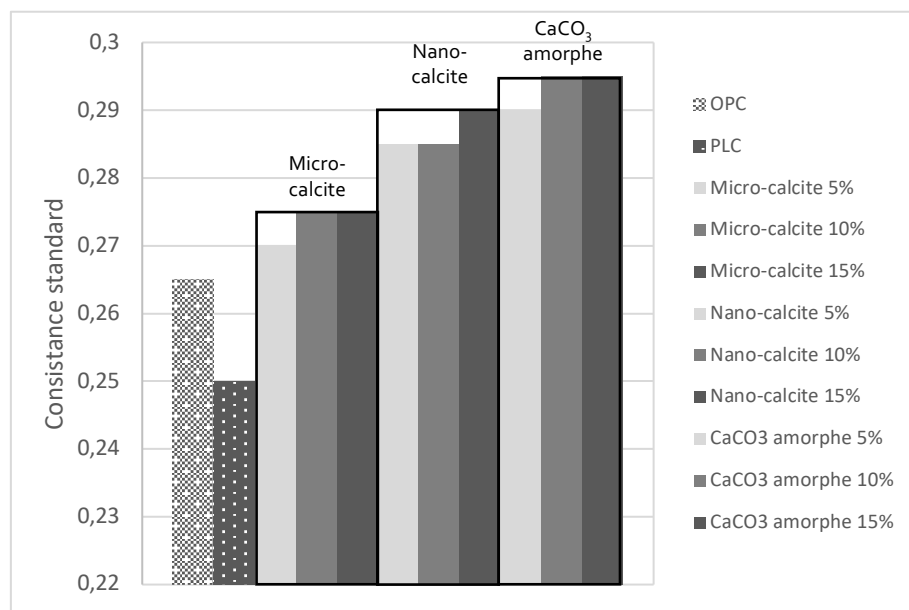


Figure 15 : représentation des consistances standard des mortiers de ciment Portland additionnés de carbonate de calcium sous trois formes différentes et à concentrations variables ; d'après McDonald, 2022.

²⁸ Baldino, « Rheological Modelling of Plaster Deposition for Painting Restoration », *op.cit.*, p. 5.

²⁹ MCDONALD Lewis J., *et al.*, « The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material », *Journal of Cleaner Production*, 338 (2022), p. 1-12.

³⁰ La consistance standard, relative au ciment, correspond à la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation et l'optimisation de la texture du matériau, donnée généralement en %.

L'influence de l'addition de nanoparticules de TiO_2 , à 1,3 ; 2,6 et 5,2 % en masse, est étudiée dans un mortier de ciment de Portland ordinaire, additionné d'un super-plastifiant³¹. Il est constaté, en utilisant le modèle de Bingham [4], que l'augmentation de la concentration de nanoparticules tend à augmenter la viscosité plastique. Ceci se traduit donc par un épaissement de la texture du mortier. Enfin, il est précisé que plus la texture est pâteuse, plus il est difficile d'ajuster proprement les données avec le modèle de Bingham.

À partir de mesures de viscosité, le comportement du dioxyde de titane en solution dans l'eau déminéralisée a été déterminé³². À concentrations élevées, les solutions de dioxyde de titane présentent un comportement non-newtonien et rhéofluidifiant. Lorsque la concentration est trop basse, la formulation se comporte comme un fluide newtonien, c'est-à-dire similaire au fluide porteur.

REMARQUES

Les différences de protocoles des références présentées et la diversité des formulations rendent les résultats difficilement comparables. Il est néanmoins possible d'identifier des tendances de comportement qui permettent alors de mieux appréhender les notions de viscosités et de consistances pour les plâtres composés avec des additifs. Dans tous les cas, les tendances sont similaires à celles du plâtre seul, avec une augmentation de la viscosité lorsque la concentration en poudre est accrue.

Seuil de cisaillement τ_0

Les additifs divers influencent la contrainte seuil, avec une tendance à l'augmentation du seuil quand le matériau est plus dense, selon un comportement similaire à celui des formulations de plâtre seul à différents rapports massiques.

Dans les travaux de Senff³³, les contraintes seuil semblent plus élevées quand l'addition en TiO_2 est supérieure. Les données pour un mélange de ciment sans TiO_2 ou à 2,6 % sont similaires, mais la valeur de seuil augmente lorsque la concentration en dioxyde de titane est de 5,6 %. Un autre mélange composé de 1,3 % en masse de TiO_2 et de 1,8 % de super-plastifiant montre des valeurs supérieures à celles de la formulation sans TiO_2 .

La comparaison de pâtes de plâtre et de mousses de plâtre (additionnées de tensio-actif) faite dans les travaux de thèse de Mortada³⁴ montre une forte élévation des valeurs de contraintes seuil des mousses, à rapports massiques équivalents. Ceci est expliqué par la modification de la structure en considérant le nombre et la finesse des bulles incorporées lors du processus de moussage (Fig. 16).

³¹ SENFF Luciano, *et al.*, « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *Materials Science and Engineering: A*, 532 (2012), p. 354-361.

³² YANG Hua-Gui, *et al.*, « Rheological Behavior of Titanium Dioxide Suspensions », *Journal of Colloid and Interface Science*, 236 / 1 (2001), p. 96-103.

³³ Senff *et al.*, « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *op. cit.*, p. 357.

³⁴ MORTADA Nourhan, *Mousses minérales : développement, structure porale et propriétés d'usages*, Thèse de doctorat, Rennes 1, 2021.

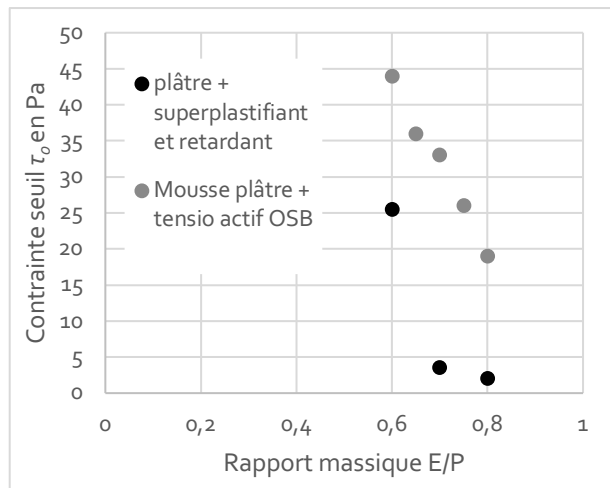


Figure 16 : représentation et comparaison des contraintes seuil mesurées pour des pâtes de plâtre (+ additifs) et des mousses de plâtre (+ additif et tensio-actifs), selon les rapports massiques équivalents, montrant une augmentation des valeurs avec la modification de la structure ; d'après Mortada, 2021.

Dans l'étude d'Asamatdinov³⁵, des formulations de plâtre et d'argile pour la fabrication d'enduits intérieurs sont évaluées selon leurs propriétés rhéologiques en cisaillement simple. Une baisse des contraintes maximales est constatée, lorsque la proportion d'eau est augmentée et lorsque la densité générale du mélange baisse. Ce constat laisse penser qu'un comportement similaire serait observable en étudiant les contraintes seuil.

En étudiant des suspensions d'eau et de dioxyde de titane, Yang³⁶ met en évidence une augmentation des valeurs de contraintes seuil, en fonction de la distribution de taille de grains, ainsi que de la concentration en poudre (Fig. 17). D'une part, ces données démontrent l'effet de la fraction volumique solide sur le seuil, et, d'autre part, s'accordent avec les prédictions que le modèle Yodel [12] peut fournir. La différence liée à la taille des grains et à l'homogénéité des mélanges est également identifiable, selon une même tendance, avec des valeurs inférieures quand la distribution est plus large, et, au contraire, des seuils plus élevés quand la distribution de taille de particules est plus serrée.

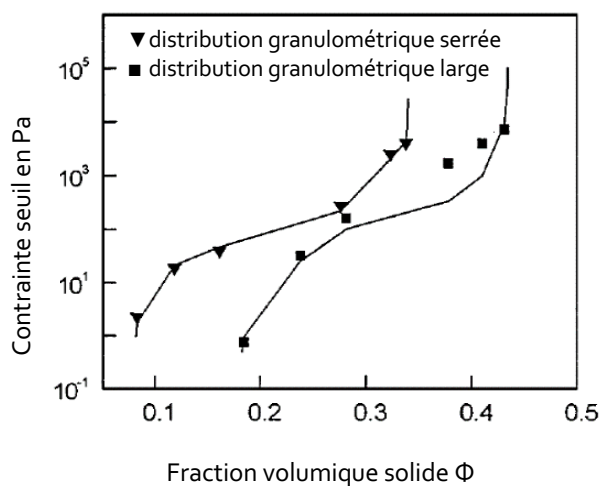


Figure 17 : représentation des contraintes seuil en fonction de la fraction volumique solide de suspensions de dioxyde de titane dans l'eau, avec deux distributions de tailles de particules (serrée et large), montrant un lien fonctionnel avec la quantité de poudre ; tirée de Yang, 2000.

³⁵ ASAMATDINOV Marat, *et al.*, « Composition and rheological characteristics of plaster mixtures », *E3S Web of Conferences*, 97, (2019), p. 1-6.

³⁶ Yang, *et al.*, « Rheological Behavior of Titanium Dioxide Suspensions », *op. cit.*, p. 99.

REMARQUES

La valeur d'indice $n=0,5$ est cohérente avec les gammes de valeurs collectées parmi les références bibliographiques, pour le plâtre seul et les formulations avec additifs. Étant variable, l'indice n indique le type de fluide testé, mais le choix d'une valeur moyenne peut permettre la caractérisation des autres paramètres et variables tels que la consistance et la contrainte seuil. La consistance, et par extension la viscosité, est fonctionnelle de la concentration en poudre ou en matière solide dans une formulation. Le lien fonctionnel entre K et l'indice de structuration n est confirmé. Les additifs influencent cette caractéristique, soit par fluidification, soit par densification et épaissement de la texture.

Les quelques travaux recensés qui considèrent la caractérisation des mélanges de plâtre et d'eau formulés avec des additifs rapportent des valeurs de l'indice de structuration proches de $n = 0,5$. La relation de cet indice avec la fraction volumique solide est difficile à vérifier, mais les suspensions présentent systématiquement un comportement de fluide rhéofluidifiant. En retenant une valeur constante qui caractérise cette structuration sous vitesse de cisaillement, il est possible de mener une analyse simple de la part visqueuse, en considérant le paramètre de consistance K . Ce dernier, à l'instar de la viscosité apparente, semble présenter un schéma de structuration compatible avec le modèle de Krieger-Dougherty [11]. Néanmoins, les rares plans d'expériences présentés dans la littérature ne permettent pas d'obtenir des ajustements exacts pour l'identification précise des paramètres du modèle.

Les additifs de cette étude, le carbonate de calcium et le dioxyde de titane, tendent à épaisir les matrices, d'après les références. Par exemple, d'après Senff³⁷, l'augmentation de la concentration en nanoparticules de TiO_2 conduit à réduire l'ouvrabilité de mortiers composés de chaux et de fibres étudiés par des essais d'étalement. La colle animale semble se comporter de la même façon que le fluide porteur, soit l'eau, et donc réagir comme une suspension de plâtre et d'eau, sans additif. Enfin, les contraintes seuil des formulations additionnées suivent le même principe, avec une élévation des valeurs quand la concentration en matière solide augmente.

Il convient de préciser que le temps de prise, probablement influencé par la présence d'additifs, n'est pas étudié dans cette thèse.

³⁷ SENFF Luciano, et al., « Development of multifunctional plaster using nano- TiO_2 and distinct particle size cellulose fibers », *Energy and Buildings*, 158 (2018), p. 721-735.

3. Apports en conservation-restauration

a. But de l'étude

Le comportement des matériaux de conservation-restauration à l'état frais est peu étudié, bien que cela corresponde à la mise en œuvre et à la pratique du professionnel, et représente donc une part importante des connaissances sur les matériaux. Ce type d'étude permet de lier les approches expérimentales et les approches psycho-sensorielles des professionnel·les, qui ont l'habitude de manipuler les matériaux et d'ajuster les formulations pour obtenir des textures spécifiques.

À l'aide de protocoles d'études rhéologiques communément utilisés dans les domaines de la physique ou du génie civil, les types de fluides peuvent être identifiés et les formulations utilisées par les praticien·nes sont précisées et quantifiées. Les valeurs de contraintes maximales τ et de seuils τ_0 , ainsi que celles de viscosité μ et de consistance K , ou encore l'indice n , permettent de qualifier la nature et le comportement d'un matériau à l'état frais. Les données peuvent être établies par des mesures lors d'essais et estimées par ajustement aux modèles. Ces caractéristiques sont ensuite mises en relation avec la microstructure des formulations et le rapport grains/liant par l'étude des fractions volumiques solides Φ .

Dans les travaux présentés ici, la quantification et la précision des caractéristiques permettent d'établir un référentiel de données pour la gamme de formulations étudiées, ainsi qu'un classement des textures, pâteuses à fluides, idéales pour la mise en œuvre des comblements par modelage ou par coulée. Les comportements rhéologiques des formulations étudiées étant mieux connus, il est possible d'établir des correspondances, en fonction des textures, et donc d'enrichir les gammes et les usages de matériaux de comblement en conservation-restauration.

b. Description des textures

Les formulations de comblement peuvent être classées selon des tendances générales de comportements rhéologiques et de textures telles que :

- La **texture liquide** (Fig. 18 a) qui permet la coulée dans un moule, avec une répartition facile dans un support comportant des anfractuosités, tels que les moules pour la statuaire ou pour les ornements des cadres. Cela permet de fabriquer des pièces de comblement à part, qui sont rapportées et fixées sur l'artefact une fois la prise et le séchage amorcés ou achevés.
- La **texture pâteuse** (Fig. 18 c) qui doit avoir une tenue suffisante sur une spatule pour permettre un travail de modelage du matériau mis en place directement sur l'artefact. La formulation doit ainsi « rester en place » et ne pas s'écouler avant la prise.
- Une **texture intermédiaire** (Fig. 18 b) qui balance basse et haute viscosité peut être employée dans des zones aux reliefs difficiles, où la nécessité d'avoir un matériau fini, relativement dense, dur et plus résistant, s'équilibre avec l'écoulement et la possibilité au matériau de s'adapter au support avant la prise ou le séchage.

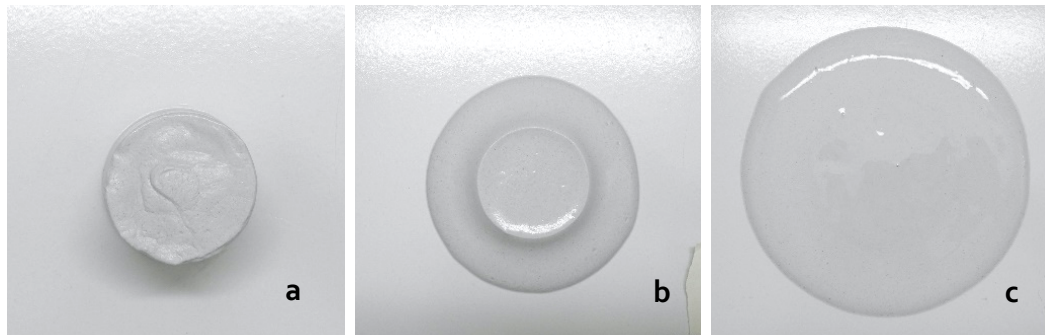


Figure 18 : (a) texture pâteuse de plâtre EXTHA®, à E/P = 0,5
(b) texture intermédiaire de plâtre EXTHA®, à E/P = 0,6
(c) texture liquide de plâtre EXTHA®, à E/P = 0,8

Des critères techniques imposent le choix d'une texture à l'état frais (Tabl. 1). Ils sont à considérer en fonction des propriétés du matériau à l'état durci et de la résistance mécanique, développées dans le chapitre IV³⁸.

Texture et mise en œuvre	Critères
<p>Texture liquide, fluide à dominante visqueuse</p> <p>(Tirage à part ou mise en œuvre <i>in situ</i> selon conditions)</p>	<p>Rôle esthétique, dimensions variables, élément d'ornement ou figuratif, zone altérée, sans apport d'eau liquide ou d'humidité (tirage à part), effet illusionniste, œuvre manipulable, durée de chantier adaptée.</p>
<p>Texture pâteuse, fluide à dominante plastique</p> <p>(Modelage <i>in situ</i>)</p>	<p>Rôle structurel, grandes dimensions, élément d'ornement, figuratif ou peu visible, zone saine, peu sensible à l'apport d'eau, effet illusionniste ou minimaliste, œuvre difficilement manipulable ou axe de travail inadéquat, durée de chantier variable.</p>
<p>Texture intermédiaire, fluide visqueux et plastique</p> <p>(Modelage <i>in situ</i> ou tirage à part selon conditions)</p>	<p>Rôles esthétique et/ou structurel, dimensions variables, élément d'ornement, figuratif ou peu visible, zone peu altérée, peu sensible à l'apport d'eau, effet illusionniste ou minimaliste, œuvre difficilement manipulable ou axe de travail inadéquat, durée de chantier variable.</p>

Tableau 1 : synthèse des textures et des aspects rhéologiques selon les critères techniques.

c. Taux de cisaillement en pratique de comblement

Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, ou vitesse de cisaillement, peut être considéré comme une transposition du geste ou de la mise en œuvre du comblement, lorsque le matériau est manipulé et, par conséquent, cisailé. Il est donc possible d'estimer $\dot{\gamma}$ en fonction de la technique, envisagée ici uniquement comme un modelage à la spatule, de façon à relier les notions à la pratique des professionnel·les.

³⁸ Par exemple, une texture fluide, peu concentrée, a une porosité élevée et un réseau cristallin peu dense, et par conséquent une résistance mécanique faible ; alors qu'une texture pâteuse, très concentrée en matrice liante, a une densité élevée, un réseau cristallin très serré et une porosité faible, et par conséquent une résistance mécanique élevée.

Une estimation des taux de cisaillement susceptibles de représenter les pratiques de comblement en conservation-restauration a été proposée selon une approche personnelle. Ainsi des vitesses moyennes par dimension de comblement ont été établies (Tabl. 2), en considérant des vitesses plus élevées pour les comblements de dimensions importantes, le geste étant plus rapide de façon à limiter la durée de manipulation du produit et parce que la zone plus grande permet un travail rapide ; à l'inverse, un petit comblement nécessite un geste plus lent.

Estimation de l'ordre de grandeur du taux de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{V_1 - V_0}{(z_1 - z_0)} \quad [13] \quad \text{soit : } \dot{\gamma} = \frac{V}{h} \quad [14]$$

Avec $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement en s^{-1} , V = vitesse en $m.s^{-1}$ et h = hauteur en m (distance entre les surfaces cisailante et cisailée), V_1 = vitesse sur la surface cisailante (à l'interface du film ou mortier et de l'outil), V_0 = vitesse sur la surface cisailée (soit le support), z_1 = surface cisailante, et z_0 = surface cisailée.

Ces estimations déterminent uniquement la profondeur ou la hauteur du comblement, en considérant la lacune comme une cavité dans une matrice.

Modelage par dimension de comblement	Hauteur estimée	Vitesse estimée	Taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ estimé en s^{-1}
Petit comblement	2 mm	1 $cm.s^{-1}$	5
	5 mm	1 $cm.s^{-1}$	2
Comblement moyen	2 cm	2 $cm.s^{-1}$	1
	5 cm	2 $cm.s^{-1}$	0,4
Gros comblement	10 cm	5 $cm.s^{-1}$	0,5
	15 cm	5 $cm.s^{-1}$	≈ 0,33

Tableau 2 : estimation des taux de cisaillement par type d'intervention de comblement.

Les gammes de taux de cisaillement estimées sont de l'ordre de 0,3 à 5 s^{-1} . Dans ces basses conditions en essai dynamique, le comportement rhéologique est difficile à interpréter en raison du mécanisme de structuration pouvant se produire, combiné à la prise du matériau.

Les protocoles de tests, décrits dans la partie suivante, ont donc été prévus pour éviter ce phénomène, et contourner cette difficulté. L'évaluation des seuils limites en cisaillement a été menée selon un protocole en cisaillement simple et en condition quasi-statique, associé à un protocole dynamique en restructuration couvrant les plages de $\dot{\gamma}$ évaluées. Cette double caractérisation permet de valider l'interprétation du comportement viscoplastique en comparant les seuils limites de cisaillement mesurés et calculés.

REMARQUES

Dans les travaux présentés, pour estimer les propriétés rhéologiques des mélanges étudiés, les fluides sont donc assimilés à des suspensions minérales liquide-solide. La partie liquide est représentée par l'eau, fluide newtonien, non compressible, et caractérisé par sa masse volumique et sa viscosité dynamique. Quelques essais ont néanmoins été réalisés en remplaçant l'eau par une solution de colle animale. La phase solide est représentée par le liant hydraulique d'hémihydrate de sulfate de calcium de type α et β , avec ou sans carbonate de calcium et dioxyde de titane. Les matériaux solides en poudre présentent des granulométries dans des ordres de grandeurs similaires, plus particulièrement pour le CaCO_3 et le TiO_2 . La masse volumique des plâtres et de la charge de CaCO_3 sont semblables, tandis que celle du TiO_2 est plus importante. Lorsque les phases sont mélangées et homogénéisées, le fluide résultant est considéré comme un fluide homogène en raison du caractère soluble des matières solides. La caractérisation rhéologique, par l'évaluation des textures, est menée en phase dite dormante, pendant laquelle la réaction de prise du plâtre n'est pas prédominante. Afin de soustraire les effets de prise du matériau et de la forte réactivité du plâtre avec l'eau, les temps d'évaluation sont courts. Généralement, il est considéré qu'un hémihydrate pur sans additif fait prise en 10 à 20 minutes. Une adaptation des protocoles de caractérisation est donc nécessaire pour limiter l'influence d'un début de prise, faussant les interprétations.

II. Méthode

Deux types d'essais sont menés en condition de cisaillement simple pour caractériser les suspensions de l'étude en phase dormante : l'un en protocole quasi-statique et le second à vitesse imposée en restructuration. Les courbes d'écoulement sont ensuite interprétées selon le modèle d'Herschel-Bulkley [6], considéré comme le plus adapté pour décrire les propriétés rhéologiques de ce type de formulation³⁹. Ce protocole permet tout d'abord de caractériser les mélanges liquide-solide eau-plâtre, puis d'identifier l'effet des additifs de carbonate de calcium et de dioxyde de titane, et enfin d'observer les tendances de comportement des formulations supplémentaires, telles que celle composée de craie de Bologne et de colle animale ainsi que le produit commercial Modostuc®.

1. Moyens et équipements

a. Rhéomètre et traitement des données

Les deux essais sont réalisés avec un rhéomètre Anton Paar®, modèle MCR 102⁴⁰, en utilisant deux types de géométrie. La première géométrie est de type plan-plan⁴¹, de 25 mm de diamètre sur un support fixe de 50 mm ; la seconde est de type Vane, d'un diamètre de 22 mm, avec une cuve équipée d'une grille, au diamètre intérieur largement supérieur à celui de la géométrie. Les données sont collectées par le logiciel Anton Paar® selon les paramètres retenus pour le traitement : contrainte de cisaillement, taux de cisaillement, viscosité, force normale, couple, et température. Elles sont ensuite traitées avec Excel®, afin de construire les courbes d'écoulement et de faire les calculs d'ajustement des modèles grâce à un algorithme de régression non linéaire.

Chaque essai est reproduit autant de fois que nécessaire, de façon à avoir un minimum de trois essais aux résultats cohérents⁴². Une calibration de l'entrefer est effectuée entre chaque essai en vérifiant la référence de mesure par la mise en contact des plateaux. La force normale, notée N, est réinitialisée et remise à zéro avant le démarrage de chaque essai de cisaillement. La température du plateau inférieur est systématiquement maintenue à 20 °C, à l'exception de certains essais à la colle animale pour lesquels la température du plateau est élevée à 40 °C.

³⁹ Ovarlez, « Caractérisation rhéologique des fluides à seuil », *op.cit.*, p. 29.

⁴⁰ Équipement du laboratoire du L2MGC de CY Cergy Paris Université, où nous avons été accueillis pour mener cette étude rhéologique, sous la supervision d'Alexandre Pierre.

⁴¹ Les deux surfaces de la géométrie plan-plan sont recouvertes de papier abrasif n°180, afin de limiter le glissement de la formulation lors du test, faussant les résultats.

⁴² En comparant les résultats d'essais préliminaires, il a été constaté que les données d'un essai à l'autre étaient cohérentes lorsque le plâtre provenait d'un sac neuf récemment ouvert. En revanche, un sac ouvert depuis longtemps, et donc un plâtre plus vieux et probablement « éventé », ne permettait pas d'obtenir des résultats aussi homogènes.

b. Préparation des formulations et mise en place

Les formulations (Tabl. 3) sont préparées spécialement pour chaque test. Afin de limiter les effets de prise des mélanges contenant de l'hémihydrate, la juste quantité est mise en œuvre à chaque essai, selon un protocole identique et répétable. Les mélanges ne faisant pas prise mais contenant de la colle à température d'utilisation spécifique sont, eux aussi, préparés avant chaque essai selon des conditions reproductibles en relevant la température à l'aide d'un thermomètre à sonde.

Ainsi les matériaux sont pesés séparément : le contenant d'eau est couvert afin de limiter l'évaporation ; le plâtre ou la poudre sont pesés en dernier pour éviter une prise d'humidité de l'air. Le matériau poudreux est ajouté en « pluie » dans l'eau, tout en mélangeant à la spatule pendant une durée de 30 secondes. Au-delà, le mélange est poursuivi pendant encore 30 secondes. Le malaxage dure 1 minute au total.

Les formulations sont alors disposées dans le système de mesure du rhéomètre, coulées ou déposées à la spatule selon la géométrie Vane ou plan-plan. La géométrie est ensuite ajustée au contact du matériau et le test est démarré. Une fois l'essai terminé, la géométrie est dégagée et la formulation est retirée du support immédiatement. Les mesures d'entrefer et de position d'attente ont été évaluées lors de tests préliminaires, afin d'optimiser les temps d'attente et d'accélérer le démarrage de l'essai.

Matériau	Variable	Texture
Plâtre Molda® 3 normal (hémihydrate β non formulé) – matériau de référence	Taux de gâchage E/P de 0,45 à 0,95	Liquide à pâteuse
Plâtre EXTHA® Ibérica (hémihydrate β)	Taux de gâchage E/P de 0,5 à 1,05	Liquide à pâteuse
Plâtre Knauf® FG100 (hémihydrate α)	Taux de gâchage E/P de 0,3 à 0,5	Liquide à pâteuse
Plâtre Molda® 3 normal + carbonate de calcium	Taux E/P : 0,7 ; 0,9 ; 1,1 ; ratio plâtre- CaCO_3 (1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5)	Liquide à pâteuxse
Plâtre Molda® 3 normal + carbonate de calcium + dioxyde de titane	E/P 1,5 ; ratio 1-2 ; + 2 % de TiO_2	Intermédiaire
Craie de Bologne + colle animale (15% dans l'eau), avec ou sans dioxyde de titane	Pas de variable - imitation « apprêt » avec ou sans 2 % de TiO_2	Liquide +/-
Colle animale à 15%	Pas de variable	Liquide +/-
Modostuc® – pâte de comblement polyvalente	Pas de variable	Pâteuse

Tableau 3 : liste des matériaux et des formulations testées.

2. Essais

a. Caractérisation dynamique, en restructuration

Ce test mesure l'écoulement en cisaillement imposé, avec un taux de cisaillement décroissant de 150 à 0,1 s⁻¹ (Tabl. 4 et fig. 19). Ce type de test permet de relever les valeurs de contrainte en fonction du taux de cisaillement. Il donne donc une indication du comportement général du matériau pendant la durée de sollicitation, en vitesse décroissante. Il est possible d'identifier le type de fluide en interprétant les courbes d'écoulement, qui renseignent sur les propriétés visqueuses et plastiques des formulations.

Réglage	Logarithmique
Taux de cisaillement	de 150 s ⁻¹ à 0,1 s ⁻¹
Nombre de points	1 point par intervalle/seconde soit 64 points au total
Durée du test	1 minute
Diamètre des géométries	Support inférieur : 50 mm - Support supérieur : 25 mm
Hauteur de l'entrefer	e = 1,5 mm
Rugosité	Disques de papier abrasif n°180, verso adhésif, découpés aux diamètres des géométries
Quantité de formulation disposée	≈ 3 g

Tableau 4 : paramètres de l'essai en géométrie plan-plan, en restructuration.

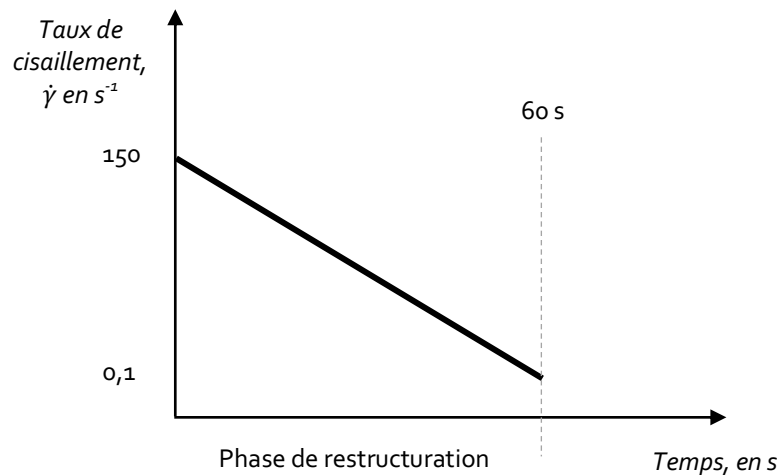


Figure 19 : représentation des conditions d'essai dynamique par géométrie plan-plan, en restructuration avec un taux de cisaillement décroissant de 150 à 0,1 s⁻¹ permettant de mesurer les caractéristiques rhéologiques, en évitant les effets de prise des formulations.

Déroulé du test

L'essai est détaillé de la façon suivante : après préparation de la quantité nécessaire, la formulation est déposée à la spatule au centre du plateau inférieur. Le plan supérieur est abaissé au contact, selon les réglages d'entrefer choisis, en écrasant la matière de façon homogène et sans bulle d'air (Fig. 20). Les débordements sont raclés à l'aide d'une spatule et l'essai est démarré. A la fin de l'essai, la géométrie est remontée, la formulation retirée des supports, qui sont rincés à l'eau et nettoyés à l'aide d'une éponge. Les supports et les géométries sont séchés à l'air puis replacés sur le rhéomètre en conservant la même configuration pour le prochain essai. Les papiers abrasifs, fixés sur les surfaces de géométrie pour éviter le glissement des formulations à l'interface de la géométrie, sont conservés le temps de quelques essais, de trois à cinq, selon la quantité d'eau présente dans la formulation.

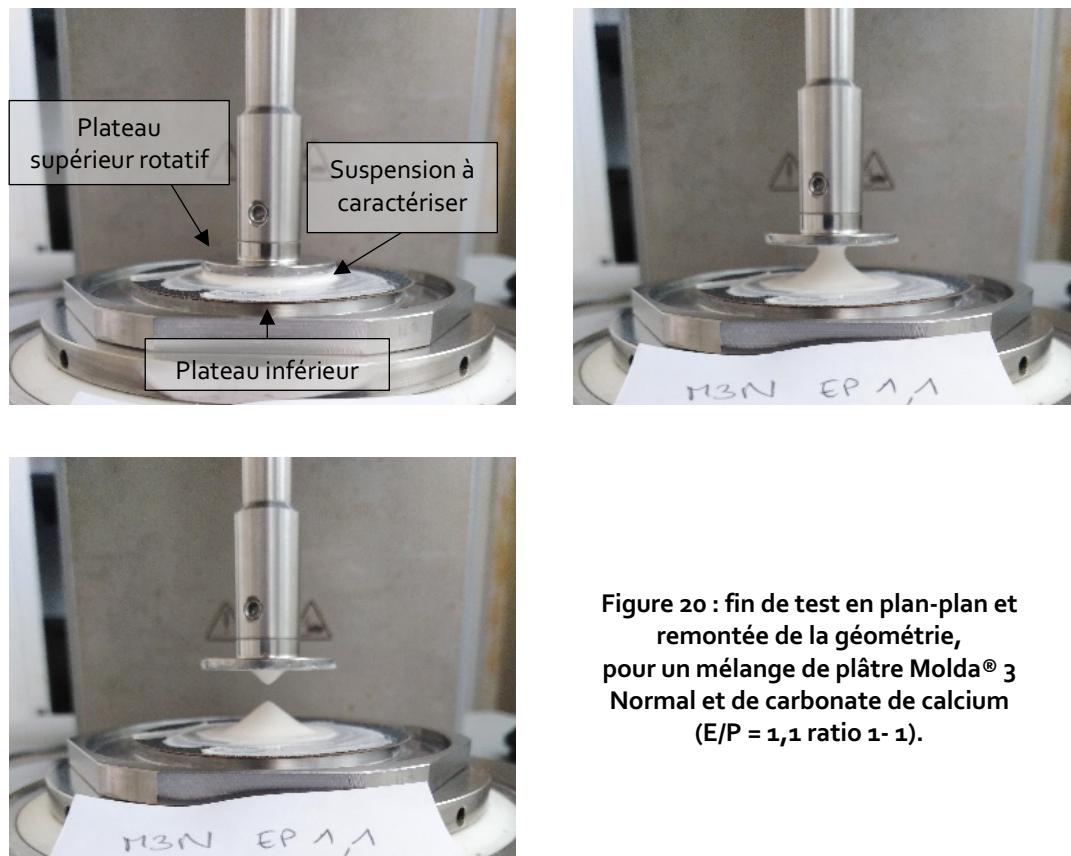


Figure 20 : fin de test en plan-plan et remontée de la géométrie, pour un mélange de plâtre Molda® 3 Normal et de carbonate de calcium (E/P = 1,1 ratio 1- 1).

b. Caractérisation statique

Ce test mesure les contraintes à un taux de cisaillement imposé et constant à $0,1 \text{ s}^{-1}$ avec l'outil Vane (Tabl. 5 et Fig. 21). La contrainte seuil τ_0 est déduite de cet essai en distinguant la rupture plastique du volume retenu par les quatre pales de l'outil Vane, par rapport au reste du fluide contenu dans la cuve.

Réglage	Logarithmique
Taux de cisaillement	$0,1 \text{ s}^{-1}$
Nombre de points	1 point par intervalle/seconde soit 180 points au total
Durée du test	180 secondes, soit 3 minutes
Mesures de la géométrie et du support	Cuve : hauteur = 100 mm, diamètre intérieur ≈ 75 mm Géométrie Vane : hauteur $h = 40$ mm, rayon $R_i = 11$ mm
Hauteur de l'entrefer	$e = 50$ mm
Rugosité	Grille amovible cylindrique ajustée à la cuve
Quantité de formulation disposée	≈ 600 à 800 g

Tableau 5 : paramètres de l'essai en géométrie Vane, en quasi-statique.

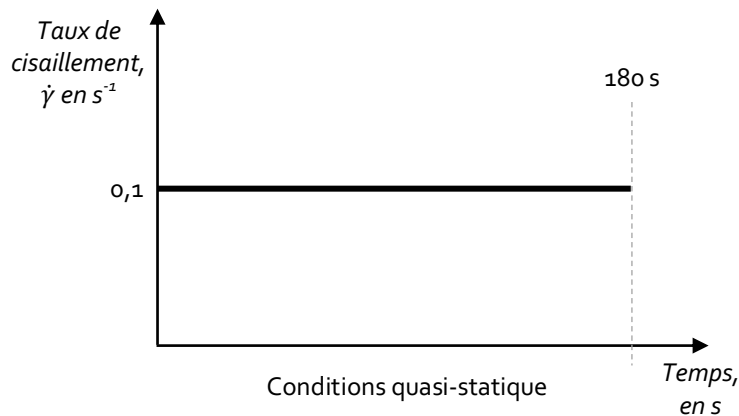


Figure 21 : représentation des conditions de l'essai en Vane test, à bas taux de cisaillement constant et imposé à $0,1 \text{ s}^{-1}$ pendant 3 minutes ; ce test permet d'identifier la contrainte seuil de chaque formulation.

Ce test est complémentaire de celui en géométrie plan-plan, pour lequel les contraintes seuil sont modélisées à partir des données collectées et mesurées. Les valeurs de contrainte sont croissantes sur la courbe $\tau = f(t)$, jusqu'à atteindre un seuil maximal qui correspond donc à la contrainte seuil.

Déroulé du test

Après la mise en œuvre de la suspension pour un essai, suivant le même protocole que celui détaillé plus haut, le matériau est coulé dans la cuve, l'outil est enfoncé jusqu'à ce que la limite supérieure de l'outil soit au niveau de la surface libre de la suspension à caractériser (Fig. 22). Lors de tests préliminaires, la hauteur de l'entrefer a été réglée et la quantité de formulation déterminée, de façon à avoir toujours les mêmes paramètres d'essais. La distance entre le fond de la cuve et la partie inférieure de l'outil Vane est suffisamment importante pour pouvoir négliger les éventuelles interactions. Ceci requiert de préparer un volume conséquent pour chaque suspension. Après ces réglages, l'essai est démarré. À la fin de l'essai, la géométrie est remontée, le système démonté, la cuve et la géométrie sont nettoyées à l'eau, après le retrait de l'excédent de matière. L'ensemble est séché puis remis en place sur le rhéomètre, en procédant aux réglages, avec repositionnement et réinitialisation de l'entrefer, avant de procéder à l'essai suivant.

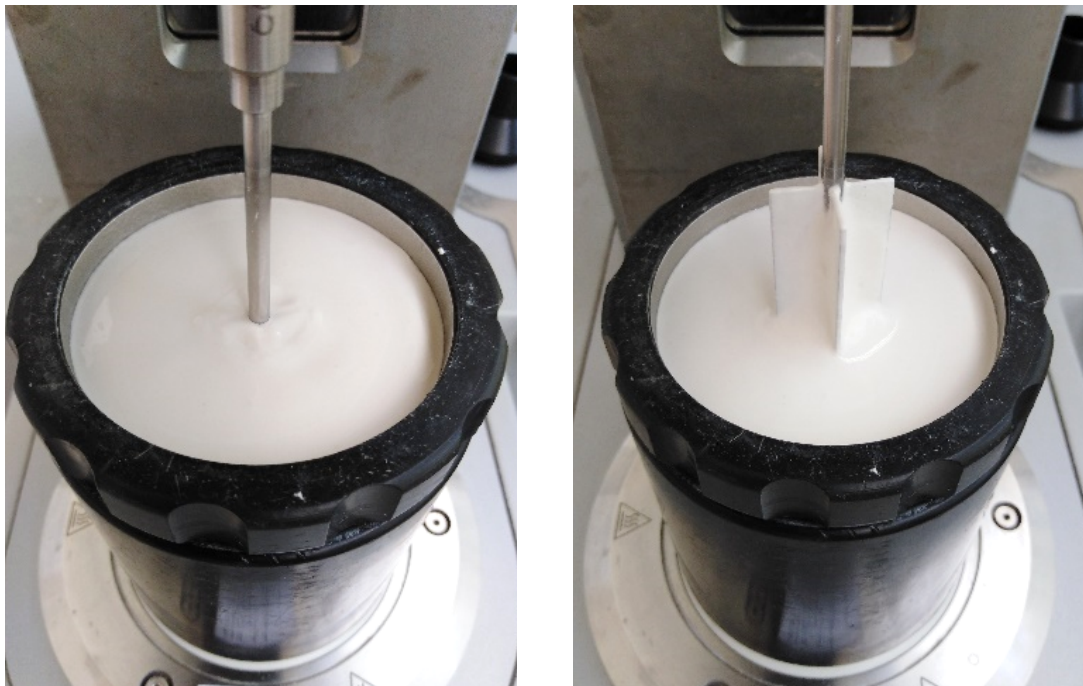


Figure 22 : fin de test en Vane et remontée de la géométrie, pour un mélange de plâtre Molda® 3 Normal et de carbonate de calcium (E/P 1,1 ratio 1- 1).

3. Traitement des données

Les données mesurées et obtenues lors des essais sont ensuite traitées et modélisées, de façon à quantifier les paramètres non mesurables ou à vérifier la bonne concordance des valeurs. Par exemple, la contrainte seuil est mesurée en protocole quasi-statique et estimée par modélisation à partir des essais en dynamique.

a. Caractéristiques calculées

Fraction volumique solide

La fraction volumique solide Φ correspond au volume de poudre par rapport au volume total, et permet donc de comparer les différentes formulations en considérant l'ensemble poudre/eau. Elles sont calculées à partir des données en volume ou à partir des valeurs de masses volumiques ρ , selon les formules suivantes :

$$\text{Calcul de la fraction volumique solide : } \Phi = \frac{V_{\text{solide}}}{V_{\text{total}}} \quad [8]$$

$$\text{soit } \Phi = \frac{1}{\left(1 + \frac{E}{L} \times \frac{\rho_{\text{poudre}}}{\rho_{\text{eau}}}\right)} \quad [15]$$

Avec E/L = rapport massique eau/liant (poudre), et ρ = masse volumique en kg.m^{-3} .

Contrainte τ

Les données sont enregistrées lors des essais en géométrie plan-plan. Les valeurs de la contrainte de cisaillement sont ensuite vérifiées selon la formule [16], avant d'entreprendre l'interprétation du comportement rhéologique.

$$\text{Calcul de la contrainte de cisaillement : } \tau = \frac{3}{2} \frac{T}{\pi R^3} \quad [16]$$

Avec T = le couple en N.m et R = le rayon de la géométrie en m .

Contrainte seuil en essai Vane

Les contraintes seuil τ_0 , qui correspondent aux forces nécessaires pour initier la mise en écoulement du fluide, sont évaluées de deux façons dans ces travaux. Elles sont mesurées par l'essai en géométrie Vane en condition quasi-statique et modélisées d'après les mesures de contraintes du test en géométrie plan-plan en condition dynamique. Il est ainsi possible de comparer les deux séries de données et de vérifier la fiabilité et la cohérence de la modélisation. En géométrie Vane, la contrainte seuil correspond au moment où la courbe se stabilise, et donc, en théorie, aux valeurs de contrainte maximale. Elle est identifiée grâce à l'équation [17], à partir des valeurs du couple de cisaillement enregistré, et en négligeant l'effet du frottement exercé sur la partie inférieure de l'outil.

$$\text{Formule de calcul de la contrainte seuil : } \tau_0 = \frac{T}{2\pi h R i^2} \quad [17]$$

Avec T = le couple en N.m , h = la hauteur de la géométrie en m ,
et Ri = le rayon en m .

Deux profils peuvent être observés en fonction des formulations (Fig. 23).

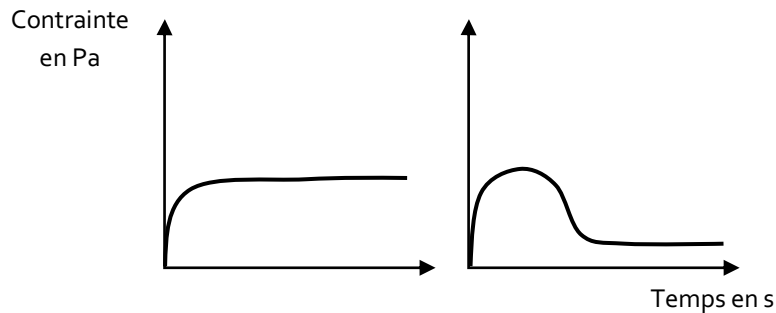


Figure 23 :
deux types de
courbes
d'écoulement
obtenues
avec l'essai en
géométrie
Vane.

b. Courbes d'écoulement

L'analyse des courbes d'écoulement telles que $\tau = f(\dot{\gamma})$ [1] permet de déterminer les types de comportement et de sélectionner les modèles adaptés à la caractérisation.

Après vérification des valeurs de la contrainte en fonction des taux de cisaillement, les courbes d'écoulement sont générées et analysées. En observant les courbes pour trois formulations de plâtre seul à différents rapports massiques (Fig. 24), un mécanisme de structuration induit par le taux de cisaillement est constaté. Ceci caractérise un comportement de type rhéofluidifiant. En comparant les gammes de contraintes mesurées, il apparaît clairement que les valeurs sont liées au rapport massique, avec des contraintes plus élevées lorsque le rapport massique est bas, soit une formulation de plâtre plus concentrée en poudre. Les contraintes à bas taux de cisaillement ont une allure particulière avec une inflexion qui semble traduire un effet de seuil. Ces premières indications concordent avec les données des références bibliographiques, en identifiant les suspensions de plâtre comme des fluides viscoplastiques à seuil, de type rhéofluidifiant.

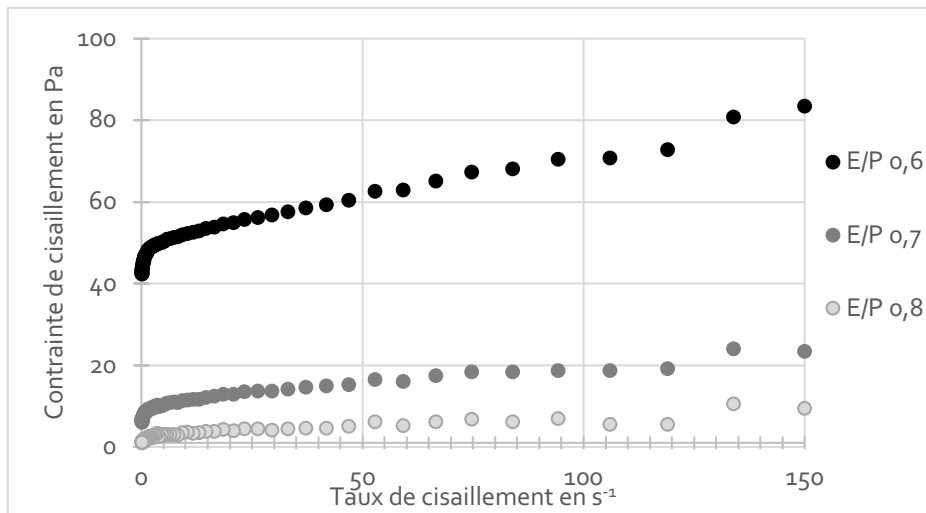


Figure 24 : représentation des courbes d'écoulement pour trois formulations de plâtre (Molda® 3 Normal) à rapports massiques E/P = 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; confirmant le comportement viscoplastique et rhéofluidifiant de la suspension.

c. Modélisations

Après confirmation du type de comportement des fluides étudiés, les données mesurées peuvent être ajustées au modèle adapté, dans ce cas celui d'Herschel-Bulkley [6], afin de préciser les caractéristiques des matériaux (Fig. 25). Le solveur de résolution d'équation du logiciel Excel® a été utilisé pour calculer les valeurs de contrainte seuil τ_0 , de consistance K et d'indice de structuration n , pour chaque formulation du plan d'expérience. Les mécanismes de structuration induits par la variation de la fraction volumique solide sont ensuite étudiés par le biais du seuil limite de cisaillement et de la viscosité apparente. Les travaux s'attachent donc à caractériser le comportement de l'indice de structuration, et, d'après ces résultats, à aborder l'analyse de τ_0 et de μ en recourant aux modèles de la littérature lorsque cela est possible.

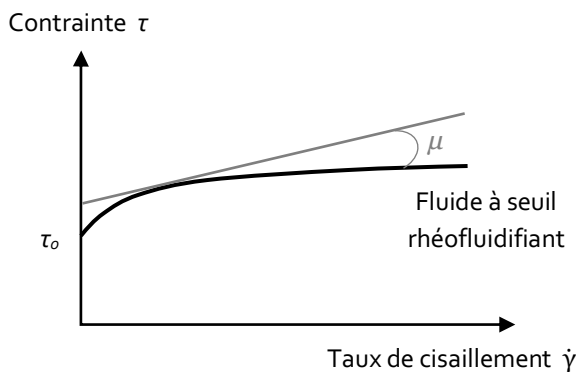


Figure 25 : Représentation d'une courbe d'écoulement type pour un fluide viscoplastique rhéofluidifiant, dont la structuration dépend du taux de cisaillement et de l'indice n ; une courbe d'écoulement de ce type peut être traitée selon le modèle d'Herschel-Bulkley [6].

Évaluation de la structuration sous $\dot{\gamma}$ sans valeurs imposées

Les données sont ajustées au modèle d'Herschel-Bulkley [6] en laissant les trois paramètres de contrainte seuil, de consistance et d'indice n « libres », c'est-à-dire calculés par le solveur sans valeur imposée. Cela permet de définir des gammes de valeurs selon les formulations et d'identifier des ensembles représentatifs. Les valeurs de toutes les formulations et les répétitions d'essai sont comparées dans le but de distinguer une tendance induite par la fraction volumique solide. En l'absence de tendance, une analyse statistique est menée afin de déterminer une valeur moyenne représentative, cohérente avec les données de la littérature. Cette valeur unique permet cibler la structuration de la consistance et de simplifier l'analyse de la composante visqueuse.

Comparaison des contraintes seuil

La contrainte seuil est identifiée par la formule [6], à partir des données mesurées, moyennées et résolues par le solveur d'équation. Les couples $(\tau_o; \Phi)$ sont ensuite comparés au seuil Yodel⁴³ [12], qui intègre les liaisons intergranulaires des suspensions et permet d'appréhender les aspects micro-structurels des fluides. Il est possible d'identifier une fraction volumique solide dite de percolation, notée Φ_p ou Φ_{per} , qui correspond au seuil de concentration en grains permettant un écoulement, en matérialisant la transition d'un comportement purement visqueux à un comportement viscoplastique ; et une valeur maximale, notée Φ_m ou Φ_{max} , qui représente la concentration limite au-delà de laquelle les interactions granulaires provoquent un effet de blocage ne permettant plus le cisaillement. Ces valeurs renseignent sur la gamme d'usage optimal pour chaque formulation, en considérant la microstructure et le rapport grain-fluide porteur.

Évaluation des consistances

L'analyse de la consistance ou de la viscosité apparente est liée à l'indice de structuration, comme évoqué précédemment. Pour les suspensions minérales comme celles composées de plâtre, il est attendu que le mécanisme de structuration induit par la variation de la fraction volumique solide soit bien représenté par le modèle de Krieger-Dougherty [11].

Vérification par le coefficient R^2

La fiabilité des calculs ajustés au modèle d'Herschel-Bulkley [6], dans le cas des configurations plan-plan, est vérifiée par des mesures du R^2 ou coefficient de détermination linéaire de Pearson⁴⁴ selon la formule [18].

$$\text{Calcul du } R^2 : \quad 1 - \left(\frac{A}{B}\right) \quad [18]$$

Avec A, la somme des (valeurs mesurées - valeurs calculées)², et B, la sommes des (valeurs mesurées - moyenne des valeurs mesurées)².

⁴³ Flatt et Bowen, « Yodel: A Yield Stress Model for Suspensions », *op. cit.*; Flatt et Bowen, « Yield Stress of Multimodal Powder Suspensions: An Extension of the YODEL (Yield Stress mODEL) », *op. cit.*

⁴⁴ Le calcul du R^2 est un outil statistique qui évalue la différence entre deux séries de données avec des valeurs comprises entre 0 et 1. La valeur 1 étant le résultat le plus fiable, il est considéré qu'un R^2 supérieur à 0,97 est fiable et acceptable.

III. Résultats et modélisations

1. Comportement rhéologique général

a. Fraction volumique solide

Masses volumiques des matériaux bruts

Les fractions volumiques solides ont été calculées à partir des données de masses volumiques des matériaux bruts (Tabl. 6). Ces valeurs sont connues par les fiches techniques des matériaux et produits, par les sources bibliographiques, ou estimées en fonction des données de références. Pour les formulations qui contiennent différents matériaux, les calculs ont été faits en fonction des proportions et des mesures afin d'avoir une valeur approximative. Les masses volumiques comprises entre deux valeurs ont été moyennées afin de n'avoir qu'une seule valeur.

Matériau brut	Masse volumique en kg.m ³
Molda® 3 Normal	2630
EXTHA®	2300
Knauf®	2720 ⁴⁵
Carbonate de calcium Kremer®	Entre 2600-2900 – Moyennée à 2750
Dioxyde de titane Kremer®	Entre 3400-4300 – Moyennée à 3850
Craie de Bologne Kremer®	800-1000
Colle de peau de lapin Kremer®	500-800 (données FDS colle en cubes) à l'état anhydre
Eau	1000
Modostuc®	1920-1960 (1,920-1,960 g/ml données fiche technique)

Tableau 6 : masses volumiques utilisées pour les calculs des fractions volumiques solides.

⁴⁵ DE KORTE Arie Cornelis Johannes, *Hydration and Thermal Decomposition of Cement/calcium-sulphate Based Materials*, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2015, p. 169.

Fraction volumique solide calculée

Les fractions volumiques solides sont variables⁴⁶ selon différents paramètres : la nature de l'hémihydrate β ou α , le rapport massique eau/plâtre et eau/matière solide et la présence d'additifs (Fig. 26). Considérant uniquement les plâtres sans additif, un lien fonctionnel est très clairement identifiable, avec une augmentation de Φ quand le rapport massique baisse, soit quand la quantité de plâtre est plus élevée. Ainsi les mélanges les plus concentrés ont les valeurs Φ les plus élevées, avec par exemple 0,458 pour le taux E/P = 0,45 de Molda® 3 Normal ; 0,465 pour E/P = 0,5 de EXTHA® ; et 0,551 pour E/P = 0,3 de Knauf®. À rapport massique équivalent, les deux plâtres β ont des fractions volumiques solides légèrement différentes, légèrement plus élevées pour le EXTHA®. Le plâtre Knauf® a des valeurs plus élevées que les deux plâtres β , en lien avec la nature du matériau.

Logiquement, les fractions volumiques augmentent avec l'addition de carbonate de calcium. Comme la masse volumique du carbonate de calcium est très proche de celle du Molda® 3 Normal, à rapport massique équivalent, les valeurs de fractions volumiques sont similaires telles que celle du mélange E/P = 0,9 ratio 1-1 à rapport massique E/Ms = 0,45 et à $\Phi = 0,452$ presque identique à E/P = 0,45 du Molda® 3 Normal cité plus haut.

La formulation additionnée de carbonate de calcium et de dioxyde de titane a un rapport massique E/Ms = 0,5 et à $\Phi = 0,428$ est proche des valeurs des plâtres seuls à E/P = 0,5 tels que le Molda® 3 Normal à $\Phi = 0,432$ ainsi que Knauf® à $\Phi = 0,424$.

Les formulations de craie et de colle sont estimées à $\Phi = 0,476$ pour un rapport massique évalué à 1,16 en considérant l'eau comme fluide porteur et en négligeant la concentration en colle. Cette préparation a une texture de type apprêt, soit suffisamment fluide pour être travaillée au pinceau en superposition de couches.

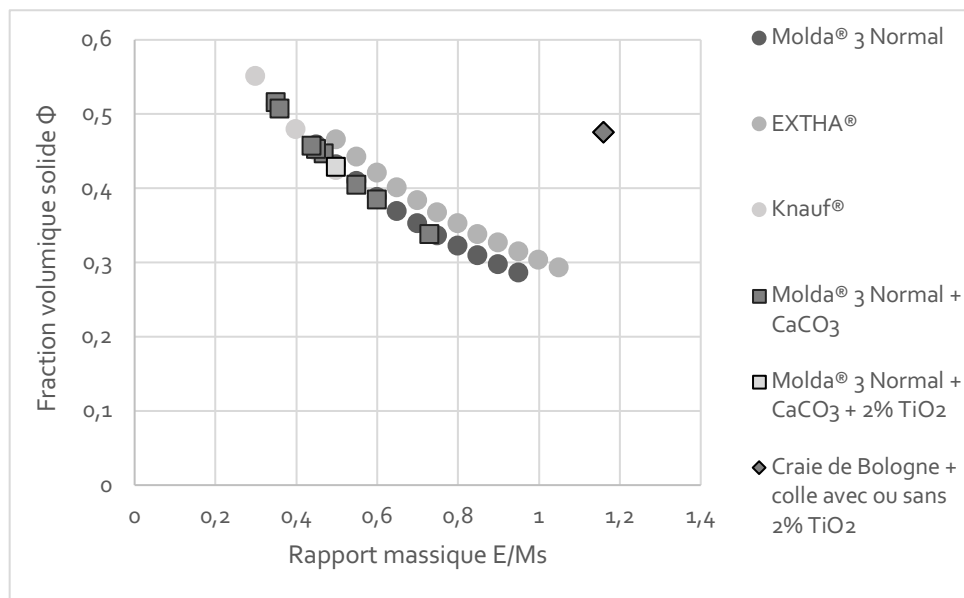


Figure 26 : représentation des valeurs calculées de fractions volumiques solides selon les rapports massiques eau/plâtre ou eau/matière solide pour toutes les formulations, montrant un lien fonctionnel entre la quantité de poudre et la structure finale.

⁴⁶ Données par formulation en annexe III, p. 516.

b. Description du comportement rhéologique

Formulations de plâtre seul

Les courbes d'écoulement, mettant en relation les contraintes et les taux de cisaillement, permettent d'observer le type de comportement des mélanges eau-plâtre. L'allure non linéaire des courbes s'apparente au comportement rhéofluidifiant, avec un seuil $\tau_0 \neq 0$ (Fig. 27 à 29). Pour les trois plâtres étudiés, plus le rapport massique est concentré en plâtre, plus la fraction volumique solide augmente, ce qui accroît la quantité d'énergie pour cisailer le fluide, et, par conséquent, les contraintes de cisaillement sont plus élevées.

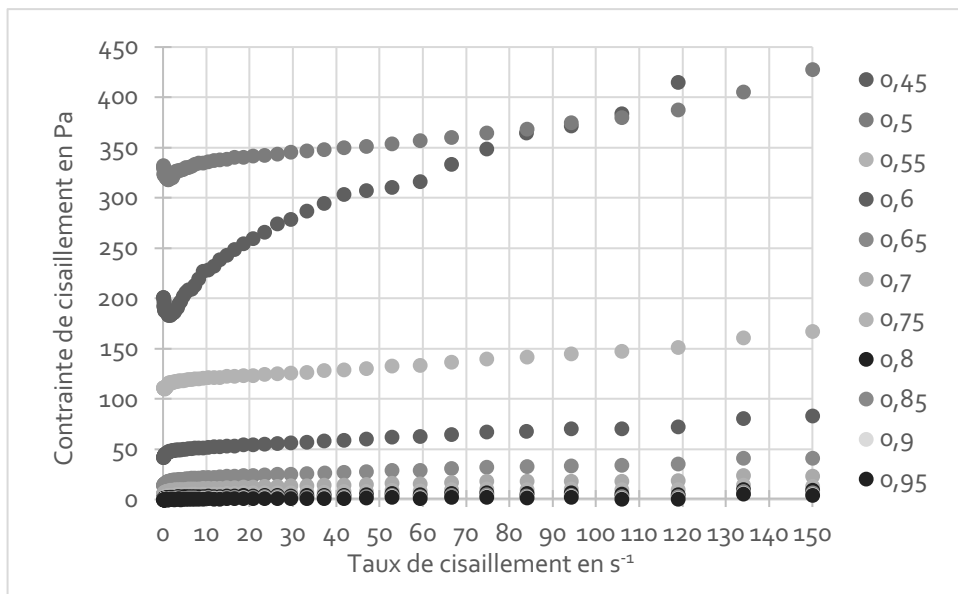


Figure 27 : courbes d'écoulement du plâtre β Molda® 3 Normal, à différents rapports massiques E/P.

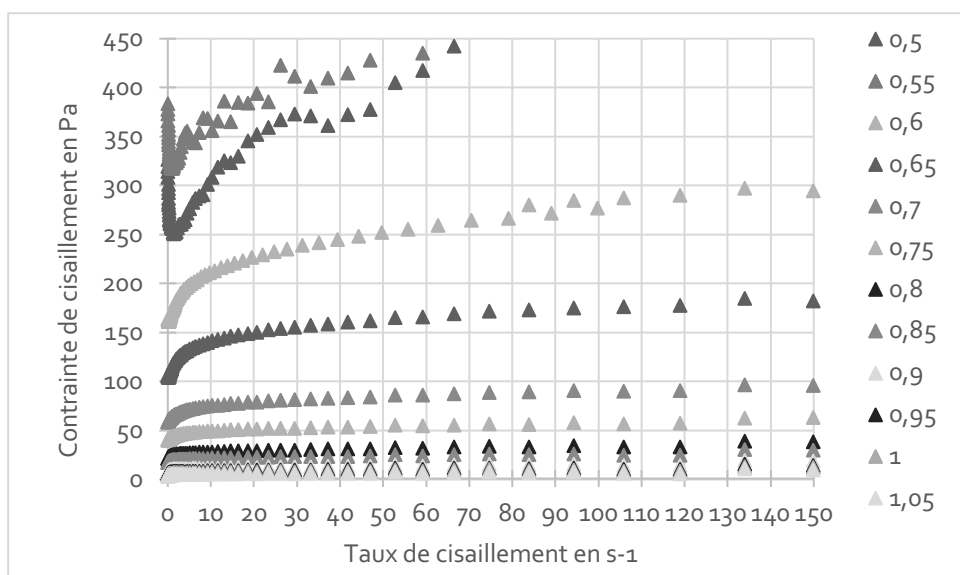


Figure 28 : courbes d'écoulement de plâtre β EXTHA®, à différents rapports massiques E/P.

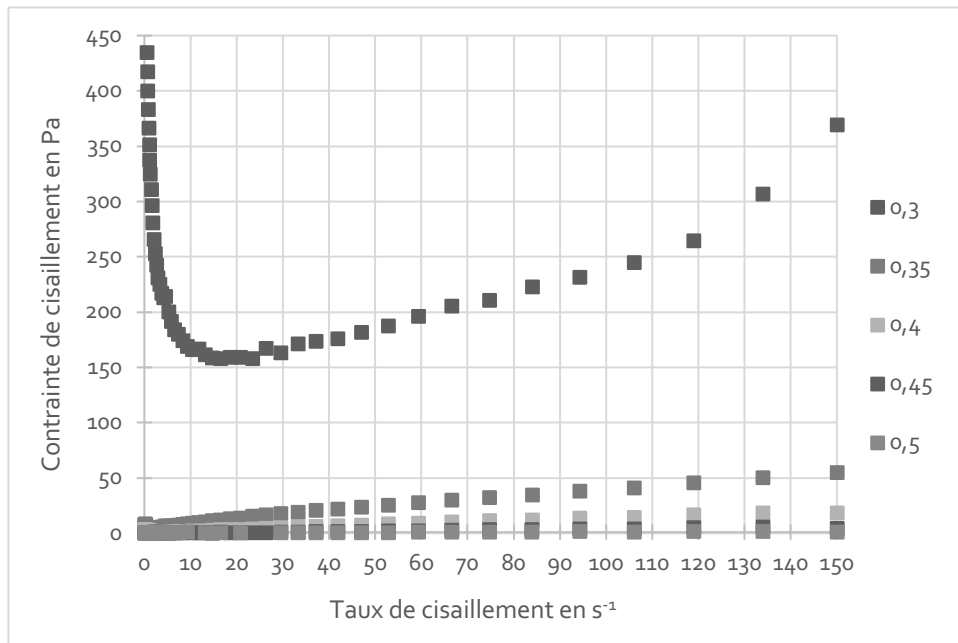


Figure 29 : courbes d'écoulement du plâtre α Knauf®, à différents rapports massiques E/P.

Les formulations peuvent donc être rangées en fonction des textures pâteuses à liquides, qui correspondent aux contraintes les plus hautes et les plus basses. La répartition est étendue et montre bien les variétés de textures possibles. Les plâtres β aux différents rapports massiques E/P offrent plusieurs gammes de textures, avec des groupes compris entre 0 et 50 Pa ; 50 et 100 Pa ; 100 et 150 Pa ; 150 et 300 Pa ; puis au-delà de 300 Pa avec des allures irrégulières. Contrairement au plâtre α , dont la texture pâteuse montre une courbe irrégulière à partir de 150 Pa, alors que les quatre autres textures sont dans les mêmes ordres de grandeur, entre 0 et 50 Pa.

Les courbes d'écoulement des formulations les plus concentrées en poudre sont irrégulières. Ce phénomène peut être lié aux effets de cisaillement lors des essais en plan-plan, à l'interface de la géométrie de mesure, et non pas dans la matière même. De même, le mélange à E/P = 0,3 du plâtre Knauf® présente une allure de courbe de comportement rhéoépaississant qui n'est probablement pas représentative de la nature du fluide mais plutôt liée à un problème de mesure. De plus, une élévation des valeurs de contraintes peut être notée à bas taux de cisaillement pour les mélanges les plus concentrés, qui se traduit par un mécanisme de structuration et un probable début de prise, non abordés dans ces travaux. Enfin, certaines formulations ont des courbes à contraintes très basses et qui semblent sans seuil apparent. Ceci est peut-être lié à la texture très liquide, avec un comportement similaire à celui du fluide porteur, et donc de l'eau.

Les gammes de textures identifiées sont reliées aux aspects pratiques, adaptées à la mise en œuvre d'un comblement telles que : des textures pâteuses adaptées pour le modelage (Fig. 30 a, Fig. 31 a, Fig. 32 a), des textures liquides pour la coulée (Fig. 30 c, Fig. 31 c, Fig. 32 c et d), et des textures intermédiaires pour les besoins spécifiques de moyenne tenue à la spatule ou de coulée épaisse (Fig. 30 b ; Fig. 31 b, Fig. 32 b).

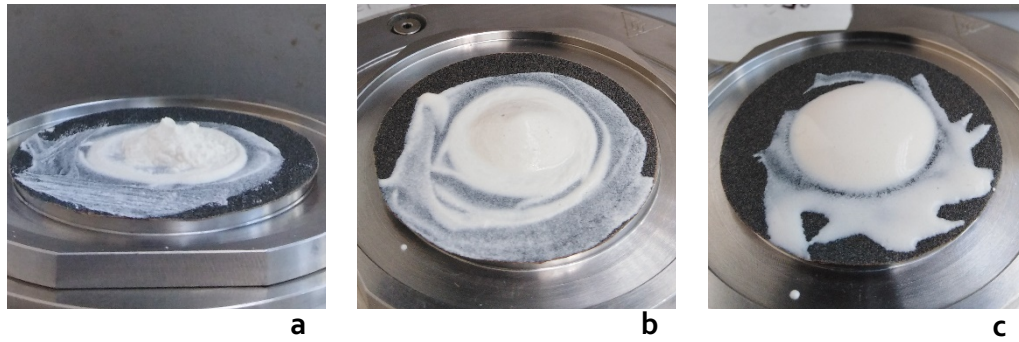


Figure 30 : formulations de plâtre β Molda[®] 3 Normal, à E/P = 0,5 (a) ; 0,6 (b) ; à 0,95 (c) ; après tests en géométrie plan-plan, montrant les différences de textures pâteuses à liquides.

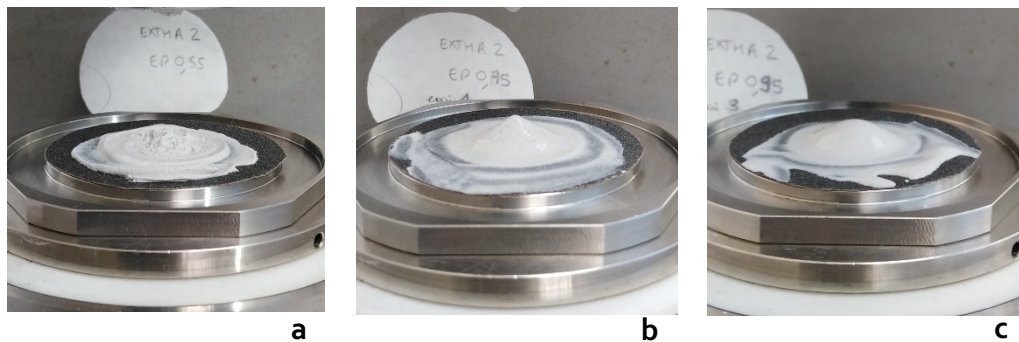


Figure 31 : formulations de plâtre β EXTHA[®], à E/P = 0,55 (a) ; 0,75 (b) ; à 0,95 (c) ; après tests en géométrie plan-plan, montrant les différences de textures pâteuses à liquides.

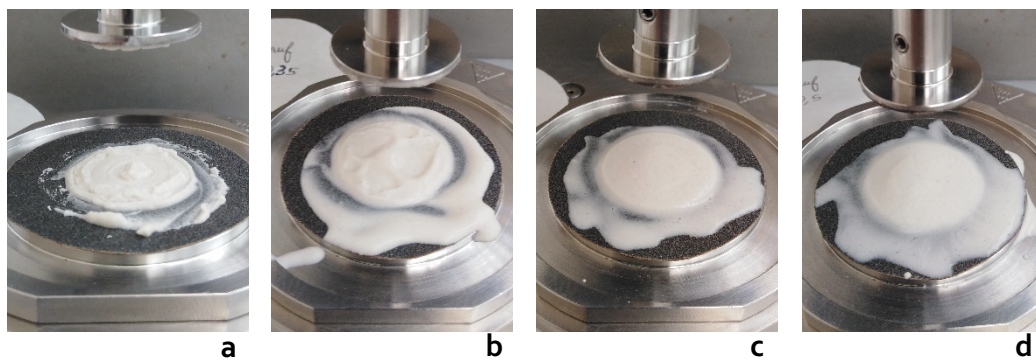


Figure 32 : formulations de plâtre α Knauf[®], à E/P = 0,3 (a) ; 0,35 (b) ; à 0,45 (c) ; et 0,5 (d) ; après tests en géométrie plan-plan, montrant les différences de textures pâteuses à liquides.

Formulations additionnées et alternatives

Les courbes d'écoulement des mélanges de plâtre additionné de carbonate de calcium et de dioxyde de titane présentent des comportements de type rhéofluidifiant, comme pour le plâtre seul (Fig. 33). Là encore, les courbes suivent une tendance d'élévation quand les fractions volumiques solides augmentent. Les mélanges les plus concentrés sont les plus pâteux et présentent donc des contraintes de cisaillement les plus élevées. Les mélanges peu chargés en additifs ont des contraintes relativement basses alors que l'augmentation du ratio d'additif fait augmenter considérablement les contraintes apparentes. L'addition de carbonate de calcium semblerait donc avoir un rôle texturant. De plus, les courbes d'écoulement sont plus variées avec les différents mélanges à E/P = 0,7 ; 0,9 et 1,1 et divers ratios de carbonate de calcium que les différents E/P du plâtre seul dont les gammes étaient regroupées en trois groupes (Fig. 27). L'addition de dioxyde de titane en faible pourcentage ne semble pas modifier la texture.

En comparant les courbes d'écoulement avec celles du plâtre seul (Fig. 27), la présence d'additifs semble abaisser les valeurs, en accord avec les ressentis de texture lors de la préparation. Par exemple, les mélanges de plâtre Molda® 3 Normal à E/P = 0,5 à 0,55 ($\Phi \approx 0,400$ à $0,430$) étaient très denses, pâteux, et presque « secs », alors que le mélange adjuvanté à E/P = 1,5 avec un ratio de 1-2 de carbonate de calcium à 2 % de dioxyde de titane ($\Phi \approx 0,430$) soit pour une fraction volumique solide et un rapport massique équivalents, avait une texture épaisse mais lisse, crémeuse, et souple.

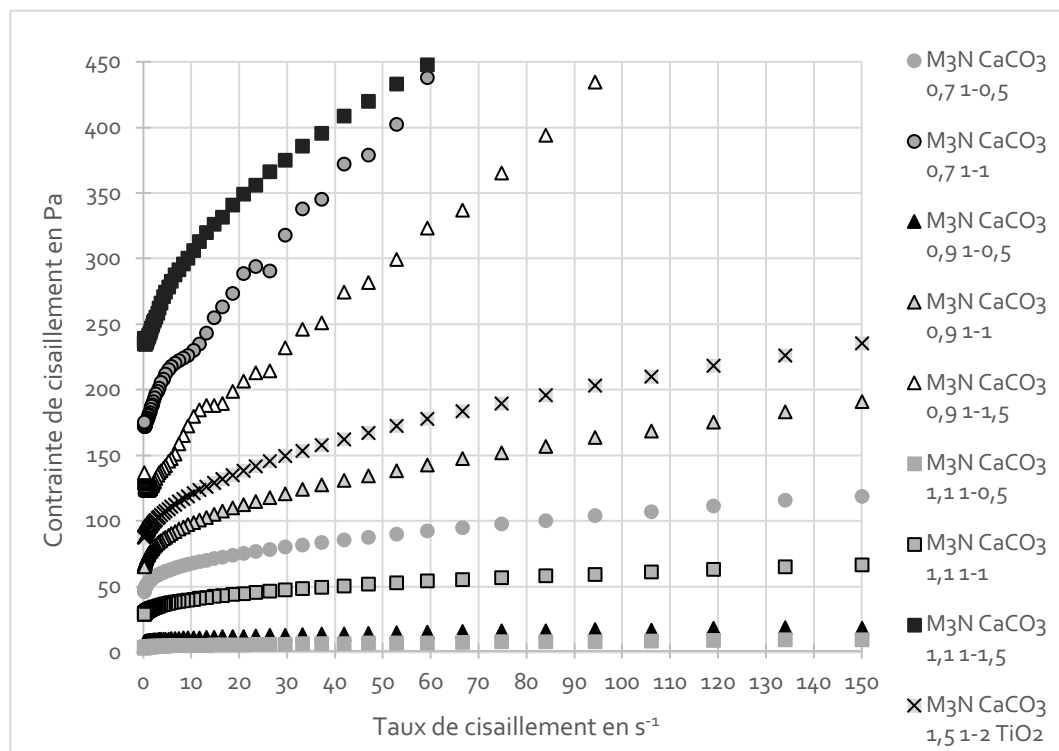


Figure 33 : courbes d'écoulement du plâtre β Molda® 3 Normal avec les additifs de carbonate de calcium et de dioxyde de titane, à différents rapports massiques et ratios d'additifs.

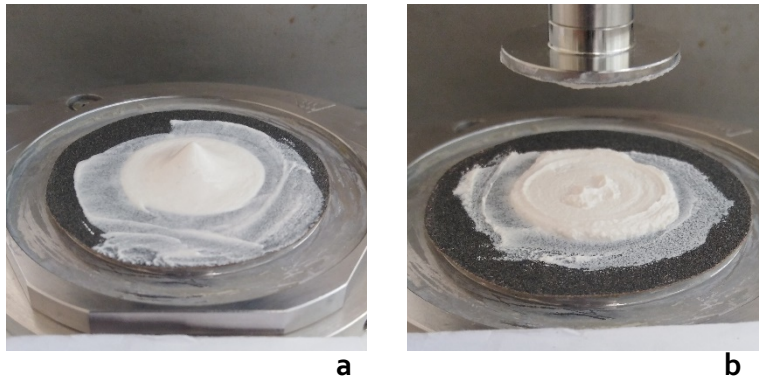


Figure 34 : formulations de Molda® 3 Normal à E/P = 0,7 à ratio 1-0,5 (a) et 1-1 (b).

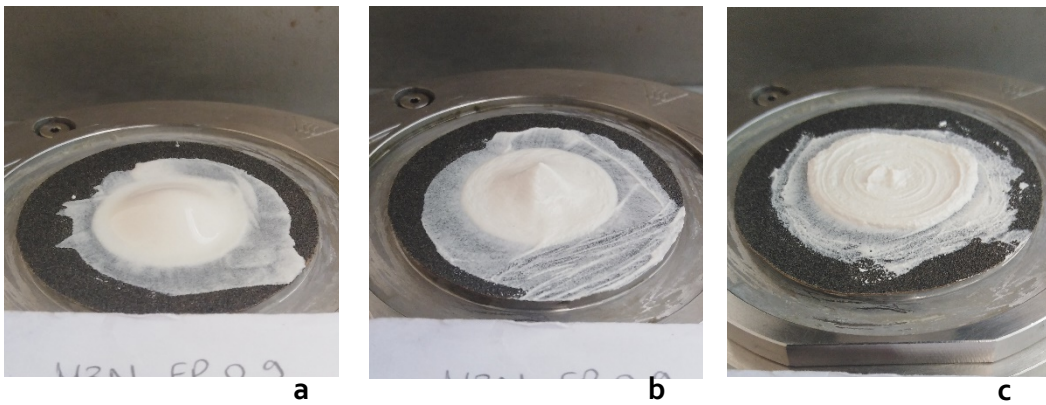


Figure 35 : formulations de Molda® 3 Normal à E/P = 0,9 à ratio 1-0,5 (a) ; 1-1 (b) ; 1-1,5 (c).

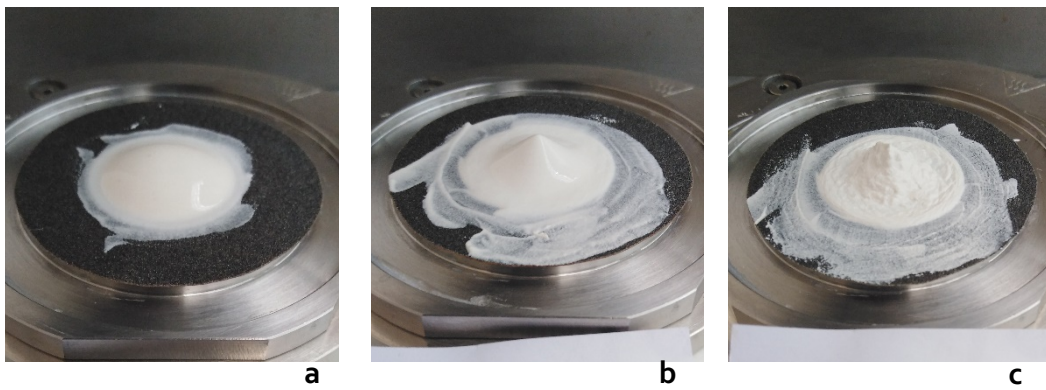


Figure 36 : formulations de Molda® 3 Normal à E/P = 1,1 à ratio 1-0,5 (a) ; 1-1 (b) ; 1-1,5 (c).

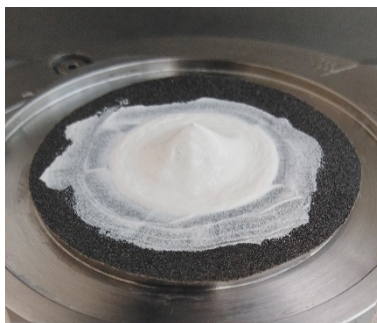


Figure 37 : formulations de Molda® 3 Normal à E/P 1,5 à ratio 1-2 + 2% de dioxyde de titane.

Les formulations de craie de Bologne et de colle animale, préparées comme des apprêts assez liquides (Fig. 38), montrent un profil rhéoépaississant lorsque le test est mené dans les conditions ambiantes avec le plateau du rhéomètre réglé à 20°C. Lorsque le plateau est réglé à 40°C, la même formulation présente un comportement rhéofluidifiant (Fig. 39). Cette différence de comportement est uniquement liée à la température. Bien que la colle soit liquéfiée par chauffe à 40-45°C au moment de la préparation, dans le premier cas il se produit très certainement un effet de structuration et de gélification au moment du dépôt sur le plateau à 20°C. Ceci montre clairement le passage d'un état « solide » à un état « liquide » par modification de la température pour des matériaux de ce type⁴⁷.

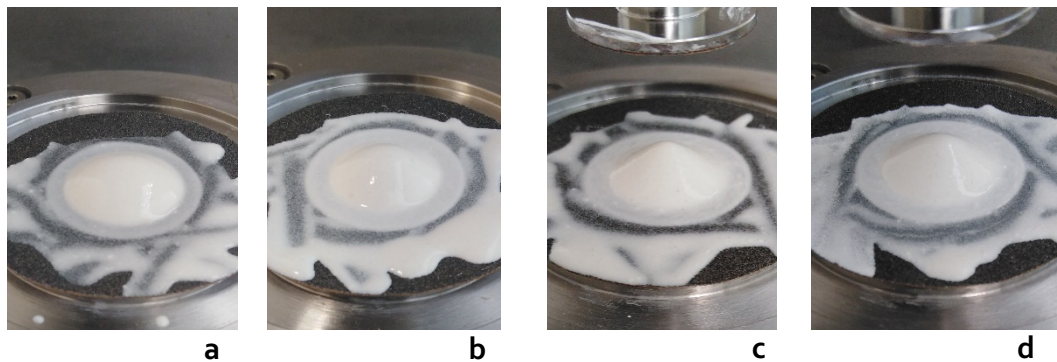


Figure 38 : formulations de craie de Bologne et de colle animale de type « apprêt » liquide, application sur plateau à 20°C (a et b) et à 40°C (c et d), avec dioxyde de titane (b et d).

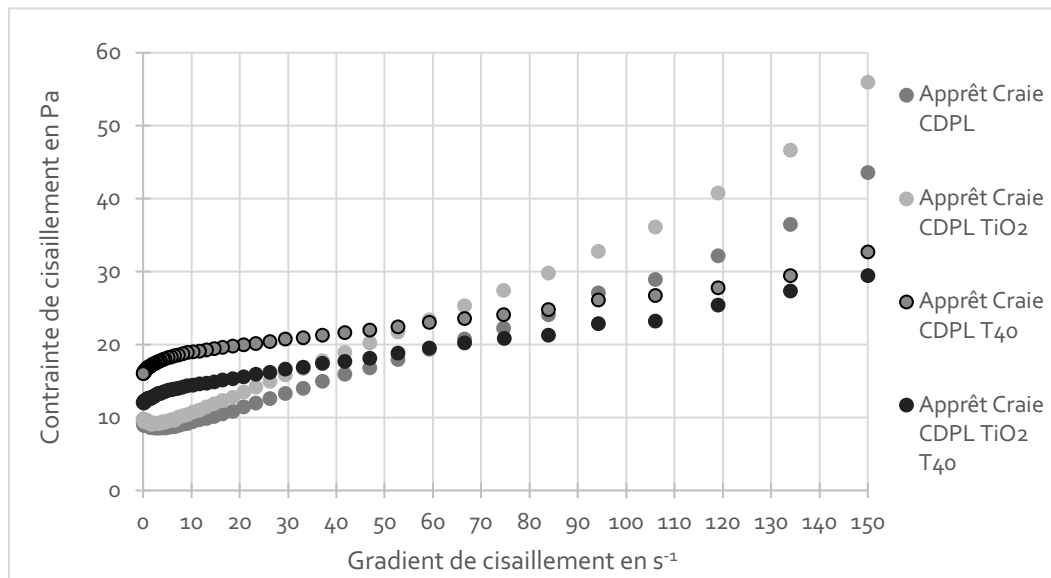


Figure 39 : courbes d'écoulement des mélanges de craie de Bologne et de colle animale, avec et sans dioxyde de titane, application à 20°C et à 40°C (noté T₄₀).

⁴⁷ La colle de peau est souvent décrite comme « thixotrope » dans les fiches techniques des produits de conservation-restauration. Toutefois, la qualité thixotropique, telle que définie dans le domaine de la rhéologie, ne prend pas en considération le paramètre de la température. Pour rappel, un matériau thixotrope est défini comme tel lorsqu'il se déstructure sous l'action du mélange, et se restructure au repos lorsqu'aucun cisaillement ni aucun mélange ne lui est appliqué.

Le Modostuc®, matériau épais et très pâteux, présente des valeurs très élevées (Fig. 40). Le comportement s'apparente au type rhéofluidifiant. L'allure irrégulière de la courbe, ainsi que l'aspect de l'échantillon à la fin du test, laissent penser que le cisaillement s'est produit à l'interface du matériau et de la géométrie, et non pas dans le matériau seul (Fig. 41). La difficulté de mesurer ce produit ne permet pas de poursuivre sa caractérisation.

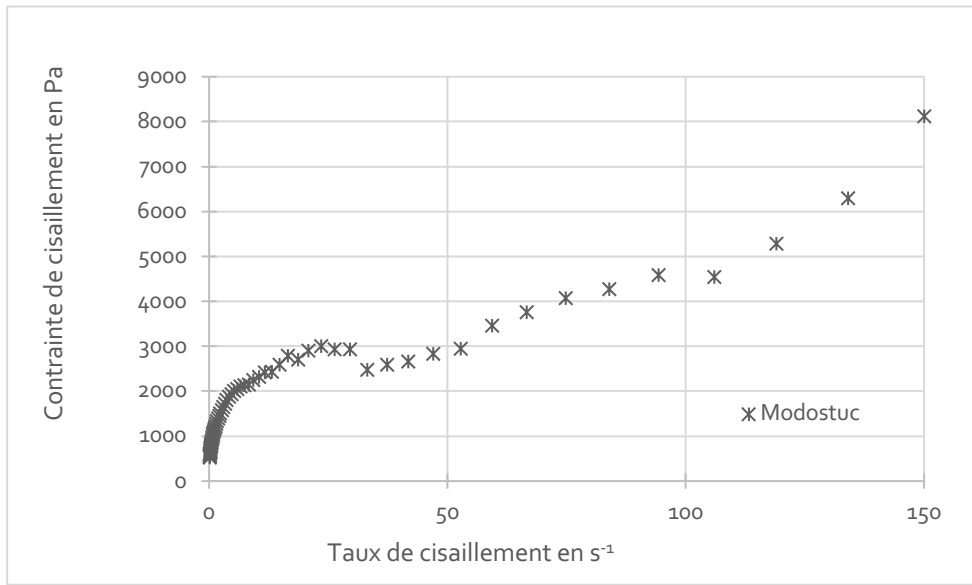


Figure 40 : courbe d'écoulement du Modostuc®, présentant des valeurs très élevées et une allure irrégulière.

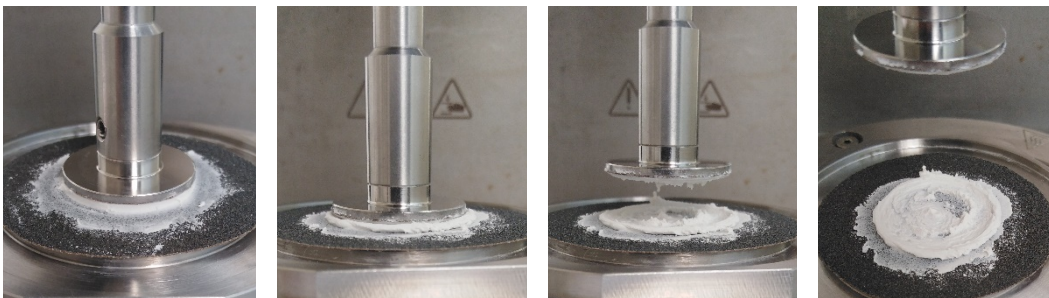


Figure 41 : essai en plan-plan avec le Modostuc® ; avant le test le matériau est raclé à l'aplomb de la géométrie supérieure ; après le test, le matériau s'est étalé et le cisaillement semble s'être produit à l'interface, comme le suggère l'aspect de surface après le retrait de la géométrie.

c. Structuration des mélanges solide-liquide, sous cisaillement simple

Indice n libres

Une grande majorité des valeurs de n^{48} sont inférieures ou égales à 1 (Fig. 42). Un tel constat est cohérent pour ces suspensions minérales, pour lesquelles un mécanisme de défloculation d'amas est généralement admis dans la littérature, c'est-à-dire une dispersion homogène des particules dans le fluide porteur. Dans ce cas, le comportement rhéoépaississant apparent pour les formulations les plus concentrées serait expliqué par un biais de mesure induit par la localisation du cisaillement entre l'outil et le matériau, et non pas dans la matière même. Une tendance générale suggère qu'une augmentation du rapport massique E/P ou E/Ms (équivalent à une baisse de concentration en poudre) est lié à la baisse de l'indice de structuration n . Ceci est plus particulièrement marqué pour le plâtre β Molda® 3 Normal, mais moins évident pour les deux autres plâtres testés. La représentation des valeurs de n en fonction de la fraction volumique solide Φ (Fig. 42), malgré la répétition des essais, ne permet pas de mettre en évidence une tendance unique pour les différents plâtres, et surtout, d'y associer une relation fonctionnelle. Ce constat est cohérent avec les caractéristiques de cette typologie de matériaux, de type suspension minérale, pour laquelle le lien $n = f(\Phi)$ n'existe pas réellement. Les additifs de CaCO_3 et de TiO_2 ne semblent pas modifier la structure de façon fonctionnelle. Le caractère rhéofluidifiant des formulations est confirmé.

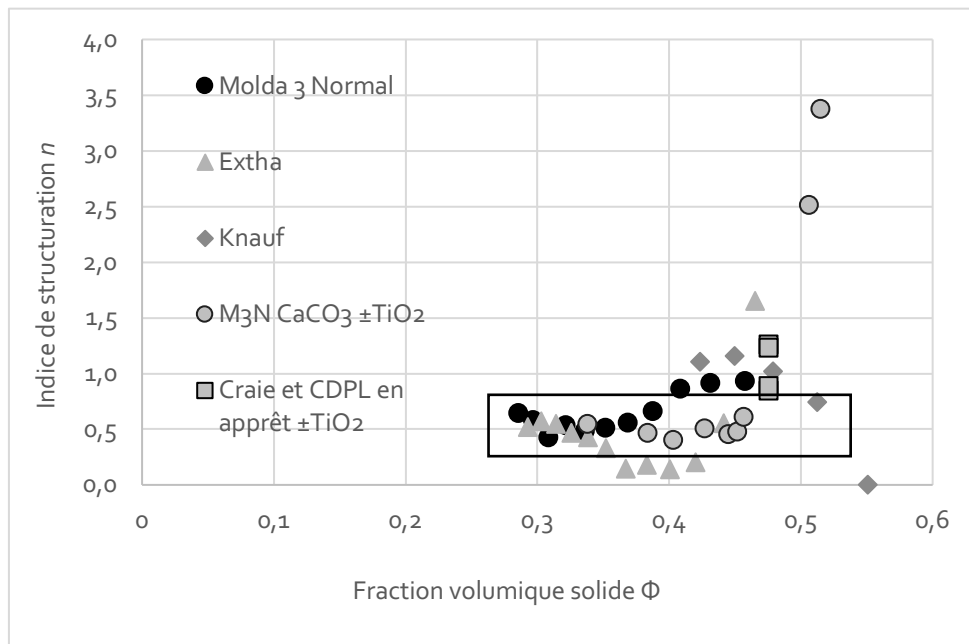


Figure 42 : valeurs de l'indice n en fonction de la fraction volumique, après ajustement selon le modèle d'Herschel-Bulkley [6], avec les valeurs moyennes encadrées.

⁴⁸ Données par formulations en annexe III, p. 517.

Recherche d'une valeur commune et vérification

Les résultats de l'analyse de répartition pour les trois plâtres confondus permettent de distinguer trois groupes de valeurs, identifiés par les discontinuités de la fonction de distribution (Fig. 43).

Le premier groupe comprend des indices n de 0 à 0,2 et représente environ 12% des mélanges. Une valeur telle que $n = 0,07$ a été constatée et est considérée comme aberrante dans ce contexte d'étude. Les valeurs de ce groupe peu représentatif ont été rejetées.

Le deuxième groupe dont $n = 0,2$ à 1 est constitué d'environ 75% des mélanges. Il est constitué de valeurs calculées à rapport massique E/P = 0,5 à 1 qui correspondent aux mélanges usuels dans la pratique, avec des textures adaptées pour le moulage et le modelage. La population de ce groupe est la plus représentative des tendances de la fonction de distribution.

Le troisième groupe a des valeurs comprises entre 1 et 1,2 et représente environ 13% des formulations. Les mélanges correspondent aux rapports massiques très concentrés pour le Molda® et le EXTHA®, soit E/P = 0,45 à 0,5 ou 0,55 ; ou très liquides dans le cas du Knauf® avec E/P = 0,4 à 0,5. Les valeurs de n indiqueraient un comportement rhéoépaississant, qui n'est pas cohérent avec la nature des formulations telles que des suspensions minérales.

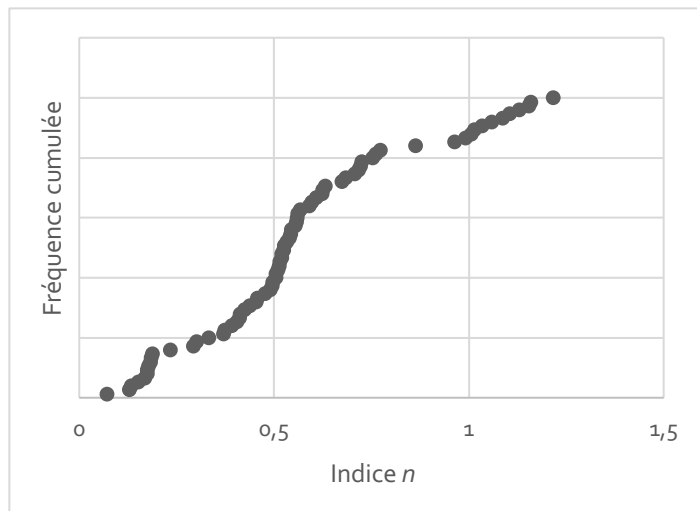


Figure 43 : fonction de distribution cumulée de l'indice n des plâtres Molda® 3 Normal, EXTHA®, et Knauf®.

L'allure de la fonction de distribution des valeurs d'indice n du groupe 2 suggère une répartition presque normale (Fig. 43). Ainsi, en utilisant une loi de probabilité de Laplace-Gauss pour représenter la variable considérée aléatoire des valeurs de n , les données du deuxième groupe peuvent être sélectionnées de façon à identifier une valeur unique et commune, adaptable à la majorité des formulations (Fig. 44). Elle est caractérisée par deux paramètres, la moyenne et la racine carrée de la variance, soit respectivement $\bar{n} = 0,55$ et $\sigma^2 = 0,024$, calculées selon l'équation [19] :

$$f(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}\right) \quad [19]$$

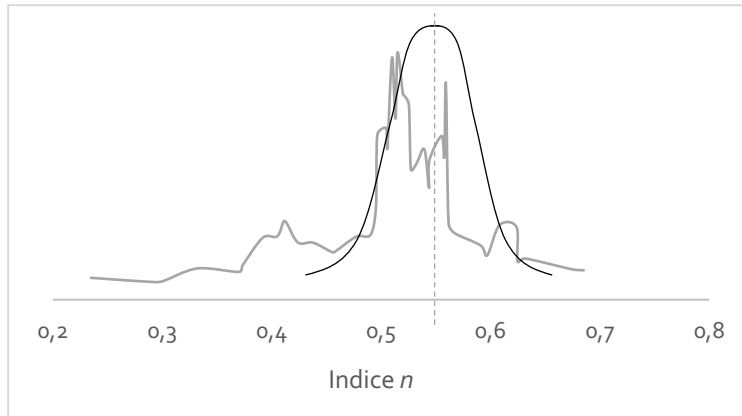


Figure 44 :
distribution des valeurs d'indice n avec une tendance générale de $n \approx 0,5$ à $0,55$ et représentation de la valeur moyenne $\bar{n} = 0,55$ selon la loi de Laplace-Gauss.

Tel qu'indiqué précédemment, il n'y a pas de valeur d'indice établie pour le plâtre. L'étude de Sinha Ray⁴⁹ fournit les valeurs de 0,35 à 0,55 pour des mélanges de plâtres adjuvantés. Cette gamme s'accorde avec l'indice $n = 0,5$ admis pour les fluides à seuil simple, comme valeur moyenne et générale adaptable à tous les matériaux de ce type d'après Ovarlez⁵⁰. La valeur d'indice $n = 0,5$ a donc été retenue pour comparaison avec les modélisations avec l'indice n libre, sans valeur imposée. Avec une telle valeur, le mécanisme de structuration est représentatif d'un comportement majoritairement rhéofluidifiant. Les valeurs de coefficient R^2 (Fig. 45 a et b) sont plutôt fiables pour les plâtres Molda® 3 Normal, EXTHA® ainsi que pour les mélanges adjuvantés. Les valeurs les plus fiables du plâtre Knauf® sont lorsque n est libre et $n = 1$, mais la valeur de $n = 0,5$ permet de comparer l'ensemble des résultats avec le même paramètre⁵¹.

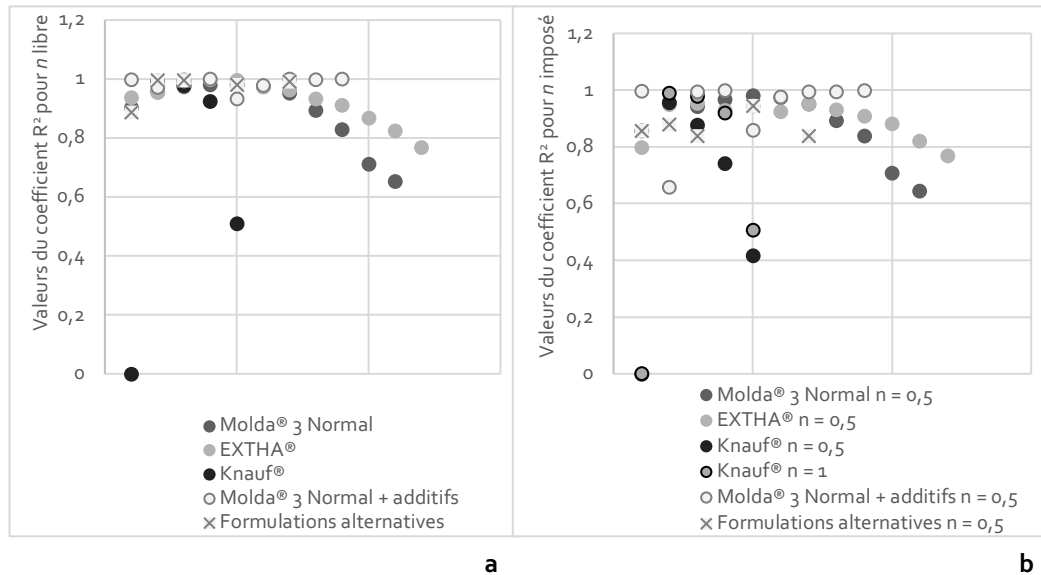


Figure 45 : représentation des valeurs de coefficient R^2 pour les indices de structuration n libres (a) et imposés à $n = 0,5$ ou 1 (b) ; montrant des valeurs ≈ 1 dans les différentes conditions, considérées comme acceptables.

⁴⁹ Sinha Ray, « Shear and elongational rheology of gypsum slurries », *op. cit.*, p.4.

⁵⁰ OVARLEZ Guillaume, *et al.*, « Flows of suspensions of particles in yield stress fluids », *Journal of Rheology*, 59 / 6 (2015), p. 1449-1486.

⁵¹ Données par formulations en annexe III, p. 518.

2. Plâtre seul

a. Seuil limite de cisaillement

Les seuils limites de cisaillement calculés en dynamique et en statique⁵², pour le plâtre EXTHA®, sont représentés en fonction de la fraction volumique solide Φ et du rapport massique E/P (Fig. 46). Ces résultats montrent une très bonne concordance des valeurs en protocole dynamique et quasi-statique. L'accroissement de la fraction volumique solide, équivalent à la décroissance du rapport massique, induit une tendance divergente qui confirme l'effet de blocage lorsque la valeur maximale Φ_m est atteinte. En considération de l'ensemble des données du plan d'expérience, une fraction volumique critique séparant un régime visqueux d'un régime viscoplastique semble identifiable. Ce comportement suggère donc une interprétation du mécanisme de structuration par le modèle Yodel [12].

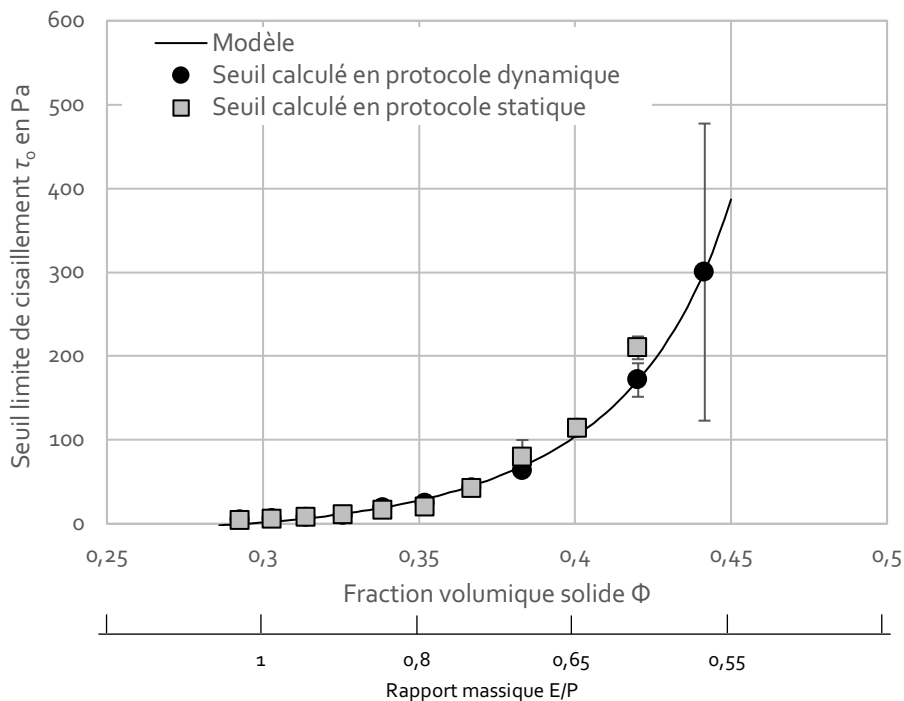


Figure 46 : représentation des valeurs de contraintes seuil pour le plâtre EXTHA®, après ajustement au modèle d'Herschel-Bulkley [6] et comparé au modèle Yodel [12], pour les essais en plan-plan et en Vane ; un lien avec la structure de la suspension, par la notion de fraction volumique solide ou de rapport massique E/P, est clairement identifiable indiquant une augmentation du seuil quand la concentration en plâtre est accrue.

Le lien avec la fraction volumique solide, et donc la structure de la suspension, peut être approfondi par l'étude des paramètres modélisés [12]. Les valeurs de fraction volumique solide de percolation et maximale, notées Φ_p et Φ_m , sont déterminées telles que :

$$\Phi_p = 0,294 \text{ et } \Phi_m = 0,5 ; \text{ avec le coefficient } m_i \text{ tel que } m \frac{A_0 a^*}{d^2 H^2} = 306,74 \text{ Pa}$$

⁵² Données par formulations en annexe III, p. 519.

Ces valeurs limites modélisées⁵³ semblent cohérentes avec les gammes de valeurs mesurées et calculées, obtenues selon les deux protocoles de caractérisation (Fig. 47). Les valeurs sous le seuil de percolation à $\Phi_p < 0,294$ semblent indépendantes de l'effet de seuil de cisaillement. Le comportement du fluide peut être assimilé à un fluide purement visqueux. À $\Phi_m > 0,5$ la concentration en poudre de plâtre est trop forte et le cisaillement n'est plus possible. Cette valeur modélisée semble inclure une gamme de formulations plus large que celle estimée lors de la réalisation des essais, puisque les rapports massiques très concentrés, à E/P = 0,5 et 0,45 semblaient déjà trop concentrés pour permettre une mesure fiable. Cette représentation montre que toutes les formulations testées ont un comportement viscoplastique, sauf quelques suspensions, moins concentrées, dont le comportement s'apparente à un fluide visqueux.

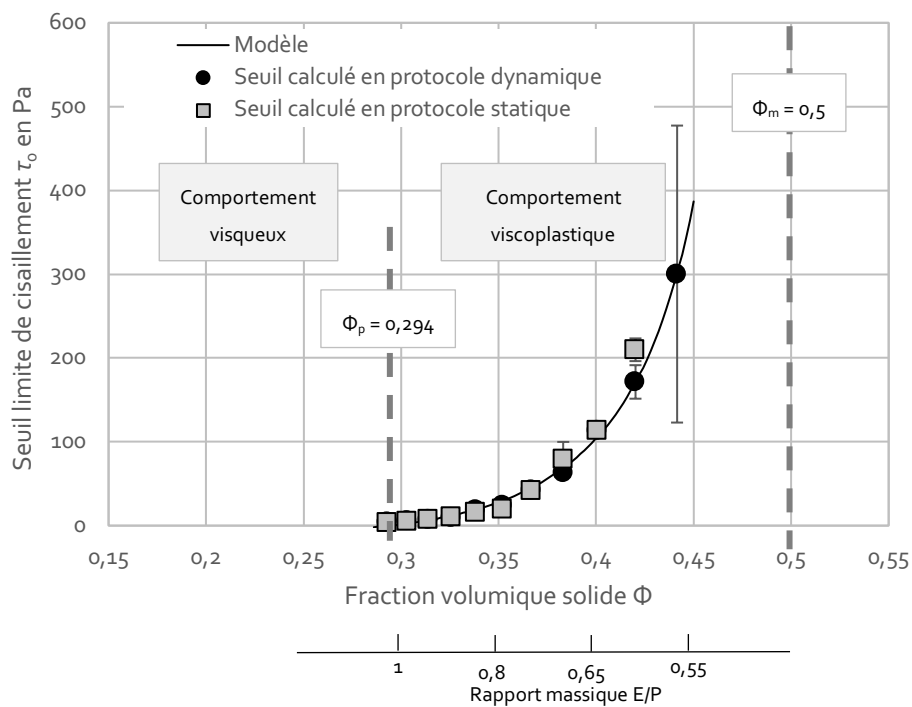


Figure 47 : représentation des valeurs de contraintes seuil pour le plâtre EXTHA[®], avec ajustement des valeurs modélisées [6] au modèle Yodel [12] de façon à identifier les comportements structurels des suspensions par l'identification des valeurs de fraction volumique solide limite, de percolation et maximale.

⁵³ Données par formulations en annexe III, p. 524.

b. Consistance

Après la validation d'un indice de structuration n unique pour un ensemble important de mélanges eau-plâtre aux textures liquides à pâteuses, la notion de viscosité peut être approchée par la consistance K également évaluée lors de la modélisation [6] à partir des données recueillies lors des essais dynamiques. L'évolution des valeurs de K en fonction de Φ révèle un lien fonctionnel (Fig. 48). La tendance montre une divergence de la consistance K quand les fractions volumiques solides Φ sont élevées, confirmant l'effet de blocage lié à Φ_m . Mais lorsque les fractions volumiques solides sont basses, les valeurs de K tendent vers une asymptote horizontale. Ce comportement est conforme à un schéma de structuration décrit, par équivalence, par le modèle de Krieger-Dougherty [11]. Les paramètres du modèle [11] sont déterminés tels que : $\mu_0 = 0,018 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0,5}$; $\Phi_m = 0,5$; et $\eta = 7,07$. Quand la valeur de Φ diminue, la consistance K tend vers une valeur qui approche la valeur du fluide porteur des suspensions qui est l'eau. Ces constats correspondent aux principes établis par la littérature. Le caractère viscoplastique des suspensions de plâtre, en général, est bien illustré par ce type d'essai et de modélisation⁵⁴.

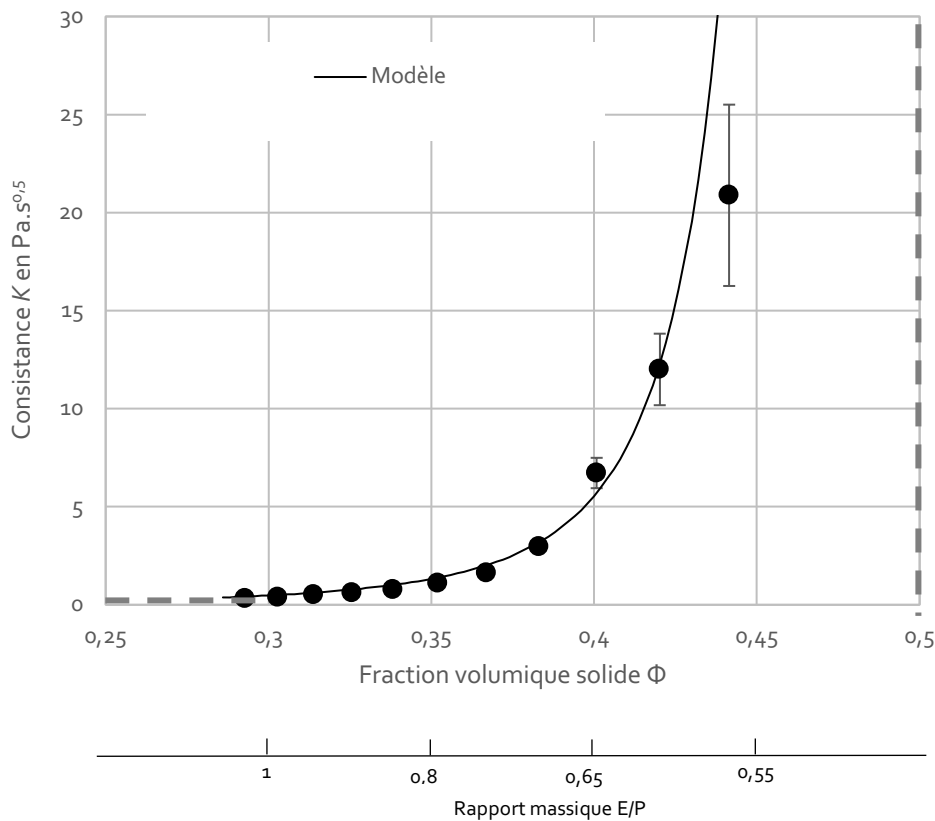


Figure 48 : représentation des valeurs de consistance K pour le plâtre EXTHA®, avec ajustement des valeurs modélisées [6] au modèle de Krieger-Dougherty [11], de façon à identifier le caractère visqueux des suspensions de plâtre, qui présentent généralement un comportement viscoplastique pour des E/P usuels, et une tendance à l'élévation de la viscosité quand la fraction volumique solide augmente, jusqu'à une valeur $\Phi_m = 0,5$.

⁵⁴ Données et courbes d'écoulement par formulations en annexe III, p. 520 à 523.

c. Variation selon le choix de l'hémihydrate β

Seuils limites de cisaillement

En comparant les données calculées et modélisées pour les trois plâtres testés (Fig. 49), il apparaît que les comportements sont similaires, avec une même tendance d'élévation des seuils limites de cisaillement lorsque la fraction volumique solide augmente. Le décalage des courbes du Molda® 3 Normal et du EXTHA® indique une faible différence d'hydratation. Le plâtre Knauf® suit la même tendance que les plâtres β , avec un décalage des valeurs, lié à la nature de l'hémihydrate et d'une différence de demande en eau. En procédant à un glissement des courbes, une superposition des valeurs confirme ce constat.

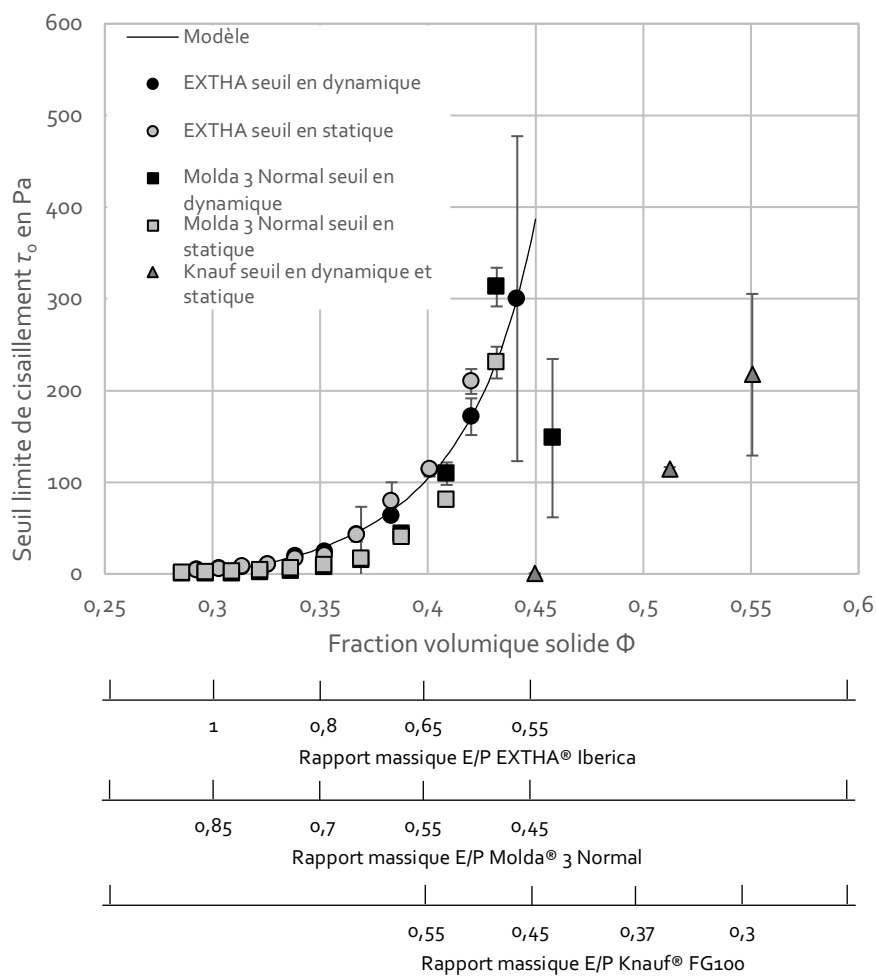


Figure 49 : représentation des valeurs de contraintes seuil pour les plâtres EXTHA®, Molda® 3 Normal, et Knauf® FG 100, ajustées aux modèles [6 et 12] ; montrant le lien avec la fraction volumique solide et des comportements similaires, décalés selon les demandes en eau.

La tendance des comportements peut être vérifiée en représentant les données dans un repère semi-logarithmique (Fig. 50). L'unique lien entre le seuil et à la fraction volumique solide, et donc à la structure et concentration de la suspension, est confirmé par la représentation linéaire.

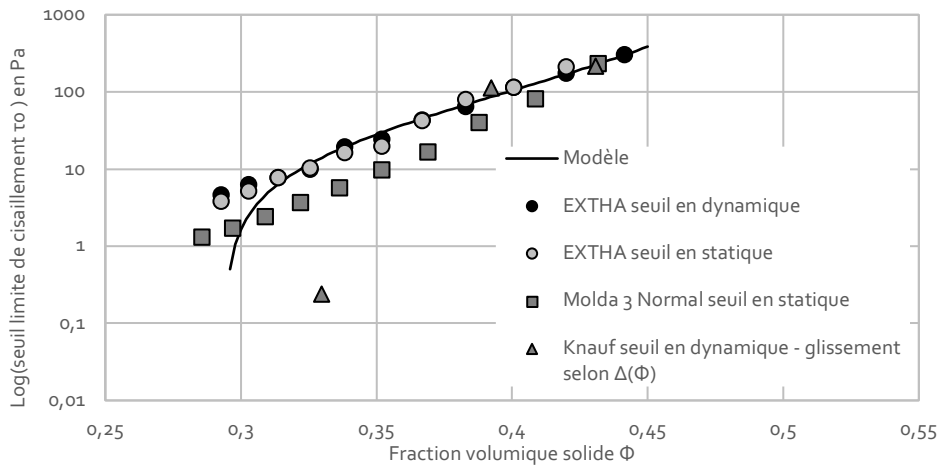


Figure 50 : représentation semi-logarithmique des contraintes seuil des plâtres EXTHA®, Molda® 3 Normal et Knauf®, ajustées aux modèles [6 et 12] ; montrant une tendance linéaire unique et confirmant l'existence d'un seul type de comportement.

Consistances

Les comparaisons des représentations des valeurs de consistance K suivent la tendance précédente, pour les contraintes seuil (Fig. 51). Ainsi, les deux plâtres β s'inscrivent dans des gammes de valeurs équivalentes et suivent la même allure ; le plâtre α présente également un lien entre la consistance, ou la viscosité, et les fractions volumiques solides, avec un décalage des valeurs de fraction volumique solide.

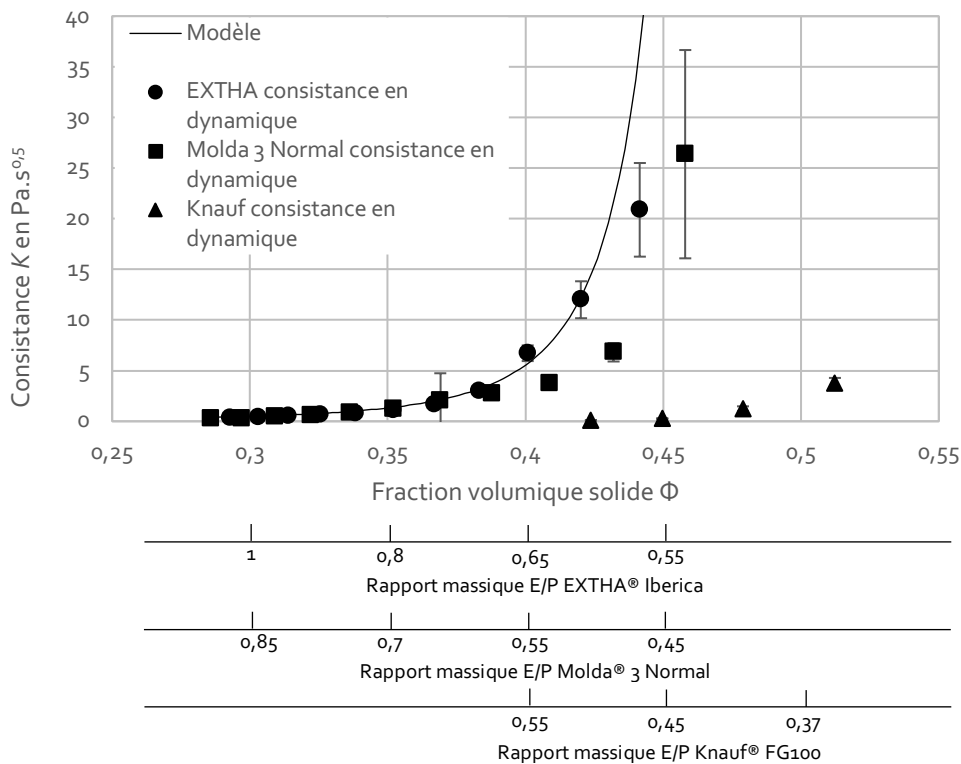


Figure 51 : valeurs de consistance des plâtres EXTHA®, Molda® 3 Normal et Knauf®, ajustées aux modèles [6 et 11] ; illustrant le lien avec la fraction volumique solide et des comportements similaires, décalés selon les demandes en eau.

La représentation semi-logarithmique suit le même constat, avec une tendance relative unique, qui confirme le lien fonctionnel entre la consistance, et par extension la texture de la formulation, et la fraction volumique solide (Fig. 52).

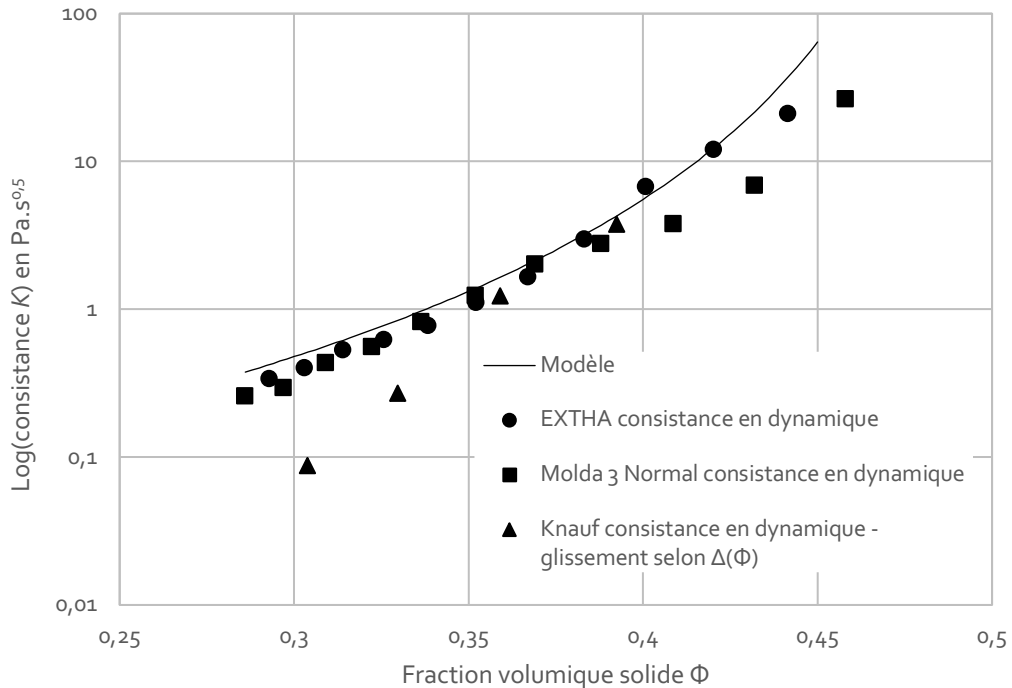


Figure 52 : représentation semi-logarithmique des valeurs de consistance pour les plâtres Molda® 3 Normal, EXTHA et Knauf, ajustées aux modèles [6 et 11] ; montrant une tendance relative unique.

REMARQUES

Les plâtres β Molda® 3 Normal et du EXTHA® ont des valeurs proches, de seuils limites, et de consistances, pour des fractions volumiques équivalentes. Les rapports massiques sont, eux, légèrement décalés. Cette observation est mise en lien avec une différence de demande en eau des deux plâtres, qui est toutefois difficile à mettre en évidence à l'état fluide et en phase dormante. Ce décalage peut également être lié à des différences de tailles de grains et d'interactions intergranulaires. Il faudrait procéder à des séries d'essais en intégrant un paramètre de temps, pour vérifier la différence de cinétique de prise et donc la réactivité et l'hydratation des deux plâtres. Le décalage du plâtre α Knauf® semble lié à la différence de demande en eau ; il est évalué à $\Delta\Phi = 13 \%$.

Selon ces données et ces constats, il semble acceptable d'affirmer la possibilité d'utiliser un plâtre β lambda, présentant les mêmes caractéristiques techniques de composition, pour obtenir des textures spécifiques, sans risquer de modifier considérablement les aspects à l'état fluide.

En ajoutant des additifs aux formulations, les comportements sont étudiés selon les mêmes démarches. Après l'étude des indices de structuration pour l'ensemble des formulations, et l'absence d'un véritable lien fonctionnel $n = f(\Phi)$, une valeur d'indice de structuration représentative telle que $n = 0,5$ est donc retenue, avec les plâtres Molda® 3 Normal ou EXTHA® comme modèles.

3. Effet du carbonate de calcium

a. Seuil limite de cisaillement

Le comportement de la matrice liante eau-plâtre étant caractérisé et la méthodologie employée permettant d'identifier les effets des composants, il est possible d'analyser l'effet des additifs et leur impact sur les mécanismes de structuration. Les rapports massiques ($E/P = 0,7 ; 0,9 ; 1,1$) et les ratios de plâtre-carbonate de calcium ($1-0 ; 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5$) ont été retenus pour correspondre à des suspensions ouvrables en pratique de comblement en conservation-restauration. Les protocoles de caractérisation des suspensions, déjà présentés, sont repris à l'identique pour établir la structuration induite par l'additif par rapport à celle induite par le plâtre seul. L'évolution du seuil de cisaillement est considérée en fonction de la fraction volumique solide totale et comparée au modèle établi pour les mélanges eau-plâtre (Fig. 53). Pour rappel, le comportement de la suspension à $E/P = 1,1$ sans additif est seulement visqueux.

Dans ce plan de représentation (Fig. 53), l'effet de l'ajout de CaCO_3 selon les proportions retenues est bien identifiable. Dans tous les cas, lorsque le seuil de cisaillement existe, l'ajout de carbonate de calcium agit comme un réducteur de la part plastique, à fraction volumique solide fixée.

Pour chaque taux E/P évalué et selon les conditions du plan d'expérience, deux comportements sont distincts en fonction de la quantité d'additif ajoutée. D'une part, lorsque le ratio plâtre-carbonate de calcium est supérieur à $1-0,5$ et lorsque l'eau est en excès avec une suspension eau-plâtre très liquide, l'ajout de CaCO_3 contribue à générer la part plastique faisant apparaître le seuil de cisaillement, qui augmente avec l'apport de l'additif. D'autre part, la diminution de la quantité d'eau dans ce même intervalle suggère que le seuil est maintenu à la valeur établie pour le mélange eau-plâtre, voire abaissé avec la réduction de la quantité d'eau.

Au-delà d'une fraction volumique solide critique, uniquement suggérée ici, l'ajout de CaCO_3 semble donc agir comme le plâtre, la tendance décrite par le modèle Yodel [12] étant transposable. La formulation additionnée présente néanmoins une microstructure et une fraction volumique solide maximale modifiées, par rapport à celles des mélanges simples eau-plâtre. Ceci indique que le comportement de la formulation est dominé par le plâtre mais qu'il est aussi affecté par le carbonate de calcium.

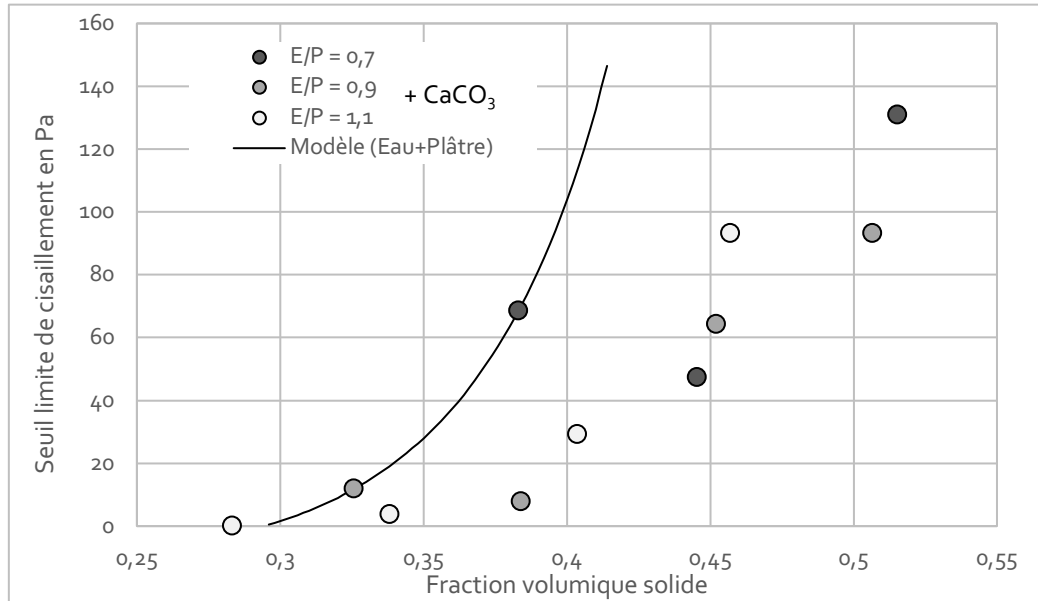


Figure 53 : valeurs de seuil des formulations à rapports massiques E/P = 0,7 ; 0,9 ; 1,1 et à ratio plâtre-carbonate de calcium 1-0 ; 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5 ; montrant un comportement général à deux tendances.

Afin de soustraire le rôle du plâtre dans les formulations additionnées, un principe d'adimensionnement par calculs des valeurs relatives est introduit à partir des données des formulations à rapports massiques E/P 0,7 et 0,9. En l'absence de seuil limite de cisaillement, la troisième formulation à E/P 1,1 a été retirée de cette analyse. La formule d'adimensionnement intègre les paramètres de seuil et de fraction volumique solide établis par le biais des rapports massiques E/P de référence et E/Ms (eau/matière solide, considérant la formulation avec additif), tels que :

$$\tau_o \text{ relative} = \frac{\tau_o \left(\frac{E}{Ms} \right)}{\tau_o \left(\frac{E}{P} \text{ réf} \right)} \quad \text{et} \quad \Phi \text{ relative} = \frac{\Phi}{\Phi_{réf}}$$

La valeur de référence étant celle de la formulation à E/P correspondant, sans CaCO₃.

D'après les résultats obtenus par cet adimensionnement, l'effet de l'ajout de CaCO₃ est bien représenté par une courbe unique (Fig. 54), que d'autres essais complémentaires pourraient étayer. De cette façon, tant que le ratio de carbonate de calcium est faible, les seuils limites de cisaillement sont équivalents, voire inférieurs, à ceux des mélanges sans charge. Mais quand la quantité de carbonate est augmentée, les valeurs de seuils sont croissantes, et dans ces conditions, le modèle Yodel [12] est adapté pour décrire le lien $\tau_o = f(\Phi)$ (Fig. 55). Une valeur de $\Phi_{\max} = 0,67$ est alors calculées selon le modèle [12] pour les formulations de plâtre additionné de carbonate de calcium, présentant donc une valeur de packing plus élevée que celle du plâtre seul, estimée à $\Phi_{\max} = 0,5$.

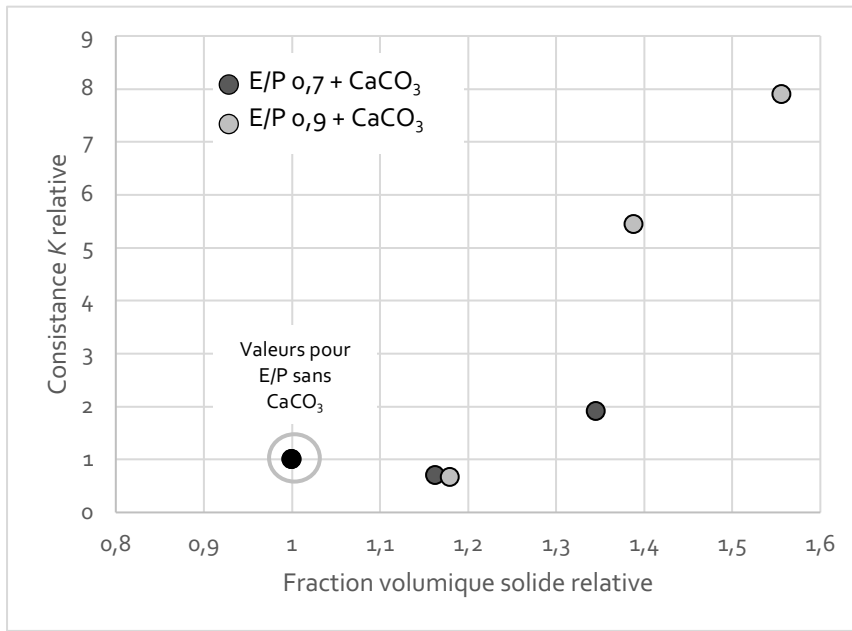


Figure 54 : représentation des valeurs relatives de seuil pour les formulations à E/P = 0,7 et 0,9 additionnées de CaCO₃ après adimensionnement ; montrant la courbe unique à deux tendances avec l'équivalence puis l'élévation des valeurs de seuils.

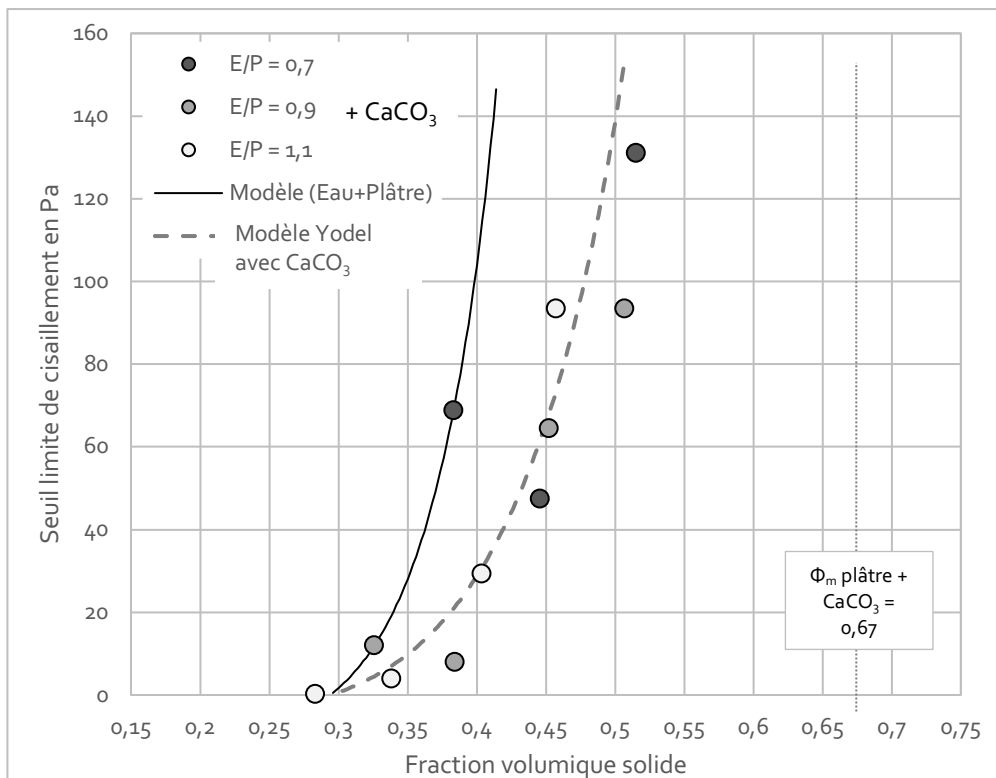


Figure 55 : représentation des seuils et du modèle additionné de carbonate de calcium établi selon le modèle Yodel [12] en identifiant la fraction volumique solide maximale telle que $\Phi_{max} = 0,67$ pour les mélanges chargés de CaCO₃.

b. Consistance

Pour évaluer l'effet de l'ajout de carbonate de calcium sur la consistance K des formulations de plâtre, la même méthode de modélisation et d'adimensionnement est appliquée. Dans un premier temps, le modèle de comportement pour la suspension eau/plâtre est représenté (Fig. 56), selon les valeurs établies précédemment d'après le modèle de Krieger-Dougherty [11] avec $K_0 = 0,018 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\Phi_{\max} = 0,5$; et $\eta = 7,07$. Les valeurs mesurées et modélisée selon Herschel-Bulkley [6] sont ensuite placées dans le repère (Fig. 57). Le comportement des formulations semble similaire à celui des suspensions de plâtre seul, en suivant le même lien fonctionnel $K = f(\Phi)$, avec toutefois une légère augmentation des valeurs de Φ à consistance égale, qui traduirait un effet « viscosant » ou lubrifiant.

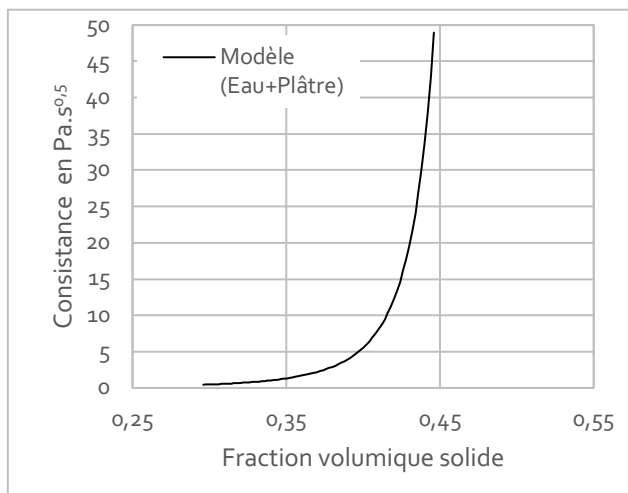


Figure 56 :
représentation du
modèle établi pour la
consistance K des
suspensions eau-
plâtre, avec l'indice de
structuration $n = 0,5$.

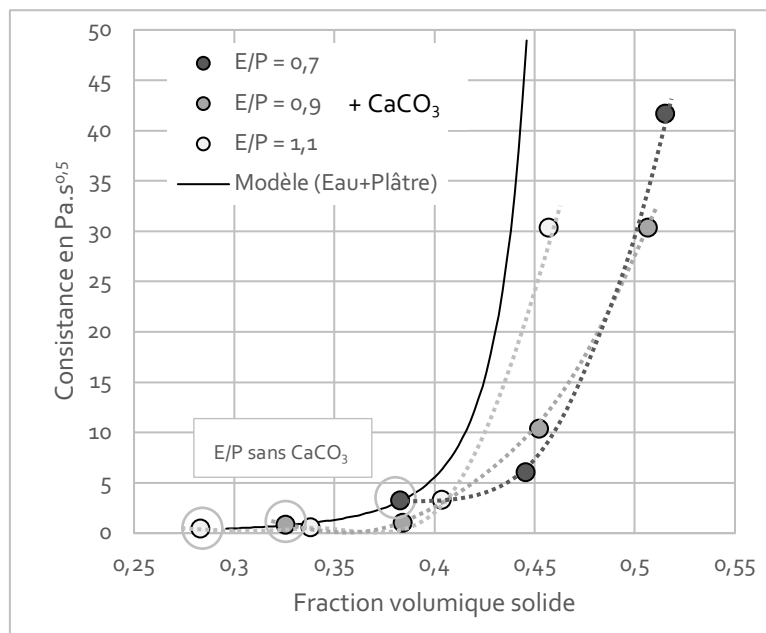


Figure 57 : représentation des valeurs établies de consistance K pour les formulations à rapports massiques E/P = 0,7 ; 0,9 ; 1,1 et à ratio de plâtre-carbonate de calcium 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5 montrant un comportement similaire au modèle sans CaCO₃.

L'analyse peut être poursuivie en isolant l'effet du carbonate de calcium par un adimensionnement et le calcul des valeurs relatives pour la consistance K et pour la fraction volumique solide Φ , telles que :

$$K_{\text{relative}} = \frac{K}{K_{\text{réf}}} \text{ et } \Phi_{\text{relative}} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{réf}}}$$

La valeur de référence étant celle de la formulation à E/P correspondant, sans CaCO_3 .

L'adimensionnement montre quelques écarts de valeurs de la consistance K mais le regroupement des points est suffisant pour identifier une tendance générale et illustrer un comportement unique lors de l'addition de CaCO_3 , pour les trois rapports massiques évalués et les différents ratios (Fig. 58). Ce comportement est similaire à celui du modèle établi pour le plâtre seul (Fig. 56).

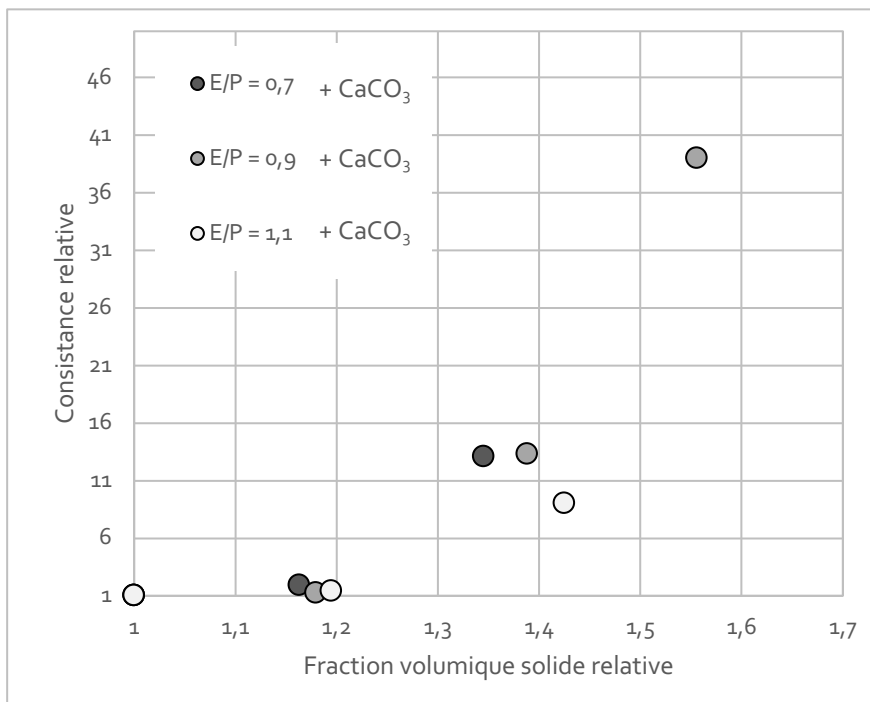


Figure 58 : représentation des valeurs relatives de consistance pour les formulations additionnées de CaCO_3 après adimensionnement ; montrant une allure exponentielle, similaire au modèle du mélange eau-plâtre.

Un premier constat peut être présenté, avec un effet inerte du CaCO_3 sur la réaction d'hydratation du plâtre, sans modification du comportement de la suspension porteuse. Le couple fraction volumique solide et consistance constitue une constante, avec :

$$\Phi_{\text{réf}} = 0,27 \text{ et } K_{\text{réf}} = 0,291 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0,5}$$

Pour rapporter ces valeurs aux courbes modèles du plâtre seul, sachant que la suspension additionnée est portée par le mélange eau/plâtre et qu'elle suit le même comportement, la consistance adimensionnée est modélisée selon Krieger-Dougherty [11]. Dans un repère adimensionné et semi logarithmique, les courbes des deux plâtres sont présentées, associées à la tendance de l'additif CaCO_3 montrant une superposition bien ajustée des comportements (Fig. 59).

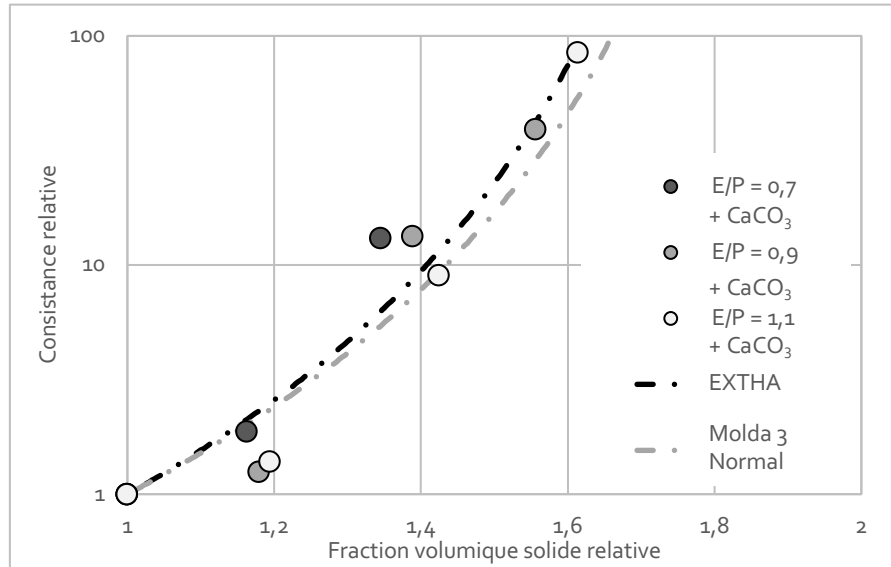


Figure 59 : représentation semi-logarithmique des valeurs de consistance après adimensionnement pour les formulations additionnées de carbonate de calcium, comparées aux modèles eau-plâtre avec le EXTHA® et le Molda® 3 Normal.

D'après ces modèles, il est finalement possible d'évaluer l'effet physique de la charge sur la suspension de plâtre. Pour cela, le modèle initial de la suspension eau/plâtre est repris et les courbes modèles établies pour les trois types de formulations additionnées, présentant l'effet du CaCO₃, sont rapportées. Les tendances peuvent donc être comparées en regardant les valeurs de K pour une fraction volumique solide donnée (Fig. 60). La valeur de consistance semble très largement augmentée par l'ajout de CaCO₃ confirmant l'effet type agent viscosant du carbonate de calcium, en accord avec les références bibliographiques. Ainsi, pour une valeur de consistance donnée, la formulation additionnée a une fraction volumique plus haute, indication d'une matière plus concentrée en poudre. La consistance n'est donc pas affectée par l'ajout de CaCO₃. Par extension, il est possible d'admettre qu'à fraction volumique équivalente, le mélange de plâtre seul aura une consistance plus basse.

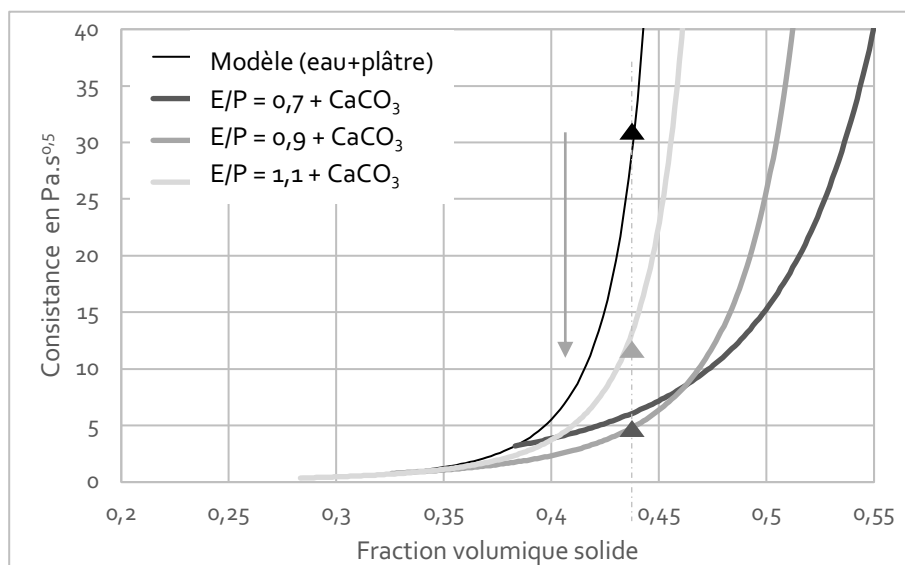


Figure 60 : représentation des modèles montrant, par un décalage des courbes, l'élévation des valeurs de consistance K lors de l'ajout de CaCO₃.

4. Effet du dioxyde de titane

a. Seuil limite de cisaillement

L'effet du dioxyde de titane, ajouté à une formulation de plâtre et de carbonate de calcium est évalué dans un premier temps en extrapolant le comportement pour le mélange de plâtre seul à $E/P = 1,5$ puis en considérant le ratio plâtre-carbonate de calcium de 1-2, et enfin en comparant ces modélisations à la valeur obtenue par mesure et ajustée aux modèles (Fig. 61). Le comportement des formulations additionnées de CaCO_3 étant complexe à analyser, le modèle établi par le Yodel [12], avec une valeur de $\Phi_m = 0,67$ a été retenu pour extrapoler les données, permettant une bonne représentation du modèle de suspension. Ainsi, le mélange de plâtre et CaCO_3 à rapport massique E/P 1,5 et ratio 1-2 a une contrainte seuil estimée à ≈ 30 Pa, équivalente à un mélange de type $E/P = 1,1$ et ratio 1-1. Cette analyse fait estimer l'allure de la courbe, qui démarrerait à $\Phi = 0,25$ et s'arrêterait à $\Phi \approx 0,45$ avec une valeur maximale de $\tau_0 \approx 50$ Pa.

Les valeurs mesurées et ajustées au modèle d'Herschel-Bulkley avec l'ajout de 2% de TiO_2 sont largement supérieures, avec des valeurs ≈ 80 Pa. Il semblerait donc que le pigment, même en très faible quantité ajoutée, influence le comportement rhéologique de la formulation, en augmentant le caractère plastique.

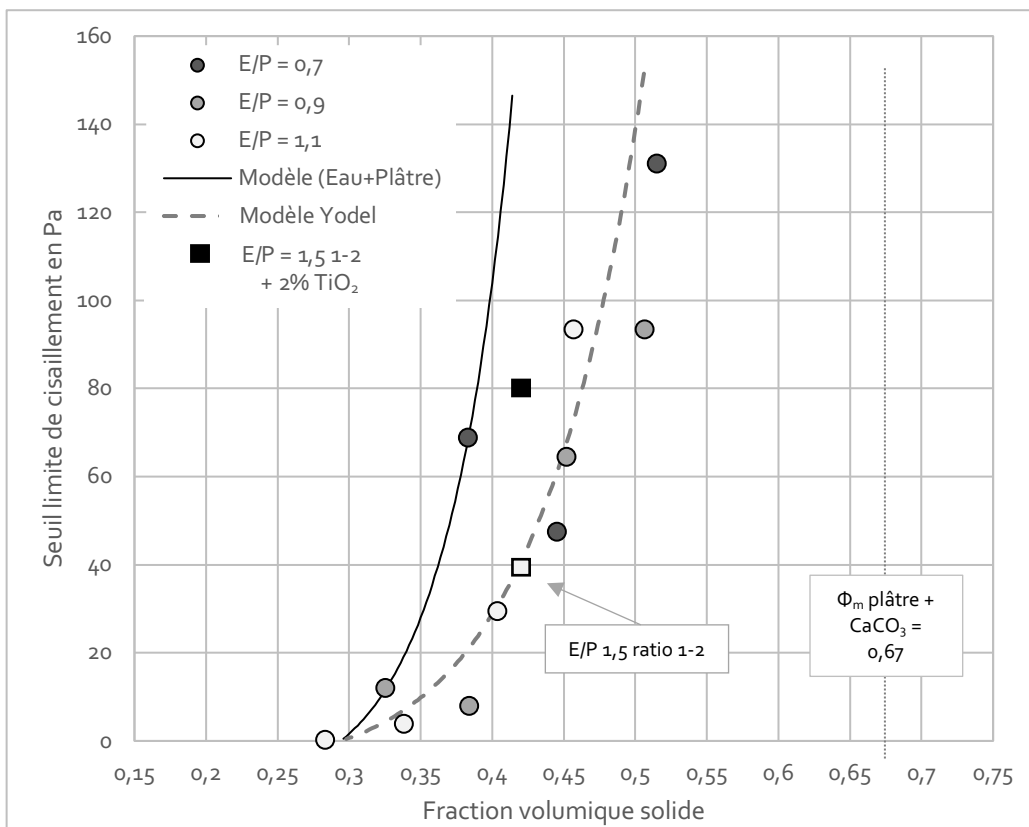


Figure 61 : représentation des valeurs de contrainte seuil τ_0 pour les formulations additionnées de carbonate de calcium et de dioxyde de titane, par modélisation et extrapolation ; en comparant les données aux valeurs obtenues par mesure pour le mélange à 2 % de TiO_2 l'effet d'augmentation du caractère plastique est constaté, même à faible quantité de pigment ajouté, avec une nette élévation du seuil.

b. Consistance, représentation de la composante visqueuse

L'évaluation de la consistance K suit le même procédé que pour le seuil limite de cisaillement. L'extrapolation des données permet de construire la courbe de structuration pour des formulations à rapport massique E/P = 1,5 et une addition de carbonate de calcium dans la limite du ratio 1-2. Cette courbe est représentée en comparaison de celles établies précédemment, selon le modèle eau-plâtre et les formulations à E/P = 0,7 ; 0,9 ; et 1,1 additionnées de CaCO₃. Les valeurs obtenues par mesure et modélisation pour la formulation à de 2 % de TiO₂ sont ensuite figurées (Fig. 62). En raison de la forme du modèle de Krieger-Dougherty [11] et de son caractère asymptotique pour les faibles valeurs de Φ , il est difficile d'extrapoler le modèle de consistance au-delà des textures évaluées selon le plan d'expérience. En ajustant ce modèle modifié [11], qui substitue la viscosité apparente par la consistance, les formulations évaluées expérimentalement peuvent être représentées. Mais, dans le cas de formulations aux textures très liquides telles que E/P = 1,5, l'ajout de carbonate de calcium est difficile à simuler, et la fraction volumique solide $\Phi = 0,428$ mesurée pour cette formulation à ratio plâtre-carbonate de calcium 1-2 additionnée de TiO₂ est mal ajustée au modèle (Fig. 62). Il serait nécessaire de compléter les données avec d'autres formulations pour obtenir une meilleure représentation de l'effet de ces additifs dans une suspension eau-plâtre purement visqueuse, à E/P = 1,5. Les résultats représentés indiquent que la consistance obtenue en présence de TiO₂ est équivalente à 13 Pa.s^{0,5} pour une valeur de $\Phi = 0,428$ (Fig. 62). À fraction volumique solide fixée, l'évolution non linéaire de la consistance par rapport à l'apport d'eau dans le mélange eau-plâtre suggérerait une valeur de l'ordre de 20 Pa.s^{0,5} pour la formulation à E/P = 1,5 après réajustement du modèle. Dans ces conditions, l'ajout de TiO₂, même en faible quantité, agirait effectivement comme un agent viscosant, en accord avec les données de la littérature⁵⁵.

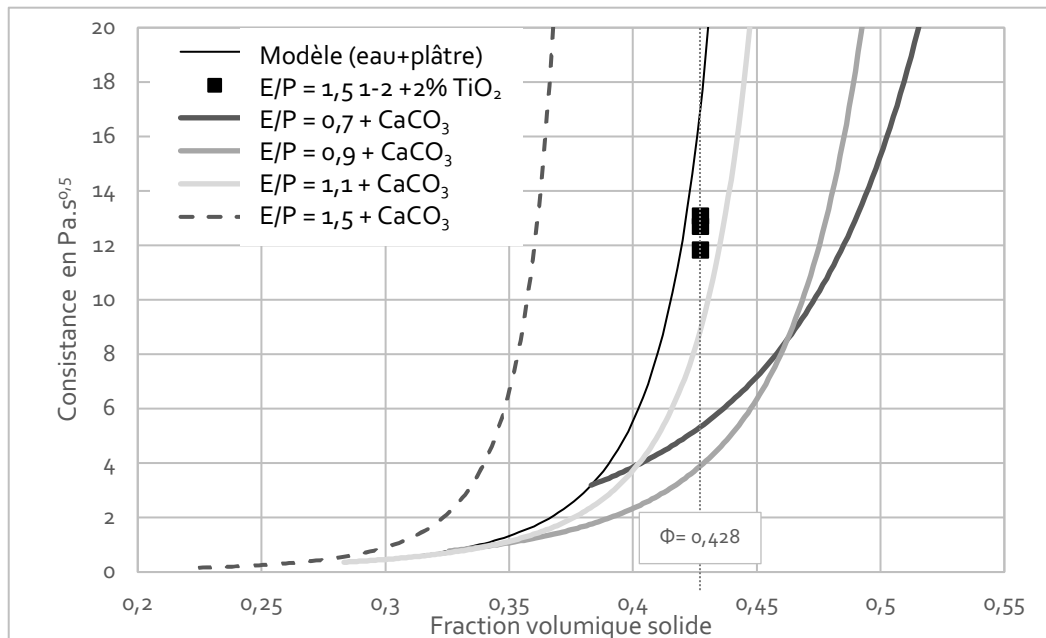


Figure 62 : consistances des formulations additionnées de carbonate de calcium et de dioxyde de titane, avec l'élévation de Φ et un effet texturant de type agent viscosant.

⁵⁵ Senff, *et al.*, « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *Op. cit.*, p. 354-361.

5. Formulations alternatives

Les mesures de seuil effectuées avec les mélanges de type « apprêt » composés de craie de Bologne et de colle animale, avec et sans TiO_2 , sont disparates. Pour ces mélanges, la fraction volumique solide est estimée à $\Phi = 0,476$. Le seuil de cisaillement évalué à partir des courbes d'écoulement et en considérant l'indice de structuration $n = 0,5$ est de l'ordre de $\tau_0 = 1,5$ Pa à 20°C , et de $\tau_0 = 15,5$ à 40°C . Pour indication, les seuils mesurés en protocole quasi-statique sont de l'ordre de $\tau_0 = 14$ Pa à 20°C . Les résultats extrêmement bas obtenus pour les formulations à 2 % de TiO_2 ne permettent pas de poursuivre les interprétations sur l'effet de l'additif. Enfin, la part plastique de ces mélanges est peu importante et concorde avec le caractère liquide voulu, peu affecté par la variation de température évaluée dans ces travaux.

Les mélanges de craie de Bologne et de colle animale, testées à géométrie réglée à 20°C ou à 40°C présentent des valeurs de consistance K très similaires (Fig. 63). Une différence de comportement semble se révéler en fonction de la température : avec une tendance rhéofluidifiante lorsque la géométrie est à 40°C et une tendance rhéoépaississante à 20°C . Cette différence de comportement est très probablement liée à un effet de refroidissement du liant de colle animale, lors du dépôt sur le plateau, et donc un début de gélification de la formulation pouvant être interprété comme une augmentation de la consistance, caractéristique du comportement rhéoépaississant qui augmente avec l'accélération du taux de cisaillement.

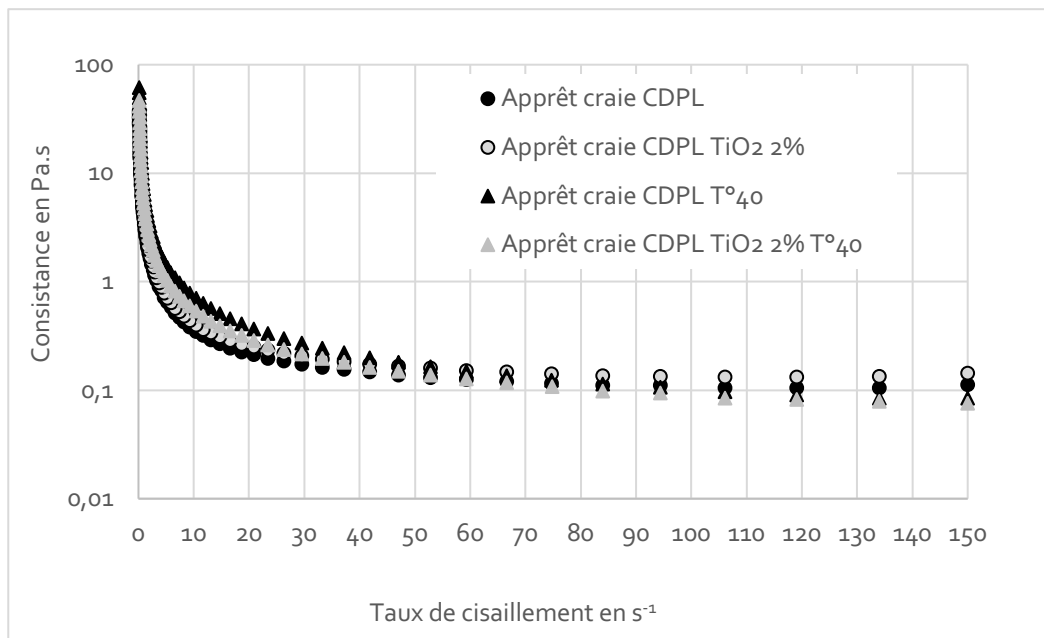


Figure 63 : courbes d'écoulement et de consistance en fonction du taux de cisaillement des mélanges d'apprêts liquides de craie de Bologne et de colle animale, avec ou sans dioxyde de titane, dans des conditions d'essai à 20°C ou 40°C .

Le Modostuc® semble présenter un comportement rhéofluidifiant, avec des valeurs de consistance très élevées à bas taux de cisaillement, qui décroissent en augmentant la vitesse (Fig. 64). Pour comparaison, la valeur de consistance à bas taux de cisaillement correspond à celle d'un plâtre β à rapport massique E/P = 0,55. Mais, à fort taux de cisaillement, les valeurs supérieures à 10 Pa.s sont très largement supérieures à celles des formulations présentées précédemment. Le caractère très pâteux, avec une haute tenue semble bien représenté par les valeurs mesurées, malgré des conditions de tests non optimales. Les valeurs ajustées pour le Modostuc® sont modélisées à ≈ 470 Pa.s pour n libre, et à ≈ 520 Pa.s pour $n = 0,5$ avec le modèle d'Herschel-Bulkley [6].

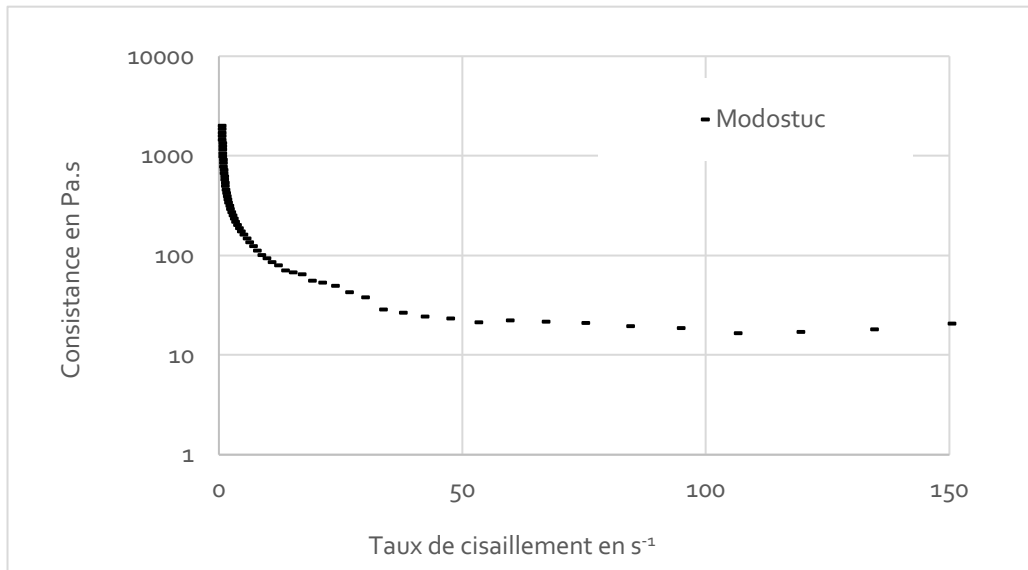


Figure 64 : courbe d'écoulement et de consistance K selon le taux de cisaillement pour le produit commercial Modostuc® montrant des valeurs de consistance élevées, représentatives de la texture très pâteuse

REMARQUES

Dans la plupart des cas, les valeurs de fraction volumique solide maximale modélisées sont en accord avec les ressentis des préparations et des essais, lorsque la consistance était jugée trop dense ou trop pâteuse. En effet, lors de la préparation pour les essais rhéologiques, le seuil de Φ_m a semblé atteint expérimentalement pour les formulations à E/P très bas et pour les formulations additionnées très concentrées en plâtre et en carbonate de calcium. Pour ces formulations, il semblerait qu'il n'y ait pas suffisamment d'eau pour enrober tous les grains rendant alors le mélange « sec » et granuleux, hétérogène et irrégulier. Difficiles à mélanger et à travailler, les matériaux à ces taux de préparation ne sont pas préconisés pour un usage en conservation-restauration. Les modélisations semblent cohérentes avec les ressentis, et permettent donc de traduire et de représenter les gammes de textures étudiées. Afin de clore cette approche des caractéristiques rhéologiques d'une sélection de formulations de comblement, un tableau de synthèse est proposé (Tabl. 7), permettant de classer les formulations selon les trois gammes de textures identifiées et présentées en début de chapitre, telles que la texture pâteuse, la texture liquide, et la texture intermédiaire.

Synthèse

L'étude des matériaux à l'état fluide a permis de qualifier et de calibrer les formulations utilisées par les professionnel·les de la conservation-restauration aux moments de la mise en œuvre du comblement. Par habitude et par expérience, les formulations sont préparées en fonction des textures et des besoins comme par exemple une texture fluide qui s'écoule dans un moule ou au contraire une texture épaisse avec une bonne tenue qui se modèle facilement à la spatule, directement sur la zone de l'artefact à combler. La rhéologie, ou l'étude des propriétés d'écoulement des matériaux fluides et solides, est très peu étudiée dans le domaine du patrimoine. Les sources, les références et les modèles d'analyses ont alors été puisés dans les spécialités de l'ingénierie. Un protocole a été mis en place en réalisant deux types d'essais : en condition dynamique avec une géométrie plan-plan, et en condition quasi-statique avec une géométrie Vane. Ces tests permettent de qualifier les fluides (visqueux et viscoplastiques essentiellement) et de caractériser les propriétés rhéologiques associées telles que la viscosité, le seuil limite de cisaillement, ainsi que l'indice de structuration induit par le taux de cisaillement.

Selon les références des années 1980, le plâtre peut présenter un caractère thixotrope, en présence d'additifs par exemple ou lorsque le mélange est très concentré et laissé sans sollicitation avant le début de la prise. Son comportement est aussi décrit comme celui d'un fluide à seuil ou viscoplastique, visqueux et rhéofluidifiant. En phase dormante, la transition du comportement visqueux à viscoplastique est conditionnée par la quantité d'eau apportée au mélange et par le caractère cohésif des suspensions formées. Au-delà de la phase dormante, les propriétés rhéologiques sont dépendantes de la cinétique de prise du liant hydraulique. Ainsi les essais ont été réalisés sur une courte durée, de moins de deux minutes, et en restructuration, c'est-à-dire à vitesse de cisaillement décroissante, de 150 à 0,1 s⁻¹, pour soustraire les effets de prise. Ce protocole s'apparente également au geste et à la pratique des professionnel·les qui procèdent à un mélange rapide immédiatement, pour ensuite travailler la formulation plus lentement.

Dans un premier temps, le protocole a permis de mesurer les différentes textures du plâtre seul, en comparant deux plâtres β , le Molda® 3 Normal et le EXTHA® Ibérica, et un plâtre α , Knauf® FG100. Ensuite, des mélanges additionnés de carbonate de calcium à différents ratios, et de dioxyde de titane en faible quantité, ont été évalués. Une autre formulation de craie de Bologne et de colle animale, inspirée des mélanges d'apprêts utilisés en dorure, ainsi que le produit commercial Modostuc® ont été testés pour comparaison.

En accord avec les données de référence et les sources, les formulations composées de plâtre peuvent être classées dans les suspensions de fluides à seuil dits aussi fluides viscoplastiques, qui nécessitent une sollicitation minimale en cisaillement pour que l'écoulement débute. Tant que le seuil n'est pas atteint, la formulation ne s'écoule pas et le comportement du matériau peut être comparé à celui d'un solide. Une fois le seuil atteint, la formulation est en écoulement, « cisillée », et la part visqueuse peut être considérée. Dans la généralité des cas étudiés, les formulations présentent un comportement viscoplastique et rhéofluidifiant. La rhéofluidification est un mécanisme de structuration des mélanges, induit par la variation du taux, ou vitesse, de cisaillement. Il est représentatif des suspensions minérales pour lesquelles des amas sont formés au cours de la mise en œuvre et sont éventuellement détruits lors de l'accroissement de la vitesse de cisaillement.

Cette déstructuration de la microstructure cause la diminution de la viscosité apparente. Ces travaux ont montré la possibilité de représenter les courbes d'écoulement de l'ensemble du plan d'expérience en retenant un indice de structuration n constant et égal à 0,5 en accord avec les rares références de la littérature.

Les comportements rhéoépaississants observés pour quelques formulations aux faibles quantités d'eau ont été interprétés comme étant le résultat d'un biais expérimental plutôt qu'une véritable qualification, les textures très fermes étant difficilement caractérisables par les moyens expérimentaux mis en œuvre dans ces travaux.

La fraction volumique solide Φ , qui correspond au rapport du volume de poudre et du volume total, a été considérée dans un premier temps. Calculée en fonction de la masse volumique des matériaux, la fraction volumique solide peut donc varier d'un plâtre à l'autre. Les deux β ont des valeurs relativement proches mais un léger décalage est toutefois notable : à même rapport massique, les valeurs Φ du plâtre EXTHA® sont légèrement plus élevées que celles du Molda® 3 Normal. L'ajout d'additifs peut également modifier les valeurs de fractions volumiques solides. Dans le cas du carbonate de calcium, ayant une masse volumique similaire à celle du Molda® 3 Normal, les valeurs à rapports massiques eau/plâtre E/P ou eau/matière solide E/Ms équivalents sont presque égales, comme par exemple le mélange à taux E/P = 0,6 à $\Phi = 0,388$ et le mélange à E/P = 0,9 et ratio plâtre-CaCO₃ à 1-0,5 à E/Ms = 0,6 et à $\Phi = 0,384$.

Les contraintes seuil ont été calculées à partir des contraintes mesurées lors des essais en géométrie plan-plan et modélisées selon Herschel-Bulkley [6], puis comparées aux valeurs estimées à partir des essais en géométrie Vane. Dans tous les cas, les données obtenues en condition statique et dynamique concordent, et la structuration induite par la variation de la fraction volumique solide est correctement décrite par le modèle Yodel [12]. En deçà de la fraction de percolation, l'absence de seuil est validée, tandis qu'au-delà de cette valeur critique, le seuil existe et croît pour tendre vers un comportement asymptotique approchant la fraction maximale, dite de *packing*. Le cadre méthodologique mis en œuvre permet d'identifier une légère différence entre les deux plâtres β et α . L'ajustement des courbes de structuration (τ , Φ) grâce à un paramètre de glissement, identifiant une variation de fraction volumique solide $\Delta\Phi$, est suffisant pour confondre les résultats. Le décalage constaté est attribué à une différence de demande en eau, et peut engendrer des variations de l'ouvrabilité des mélanges en changeant de produit commercial, toutefois peu importantes quand les produits sont faiblement adjuvés. Lors d'une addition de carbonate de calcium, dont l'effet est bien identifié, le modèle Yodel reste applicable. L'extrapolation et l'interpolation des données permettent de suggérer l'effet de l'ajout du dioxyde de titane, utilisé en faible quantité pour marquer le matériau de restauration. La modélisation semble suffisamment fiable pour généraliser les résultats dans le domaine de textures évaluées mais également au-delà, de façon à générer un abaque de prédiction du comportement rhéologique.

L'évaluation de la consistance complète la caractérisation des formulations. Ce paramètre sert à caractériser la structuration de la part visqueuse induite par Φ , l'indice de structuration n étant défini par une valeur constante. Les résultats suffisamment nombreux permettent d'établir une interprétation fiable du lien (K , Φ) grâce au modèle de Krieger-Dougherty [11]. À l'instar du seuil, les propriétés des deux plâtres β sont similaires malgré le décalage des valeurs pouvant être corrigé par réajustement selon $\Delta\Phi$. En lien avec les procédés de fabrication des produits, le décalage est plus conséquent entre les plâtres type β et de type α .

Pour caractériser l'effet des additifs sur la consistance, l'approche par interpolation est également possible, mais l'extrapolation est plus difficile et ne permet pas, à partir des données de cette étude, d'identifier clairement l'effet induit par le TiO_2 dans le domaine de textures non mesurées. La tendance est toutefois discernable avec une différence de mécanisme de structuration et un effet viscosant pour cette formulation additionnée, en comparaison de ceux établis lorsque l'eau est en excès pour les mélanges eau-plâtre-carbonate de calcium.

Les mélanges de craie de Bologne et de colle animale, avec ou sans dioxyde de titane, présentent des valeurs cohérentes par rapport aux ressentis lors des préparations. Formulés comme des apprêts, ils sont donc relativement liquides, avec une faible concentration en poudre. Toutefois la colle animale, à la texture spécifique qui forme un gel dès le refroidissement, assure à la fois un rôle de fluide porteur mais aussi un éventuel rôle texturant. Ce mélange présente des valeurs équivalentes à celles d'un plâtre préparé à rapport massique E/P = 0,85 à 1 soit de consistance intermédiaire à liquide selon le plâtre β choisi. La texture pâteuse du Modostuc® a été difficile à caractériser avec les protocoles de cette étude. Il est uniquement possible de constater des gammes de seuils de cisaillement très élevées, qui concordent avec son usage courant par modelage en pratique de comblement.

Les additifs testés ici dans une formulation de plâtre ont un rôle avantageux. En abaissant légèrement les contraintes, les seuils, et les coefficients de consistance, ils permettent de donner de la tenue ou du corps à la texture, permettant ainsi un travail à la spatule plus aisé, ou un effet nappant en cas de coulée, en se mélangeant parfaitement au plâtre, à l'exception des concentrations trop élevées en poudre pour lesquelles il n'y a plus suffisamment d'eau pour permettre un mélange homogène. Les références de la littérature mentionnent l'accélération du temps de prise en cas d'addition de dioxyde de titane et de micro-calcite, qui peut être un avantage comme un inconvénient selon les cas. La cinétique de prise n'a pas été évaluée dans ces travaux. Cependant, une prise très rapide peut être remarquée pendant les essais au rhéomètre, par exemple en essai Vane, lorsque les courbes d'écoulement ne montrent pas de stabilisation caractéristique du seuil limite de cisaillement, observé par exemple pour le plâtre α Knauf®. En revanche, cet effet n'a pas été constaté pour les formulations additionnées, laissant penser que le carbonate de calcium ou le dioxyde de titane, dans les proportions évaluées, n'accélèrent pas la prise du plâtre. Les textures sont améliorées sans impacter les comportements à l'écoulement, les valeurs de contraintes seuil et donc le degré de sollicitation nécessaire pour travailler le matériau. Il est alors tout à fait possible de formuler un matériau de comblement avec les additifs étudiés ici, tout en conservant les aspects rhéologiques adaptés à la pratique de la conservation-restauration.

Les caractéristiques évaluées pour chaque formulation ont été comparées, permettant ensuite de les classer et de les réunir dans un tableau de synthèse (Tabl. 7). Les gammes d'usage ne sont pas toujours aisées à discerner, mais les tendances sont identifiables et, grâce à cette caractérisation, le classement en trois catégories de textures pâteuse, intermédiaire, et liquide, rejoint celui présenté au début du chapitre. Ces indications peuvent donc servir à aiguiller les professionnel·les en cas de besoins spécifiques de texture ou de correspondances de formulations avec l'ajout d'un autre composé comme le carbonate de calcium. Les aspects à l'état frais ayant été caractérisés, il convient désormais d'étudier et de présenter les aspects des formulations à l'état solide, et ainsi, de vérifier la bonne compatibilité des matériaux à l'état sec et durci.

Formulation	Rapport massique eau/plâtre E/P ou eau/matière solide E/Ms	Fraction volumique solide Φ	Contraintes seuil τ_0				Consistance - Viscosité			Texture
			Herschel-Bulkley n libre	Herschel-Bulkley $n = 0,5$	YODEL $n = 0,5$	Vane	Herschel-Bulkley n libre	Herschel-Bulkley $n = 0,5$	Krieger-Dougherty adapté $n = 0,5$	
Molda® 3 Normal	0,45 à 0,55	0,458 à 0,409	183 à 114	313 à 109	312 à 114	231 à 81	8,4 à 0,8	26 à 3,8	13 à 4,2	Pâteuse
EXTHA®	0,5 à 0,55	0,465 à 0,442	277 à 306	325 à 300	650 à 301	/	0,5 à 18	39 à 21	230 à 37	
0,7 1-1 CaCO ₃	0,35	0,515	214	131	-23	/	0,9	42	-	
0,9 1-1,5 CaCO ₃	0,36	0,507	149	93	-26	/	0,1	30,3	-	
1,1 1-1,5 CaCO ₃	0,44	0,457	223	93	199	/	20	30	32	
Molda® 3 Normal	0,6 à 0,75	0,388 à 0,336	101 à 2,9	44 à 3,1	58 à 12	40 à 5,7	1,7 à 1	2,8 à 0,8	2,6 à 0,9	Intermédiaire
EXTHA®	0,6 à 0,75	0,420 à 0,367	101 à 22	172 à 43	171 à 45	210 à 42	75 à 21	12 à 1,6	12 à 2	
0,7 1-0,5 CaCO ₃	0,47	0,446	46	47	51	120	7,6	6	8,1	
0,9 1-1 CaCO ₃	0,45	0,452	63	64	91	/	12	10	14	
1,1 1-1 CaCO ₃	0,55	0,404	27	29	10	37	5,5	3,2	2,6	
1,5 1-2 CaCO ₃ à 2% TiO ₂	0,49	0,428	81	81	21	97	13	13	4,1	
Molda® 3 Normal	0,8 à 0,95	0,322 à 0,286	1,6 à 0,2	1,5 à 0,04	7,2 à 0,06	3,7 à 1,3	0,5 à 0,1	0,6 à 0,3	0,7 à 0,3	Liquide
EXTHA®	0,8 à 1,05	0,352 à 0,293	22 à 5	24 à 4,6	30 à -0,3	20 à 3,8	3 à 0,3	1,1 à 0,4	1,4 à 0,4	
0,9 1-0,5 CaCO ₃	0,60	0,384	7,8	7,8	6,7	18	1,1	1	2	
1,1 1-0,5 CaCO ₃	0,73	0,338	3,9	3,7	2,9	5,9	0,4	0,5	1,4	
Craie de Bologne + colle animale avec ou sans 2 % TiO ₂ (à 20 °C et à 40 °C)	1,16	0,476	8,6 à 17	0,6 à 16	4,5	14	0,1 à 0,3	0,4 à 1,1	0,6	

Tableau 7 : tableau récapitulatif des caractéristiques rhéologiques des formulations à l'état frais (valeurs modélisées arrondies).



Chapitre IV

Étude des propriétés mécaniques
à l'état solide

Sommaire

Dans ce quatrième chapitre, les propriétés mécaniques des matériaux à l'état solide sont étudiées et évaluées afin de les qualifier, de les quantifier, de les caractériser et de les comparer. Ces propriétés comprennent les modules de Young et d'élasticité dynamique associés au coefficient de Poisson, ainsi que les résistances maximales à la compression et à la flexion 4 points, en lien avec les masses volumiques des matériaux. Les valeurs permettent de classer les formulations, de mieux connaître leur comportement après la mise en œuvre, d'estimer leur innocuité et leur bonne compatibilité avec les matériaux originaux. Ainsi des formulations calibrées et des solutions alternatives peuvent être proposées aux professionnel-le-s, selon les critères recherchés lors des traitements de comblement.

I.		II.	
Présentation	p. 241	Méthode	p. 269
1. Définitions et caractéristiques	p. 241	1. Présentation générale	p. 269
a. Masses volumiques	p. 241	a. Protocole expérimental	p. 269
b. Contraintes mécaniques et comportements	p. 242	b. Protocole de préparation des formulations et échantillonnage	p. 270
2. État de l'art	p. 245	c. Masse volumique	p. 273
a. Plâtre	p. 245	2. Moyens expérimentaux et traitement des données	p. 274
b. Effet des additifs	p. 252	a. Essais de compression et flexion 4 points	p. 274
c. Effet du fibrage	p. 260	b. Mesure de fréquence de résonance	p. 281
3. Apports en conservation-restauration	p. 266		
a. Buts de l'étude	p. 266		
b. Estimations des propriétés selon les aspects visuels	p. 268		

III.

Résultats

1. Plâtres Molda® 3

p. 283

Normal et

p. 283

EXTHA®

a. Masses volumiques p. 283

b. Comportement et
résistance à la
contrainte p. 288

c. Module de Young et
module E dynamique p. 291

d. Porosité p. 294

2. Addition de carbonate de calcium

p. 295

a. Masses volumiques p. 295

b. Comportement et
résistance à la
contrainte p. 298

c. Module de Young et
module E dynamique p. 300

3. Addition de dioxyde de titane

p. 303

a. Masses volumiques p. 303

b. Comportement et
résistance à la
contrainte p. 306

c. Module de Young et
module E dynamique p. 309

4. Coefficient de Poisson

p. 312

5. Autres formulations

p. 314

Synthèse

p. 316

I. Présentation

1. Définitions et caractéristiques

Dans ce travail, le comportement mécanique des matériaux et des formulations de comblement à l'état solide est étudié en évaluant les propriétés physiques à travers les notions de masse volumique et de porosité, de résistance en compression et en flexion, ainsi que de modules élastiques et de coefficient de Poisson. Des essais mécaniques permettent d'obtenir les valeurs de ces caractéristiques, et précisent les spécificités techniques et les qualités d'un matériau ou d'une formulation.

a. Masse volumique et porosité

La masse volumique, notée ρ , correspond à la quantité de matériau dans un volume donné. Cette grandeur physique est fonctionnelle du rapport massique telle que $\rho = f(E/P)$. Différents procédés de mesures et de calculs permettent d'obtenir les valeurs de masses volumiques : apparente, réelle, ou absolue, avec trois degrés de précisions variables caractérisant les aspects micro-structurels des matériaux. Dans cette étude, seule la masse volumique apparente a été mesurée, en mettant en relation la masse et le volume des échantillons prismatiques et cylindriques, selon les formules [1] et [2]. Elles sont données en kg.m^{-3} .

Masse volumique apparente d'un prisme : $\frac{m}{L \times l \times h}$ [1]

Masse volumique apparente d'un cylindre : $\frac{m \times 4}{\pi \times D^2 \times h}$ ou $\frac{m}{\text{surface} \times h}$ [2]

Avec m la masse en kg, L la longueur, l la largeur, h la hauteur, et D le diamètre en m.

La porosité, notée P , est aussi liée au gâchage et au rapport massique eau/plâtre. Elle est indiquée sans unité, parfois donnée en pourcentage. Elle peut donc être reliée à la masse volumique.

Les propriétés physiques de masse volumique et de porosité conditionnent les propriétés mécaniques du matériau fini, en décrivant des aspects micro-structurels qui permettent d'expliquer les comportements des matériaux.

b. Comportement à la contrainte et résistance

Soumis à un champ de contraintes mécaniques, les formulations employées pour effectuer des comblements présentent un comportement typique des corps poreux déformables. Pour caractériser le comportement de ces matériaux ainsi que leurs propriétés physiques, des essais mécaniques sont mis en œuvre. Les valeurs mesurées au cours de ces essais sont caractéristiques du comportement et de la résistance du matériau. Le comportement mécanique peut être introduit de façon théorique en considérant le cas d'une éprouvette de type barreau cylindrique, soumise à un essai de traction simple (Fig. 1).

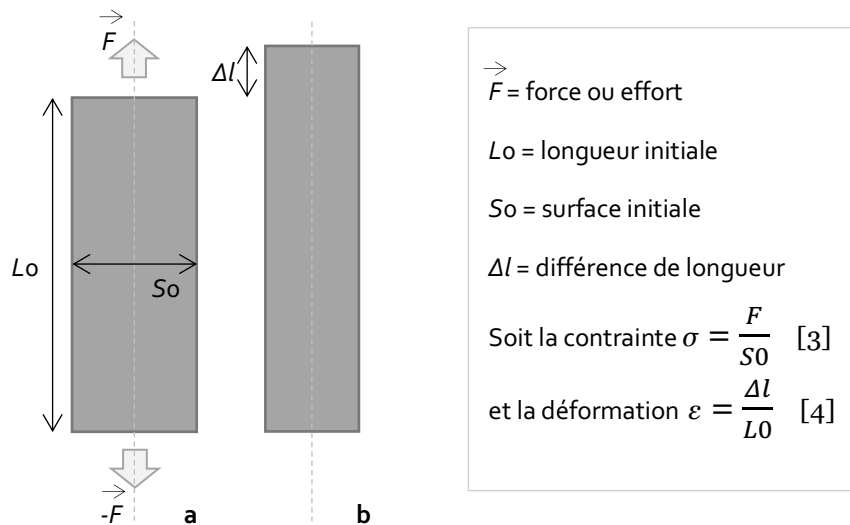


Figure 1 : représentation schématique d'un essai de traction sur une éprouvette, avec l'application d'une force aux extrémités (a), résultant en la déformation (b), et permettant d'établir un lien entre la contrainte σ et la déformation ε .

La force, notée F , uniformément appliquée sur la surface du corps d'épreuve, correspond à l'effort fourni pour imposer une déformation, notée ε [4]. Ceci a pour effet de générer une contrainte dans le matériau, notée σ [3]. En modulant l'effort, ou la déformation, différents comportements peuvent être observés selon les conditions de l'essai et le matériau (Fig. 2). Dans un premier temps, il se produit une déformation réversible, caractéristique du comportement élastique. Au-delà d'un seuil, la limite élastique est dépassée et le matériau subit des endommagements locaux irréversibles : la déformation devient irréversible, typique d'un comportement élasto-plastique ou purement plastique. Au-delà d'un second seuil, de limite plastique cette fois-ci, la rupture générale du corps est atteinte. Cette limite est représentée par la résistance mécanique maximale en traction (Rt), en compression (Rc), ou en flexion (Rf) selon le mode de sollicitation, ces deux derniers étant évalués dans ces travaux.

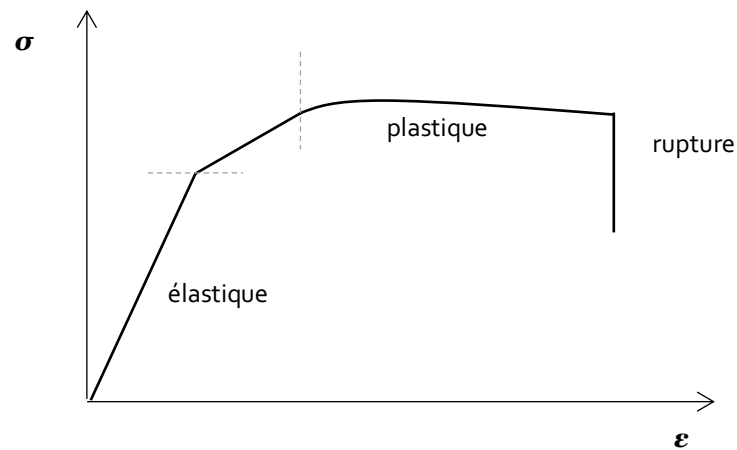


Figure 2 : courbe-typique illustrant le lien contrainte/déformation, avec une partie représentative du comportement élastique, suivie d'une partie élastique résiduelle avec un début d'endommagement, puis d'une partie plastique, et enfin de la rupture au-delà du seuil.

Le lien contrainte/déformation, fonctionnel de la force appliquée, est représenté par le module élastique, ou module de Young, noté E , tel que :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [5] \quad \text{Avec } \sigma \text{ la contrainte et } \varepsilon \text{ la déformation.}$$

Dans ce contexte de recherches, le module de Young [5] traduit le caractère plus ou moins élastique de la matière non endommagée mécaniquement. Plus la valeur E est faible et plus le matériau est élastique ; au contraire, plus E est élevé et plus le matériau est considéré comme rigide. Des paramètres extérieurs, tels que la température et le taux d'humidité relative, ainsi que des paramètres intrinsèques aux matériaux, comme leur nature, leur structure cristalline ou amorphe, leur aspect isotropique ou anisotropique¹, influencent l'élasticité d'un matériau et peuvent donc être caractérisés par ce module.

Le plâtre et plus généralement les familles de matériaux minéraux poreux ont des capacités de résistance en compression bien plus performantes qu'en traction. La quantité d'énergie fournie pour compacter le matériau et effondrer sa structure est supérieure à celle qui est nécessaire pour distendre le milieu poreux avant d'atteindre la rupture. Il est ainsi préférable de solliciter ce type de matériau en compression plutôt qu'en traction pour évaluer les résistances mécaniques. Un corps d'épreuve de forme cylindrique avec un élancement suffisant² est bien généralement utilisé pour cette caractérisation. En compression, la compaction produit une diminution de la hauteur et un élargissement du diamètre du cylindre, l'essai étant mené à volume constant. Le rapport de la déformation hauteur/diamètre renseigne sur le comportement isotropique ou anisotropique du matériau. Dans ces travaux, les déformations longitudinales et transversales sont mesurées par des jauges de déformation mises en place sur l'échantillon.

¹ Isotropie ou l'anisotropie d'un matériau décrit les directions de la déformation d'un matériau. Un matériau est dit isotrope quand il se déforme de façon égale dans toutes les directions ; à l'inverse, il est anisotrope quand sa déformation est inégale selon les différentes directions.

² L'élancement est considéré suffisant lorsque la hauteur est égale à deux fois le diamètre, tel que $h = D \times 2$.

La capacité de résistance en flexion est évaluée en sollicitant des corps d'épreuve prismatique de type poutre reposant sur deux appuis simples. L'effort est appliqué par un ou deux appuis simples sur la face opposée, ou supérieure. Un moment fléchissant est alors généré dans la poutre. Dans une configuration de flexion 4 points, ce moment fléchissant est constant entre les deux appuis supérieurs.

Le coefficient de Poisson, noté ν , est une constante aux valeurs généralement comprises entre 0 et 1. Dans un contexte mécanique monodimensionnel, ce coefficient décrit la capacité de déformation d'un matériau dans une direction perpendiculaire à celle induite par l'application d'une contrainte (Fig. 3), selon l'équation :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_z} \quad [6]$$

avec ε_r , la déformation transversale selon l'axe r ,
et ε_z , la déformation longitudinale selon l'axe z .

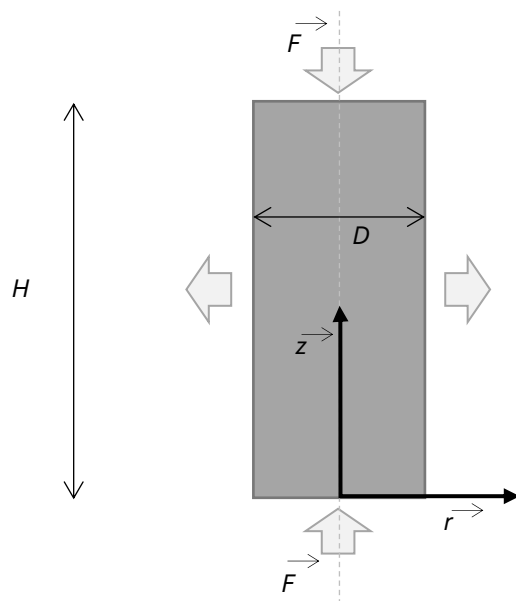


Figure 3 : schéma d'un essai de compression. La déformation imposée selon la direction z , provoque la déformation radiale de l'éprouvette suivant l'axe r . Le rapport entre la déformation radiale ou transversale et la déformation longitudinale constitue le coefficient de Poisson.

2. État de l'art

Dans un contexte général, l'emploi du plâtre présente des avantages considérables. Le matériau est abondant grâce aux nombreux gisements, les coûts de production sont relativement peu élevés, et sa mise en œuvre est facile. Il a des propriétés physiques et mécaniques qui en font un matériau attractif dans le milieu du bâti et de la construction, comme ses propriétés d'isolation thermique et acoustique, sa capacité de résistance au feu lui conférant une « protection incendie », ou encore la possibilité d'être recyclé. Ces aspects positifs ont très largement conditionné l'usage du matériau et la recherche visant à améliorer ses performances, enrichissant ainsi la connaissance sur les propriétés mécaniques à l'état solide par de nombreuses références, synthétisées ici selon les notions abordées au cours de l'étude.

a. Plâtre

Dans un premier temps, le plâtre seul est étudié, en concentrant les données pour des plâtres pris à partir d'hémihydrate β et dans des conditions normales de conservation, c'est-à-dire à l'état sec après cure à ≈ 20 °C et à 50 % de taux d'humidité relative.

Masses volumiques et porosité

D'après les données de la littérature, plus le matériau est concentré en poudre, plus la masse volumique est élevée. Le plâtre préparé à des taux de gâchage E/P de 0,35 à 0,95 présente des valeurs de masses volumiques comprises entre ≈ 1500 à ≈ 850 kg.m⁻³ (Fig. 4). Des séries de données, comme celles de Rojo³, obtenues avec du plâtre Extha®, celles de Spini⁴ avec le plâtre Molda® 3 Normal, ou encore de Peroglio Martynovitch⁵ avec un plâtre de type hémihydrate β non spécifié, illustrent bien le lien fonctionnel entre le rapport E/P et la masse volumique tel que $\rho = f(E/P)$. Les données collectées indiquent des masses volumiques comprises entre 1200 kg.m⁻³ et 1000 kg.m⁻³ pour les taux de gâchage E/P = 0,6 à 0,8 conseillés pour le moulage des artefacts, qui peuvent donc servir à l'estimation des propriétés physiques des matériaux constitutifs des artefacts. Ceci semble vérifié par la valeur de masse volumique mesurée au picnomètre par Biesel et Cascio⁶, dans un contexte d'analyse du matériau original d'une sculpture du XIX^e siècle, pour la recherche d'un matériau de comblement adapté. Cette valeur de la masse volumique ρ est de 1020 kg.m⁻³, ce qui équivaut à un taux de gâchage E/P = 0,75⁷. Cette donnée ponctuelle s'inscrit donc dans la tendance établie pour des plâtres plus récents fabriqués à partir de n'importe quel hémihydrate β (Fig. 4).

³ ROJO Amandine, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2013, p. 153.

⁴ SPINI Hugo, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, Rapport de stage de Master, Paris Centre, 2017.

⁵ PEROGLIO MARTYNOVITCH Marianna, *Composites organiques-inorganiques poreux pour la substitution osseuse*, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2008, voir BETENE EBANDA Fabien, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand 2, 2012, p. 54.

⁶ BIESEL Dominique et CASCIO Agnès, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, Mémoire de master, Paris, IFROA, 1984.

⁷ *Ibid.*, p. 7.

Il est possible, d'après l'allure des courbes représentées (Fig. 4), que de légères variations d'un hémihydrate β à l'autre coexistent, en constatant les résultats pour le plâtre Extha® évalué par Rojo, ou le plâtre Molda® 3 Normal évalué par Spini, en comparant notamment les points aux limites des valeurs mesurées, pour des taux E/P de 0,35 et 0,45 ou 0,95 pour lesquelles les courbes semblent légèrement décalées.

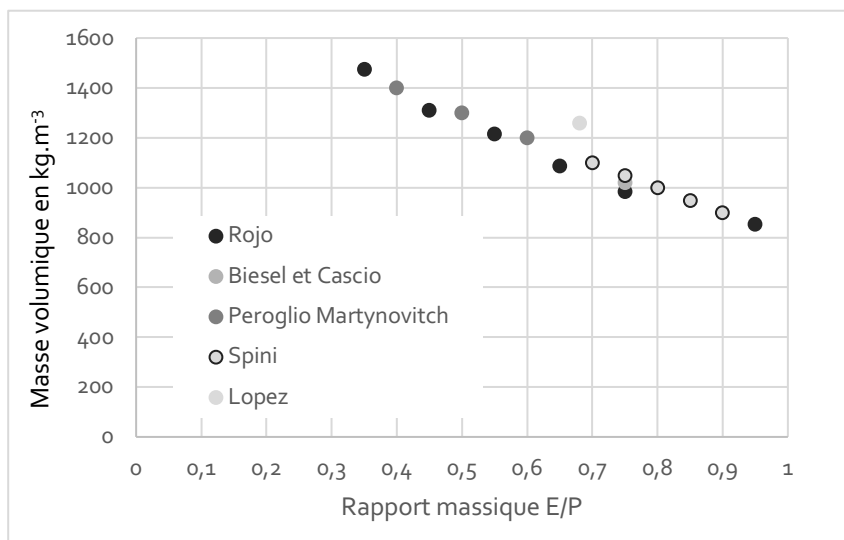


Figure 4 : masses volumiques ρ pour des plâtres de type hémihydrate β , montrant un lien fonctionnel avec le taux de gâchage ou rapport massique E/P, d'après les références.

La porosité induite par l'évaporation de l'excédent d'eau d'hydratation peut être directement reliée au taux de gâchage selon un lien fonctionnel tel que $P = f(E/P)$ (Fig. 5), et par conséquent à la masse volumique. En effet, l'augmentation de la quantité d'eau dans un mélange modifie la porosité finale du plâtre. À l'inverse, si le plâtre est peu dilué et plus concentré en poudre, alors la porosité est faible avec des valeurs comprises entre 0,35 à 0,8 pour des E/P = 0,45 à 2.

Des séries de données sont compilées pour des valeurs variées de taux de gâchage, permettant d'identifier une tendance générale d'évolution de la porosité. Des valeurs plus ponctuelles, comme celles recueillies chez Coquard⁸, Meille⁹, ou Lopez¹⁰ sont relativement similaires. Phénomène déjà constaté pour les valeurs de masses volumiques, les quelques décalages observables sont très probablement liés à la différence d'hémihydrates β testés, comme le point mesuré par Lopez à partir du plâtre Molda® 3 Normal qui varie très sensiblement des mesures de Rojo faites avec le plâtre Extha®. Dans les travaux de Chen, Suceh et Faber¹¹, la relation de Satava [7] a été utilisée pour calculer la porosité des mélanges évalués, dont les valeurs s'inscrivent correctement dans la tendance observée (Fig. 5) pour des plâtres très dilués aux rapports massiques E/P élevés.

⁸ COQUARD Philippe, *et al.*, « Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster », *Journal of Materials Science*, 29 / 17 (1994), p. 4611-4617.

⁹ MEILLE Sylvain, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2001, p. 83.

¹⁰ LOPEZ Élise, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2016, p. 182.

¹¹ CHEN Z., *et al.*, « A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum », *Journal of Materials Science*, 45 / 16 (2010), p. 4445.

Relation entre le taux de gâchage et la porosité, tirée de Satava : $P = \frac{(E/P - 0,15)}{(E/P + 0,36)}$ [7]

Avec P la porosité et E/P le taux de gâchage.

Enfin, en suivant ces données, la porosité d'un plâtre original, gâché à $E/P = 0,6$ à $0,8$ doit être comprise entre $\approx 0,45$ et $\approx 0,6$.

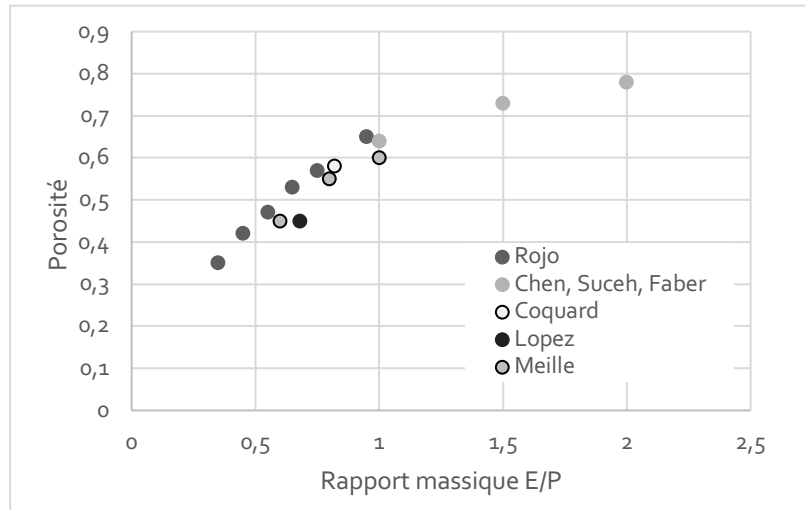


Figure 5 : porosité pour des plâtres de type hémihydrate β , montrant un lien fonctionnel avec le taux de gâchage ou rapport massique E/P , d'après les références.

Résistances aux essais mécaniques

Les résistances mécaniques, à la compression (Fig. 6), à la flexion 3 ou 4 points (Fig. 7), sont liées à la préparation du plâtre et il apparaît que les valeurs de résistance augmentent avec l'élévation de la concentration en matrice liante ou au contraire tendent à baisser lorsque la quantité d'eau est augmentée, élevant également la porosité du matériau.

Les résultats de Rojo¹² avec le plâtre Extha® donnent une importante série de données qui traduisent le comportement général observé et la baisse des résistances constatées lorsque le taux de gâchage ou la porosité augmentent (Fig. 6). Les valeurs s'échelonnent de 35 MPa pour un taux $E/P = 0,35$ et une porosité de 0,35 ; à 3 MPa pour un taux $E/P = 0,95$ et une porosité de 0,65. Les données de Peroglio Martynovitch¹³, suivent le même type de comportement, avec une tendance non linéaire, et présentent un léger décalage par rapport à celles de Rojo. Des données complémentaires mesurées par Spini¹⁴ avec du plâtre Molda® 3 Normal, semblent suivre la tendance établie par Peroglio Martynovitch¹⁵, avec des valeurs comprises entre $\approx 8,1$ MPa pour $E/P = 0,7$ et $\approx 4,5$ MPa pour $E/P = 0,9$.

¹² Rojo, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, op. cit., p. 156.

¹³ Betene Ebanda, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, op. cit., p. 54.

¹⁴ Spini, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, op. cit., p. 20.

¹⁵ Betene Ebanda, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, op. cit., p. 54.

Une mesure additionnelle tirée de Lopez¹⁶ s'inscrit dans cette même tendance, avec une valeur de $\approx 10,3$ MPa pour un taux E/P = 0,68 évaluée lors de tests préliminaires. Alors qu'une mesure de Coquard¹⁷ indique une valeur plus élevée de ≈ 10 MPa pour E/P = 0,82.

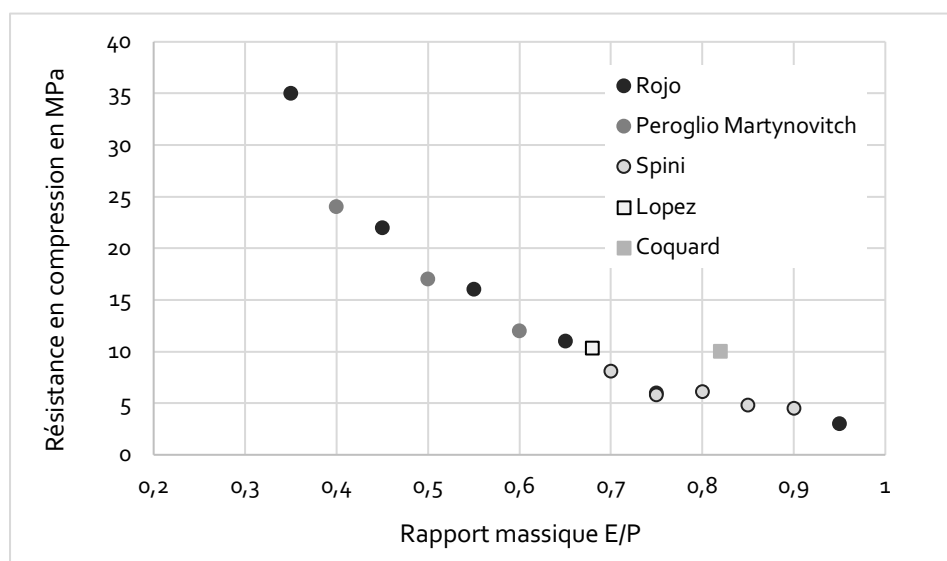


Figure 6 : données de résistance en compression d'après les références sélectionnées pour du plâtre de type hémihydrate β , illustrant la tendance de baisse de résistance lors de l'augmentation de la quantité d'eau et l'élévation du taux E/P.

Lorsque les matériaux sont testés en flexion 3 et 4 points, le regroupement des données de la littérature montre une augmentation de la résistance lorsque le plâtre est plus concentré (Fig. 7), soit un effet induit par la variation du rapport massique E/P similaire à celui décrit pour la résistance en compression (Fig. 6). Il est toutefois plus difficile de démontrer le caractère non linéaire du lien $Rf = (E/P)$. La comparaison des données collectées en flexion 3 et 4 points permet de distinguer les deux gammes de résultats obtenus selon les configurations de l'essai. Les données regroupées s'accordent et ont des résistances comprises entre $\approx 4,5$ MPa à $\approx 2,2$ MPa en flexion 3 points pour des E/P de 0,68 à 0,9 ; et $\approx 4,5$ MPa à $\approx 1,3$ MPa en flexion 4 points pour des E/P de 0,45 à 1,1.

Établie par Coquard¹⁸ en flexion 3 points, une donnée ponctuelle peut être ajoutée avec une rupture à 3,85 MPa pour un volume de 27 cm³ lorsque la porosité est de $\approx 0,55$ et le taux E/P $\approx 0,8$. En modifiant le volume de l'éprouvette, mais en conservant le même rapport massique de mélange et donc la même porosité, la rupture en flexion 3 points augmente à 4,5 MPa pour un volume de 9 cm³, et baisse à 3,65 MPa pour un volume de 75 cm³. Le décalage de valeurs par rapport à la tendance observée est très certainement conditionné par le volume et la géométrie de l'éprouvette. Le volume d'une éprouvette 4 x 4 x 16 cm étant plus élevé que ceux évalués par Coquard, il est probable que la valeur mesurée s'aligne sur la tendance représentée (Fig. 7).

¹⁶ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 183.

¹⁷ Coquard, et al., « Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster », op. cit., p. 4614.

¹⁸ *Ibid.*, p. 4615 ; COQUARD Philippe, *Résistance mécanique des plâtres secs et humides*, Thèse de doctorat, Aix-Marseille 3, 1992 voir Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op. cit., p. 32.

Spini établit une série de valeurs en testant le Molda® 3 Normal en flexion 3 points et en échelonnant les taux de gâchage. Les valeurs à la rupture sont comprises entre 4,2 et 2,2 MPa pour des taux E/P = 0,7 à 0,9¹⁹. La donnée de 4,5 MPa pour un taux E/P = 0,68 fournie par Lopez²⁰ s'inscrit bien dans cette tendance.

Meille²¹ indique une résistance maximale à la flexion 4 points de ≈ 5 MPa pour une valeur de taux de gâchage à E/P = 0,6 et une porosité de $\approx 0,45$; qui décroît à $\approx 4,2$ MPa pour E/P = 0,8 et porosité de $\approx 0,55$; puis à 2,5 Mpa pour E/P = 1 et une porosité de $\approx 0,6$.

En flexion 4 points avec des éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm, Rojo²² obtient des résistances maximales allant de 7,2 MPa à 2 MPa pour les taux E/P de 0,35 à 0,95 qui s'inscrivent et complètent les valeurs précédentes.

Péronnet²³ évalue les ruptures à 3,2 MPa en flexion 3 points, et à 3,7 MPa en flexion 4 points²⁴ pour un plâtre β gâché à E/P = 0,8. Dans les deux cas, ces données s'inscrivent parfaitement dans les tendances générales compilées et observées.

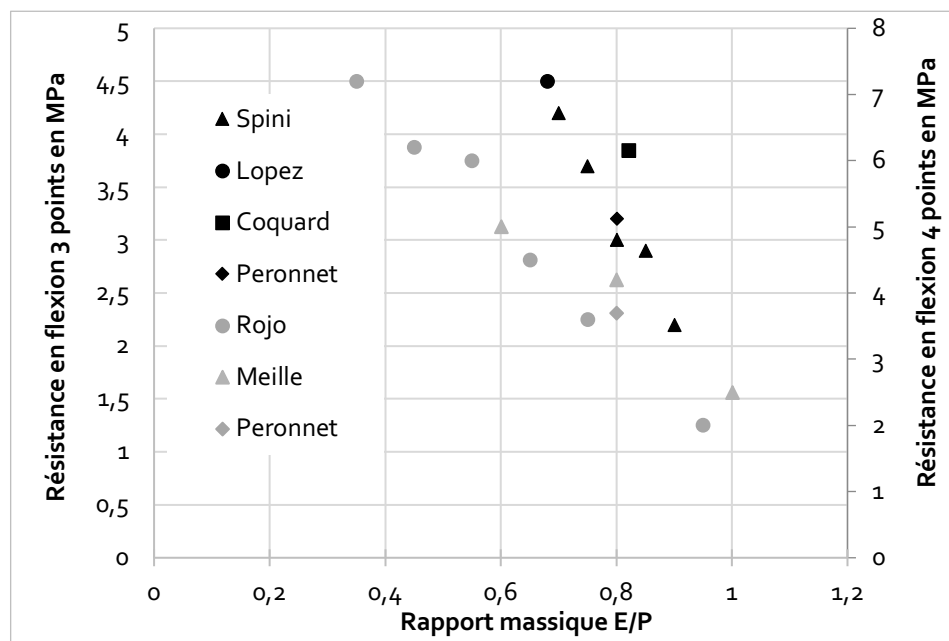


Figure 7 : données de résistances en flexion 3 points (en noir) et en flexion 4 points (en gris), selon le rapport massique E/P ; les tendances linéaires illustrent bien le lien entre la quantité d'eau, de poudre de plâtre et les variations de résistances.

¹⁹ Spini, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, op. cit., p. 16.

²⁰ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 185.

²¹ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op. cit., p. 83.

²² Rojo, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, op. cit., p. 156.

²³ PERONNET François, *Caractérisation du comportement mécanique des plâtres*, Rapport de stage, INSA Lyon, 1994 ; PERONNET François, *Étude du comportement à la rupture et des mécanismes de propagation des fissures dans les plâtres secs*, Rapport de DEA, INSA Lyon, 1996.

²⁴ *Ibid.*, voir Betene Ebanda, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, op. cit., p. 54.

Modules E

À l'instar de la tendance observée pour la résistance en compression, les modules élastiques varient selon les propriétés physiques du matériau : lorsque les corps d'épreuve sont formulés à des rapports massiques élevés, le module élastique tend à diminuer, en relation avec la structure porale plus aérée. En compilant différentes données de référence²⁵ (Fig. 8 et Fig. 9), un comportement général peut être identifié en statique et en dynamique, décrit par les modèles de Coquard²⁶ [8] et de Ramakrishnan²⁷ [9], tels que :

$$E = 27(1 - 1,15P)^{1,84} \quad [8]$$

Avec E le module élastique statique et P la porosité.

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1-P)^2}{(1+P)} \quad [9]$$

Avec E_0 le module de Young d'un polycristal de gypse ; sans porosité, $E_0 = 40,8$ GPa.

En statique, la dispersion des références est liée à la complexité de la mesure. La tendance est néanmoins distinguable avec une surestimation des résultats de la littérature par le modèle de Ramakrishnan [9], tandis qu'un meilleur ajustement est obtenu avec celui de Coquard [8] (Fig. 8).

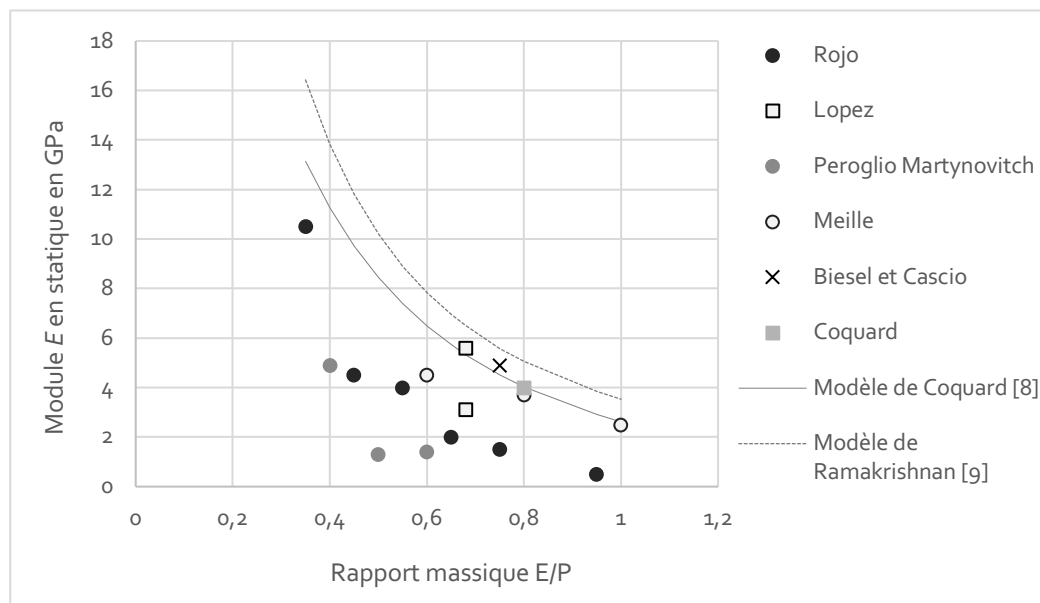


Figure 8 : représentation du module E statique d'après les données de référence.

²⁵ Coquard, « Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster », *op. cit.*, p. 4617 ; Rojo, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, *op. cit.*, p. 156 ; Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, *op. cit.*, p. 82 et p. 116 ; Biesel et Cascio, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, *op. cit.*, p. 8 ; Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, *op. cit.*, p. 313.

²⁶ Coquard, « Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster », *op. cit.*, p. 4617.

²⁷ RAMAKRISHNAN N. et ARUNACHALAM V. S., « Effective elastic moduli of porous solids », *Journal of Materials Science*, 25 / 9 (1990), p. 3930-3937.

En dynamique (Fig. 9), les valeurs sont plus cohérentes, avec une continuité notable entre les données de Meille²⁸ et celles de Chen, Sucech et Faber²⁹ et une concordance de valeur de ≈ 4 GPa pour $E/P = 1$. La tendance élastique en dynamique est représentée par une loi puissance. La valeur moyennée de Plachý³⁰ est établie à $\approx 4,5$ GPa pour un ratio $E/P = 0,71$. Les mesures de fréquence de résonance à différents moments de la cure montrent que la rigidité et la résistance du matériau augmentent au fur et à mesure du séchage, selon les trois modes d'essais : en longitudinal, en flexion et en torsion. La différence de valeurs, par rapport aux autres références, pourrait être liée à la nature du produit, constitué d'un mélange d'hémihydrate naturel et artificiel.

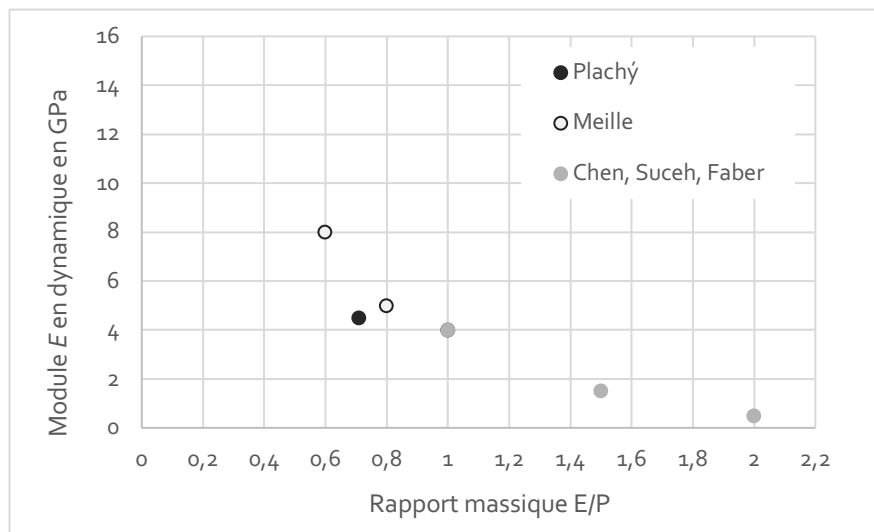


Figure 9 : représentation du module E dynamique d'après les données de référence.

Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson d'une matrice de plâtre est généralement évalué à $\nu \approx 0,3$. Dans la partie dédiée à la modélisation des modules élastiques, Meille³¹ indique une valeur de $\nu = 0,33$ également déterminée par Plachý³². Une valeur de $\nu = 0,34$ est communiquée par Betene Ebanda³³, réévaluée en considérant uniquement la matrice de plâtre sans la porosité et « homogénéisée » à $\nu_{\text{hom}} = 0,13$.

²⁸ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit. p. 83.

²⁹ Chen, *et al.*, « A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum », op. cit., p. 4450.

³⁰ PLACHÝ Tomáš, *et al.*, « Monitoring of Mechanical Properties Evolution of the Cast Gypsum », *Procedia Engineering*, 48 (2012), p. 562-567.

³¹ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit. p. 92.

³² Plachý, *et al.*, « Monitoring of Mechanical Properties Evolution of the Cast Gypsum », op. cit., p. 564.

³³ Betene Ebanda, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, op. cit., p. 174 ; SANAHUJA Julien, *Impact de la morphologie structurale sur les performances mécaniques des matériaux de construction : application au plâtre et à la pâte de ciment*, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, France, 2008.

REMARQUES

La relation entre la micro-structure et la résistance mécanique du plâtre à l'état solide est traitée dans les travaux de la RILEM³⁴, puis approfondie par Meille³⁵. Dans ces travaux, comme dans ceux déjà rapportés, l'accroissement de la porosité totale liée à la variation du rapport massique E/P, induit une réduction de la capacité de résistance des matériaux. Étudiés par Péronnet³⁶, les mécanismes de rupture semblent conditionnés par les défauts du matériau, comme les bulles d'air au diamètre important, supérieur à 400 µm, observées au MEB dans les plans de cassure des éprouvettes.

b. Effets des additifs

Afin d'optimiser les performances des matériaux, il est fréquent d'ajouter des matériaux de type charge ou liant qui modifient les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés mécaniques du plâtre. Ces additifs sont par exemple de l'anhydrite II³⁷, des fibres synthétiques³⁸, des additifs inorganiques comme de la céramique³⁹ ou de la silice⁴⁰. Dans certains cas, les propriétés mécaniques sont renforcées et dans d'autres cas, les auteurs rapportent des baisses de résistances. La nature de l'additif, les dimensions, ainsi que les proportions d'ajouts conditionnent les effets sur une matrice de plâtre. Dans cette étude, l'effet du carbonate de calcium et du dioxyde de titane sont plus particulièrement observés. Des matériaux de comparaison, comme la craie de Bologne et la colle animale, ont des usages plus restreints comme matériaux de mise en œuvre de certains artefacts (peinture) avec une localisation spécifique (école italienne), et il n'a pas été trouvé de source ni référence bibliographique portant sur les propriétés mécaniques. Les données sont donc apparentées à celles du gypse et du carbonate de calcium, dont les natures physico-chimiques sont proches.

Masses volumiques

Dans les travaux de Lopez⁴¹ des formulations de plâtre additionnées de charges radio-opaques, telles que du sulfate et du carbonate de baryum BaSO₄ et BaCO₃, de dioxyde de cérium CeO₂, de l'oxyde de zinc ZnO, et de l'oxyde d'ytterbium (III) Yb₂O₃ ont été évaluées. Ces formulations contiennent 20 %, 50 % et 75 % de charges radio-opaques en substitution. Lorsque la part de charge radio-opaque est augmentée, celle du plâtre baisse.

³⁴ MURAT Michel et FOUCAULT Michel (éd.), *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions], Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977*, RILEM Publications, 1977.

³⁵ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit.

³⁶ À propos de Péronnet, *Caractérisation du comportement mécanique des plâtres*, op.cit., et *Étude du comportement à la rupture et des mécanismes de propagation des fissures dans les plâtres secs*, op. cit., voir Meille, *ibid.*, p. 33-34.

³⁷ Murat et Foucault, *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions], Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977*, op.cit., p.383.

³⁸ *Ibid.*, p. 463.

³⁹ BELDJILALI Said, et al., « Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick », *Construction and Building Materials*, 259 (2020), p. 1-9.

⁴⁰ KONDRATIEVA Nataliia, et al., « Study of modified gypsum binder », *Construction and Building Materials*, 149 (2017), p. 535-542.

⁴¹ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit.

Dans ces conditions, la masse volumique totale augmente, avec des valeurs maximales de $\approx 1700 \text{ kg.m}^{-3}$ lors d'une substitution à 75 % par exemple avec de l'oxyde de zinc, pour $\approx 1100 \text{ kg.m}^{-3}$ pour le plâtre β seul⁴². Ces légères variations semblent dictées par la masse volumique intrinsèque des charges, qui sont pourtant largement supérieures à celle d'un plâtre β à l'état hémihydrate d'environ $\approx 2630 \text{ kg.m}^{-3}$, avec par exemple une valeur de $\approx 5600 \text{ kg.m}^{-3}$ pour l'oxyde de zinc, de $\approx 4500 \text{ kg.m}^{-3}$ pour le sulfate de baryum, ou de $\approx 4800 \text{ kg.m}^{-3}$ pour le dioxyde de cérium. Un constat similaire est fait en observant les deux formulations retenues pour approfondir les essais en conservant un rapport massique eau/poudre $\approx 0,68$ avec une substitution de 50 % de sulfate de baryum et de 50 % de dioxyde de cérium, dont les quantités suffisent pour l'identification des zones restaurées par contraste en radiographie de rayons X. Les masses volumiques de ces mélanges sont sensiblement supérieures à celle du plâtre seul⁴³ (Fig. 10).

Pourtant, une part de la poudre totale est substituée à moitié avec un matériau dont la masse volumique est très largement supérieure à celle du plâtre seul. La différence de granulométrie ou encore le phénomène de prise du plâtre sont liés à cette différence limitée d'augmentation de la masse volumique, indiquant alors que le plâtre a un rôle principal et qu'une substitution ou un apport de matière autre a un impact limité sur la masse volumique, malgré une proportion importante.

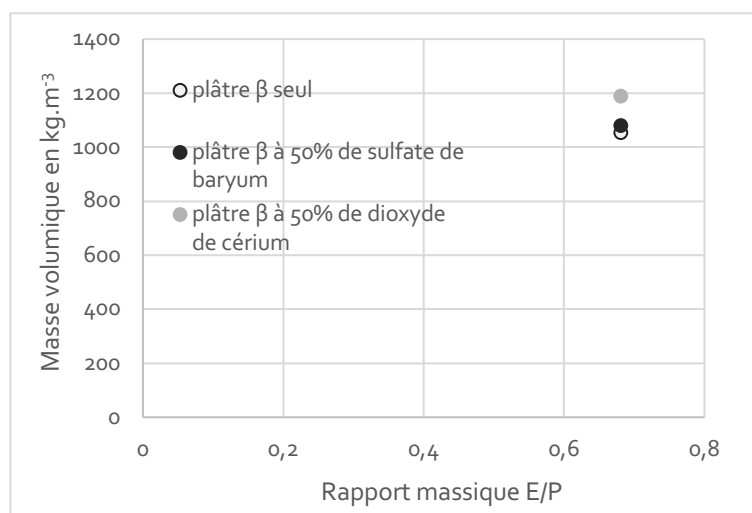


Figure 10 : représentation des masses volumiques évaluées pour le plâtre seul et en substitution à 50 % avec des charges radio-opaques de sulfate de baryum ou de dioxyde de cérium, selon un même rapport massique eau/poudre $\approx 0,68$; les valeurs sont très similaires, malgré des substitutions importantes de matière avec une charge radio-opaque dont la masse volumique intrinsèque équivaut au double de celle du plâtre seul à l'état hémihydrate ; d'après Lopez, 2016.

⁴² *Ibid.*, p. 187.

⁴³ *Ibid.*, p. 214.

L'effet du carbonate de calcium sur la masse volumique est considéré par McDonald⁴⁴, dans son étude sur le ciment de type Portland. Bien que ce liant hydraulique soit très différent du plâtre, il est intéressant de constater que les formulations chargées en substitution de 5, 10 et 15 % en masse sous les formes micro-calcite, nano-calcite et CaCO_3 amorphe ont des masses volumiques plus élevées que celle du ciment seule, évaluée à $\approx 1760 \text{ kg.m}^{-3}$. Toutefois, plus le ratio de charge substituée est élevé, plus la masse volumique tend à baisser. Il est constaté que les baisses sont plus importantes pour les mélanges avec la micro-calcite et pour le CaCO_3 amorphe, dont la masse volumique passe de $\approx 1800 \text{ kg.m}^{-3}$ à $\approx 1770 \text{ kg.m}^{-3}$ en changeant la substitution de 5 % à 15 %. Au-delà d'une substitution de 15 %, il est probable que la masse volumique totale du mélange soit inférieure à celle du ciment seul.

Résistances aux essais mécaniques

En poursuivant l'analyse des résultats de Lopez, l'effet sur les résistances en compression et en flexion 3 points peut être constaté pour les formulations avec des substitutions de plâtre par des parts importantes de charges radio-opaques.

Dans l'étude de Lopez, il est montré que les apports de charges radio-opaques, par substitution de plâtre, tendent à abaisser les résistances maximales en compression (Fig. 11). Les valeurs mesurées sont plus basses que celles du plâtre seul, et sont jugées insuffisantes pour pallier les contraintes auxquelles le cadre à restaurer est soumis⁴⁵.

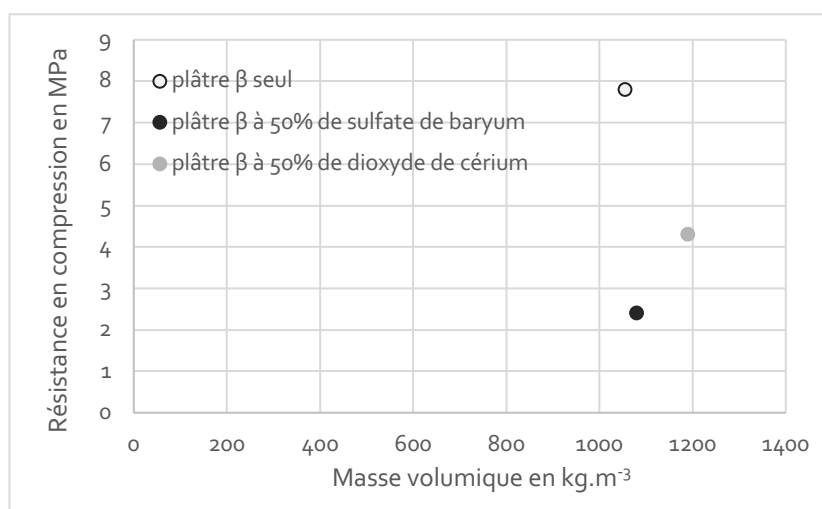


Figure 11 : valeurs de rupture à la compression pour des formulations de plâtre Molda® 3 Normal, avec 50 % de charges radio-opaques, éprouvettes cubiques ; d'après Lopez, 2016.

⁴⁴ MCDONALD Lewis J., *et al.*, « The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material », *Journal of Cleaner Production*, 338 (2022), p. 1-12.

⁴⁵ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, *op. cit.*, p. 221.

Spini fait le même constat d'une baisse de résistance à la compression avec les formulations comprenant 30 % de sulfate de baryum ou de carbonate de calcium, par rapport à un plâtre β seul, donnant pour exemple une valeur de rupture à 2,8 MPa pour le mélange chargé en BaSO_4 en comparaison d'un plâtre seul à $E/P = 0,75$ et à valeur de rupture 5,8 MPa⁴⁶.

Avec des éprouvettes cubiques de 5 x 5 x 5 cm, McDonald constate qu'une substitution de 5 % de ciment par du carbonate de calcium amorphe permet d'obtenir une résistance maximale plus élevée que celle du ciment seul. Sans additif, le ciment a une résistance maximale de ≈ 45 MPa, alors qu'avec 5 % de CaCO_3 la valeur s'élève à ≈ 52 MPa. À 10 %, la valeur est de ≈ 43 MPa et à 15 % la valeur est de ≈ 40 MPa⁴⁷.

Dans l'étude de Lucas⁴⁸, les propriétés mécaniques de mortiers de plâtre et de sable sont évaluées avec une addition de dioxyde de titane, sous forme de nanoparticules de taille moyenne de 21 nm, et à différentes concentrations de 0,5 ; 1 ; 2,5 et 5 % en masse. Une baisse significative des résistances du mélange plâtre-sable en compression est constatée avec l'augmentation de la concentration en dioxyde de titane (Fig. 12)⁴⁹.

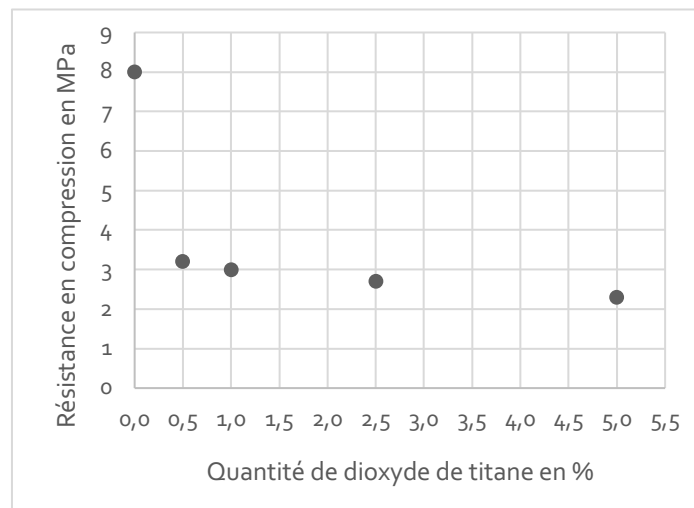


Figure 12 : données de résistances maximales en compression d'une formulation de plâtre-sable, selon le pourcentage de dioxyde de titane présent ; d'après Lucas, 2013.

Alors qu'un faible effet de renfort est noté par Senff⁵⁰ lors de l'addition de nanoparticules de dioxyde de titane dans du ciment Portland ordinaire, en complément d'un superplastifiant. Sans additif, la résistance en compression du mélange ciment-superplastifiant est évaluée à $\approx 46,5-48,5$ MPa, alors qu'avec l'addition de TiO_2 à 1,3 % en masse les valeurs augmentent sensiblement à $\approx 47-49,5$ MPa⁵¹.

⁴⁶ Spini, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, op. cit., p. 22.

⁴⁷ McDonald, et al., « The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material », op. cit., p. 41.

⁴⁸ LUCAS Sandra S., et al., « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », *Cement and Concrete Research*, 43 (2013), p. 112-120.

⁴⁹ *Ibid.*, p. 117.

⁵⁰ SENFF Luciano, et al., « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *Materials Science and Engineering: A*, 532 (2012), p. 354-361.

⁵¹ *Ibid.*, p. 360.

En flexion 3 points avec des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm, les formulations étudiées par Lopez montrent aussi une baisse notable de la résistance, avec un écart similaire à celui des essais en compression (Fig. 13). Les valeurs de $\approx 0,77$ MPa pour le mélange au sulfate de baryum, et de $\approx 1,31$ MPa pour le dioxyde de cérium sont jugées trop basses par rapport aux valeurs de références et au matériau original⁵².

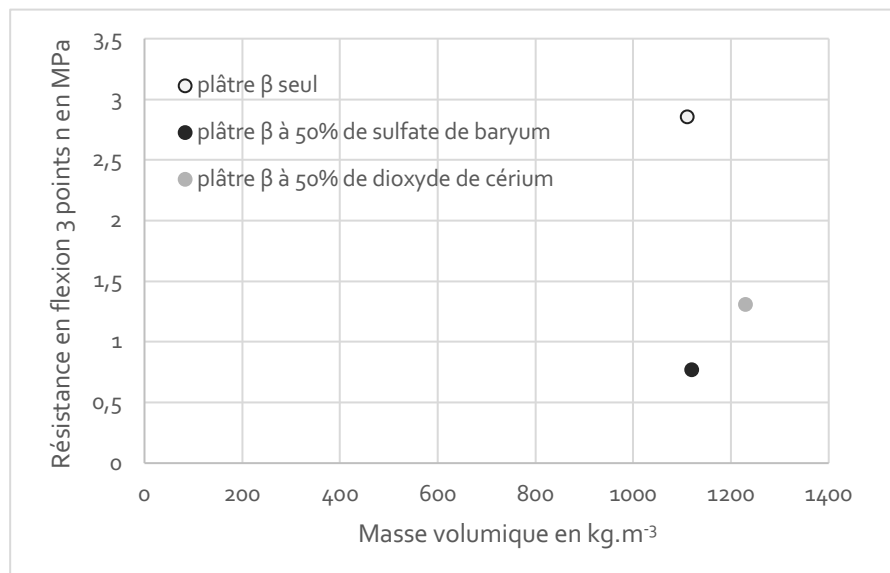


Figure 13 : valeurs de rupture à la flexion 3 points pour des formulations de plâtre Molda® 3 Normal, avec 50 % de charges radio-opaques ; d'après Lopez, 2016.

En flexion 3 points, la tendance constatée par Spini concorde avec les conclusions de Lopez. Le plâtre β seul à E/P = 0,75 a une rupture évaluée à $\approx 3,7$ MPa, qui décroît à $\approx 1,75$ MPa avec une substitution de 25 % en masse de carbonate de calcium, et à $\approx 2,1$ MPa avec 25 % en masse de sulfate de baryum⁵³.

À l'inverse, selon McDonald, l'effet du carbonate de calcium en flexion 3 points dans un mortier de ciment tend à améliorer la résistance, avec des valeurs passant de $\approx 8,8$ MPa pour le ciment seul, à ≈ 9 MPa avec une substitution de 5 % et de 15 % de CaCO₃ amorphe, et à $\approx 9,2$ MPa⁵⁴ pour une substitution de 10 %. Les formes de nano-calcite et de micro-calcite ont des valeurs comprises entre ≈ 8 et ≈ 9 MPa, avec une élévation de la résistance selon l'augmentation du taux d'additif substitué⁵⁵.

Pour Lucas, une baisse significative des résistances du mélange plâtre-sable est aussi constatée en flexion lors de la présence de TiO₂, et selon la quantité d'additif (Fig. 14)⁵⁶.

⁵² Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 221.

⁵³ Spini, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, op. cit., p. 18.

⁵⁴ McDonald, et al., « The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material », op. cit., p. 44.

⁵⁵ *Ibid.*, p. 43.

⁵⁶ Lucas, et al., « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », op. cit., p. 117.

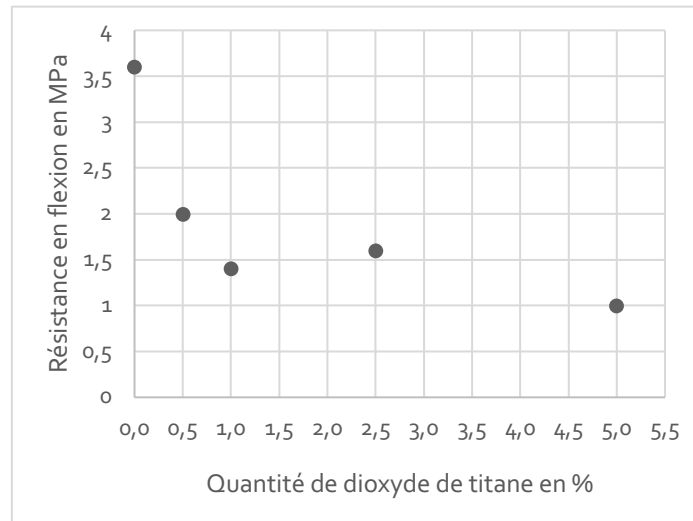


Figure 14 : données de résistances maximales en flexion d'une formulation de plâtre-sable, selon le pourcentage de dioxyde de titane présent ; d'après Lucas, 2013.

Modules E

Le module de Young, ou module élastique statique, noté E , est évalué par Lopez⁵⁷ en fonction des substitutions de charges radio-opaques et, une fois encore, la même tendance de baisse de valeur est observée, avec un profil similaire à ceux de la compression ou de la flexion 3 points (Fig. 15).

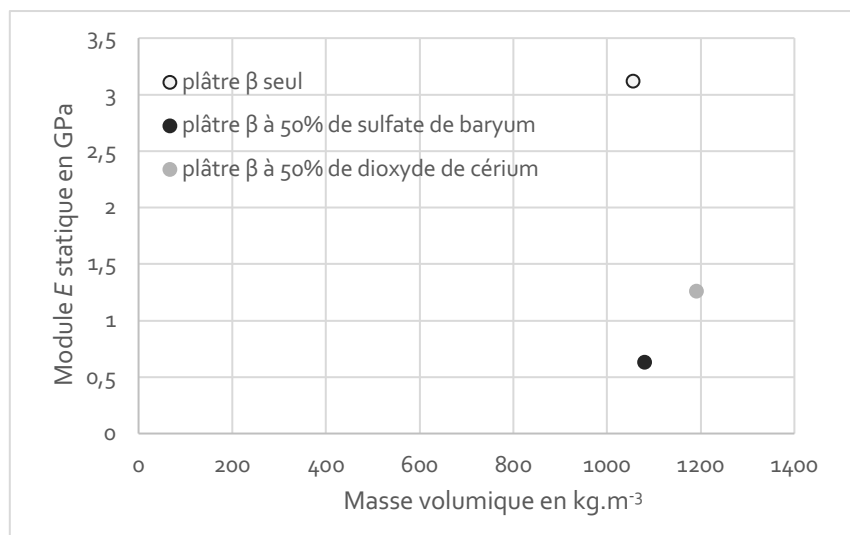


Figure 15 : valeurs de module E statique mesurées pour des formulations de plâtre Molda® 3 Normal, avec 50 % de charges radio-opaques ; d'après Lopez, 2016.

⁵⁷ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 213 et p. 313.

Lors de l'ajout de faibles quantités d'additifs divers, d'autres études montrent des tendances à l'augmentation du module élastique.

Dans les travaux de thèse de Martias⁵⁸, le plâtre Extha® et des additifs divers tels qu'un retardant et un fluidifiant, associés à des renforts thermiques constitués de charges de mica ou de vermiculite sont analysés dans un contexte spécifique d'étude des propriétés de résistance au feu. Sans considérer ces aspects loin du sujet décrit ici, il est constaté que pour un taux E/P = 0,5 les formulations adjuvantées ont des modules E compris entre ≈ 4 et ≈ 7 GPa⁵⁹, et présentent donc des valeurs plutôt élevées.

Des mesures d'élasticité dynamique, notée E dynamique, faites par Chen, Sucech et Faber avec du plâtre β et différents additifs sont faites par mesure de vitesse de propagation d'ondes. Le plâtre préparé avec un accélérateur composé de gypse broyé, à taux E/P 1,5 et porosité de 73 % voit une légère augmentation du module élastique dynamique, avec l'ajout progressif de l'additif. Le plâtre seul, dont le module est mesuré à environ $\approx 1,25$ GPa augmente à environ ≈ 2 GPa, avec une addition de $0,8 \text{ mg.g}^{-1}$ d'additif, selon une courbe exponentielle⁶⁰.

Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson semble être modifié par la présence d'additifs dans le plâtre. Martias⁶¹ indique que les matrices de plâtre, sans charge, ont pour valeur $\nu = 0,2$ soit une valeur plus basse que celles communiquées par d'autres auteurs pour le plâtre seul, plutôt évaluées à $\nu = 0,33$. Il est possible que cette différence de valeur soit liée à la présence d'agents retardants et fluidifiants dans le plâtre mis en œuvre par Martias⁶².

REMARQUES

Un constat général laisse penser que l'emploi d'additifs, en ajout ou en substitution, dans un plâtre de type β , ne semble pas affecter les propriétés physiques comme la masse volumique, mais cela conditionne très largement les propriétés mécaniques. Il est généralement constaté une baisse des résistances maximales en compression et en flexion 3 points ou 4 points, ainsi qu'une baisse des modules élastiques E statique et E dynamique. Ces baisses de valeurs, par rapport aux valeurs évaluées pour différents rapports massiques, semblent directement liées à la quantité de substitution ou d'ajout d'additifs. Par exemple, les données de Lopez montrent qu'à masses volumiques supérieures ou égales à celle du plâtre seul, les résistances mécaniques en compression et en flexion 3 points, ainsi que les modules E statiques sont inférieurs, avec des valeurs plus ou moins satisfaisantes pour un usage en comblement de lacune en conservation-restauration. Des additifs comme le carbonate de calcium, le dioxyde de titane, et les charges radio-opaques variées tendent à affaiblir les propriétés mécaniques du plâtre.

⁵⁸ MARTIAS Céline, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, Thèse de doctorat, Toulon, 2011.

⁵⁹ *Ibid.*, p. 85-87.

⁶⁰ Chen, *et al.*, « A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum », *op. cit.*, p. 4444-4453.

⁶¹ Martias, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, *op. cit.*, p. 202.

⁶² *Ibid.*, p. 152-153.

En revanche, d'autres additifs présentés, comme le gypse broyé (sulfate de calcium dihydraté), les micas ou la vermiculite⁶³, semblent renforcer les propriétés mécaniques.

En observant les effets de certains additifs sur le ciment, autre matériau de type matrice liante, et d'après les références mentionnées, l'usage de CaCO₃ ou TiO₂ conditionne un comportement différent avec un maintien voire un renfort des propriétés mécaniques.

La nature du matériau constitutif de la matrice est donc primordiale dans les propriétés mécaniques d'une quelconque formulation. La microstructure et la porosité de cette matrice semblent directement liées aux effets sur les propriétés mécaniques à l'état solide.

Ainsi, un ajout de TiO₂, même de faible quantité, impliquerait un changement de la microstructure et de la distribution des tailles de pores, rendant la matière finale plus fragile⁶⁴. D'après Martias, lorsque les dimensions de tailles de grains sont trop petites, avec un diamètre de 10 µm, ou trop grandes, avec des mesures supérieures à 500 µm, des baisses du module de Young et donc de la résistance mécanique sont induites⁶⁵.

L'étude de Prakaypun et Jinawath⁶⁶ compare les effets de l'adjuvantation, avec des retardants, comme l'acide citrique, la méthylcellulose, l'acide acétique, le tétraborate de sodium, et le sulfate d'aluminium et de potassium (dodécahydrate) ; des accélérateurs de prises, comme le sulfate de calcium dihydraté, le sulfate de potassium, et l'acide sulfurique. Les additifs modifient la forme des cristaux : ils perdent leur morphologie aciculaire et deviennent tabulaires lorsque la concentration en additifs augmente. Cette modification impacte directement les propriétés mécaniques, évaluées inférieures à celles des plâtres non adjuvantés. Un seul additif de l'étude renforce les propriétés mécaniques. Il s'agit également du sulfate de calcium dihydraté, ou gypse, dont les résultats concordent avec ceux cités précédemment. Pour Chen, Sucech et Faber⁶⁷ le module de Young augmente sensiblement quand la microstructure est ordonnée et homogène, améliorant la résistance.

Différents effets des additifs sont donc rapportés : certains améliorent les performances, par optimisation du réseau cristallin, alors que d'autres tendent à baisser les propriétés mécaniques, notamment par leur positionnement inter-cristallin créant des zones de rupture préférentielles qui s'ajoutent à celles du plâtre seul. Pour pallier cet effet fragilisant, des fibres peuvent être incorporées dans la formulation afin de créer des ancrages dans la matrice. À titre informatif, une sélection d'études et de résultats est brièvement présentée ci-après.

⁶³ *Ibid.*

⁶⁴ Lucas, *et al.*, « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », *op. cit.*, p. 116.

⁶⁵ Martias, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie.*, *op. cit.*, p. 87.

⁶⁶ PRAKAYPUN Wichit et JINAWATH Supatra, « Comparative effect of additives on the mechanical properties of plasters made from flue-gas desulfurized and natural gypsums », *Materials and Structures*, 36 / 1 (2003), p. 51-58.

⁶⁷ Chen, *et al.*, « A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum », *op. cit.*, p. 4444-4453.

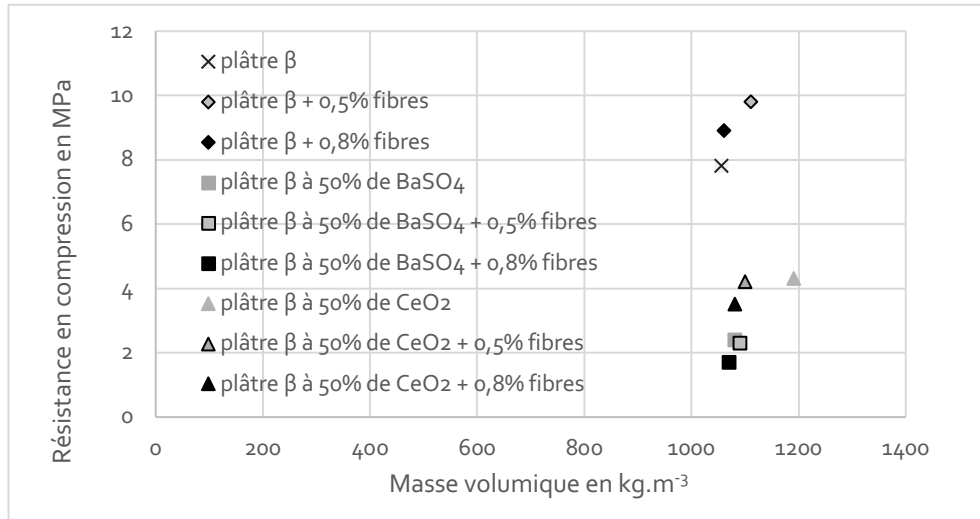
c. Effets du fibrage

Le cas particulier du fibrage est présenté car il a été introduit dans les études de Lopez et de Spini, à l'origine des travaux de cette thèse. Les résultats et les données participent à la compréhension des comportements mécaniques du plâtre.

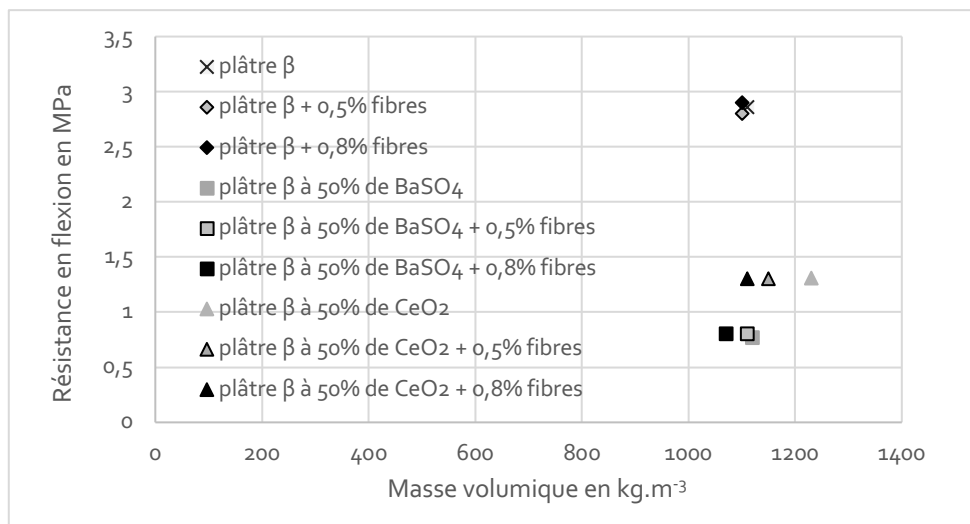
Dans le cas de Lopez⁶⁸, des fibres ont été testées pour compenser la perte de résistance mécanique des formulations chargées à 50 % de sulfate de baryum ou d'oxyde de cérium. Pour cela, des fibres de verre (composition majoritaire de silice) de 6 mm de longueur et de diamètre compris entre 15 et 20 μm ont été testées en addition de 0,5 et 0,8 % en masse. Les renforts mécaniques par ajout de fibres se sont révélés insuffisants pour compenser la perte de propriétés mécaniques dans un mélange marqué par des charges radio-opaques à 50 % et dans ces conditions d'essais (Fig. 16 a, b et c). Cependant l'apport de fibres de verre au plâtre seul, notamment à 0,5 %, montre des améliorations des résistances mécaniques en compression (Fig. 16 a) et pour le module E (Fig. 16 c), ainsi qu'un maintien des valeurs en flexion (Fig. 16 b). Ce mécanisme est interprété selon les profils de rupture des éprouvettes après essai. Contrairement aux éprouvettes de plâtre seul, présentant une rupture nette, caractéristique du type fragile, les formulations fibrées montrent une rupture similaire à de l'écroutissage ou à un plateau plastique. Les éprouvettes se fissurent mais les fibres créent un maintien, ou un ancrage mécanique, qui permet de retarder la rupture totale. Une formulation de plâtre et de fibres de verre, sans charge radio-opaque, a donc été utilisée pour les comblements des lacunes aux dimensions importantes⁶⁹.

⁶⁸ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 222-227.

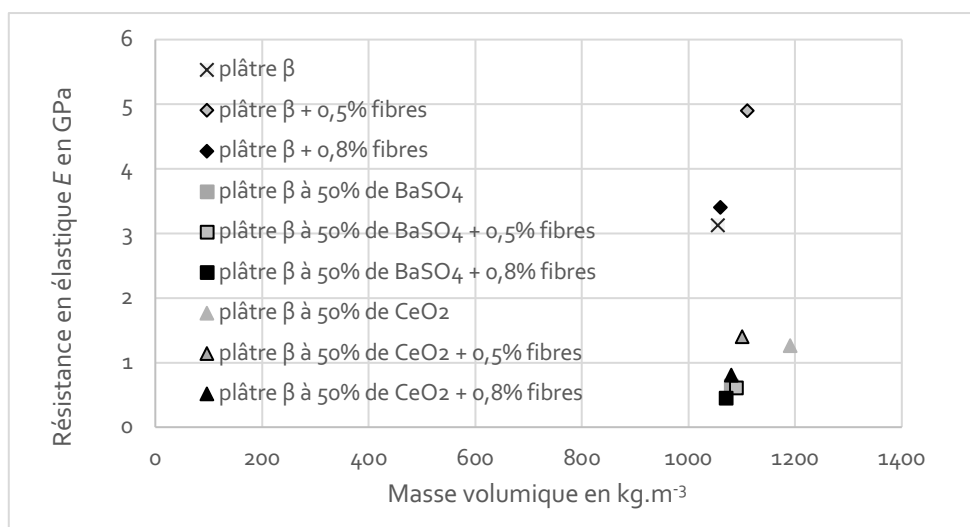
⁶⁹ *Ibid.*, p. 224.



a



b



c

Figure 16 : résistances en compression, en flexion 3 points, et du module élastique E représentant les valeurs mesurées pour les formulations de plâtre, charges radio-opaques et fibres ; d'après les données de Lopez, 2016.

En conservant les mêmes formulations que Lopez, Spini⁷⁰ a poursuivi l'étude avec différents types de fibres telles que des fibres linéaires de lin et des fibres multifibrées en polypropylène (6 et 12 mm de longueur et 40 µm de diamètre). En compression, le fibrage tend à abaisser légèrement la contrainte maximale, particulièrement lorsque les fibres sont longues et plus concentrées. Les mélanges à 0,5 % et longueur de fibres de 6 mm donnent des résultats variables plus difficiles à interpréter, selon le taux de gâchage. Cet abaissement des valeurs est analysé comme une conséquence de l'agglomération des fibres dans la matrice liante, provoquant alors des défauts et des sites de rupture du réseau cristallin. En flexion, les fibrages en multifibrées de polypropylène de 6 mm ou de 12 mm, à 0,5 % ou à 0,8 %, ne semblent pas influencer la résistance dans les mélanges avec le plâtre β et des taux E/P de 0,7 à 0,9. Les valeurs de résistances maximales sont très similaires à celles du plâtre seul. Pour ce type de sollicitation, l'effet de défaut induit par la présence de fibres semble être compensé par la création d'ancrage mécanique. En testant des éprouvettes de plâtre α, il est constaté un effet de contrainte résiduelle, comme évoqué chez Lopez, permettant de retarder ou de limiter la rupture. Cet effet est plus important lorsque de longues fibres multifibrées sont utilisées, comme celles en polypropylène de 12 mm, et à concentration plus élevée de 0,8 %. Plus généralement, les valeurs de résistances mécaniques mesurées par Spini sont relativement identiques au plâtre seul, et que des valeurs inférieures au plâtre seul ne sont pas nécessairement à exclure en conservation-restauration puisqu'en cas de contrainte il est essentiel que le matériau de comblement cède préférentiellement au matériau original de l'artefact.

L'étude de Khenfer et Morlier⁷¹ teste des éprouvettes de plâtre additionné de fibres de cellulose et de Keratine®, un retardateur de prise ajouté à 3 % en masse. L'ensemble est mis en œuvre avec un pressage imposé, de façon à réduire la porosité du matériau. Des essais en flexion et les valeurs de module de Young sont calculées. Le temps de pressage augmente les valeurs du module E ainsi que les résistances en flexion et à la rupture. La résistance maximale en flexion est de 38,53 MPa et le module E est mesuré à 9,87 GPa. Ces valeurs, très élevées par rapport aux références citées précédemment, sont très certainement liées au processus de pressage imposé, qui condense la matière et réduit drastiquement le nombre de défauts naturels du matériau. Le résultat est confirmé par l'observation des microstructures et des modes de rupture des fibres par casse ou déchaussement (Fig. 17). Le plâtre obtenu par pressage est très compact et se fracture en fragments et amas autour des fibres ; la cohésion de la matrice évoque celles obtenues avec des formulations de plâtre non pressées mais à taux de gâchage très concentrés en poudre, comme E/P = 0,45 (Fig. 18).

⁷⁰ Spini, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, op. cit., p. 15-17 et p. 19-20.

⁷¹ KHENFER Mohamed-Mouldi et MORLIER Pierre, « Plâtres renforcés de fibres cellulosiques », *Materials and Structures*, 32 / 1 (1999), p. 52-58.



Figure 17 : plan de rupture d'une formulation de plâtre (E/P non renseigné) additionnée de fibres de cellulose, avec pressage imposé, MEB, échelle 100 μm (grandissement estimé x 200) ; tirée de Khenfer et Morlier, 1999.

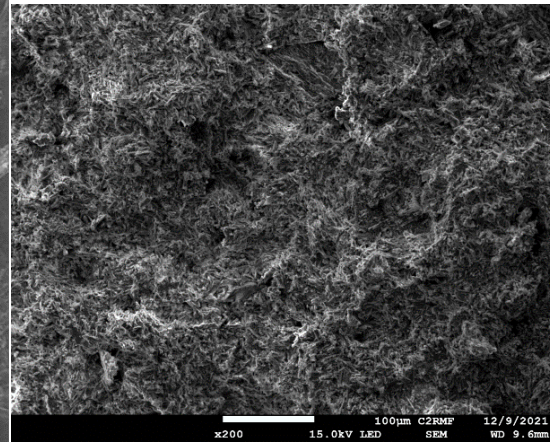


Figure 18 : plâtre Molda® 3 Normal à E/P = 0,45, MEB mode LED, x 200, montrant une matrice très compacte, similaire à celle-ci-contre, en préparation normale de gâchage et de coulée sans pressage imposé.

Les travaux de thèse de Betene Ebanda évaluent l'effet d'ajout de fibres végétales (sisal et liane *rhectophyllum camerunense*) dans une matrice de plâtre β , de type plâtre à modeler, gâché à E/P = 1. L'ajout de fibres améliore sensiblement le module E et très grandement la résistance à la traction et l'allongement à la rupture⁷². En flexion, les résultats sont plus mitigés, très certainement liés aux effets possibles des additions de fibrage, à savoir l'effet d'ancrage mécanique qui améliore la résistance, mais aussi l'effet d'agglomération des fibres et de défauts dans la matrice qui abaisse donc la résistance⁷³. Le module E mesuré en parallèle des essais en flexion ne semble pas influencé par l'ajout de fibre. Au contraire, une légère baisse des valeurs est observée par rapport à celles du plâtre seul.

REMARQUES

Les effets du fibrage semblent donc très variables, selon la formulation de plâtre, la quantité de fibres ainsi que leurs propriétés physiques intrinsèques (longueurs, diamètres, formes, ou assemblages). L'effet d'amélioration des propriétés mécaniques semble essentiellement lié à l'ancrage mécanique, qui permet de retarder la rupture du matériau. Comme évoqué par Lopez dans le cas d'une réalisation de pièce moulée pour un comblement, le fibrage ne doit pas impacter la dureté du matériau ni affleurer la surface visible du comblement. L'inclusion de ce type de matériau peut toutefois occasionner des défauts dans la matrice de plâtre et conditionner des ruptures non maîtrisées à des seuils difficilement évaluables.

⁷² Betene Ebanda, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, op.cit., p. 125.

⁷³ *Ibid.*, p. 126.

Référence et formulation		Masse volumique en kg.m ³	Porosité
Biesel et Cascio (1984)	Plâtre original E/P ≈ 0,75	1020	-
Coquard (1992 et 1994)	Plâtre β à différents E/P	-	0,25 0,45 0,525 0,55 0,65
	Plâtre β E/P ≈ 0,82	-	0,58
Péronnet (1994 et 1996)	Plâtre β, E/P = 0,8	-	-
Meille (2001)	Plâtre β E/P = 0,6 E/P = 0,8 E/P = 1	-	0,45 0,55 0,6
	Plâtre β à différents E/P	-	0,25 0,65
Peroglio Martynovitch (2008)	Plâtre β E/P = 0,4 E/P = 0,5 E/P = 0,6	1400 1300 1200	-
Chen, Suceh, Faber (2010)	Plâtre β E/P = 1 E/P = 1,5 E/P = 2	-	0,64 0,73 0,78
Martias (2011)	Extha®+ additifs E/P = 0,5	-	0,42 à 0,44
Betene Ebanda (2012)	Plâtre β	-	-
Plachý (2012)	Plâtre β E/P = 0,71	-	-
Senff (2012)	Ciment et additif	-	-
	+ TiO ₂ à 1,3 %	-	-
Rojo (2013)	Extha® E/P = 0,35	1476	0,35
	E/P = 0,45	1311	0,42
	E/P = 0,55	1216	0,47
	E/P = 0,65	1087	0,53
	E/P = 0,75	986	0,57
	E/P = 0,95	854	0,65
Lucas (2013)	Plâtre + sable	-	-
	+ TiO ₂ à 0,5 %	-	-
	1 %	-	-
	2,5 % 5 %	-	-
Lopez (2016)	Molda® 3 Normal E/P = 0,68 Selon géométrie	1260 1110 1055 1090	0,45
	+ charges radio-opaques à 50 %	1050 à 1230	-
Spini (2017)	Molda® 3 Normal E/P = 0,7 E/P = 0,75 E/P = 0,8 E/P = 0,85 E/P = 0,9	1100 050 1000 950 900	-
	E/P = 0,75 à 25-30 % charges radio-opaques ou CaCO ₃	-	-
	Ciment	1760	-
McDonald (2022)	+ CaCO ₃ à	-	-
	5 %	1880	-
	10 % 15 %	- 1770	-

Tableau 1 :

Contrainte maximale en compression en MPa	Contrainte maximale en flexion en MPa		Module élastique en GPa		Coefficient de Poisson
	3 points	4 points	statique	dynamique	
-	-	-	4,9 à 9,8	-	-
-	- 4,93 3,85 2,81	-	15 6,7 5,7 4 1,9	-	-
10	3,85	-	-	-	-
-	3,2	3,7	-	-	-
-	-	5 4,2 2,5	4,5 3,7 2,5	8 5 4	0,33
-	-	10 1	-	-	-
24 17 12	-	-	4,9 1,34 1,4	-	-
-	-	-	-	4 1,25 0,5	-
-	-	-	-	4 à 7	0,2
-	-	-	-	-	0,34 et 0,13
-	-	-	-	4,5	0,33
46,5 à 48,5	-	-	-	-	-
47 à 49,5	-	-	-	-	-
35 22 16 11 6 3	-	7,2 6,2 6 4,5 3,6 2	10,5 4,5 4 2 1,5 0,5	-	-
8	3,6		-	-	-
3,2 3 2,7 2,3	2 1,4 1,6 1		-	-	-
10,3 - 7,8 2,7	4,5 2,86 - -	-	5,6 - 3,12 -	-	-
2,4 à 4,3	0,77 à 1,31	-	0,63 à 1,26	-	-
8,1 5,8 6,1 4,8 4,5	4,2 3,7 3 2,9 2,2	-	-	-	-
2,8	1,75 à 2,1	-	-	-	-
45	8,8	-	-	-	-
52 43 40	9 9,2 9	-	-	-	-

synthèse des données de référence, valeurs arrondies.

3. Apports en conservation-restauration

Les caractéristiques des matériaux et leurs propriétés à l'état solide sont nécessaires pour mieux connaître les matériaux originaux et ceux des traitements de conservation-restauration, afin d'anticiper les comportements mécaniques et d'assurer la compatibilité et l'innocuité de l'intervention.

a. Buts de l'étude

L'état solide représente à la fois un moment de mise en œuvre (par exemple par l'emploi d'une pièce moulée à part qui est rapportée et collée), qui est temporaire et pendant lequel le matériau peut être modifié et ajusté (par retaille de la pièce). Il représente aussi un état permanent, définitif, qui correspond à l'après traitement de comblement, pendant lequel il n'y a pas d'intervention. Cet état doit donc être durable et compatible, sans modifier ou altérer le matériau original ou l'artefact. Selon les besoins en conservation-restauration, d'une intervention de surface à une intervention structurelle conséquente (Fig. 19 à 22), il est important de connaître et de maîtriser les matériaux afin de sélectionner les plus adaptés et ainsi de s'assurer d'un confort de travail lors de la mise en œuvre du comblement, et ensuite de garantir un bon vieillissement de l'intervention. Pour cela, les propriétés mécaniques et les caractéristiques à l'état solide peuvent être approfondies en mesurant les domaines élastiques ainsi que les résistances maximales aux déformations de flexion et de compression des types de formulations.



Figure 19 : exemple de comblement de petite dimension sur le bord du casque d'une figure d'Hermès de la gypsothèque (Gy 0185),
©Musée du Louvre, J. Robin Dupire.



Figure 20 : exemple de comblements structurels importants (en blanc) sur la terrasse du Molosse de la gypsothèque (Gy 0236),
©Musée du Louvre, J. Robin Dupire.



Figure 21 : exemple d'un comblement esthétique et figuratif sur le cadre du tableau R.F. 1659, ©Musée du Louvre, J. Robin Dupire.



Figure 22 : exemple d'un comblement structural sur le dessus de l'ornement de l'angle du cadre du tableau R.F. 1447, ©Musée du Louvre, J. Robin Dupire.

La connaissance des gammes de résistance maximale est particulièrement utile puisqu'il est nécessaire dans la plupart des cas d'employer un matériau de conservation ayant des propriétés de résistances inférieures à celles du matériau original, afin d'éviter des phénomènes de rupture dans le substrat original ou à l'interface de la zone restaurée, mais plutôt idéalement dans le matériau de comblement. Les résistances maximales, en compression et en flexion 4 points, servent également à choisir un matériau suffisamment résistant pour assurer un rôle porteur ou de soutien dans le cas d'un comblement sur un socle ou une terrasse par exemple (Fig. 20), ou dans les angles des cadres (Fig. 22), ou encore dans le cas d'un comblement en saillie et en porte-à-faux. Le module élastique permet aussi de vérifier la compatibilité entre le comblement et le matériau original, afin d'éviter une altération de la zone restaurée ou de l'artefact, en sélectionnant un matériau au module E équivalent ou inférieur au matériau original. L'analyse des différentes formulations permet également de proposer des correspondances de valeurs ou des gammes d'usages, en faisant varier la composition du comblement ou en intégrant un élément marqueur ou de distinction. Pour cela, des matériaux doivent être formulés et des éprouvettes mises en forme, apparentées aux matériaux originaux et à ceux de restauration, permettant de mener des tests invasifs et destructifs, qui ne peuvent donc pas être effectués sur des artefacts originaux.

REMARQUES

Une observation préalable du plâtre original ou du matériau constitutif de l'artefact peut aider à estimer une partie des propriétés mécaniques et assister la sélection d'une formulation de comblement adaptée.

b. Estimations des propriétés selon les aspects visuels

Lors de la mise en œuvre, les mesures du rapport massique eau/plâtre, noté E/P, traduisent les propriétés mécaniques et micro-structurelles spécifiques. Mais généralement le taux précis n'est pas connu pour les artefacts muséaux ; il faut plutôt admettre un taux approximatif et usuel, comme le gâchage à fleur, qui permet d'obtenir un plâtre β au taux entre 0,6 et à 0,8 ou à rapport E/P \approx 0,75 considéré idéal pour le moulage en statuaire⁷⁴. En changeant les proportions et en présence d'additifs, les critères visuels peuvent changer. Par exemple, la texture peut être cohésive et très compacte, avec une porosité apparente qui semble faible (Fig. 23), granuleuse, poudreuse, ou peu cohésive avec de nombreuses cavités indiquant une porosité apparente élevée (Fig. 24). La différence de couleur, plus blanche dans le cas d'ajout de carbonate de calcium, la densification de la matrice, ou encore un type de plan de cassure plus ou moins net (Fig. 25 et 26) sont d'autres indicateurs visuels qui aident à l'estimation des propriétés mécaniques à l'état solide, pour estimer le matériau original, mais également pour identifier un ancien comblement. Enfin, cela permet de sélectionner les formulations de comblement les plus adaptées, en fonction des besoins établis (Tabl. 2).



Figure 23 : éprouvette de plâtre Molda® 3 Normal, E/P = 0,45.

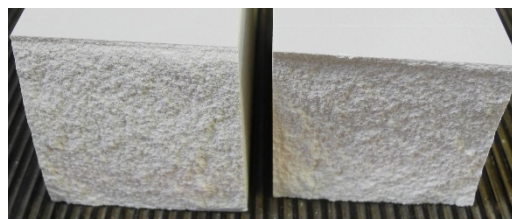


Figure 24 : éprouvette de plâtre Molda® 3 Normal, E/P = 0,95.



Figure 25 : éprouvette de plâtre Molda® 3 Normal, E/P = 0,9 et carbonate de calcium, ratio 1-1,5.



Figure 26 : éprouvette de plâtre Molda® 3 Normal, E/P = 1,5 ; carbonate de calcium, ratio 1-2 ; 2 % de dioxyde de titane.

Aspect et mise en œuvre	Critères
Aéré (par application <i>in situ</i>)	Résistance inférieure car zones fragiles, sans besoin de renfort structurel, comblement de petite dimension, rôle esthétique, de surface.
Dense (par application <i>in situ</i> , par modelage, par tirage à part)	Rôle structurel, grandes dimensions, élément d'ornement, figuratif ou peu visible, zone saine, peu sensible à l'apport d'eau, effet illusionniste ou minimaliste.

Tableau 2 : indications des aspects à l'état solide et des critères techniques pour le choix d'un matériau de comblement.

⁷⁴ Biesel et Cascio, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, op. cit., p. 7.

II. Méthode

1. Présentation générale

Les matériaux de l'étude à l'état solide sont présentés plus en détails aux chapitres précédents, selon leurs aspects micro-structuraux, et à l'état fluide. Ils comprennent des séries de deux plâtres β à taux de gâchage variés ; des formulations additionnées de carbonate de calcium, à taux E/P et ratio plâtre- CaCO_3 divers ; une formulation additionnée de dioxyde de titane.

a. Protocole expérimental

Dans cette étude, les matériaux et les formulations ont été caractérisés à l'état solide selon les valeurs de masse volumique, les comportements sous contrainte et selon les résistances maximales à la rupture, les modules élastiques statiques et dynamiques, ainsi que les coefficients de Poisson.

Trois types d'essais ont été retenus pour évaluer les propriétés mécaniques à l'état solide (Fig. 27) : en compression, en flexion 4 points, et par des mesures de fréquence de résonance ou vitesse de propagation des ondes.

- Les essais de compression et de flexion 4 points indiquent les comportements des matériaux ainsi que les résistances maximales mesurées à la rupture. Le lien fonctionnel entre les contraintes maximales de flexion 4 points et de compression, calculées à partir des valeurs de rupture mesurées, peut être observé pour vérifier l'exactitude des valeurs.
- En compression, certaines éprouvettes ont également été équipées de jauges de déformation bilatérale permettant l'évaluation du module de Young ou module élastique statique, ainsi que le coefficient de Poisson.
- Les mesures de fréquence de résonance permettent de calculer les masses volumiques, les *modules d'élasticité dynamique* et d'obtenir le coefficient de Poisson.

Afin de comparer les formulations de plâtre seul et celles contenant des additifs, les taux de gâchage, ou rapports massiques, sont reliés aux masses volumiques qui renseignent également sur la structure de la formulation.

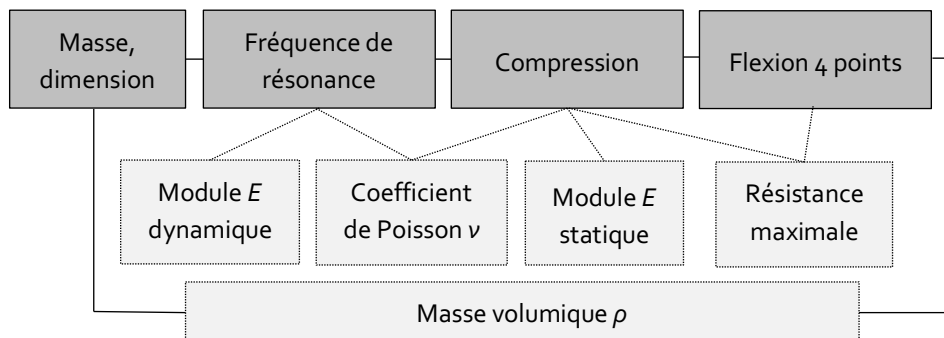


Figure 27 : schéma des mesures et des essais à l'état solide, et des caractéristiques évaluées.

b. Protocole de préparation des formulations et échantillonnage

Dimensions et formes

Les essais mécaniques nécessitent des éprouvettes calibrées, selon des normes spécifiques. Des prismes et des cylindres (Tabl. 3 et Fig. 28) ont été mis en œuvre par moulage⁷⁵. Les éprouvettes ont toutes été mesurées au pied-à-coulisse numérique. Les valeurs de diamètre des cylindres et les largeurs et hauteurs des prismes ont été faites en trois points puis moyennées.

Essai	Formes et dimensions des éprouvettes
Fréquence de résonance	Prisme, 4 x 4 x 16 cm
Flexion 4 points	
Compression, avec ou sans jauge de déformation	Cylindre, 30 x \approx 15 mm

Tableau 3 : géométrie des éprouvettes par type d'essai ou de mesure.



Figure 28 : détail des deux types d'éprouvettes prismatiques et cylindriques, après mise en œuvre et pendant le curage.

⁷⁵ Les prismes sont faits dans des moules normés en élastomère et les cylindres dans des moules fabriqués dans un tube en PVC découpé aux dimensions requises, avec une fente dans la hauteur du cylindre pour permettre le démoulage.

Préparation

Les éprouvettes ont toutes été préparées selon le même protocole :

- 1/ pesée des différents matériaux séparément,
- 2/ mélange des poudres,
- 3/ ajout progressif dans l'eau en mélangeant pendant 30 secondes,
- 4/ 30 secondes supplémentaires de mélange,
- 5/ coulée dans les moules,
- 6/ retrait immédiat du surplus en raclant la surface avec un réglet.

Les quantités ont été préparées formulation par formulation, série par série.

Les quantités de matière étant importantes pour les moules en 4 x 4 x 16 cm, un malaxeur mécanique a été utilisé en imposant la vitesse la plus faible, permettant d'obtenir dans un délai bref une formulation homogène. Certains mélanges étant très chargés en poudre, avec peu d'eau, il a parfois été difficile de préparer la juste quantité permettant la coulée de toutes les éprouvettes dans un même laps de temps. Pour ces formulations spécifiques, plus difficiles à couler et faisant prise plus rapidement, comme E/P = 0,5 et 0,55, et les mélanges avec du carbonate de calcium à E/P = 0,7 ratio plâtre-carbonate de calcium à 1-1 et E/P = 0,9 à ratio 1-1,5, des nouveaux mélanges ont été faits pour chaque prisme.

Les mélanges de craie de Bologne et de colle animale ont été préparés comme du « gros blanc » en formant une boule de pâte de façon progressive, suivant le protocole décrit au chapitre I⁷⁶. Toutefois l'irrégularité des éprouvettes prismatiques, liée aux difficultés de mise en œuvre et aux formats inadaptés, n'a pas permis de les tester en flexion 4 points (Fig. 29). Le produit commercial Modostuc® a posé le même problème. Il n'a pas été possible de réaliser des éprouvettes cylindriques car la matière a présenté un retrait important et a fissuré très rapidement après la mise en œuvre, sans atteindre le séchage à cœur (Fig. 30). Ce phénomène est connu des professionnels de la conservation-restauration, qui utilisent le matériau en comblement ou en mastic de surface en multicouche avec un montage progressif, chaque couche étant de quelques millimètres d'épaisseur. La fabrication d'éprouvettes avec cette configuration multicouche n'a pas été retenue dans ces travaux car les aspects mécaniques sont alors très spécifiques. La différence avec les configurations en coulées uniques pleines rend ainsi les résultats difficilement comparables. Les données de résistance mécanique ne sont pas communiquées par le fabricant. Les informations exploitables sont tirées des expériences personnelles et professionnelles, considérant que le matériau est peu résistant, plutôt « tendre », avec une reprise facile après son séchage qui indique une faible dureté.

⁷⁶ Voir la description de la mise en œuvre des pâtes et apprêts en dorure au chapitre I, p. 48.

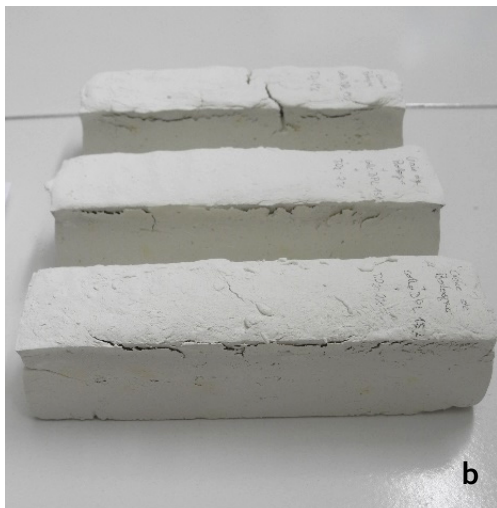
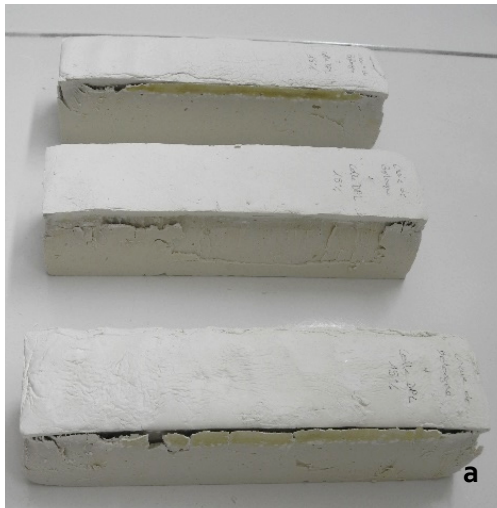


Figure 29 : formulation de craie de Bologne et de colle animale, sans dioxyde de titane (a) et avec dioxyde de titane à 2 % (b), éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm, mise en œuvre non adaptée à cette géométrie et à ce volume.



Figure 30 : produit du commerce Modostuc®, éprouvettes cylindriques 30 x ≈ 15 mm, mise en œuvre non adaptée à cette géométrie et à ce volume.

Période de cure des échantillons

Toutes les éprouvettes du protocole expérimental ont été conservées dans un environnement climatisé ($T \approx 20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} \approx 50\%$) à partir de leur fabrication. Après la mise en œuvre, des suivis de masses ont été effectués afin de contrôler le séchage et de vérifier le délai de cure minimum. Des pesées ont été faites régulièrement pour observer la perte de masse liée à l'évaporation de l'eau de gâchage, jusqu'à atteindre la stabilisation de la masse et donc des éprouvettes dans leur milieu climatique de conditions ambiantes de laboratoire. Des pesées de vérification ont toutefois été faites avant chaque essai : les masses étaient stables, avec une différence d'un ou deux dixièmes dans quelques cas.

c. Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes sont calculées à partir des masses et des dimensions de chaque éprouvette cylindrique et prismatique, obtenues par pesées et par mesures au pied-à-coulisse, selon les formules [1 et 2], citées précédemment. Des valeurs sont également calculées par le logiciel Genemod®, pour le traitement des données de mesure de fréquence de résonance. Trois valeurs pour chaque formulation sont donc déterminées, vérifiées, puis moyennées.

Les masses volumiques sont ensuite mises en lien avec les taux de gâchage E/P, de façon à comparer les différences d'un taux à l'autre pour un même plâtre, puis selon un plâtre différent, et enfin en présence d'additifs. Il est alors possible d'établir un classement, tout en vérifiant la cohérence des données en fonction des taux (Fig. 31). Identifié par les données de références, il existe un lien fonctionnel entre les rapports massiques et la masse volumique, présentant une tendance exponentielle, à laquelle peut être appliquée une loi de type puissance.

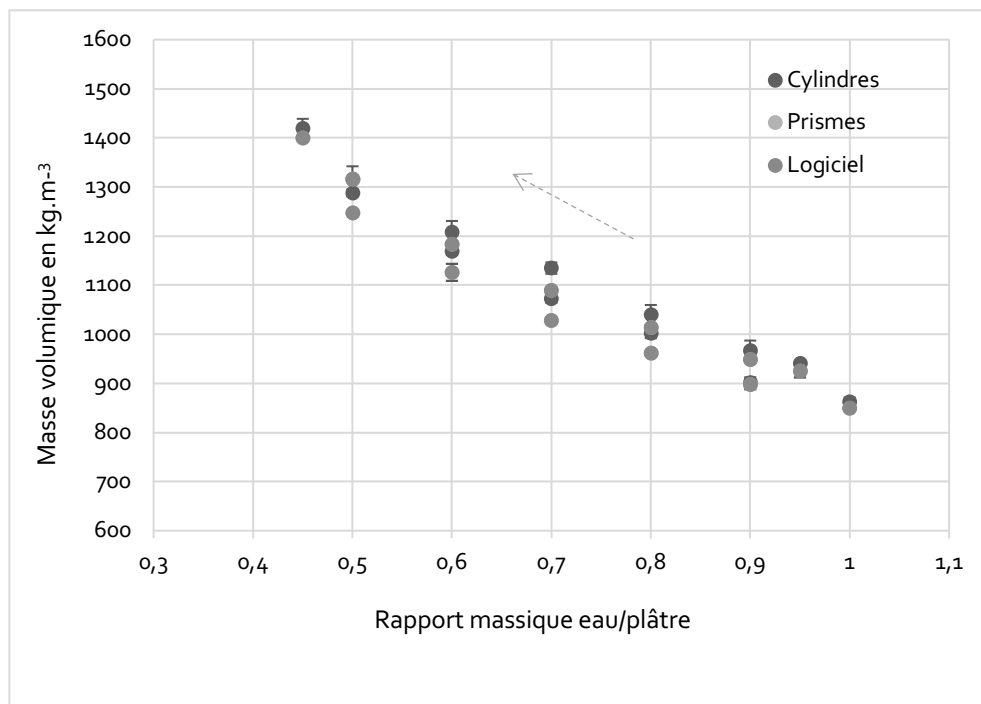


Figure 31 : comparaison des masses volumiques obtenues par mesures et calculs sur les deux types d'éprouvettes, et calculées automatiquement par le logiciel Genemod®, pour les plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA®.

2. Moyens expérimentaux et traitement des données

a. Essais de compression et de flexion 4 points

Les essais mécaniques de flexion et de compression sont réalisés avec une presse uniaxiale Instron Merlin 5500, à vitesse imposée de $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ soit en condition quasi-statique. L'effort généré et le déplacement du tablier de la presse sont les grandeurs enregistrées au cours d'un essai. En compression comme en flexion, un chargement de $0,5 \text{ N}$ est appliqué au début de l'essai, pour assurer le contact de la matière de l'éprouvette au système de caractérisation. Cette procédure facilite le traitement des données, sans affecter les propriétés des matériaux étudiés. L'essai est démarré et arrêté manuellement. Dans certains cas, la résistance très élevée du matériau conditionne un arrêt automatique de la presse, par sécurité, juste après la rupture de l'éprouvette. Un minimum de trois essais par formulation et par type de test permet de fiabiliser les mesures et les données.

Compression

Les essais de compression ont été menés en plaçant les éprouvettes cylindriques entre le plateau de support et la cellule de mesure, en utilisant des interfaces cartonnées d'épaisseur 1 mm (Fig. 32). Ces interfaces servent à limiter les irrégularités à la surface des éprouvettes, telles que les effets de rugosité et les éventuels défauts de planéité.

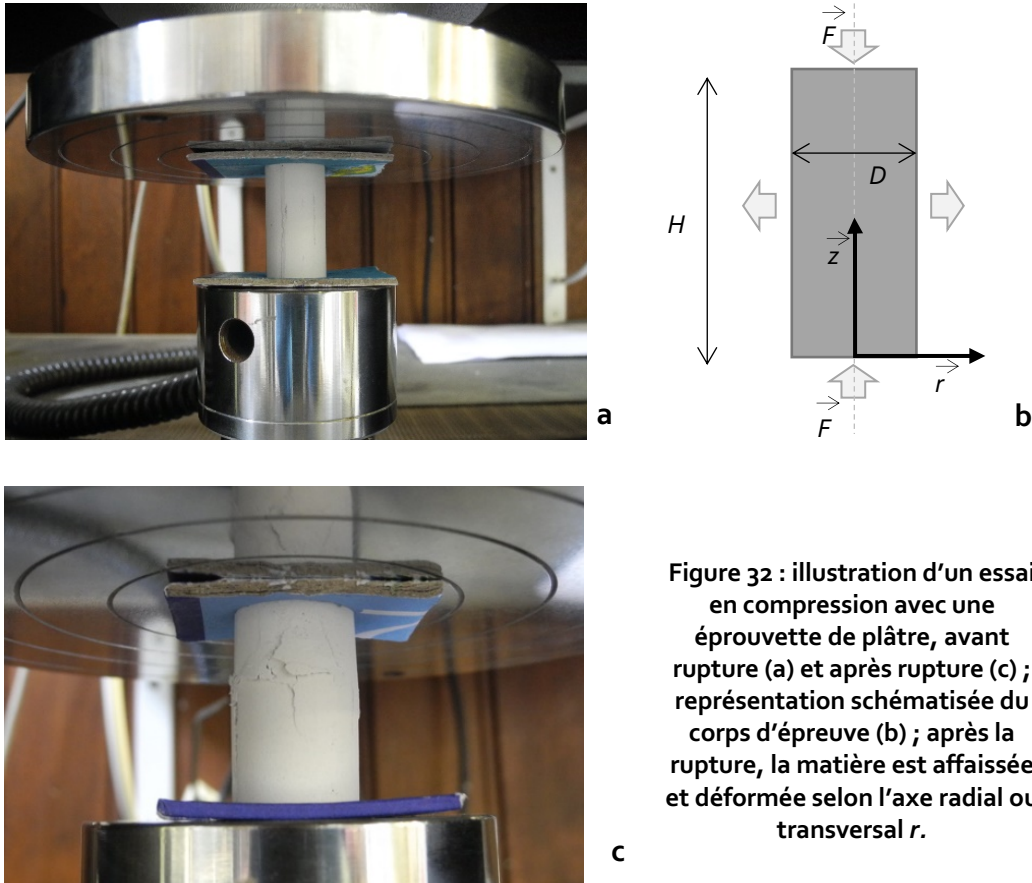


Figure 32 : illustration d'un essai en compression avec une éprouvette de plâtre, avant rupture (a) et après rupture (c) ; représentation schématisée du corps d'éprouve (b) ; après la rupture, la matière est affaissée et déformée selon l'axe radial ou transversal r .

La symétrie de révolution selon l'axe z de la génératrice des éprouvettes cylindriques assure une distribution homogène des contraintes (Fig. 32 b). Le plâtre étant un matériau déformable, l'application d'un effort F induit une déformation selon l'axe z (Fig. 32 b). Tant que la rupture n'est pas apparue, l'essai se déroule à volume constant. Par conséquent, la déformation imposée selon la direction z provoque la déformation radiale du corps d'épreuve selon l'axe r . Théoriquement, la forme finale du corps d'épreuve est celle d'un diabololo, soit avec deux extrémités coniques.

Flexion 4 points

Les essais de flexion 4 points sont menés avec une cellule de mesure constituée de deux appuis supérieurs de 6 cm de distance, et de deux appuis inférieurs de 12 cm de distance, sur lesquels repose le prisme (Fig. 33). La charge est appliquée par les deux appuis supérieurs. La configuration de l'essai et les mesures de placement de l'éprouvette ont été choisies en fonction des dimensions de 4 x 4 x 16 cm des corps d'épreuve, en suivant la norme D 7264/D 7264M – 07⁷⁷.

Avec $L = 12$ cm, la distance entre les appuis inférieurs ; $\frac{L}{2} = 6$ cm, la distance entre les appuis supérieurs ; F = la force appliquée en Newton.

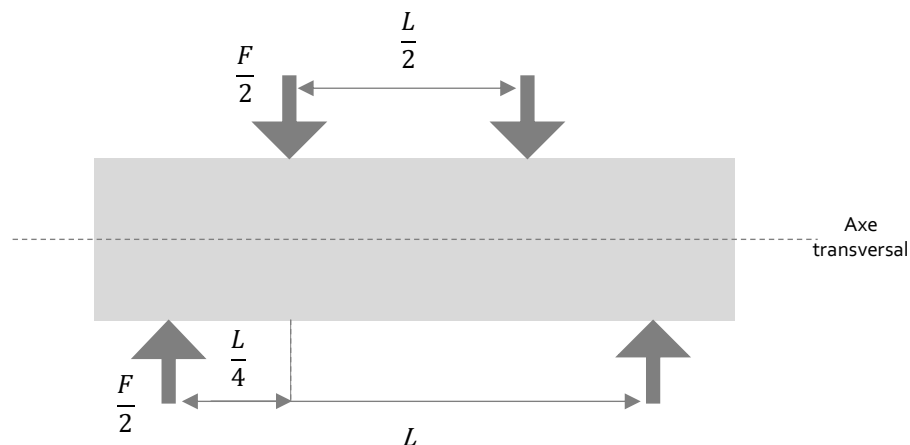


Figure 33 : schéma de la flexion 4 points en procédure B, selon la norme ASTM D 7264/ D 7264M-07.

Les éprouvettes sont placées sur les appuis inférieurs, puis les appuis supérieurs sont abaissés au contact de l'éprouvette. Les ruptures, produites dans la matière entre les deux appuis inférieurs, garantissent le bon déroulement de la mesure et la fiabilité des résultats (Fig. 34). Dans le cas de matériau à la rupture de type fragile, comme le plâtre, cette configuration d'essai en 4 points est préférée à la configuration 3 points car la zone de rupture attendue ne risque pas d'être poinçonnée par l'unique appui supérieur.

⁷⁷ ASTM INTERNATIONAL, (2007) *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM D 7264/D 7264M.

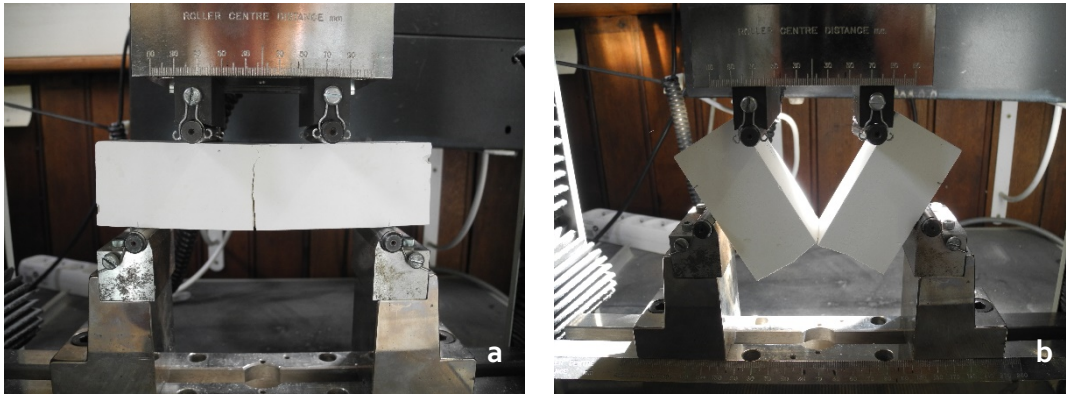


Figure 34 : exemple d'essais en flexion 4 points, avec fissuration (a) et rupture totale (b) entre les supports de charge et les supports d'appui.

L'essai en flexion 4 points génère un moment fléchissant constant et un effort tranchant nul dans la zone $L/2$, comprise entre les appuis supérieurs. Il en résulte une sollicitation en flexion quasi-pure. En théorie, la rupture se produit dans la zone médiane du corps d'éprouvette. Dans la partie inférieure de l'éprouvette, selon l'axe transversal, la rupture est provoquée par un effet dominant de traction.

Les données des essais de compression et de flexion sont relevées par le logiciel Instron. Elles renseignent la valeur de charge en Newton en fonction du déplacement en mm. Les valeurs sont traitées dans un tableau Excel, essai par essai, de la façon suivante : conversion en données positives, identification de la valeur de charge maximale avec l'outil de tri et de valeur maximale, puis conversion en contrainte en Pa et MPa, selon les formules [10] et [11].

Formule de résistance maximale à la compression : $\sigma_c = \frac{F}{S}$

$$\sigma_c = \frac{4F}{\pi\left(\frac{D}{1000}\right)^2} \quad [10]$$

Avec σ la contrainte de compression, F la force maximale en Newton et S la surface, D le diamètre moyen en mm.

Formule de résistance maximale à la flexion 4 points⁷⁸ : $\sigma_f = \frac{3PL}{4bh^2}$ [11]

Avec σ la contrainte en MPa, P la force appliquée en newton, L la longueur entre les appuis inférieurs, b la largeur de l'éprouvette en mm et h l'épaisseur de l'éprouvette en mm.

⁷⁸ *Ibid.*, p. 6.

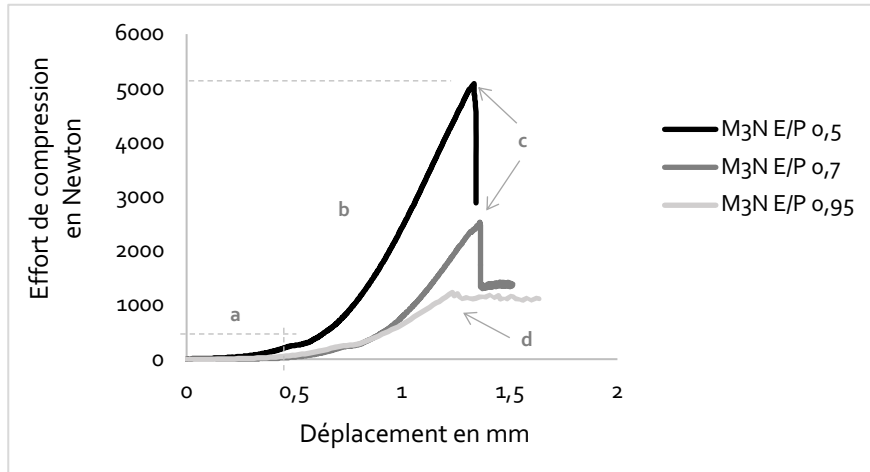


Figure 35 : signal obtenu en compression (courbes de déplacement) en fonction de la force appliquée, pour trois E/P représentatifs du plâtre Molda® 3 Normal.

L'observation des courbes de déplacement (Fig. 35) permet d'identifier le comportement à la compression d'une formulation de plâtre, avec une première période transitoire au cours de laquelle le test débute (a). Puis, un caractère élastique (b) est constaté avec l'augmentation de l'effort, suivant une fonction linéaire telle que $F = f(\text{déplacement})$. Au-delà d'un seuil, caractéristique selon les matériaux ou les formulations, deux types de rupture peuvent être observés : une rupture fragile (c) et une rupture de type plastique écouissable (d). Le premier cas est représentatif des formulations usuelles de plâtre. La rupture se produit quand le matériau atteint ses capacités maximales de résistance, et l'accumulation d'énergie élastique est brusquement relâchée. Dans le second cas, le dépassement de la limite élastique ne provoque pas de rupture brutale du matériau. Ce phénomène d'endommagement est plutôt observable pour les mélanges à taux E/P élevés. La structure, qui est caractérisée par une forte porosité, tend à s'effondrer sur elle-même dès que la capacité de résistance maximale est atteinte. Cette distinction de profil de rupture renseigne à la fois sur les propriétés de la formulation ainsi que sur la dureté locale de la surface. Parallèlement aux courbes-types (Fig. 35), les photographies des éprouvettes correspondantes (Fig. 36) illustrent l'état après essais de compression et différents profils : une déformation radiale similaire à du frettage et une rupture fragile (Fig. 36 a), un affaissement et une rupture plastique (Fig. 36 c), et un comportement intermédiaire avec de l'affaissement et une rupture fragile, suivi d'une phase d'écrouissage qui correspond à l'écrasement de la matière si l'essai n'est arrêté (Fig. 36 b).

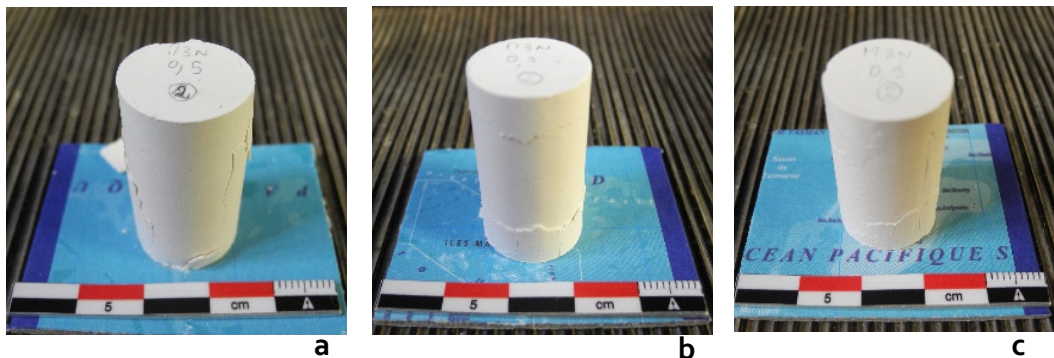


Figure 36 : éprouvettes cylindriques de Molda® 3 Normal à E/P = 0,5 (a), 0,7 (b), 0,9 (c), après essai de compression, aux ruptures fragile (a et b) et plastique avec écouissage (c).

Le plâtre, comme d'autres milieux poreux et matériaux de construction de type liant hydraulique, présente une bonne résistance en compression. La sensibilité à l'eau a conditionné la mauvaise considération du matériau et de ses propriétés mécaniques, néanmoins, les résistances du plâtre sont tout à fait comparables à celles de matériaux réputés très résistants, tels qu'un béton normal ou une pierre calcaire. Il faut par exemple noter que le taux $E/P = 0,45$ du plâtre β Molda® 3 Normal n'a pas pu être traité en compression car la première éprouvette testée a dépassé la limite de force de la presse utilisée (5000 N).

Toutefois, les propriétés mécaniques à l'état solide sont déterminées par le rapport massique eau/plâtre, qui est un paramètre primordial de la préparation. L'évolution des propriétés en fonction du taux E/P doit donc être étudiée. Pour cela, un modèle mathématique simple, de type loi puissance, permet d'exprimer le lien entre le taux E/P et la résistance en compression.

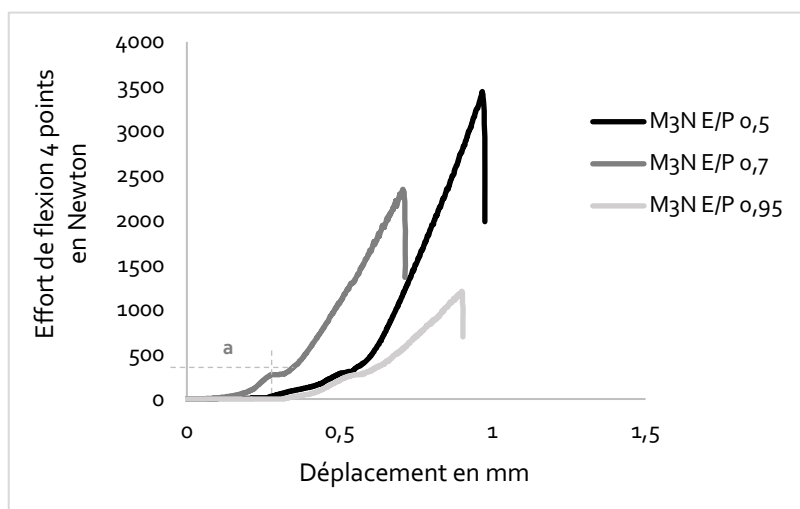


Figure 37 : signal obtenu en flexion 4 points (courbes de déplacement) en fonction de la force appliquée, pour trois E/P représentatifs du plâtre Molda® 3 Normal.

En flexion 4 points, il est plus difficile de mettre en évidence un mode de rupture particulier en lien avec la structure plus ou moins aérée du matériau (Fig. 37). De même qu'en compression, une période transitoire est observée (Fig. 37 zone a); puis l'accumulation d'énergie met en tension la fibre inférieure du corps d'éprouve (Fig. 38 b), et la fibre supérieure subit un effort de compression (Fig. 38 b).

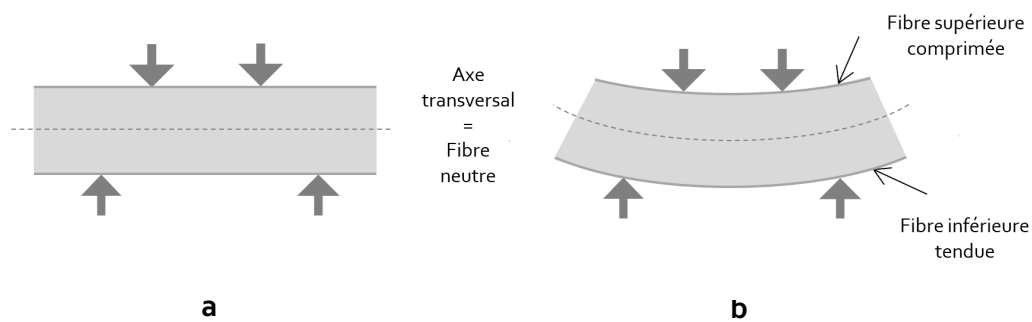


Figure 38 : représentation schématisée d'un essai en flexion 4 points, avant (a) et en cours d'essai (b), avant rupture.

Au-delà d'un seuil, une rupture se produit et l'énergie accumulée est libérée brutalement. Ce type d'essai à vitesse imposée ne permet pas de distinguer le mode de rupture selon les variations de formulations. Dans tous les cas, peu importe le rapport massique eau/plâtre, la rupture en flexion est identifiée comme fragile. Cependant, l'effort maximal atteint est bien identifiable avant la rupture et permet la caractérisation du matériau testé (Fig. 37 et 39), avec par exemple trois taux E/P différents, aux ruptures échelonnées entre 1000 et 3500 Newton.

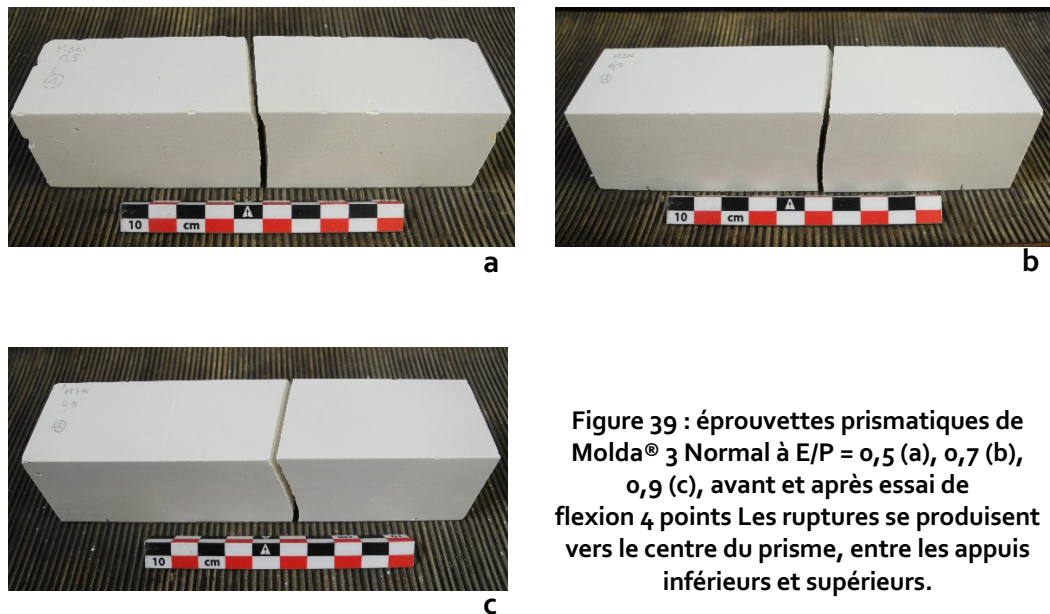


Figure 39 : éprouvettes prismatiques de Molda® 3 Normal à E/P = 0,5 (a), 0,7 (b), 0,9 (c), avant et après essai de flexion 4 points Les ruptures se produisent vers le centre du prisme, entre les appuis inférieurs et supérieurs.

Comme pour les données en compression, un lien fonctionnel semble exister entre le rapport massique et la résistance en flexion 4 points : l'accroissement du dosage massique E/P conduit à la fragilisation de la structure poreuse et donc la résistance en flexion décroît.

Compression avec jauges de déformation biaxiale

Des éprouvettes cylindriques ont été sélectionnées pour chaque formulation afin d'être équipées de jauges de déformation biaxiale Kyowa®⁷⁹. Ces jauges ont été collées le long du corps de l'éprouvette, à la moitié du cylindre et en suivant l'axe longitudinal (Fig. 40 b). Pour la mesure, elles sont reliées à une centrale d'acquisition de données Keysight® DAQ 970A. La presse et la centrale d'acquisition étant deux équipements indépendants, les essais ont été démarrés manuellement et en différé, suivant un protocole répétable.

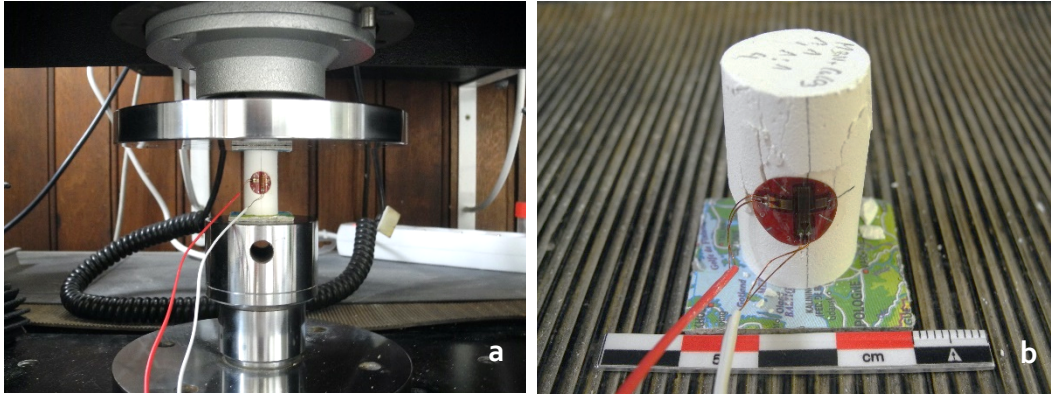


Figure 40 : exemple d'essais en compression avec une jauge de déformation (a) et détail de la jauge après rupture de l'éprouvette (b).

Cet équipement, mesurant la déformation de la surface permet également de déterminer le module de Young [5] et le coefficient de Poisson [6].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [5]$$

Avec σ la contrainte et ε la déformation.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_z} \quad [6]$$

Avec ε_r , la déformation transversale selon l'axe r,
et ε_z , la déformation longitudinale selon l'axe z.

En compression, les mesures renseignent aussi sur les domaines élastiques en considérant la partie linéaire avant la rupture. Ce domaine représente les contraintes auxquelles le matériau résiste, sans modification structurelle et sans effet irréversible. Des valeurs ont été retenues, en considérant le plus grand ensemble possible pour calculer le module de Young, par les mesures de contrainte et de déformation longitudinale [5] et en y appliquant un modèle de régression linéaire. En vérifiant l'écart-type et l'écart-moyen, le lien fonctionnel des valeurs E selon le rapport massique ou la masse volumique peut être représenté. La même démarche est retenue pour identifier les valeurs de coefficient de Poisson. Le coefficient de Poisson est déterminé pour chaque formulation, selon les valeurs de déformation transversale et longitudinale [6], en appliquant un modèle de régression linéaire.

⁷⁹ Jauge de déformation Kyowa®, modèle KFGS-5-120-D16-11 L1M2S, fiche technique en annexe IV, p. 533.

b. Mesure de fréquence de résonance

Les mesures de fréquence de résonance ont été faites avec un appareil GrindoSonic® MK5i, un équipement portable permettant des mesures non invasives. Les éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm ont servi aux prises de mesure. La technique d'excitation par impulsion permet, par l'évaluation de la vitesse de la propagation des ondes dans un matériau, d'en connaître les caractéristiques. Différentes configurations d'essais sont adaptées aux matériaux et à la géométrie de l'éprouvette. Dans ces travaux, les configurations de mesure de vibration en flexion (a) et en torsion (b) adaptées à une géométrie type barreau, ont été utilisées (Fig. 41).

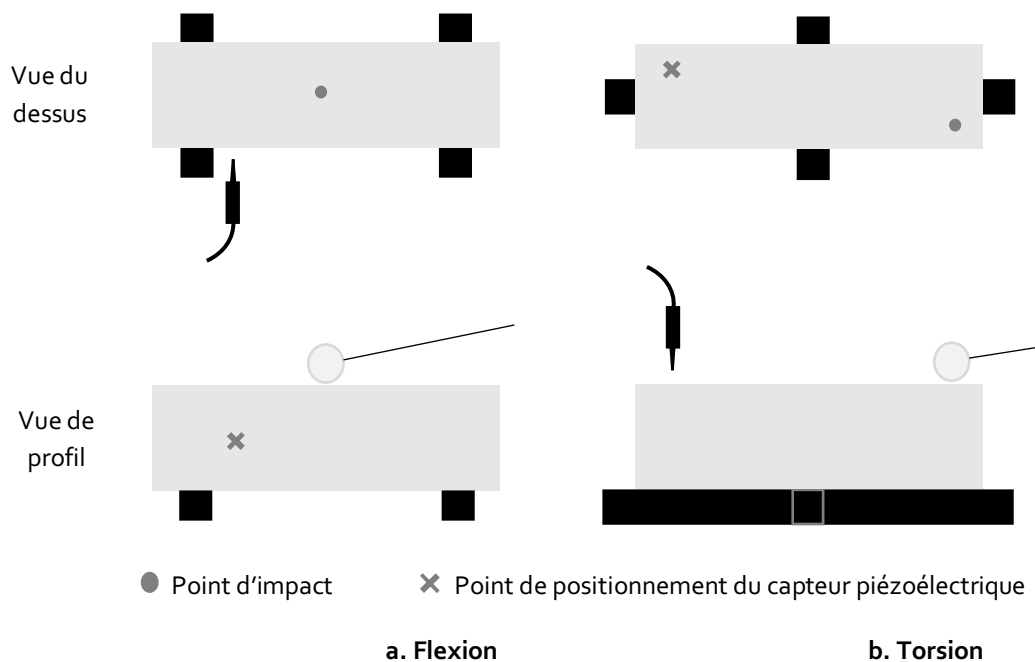


Figure 41 : schéma des deux modes de mesures de la fréquence de résonance, en flexion (a) et en torsion (b), avec les points d'impact du marteau (boule grise) et de positionnement du capteur (pointe noire).

L'échantillon est placé sur deux supports (Fig. 41). La pointe du capteur piézoélectrique est posée sur l'échantillon. Une percussion légère est produite à l'aide d'un outil adapté⁸⁰. La valeur est affichée instantanément sur l'écran de l'appareil. Plusieurs répétitions sont nécessaires pour garantir la validité de la valeur. Ces valeurs sont alors notées pour le traitement ultérieur à partir du logiciel adapté. Les mesures sont rapides et sans dommages pour l'échantillon. Les valeurs sont affichées immédiatement au moment de l'essai. Elles ont donc été notées puis reportées dans le logiciel Genemod, WinEmod 2.00, fourni avec l'équipement de mesure. Les dimensions en mm et la masse en g sont renseignées, suivies des valeurs de fréquence de résonance en flexion et en torsion en kHz. La géométrie est à indiquer, ainsi que la norme choisie.

⁸⁰ Ici le marteau en bois, d'environ 15 mm de diamètre, s'est révélé être le plus adapté pour l'émission d'ondes sur les matrices de type plâtre et additifs.

En raison des dimensions des éprouvettes prismatiques, la norme NBN B15-230 a été sélectionnée. Les valeurs des masses volumiques, des modules élastiques dynamiques, et des coefficients de Poisson sont calculées automatiquement (Fig. 42).

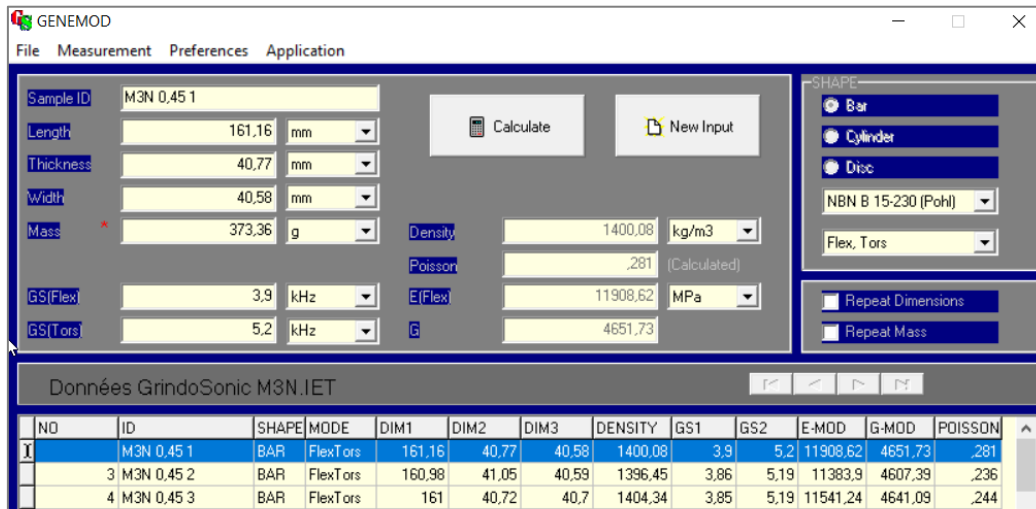


Figure 42 : interface du logiciel de traitement des données de fréquences de résonance, exemple du plâtre Molda® 3 normal à E/P = 0,45.

L'évolution du module élastique dynamique peut être caractérisée grâce à un modèle mathématique de type loi puissance pour identifier le lien fonctionnel avec le rapport massique E/P ou la masse volumique, comme le suggère le nuage des données et les références compilées.

Les coefficients de Poisson, calculés automatiquement par le logiciel lors du traitement de données des mesures de fréquence de résonance, peuvent être comparés aux valeurs obtenues par les essais de compression instrumentés de jauges biaxiales.

III. Résultats

Les données présentées dans cette partie sont traitées en considérant le plâtre seul, dans un premier temps, puis chargé de carbonate de calcium, et enfin de dioxyde de titane. Les masses volumiques, les résistances mécaniques ultimes, les modules élastiques et les coefficients de Poisson sont étudiés par type de matériau ou formulation. Les données mesurées sont comparées à des références établies par une approche relative ou d'adimensionnement, permettant ensuite de modéliser et d'extrapoler les données par des lois de calibration telles que des lois puissance et des indices de régression linéaire. Ainsi, après l'identification d'un comportement général pour un plâtre de référence, les valeurs sont vérifiées par l'ajustement d'un second plâtre. Les modèles établis sont alors utilisés pour mettre en évidence les effets des apports d'additifs de carbonate de calcium et de dioxyde de titane.

1. Plâtres β Molda® 3 Normal et β EXTHA®

Tout d'abord, les plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA® sont étudiés sans additif, pour identifier le comportement type du matériau seul. Issus d'un même type de production et de cuisson, leurs caractéristiques sont comparées à travers différents taux de gâchage.

a. Masses volumiques

Deux séries de données sont obtenues par calcul à partir des mesures des éprouvettes cylindriques et prismatiques⁸¹ (Fig. 43). Dans ce cas, les résultats évalués avec le plâtre EXTHA® sont comparés à ceux de Rojo⁸², avec lesquels ils s'accordent (Fig. 44). En modifiant le rapport massique E/P, la masse volumique change : plus il y a de poudre de plâtre dans le mélange, et plus la valeur ρ augmente. Ceci confirme donc l'existence d'un lien fonctionnel tel que $\rho = f(E/P)$. Le mécanisme d'hydratation du plâtre, qui correspond à la réaction chimique de prise du matériau, et l'influence de la quantité d'eau sont vérifiés.

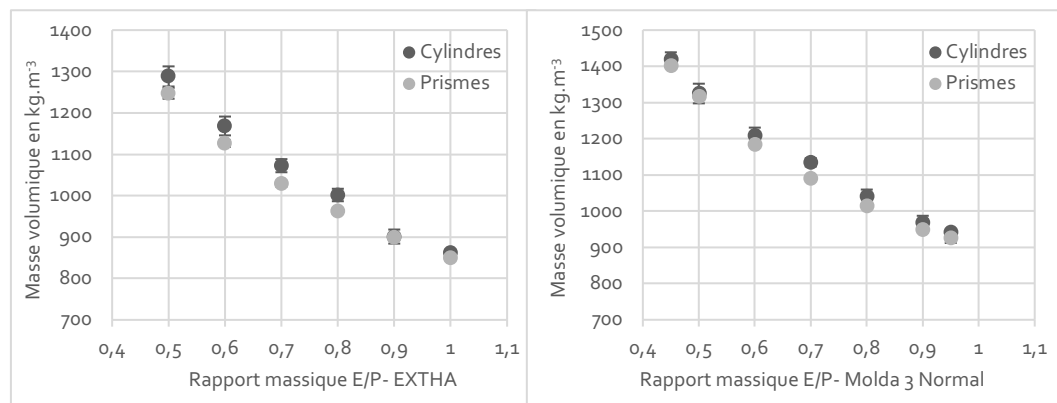


Figure 43 : mesures des masses volumiques pour les plâtres EXTHA® et Molda® 3 Normal, selon les deux types d'éprouvettes.

⁸¹ Données de masse volumiques pour toutes les formulations en annexe IV, p. 528.

⁸² Rojo, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, op. cit., p. 153.

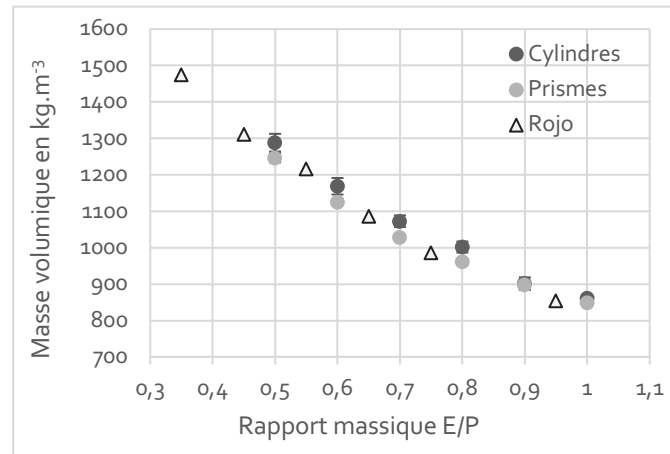


Figure 44 : comparaison des masses volumiques mesurées pour le EXTHA® et les valeurs obtenues par Rojo, 2013.

La cohérence des mesures avec les données de la littérature encourage la poursuite de l'analyse, avec la comparaison des valeurs du second plâtre issu d'un hémihydrate β , le Molda® 3 Normal. Pour cela, les données EXTHA® sont moyennées (cylindres et prismes) et compilées à celles de Rojo, afin d'établir une tendance unique (Fig. 45).

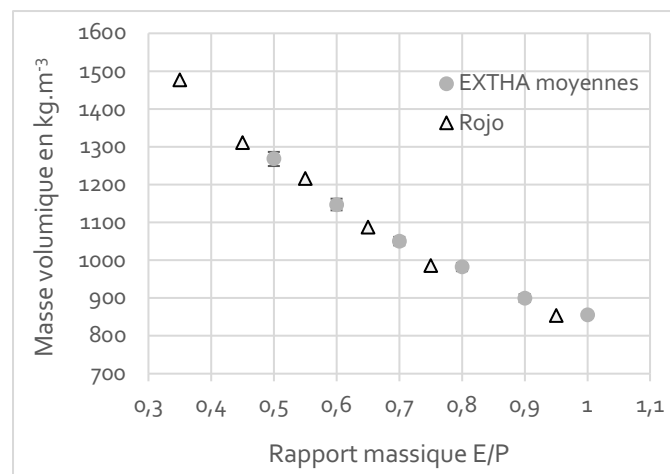


Figure 45 : comparaison du signal moyenné pour EXTHA® et des valeurs de Rojo, 2013.

La représentation des données moyennées pour le plâtre Molda® 3 Normal et celles du plâtre EXTHA® (Fig. 46) montre une tendance similaire en raison de l'équivalence de leur variété d'hémihydrate β , avec un décalage selon l'axe des rapports massiques E/P.

- À taux de gâchage équivalent, soit avec les mêmes proportions de mélanges eau/plâtre, les masses volumiques du Molda® 3 Normal sont supérieures à celles du EXTHA®. Par exemple, à taux de gâchage E/P = 0,45 la masse volumique du Molda® 3 Normal dépasse de $\approx 100 \text{ kg.m}^{-3}$ celle du EXTHA®.
- En rapportant les valeurs du Molda® 3 Normal à la tendance établie avec le EXTHA®, les deux plâtres concorderaient vers une même valeur de masse volumique, mais avec un taux de gâchage différent : plus bas pour le EXTHA®, et donc plus concentré en plâtre. Par conséquent, les structures et les porosités seraient différentes, avec une porosité supérieure pour le Molda® 3 Normal, gâché avec plus d'eau.

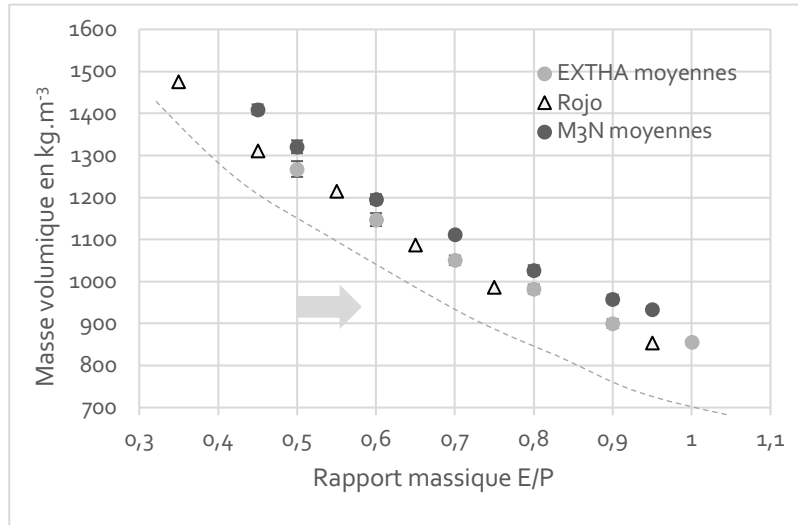


Figure 46 : représentation des valeurs moyennées pour EXTHA® et Molda® 3 Normal, comparées aux valeurs de Rojo, 2013 ; constat d'un décalage entre les deux plâtres.

Ce rapprochement des données suggère que la demande en eau n'est pas équivalente d'un hémihydrate β à un autre dans le cas de ces deux plâtres. À masse volumique égale, le Molda® 3 Normal a un besoin en eau légèrement supérieur à celui du EXTHA®, et ceci conditionne donc sa structure finale après la prise. Ce décalage, même minime, peut induire des variations de comportements mécaniques à l'état solide. Des différences de granulométries ainsi que la présence d'additifs peuvent en être à l'origine.

Afin de palier ce décalage de données, il est nécessaire d'exprimer le lien $\rho = f(E/P)$ en considérant une courbe unique, dite courbe maîtresse. Les données sont combinées en imposant une valeur de variation $\Delta(E/P) = 0,055$ aux données de EXTHA® (combinant les données moyennées de l'étude et celles de Rojo) qui permet alors d'optimiser la corrélation (Fig. 47). Concrètement, cette valeur moyenne de glissement représente un décalage de 9,16 % de la quantité d'eau pour 1 kg de plâtre, en comparant ces deux plâtres. Cette bonne corrélation des séries de données laisse penser que l'équivalence est admissible entre les deux produits.

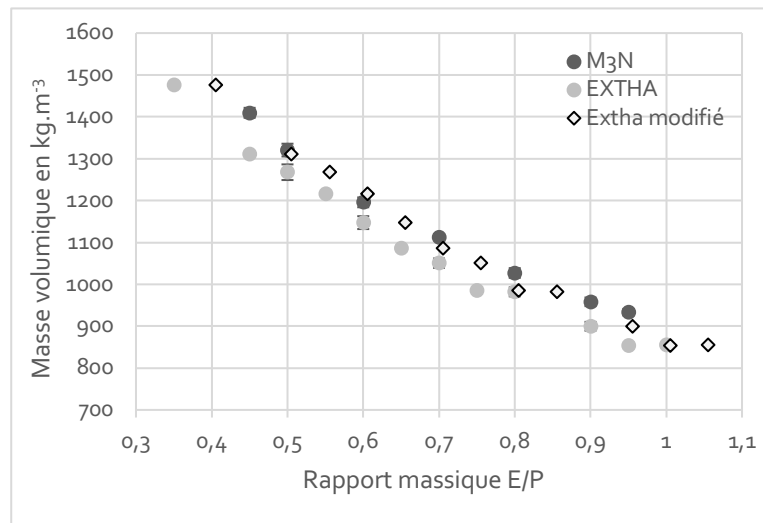


Fig. 47 : représentation des valeurs moyennées pour les deux plâtres (valeurs combinant celles de l'étude et celles de Rojo, 2013) avec un glissement $\Delta(E/P) = 0,055$ pour EXTHA®.

D'autres hémihydrates β , de production du bassin parisien, tels que les plâtres Placo et Vieujot sont comparés. Les résultats bruts et corrigés s'inscrivent dans les mêmes gammes de valeurs, similaires à celles de référence, établies avec le Molda® 3 Normal (Fig. 48).

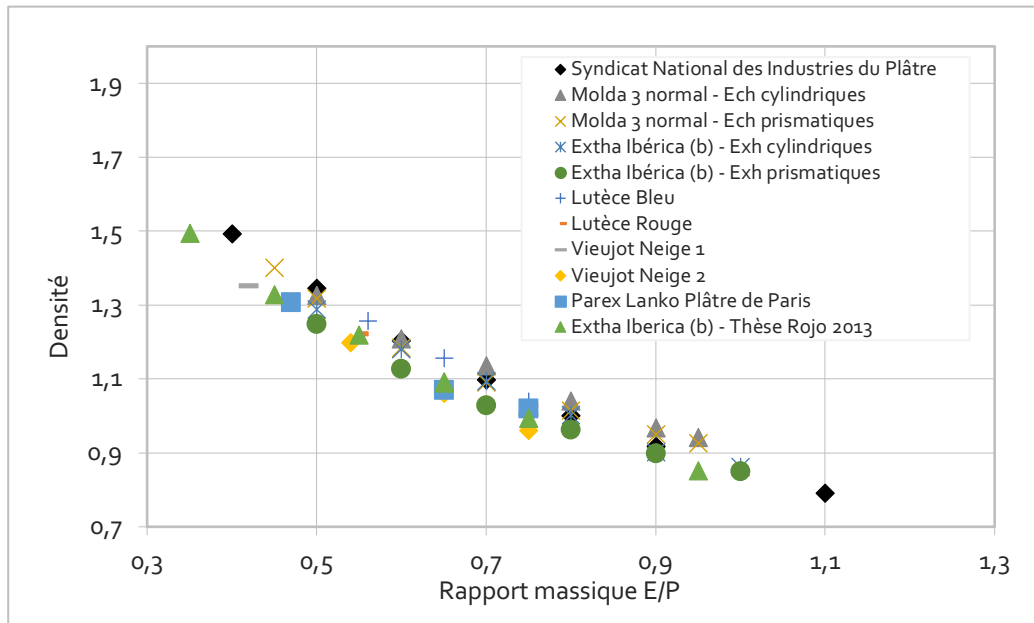


Figure 48 : représentation des données de masses volumiques pour divers plâtres β montrant la cohérence des mesures et illustrant le lien fonctionnel.

Une tendance générale non linéaire peut y être distinguée, avec un lien fonctionnel de la forme $\rho = b.(E/P)^a$. Les données sont ajustées au modèle établi avec le Molda® 3 Normal (Fig. 49). Les valeurs de a et b sont obtenues par régression linéaire de toutes les données regroupées dans un repère bi-logarithmique, avec $a = -0,606$ et $b = 880,18$. Le coefficient de détermination $R^2 = 98,43 \%$ tend à confirmer le choix du lien.

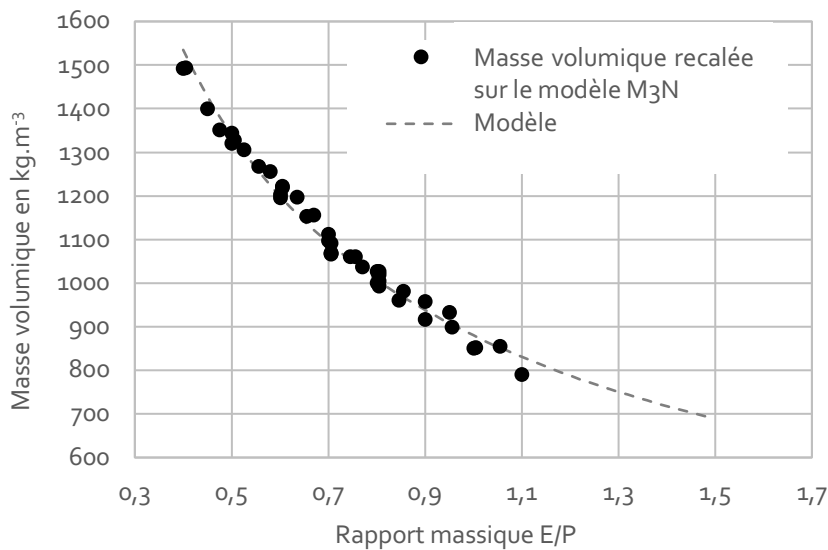


Figure 49 : ajustement des données au modèle établi pour le plâtre Molda® 3 Normal illustrant le lien $\rho = f(E/P)$.

Les données des différents hémihydrates sont corrélées au modèle selon différentes valeurs de $\Delta(E/P)$ (Tabl. 4). En comparant ces différents plâtres, le même phénomène de variation de demande en eau est constaté, comme entre le EXTHA® et le Molda® 3 Normal. Ces variations sont néanmoins minimales, en considérant uniquement la masse volumique. D'autres propriétés et valeurs, telles que la porosité ou la résistance en compression en fonction des rapports massiques E/P peuvent être exploitées pour vérifier ce principe.

Marque	Appellation	$\Delta(E/P)$ / Molda® 3 Normal
Saint-Gobain® - Placo®	Lutèce Bleu	0,02
Saint-Gobain® - Placo®	Lutèce Rouge	0,055
Vieujot®	Neige 1	0,055
Vieujot®	Neige 2	0,095
Parexlanko®	Plâtre de Paris	0,055
Syndicat national des industries du plâtre	-	0

Tableau 4 : valeurs de variations $\Delta(E/P)$ d'une sélection de plâtre issu d'hémihydrate β , par rapport aux valeurs E/P du plâtre Molda® 3 Normal.

Les masses volumiques calculées automatiquement par le logiciel Genemod®, de traitement de données des fréquences de résonance, sont comparées aux séries de données moyennées pour le Molda® 3 Normal et le EXTHA® (Fig. 50), et confirment la fiabilité des données avec une même tendance $\rho = f(E/P)$.

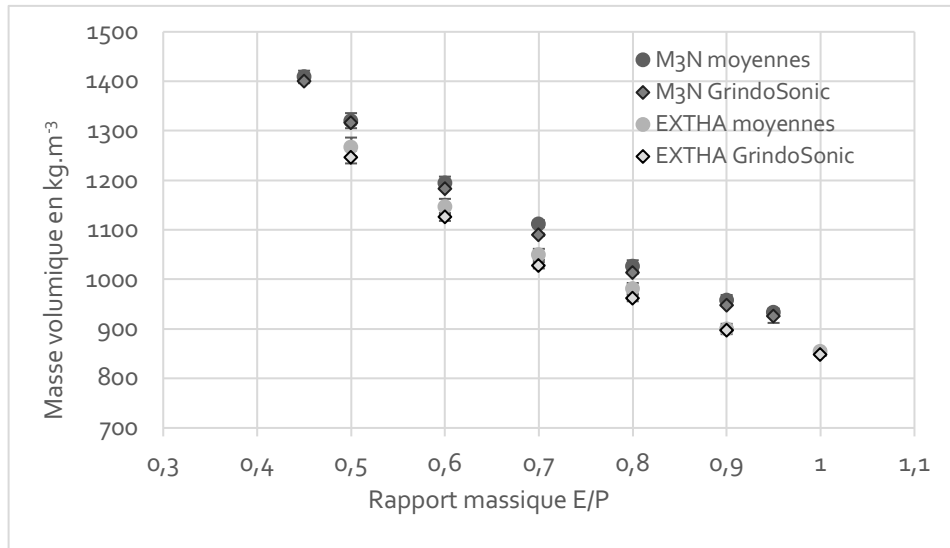


Figure 50 : représentation des valeurs de masses volumiques, calculées par logiciel lors des mesures de fréquence de résonance sur éprouvettes prismatiques, présentant une bonne corrélation avec les mesures faites d'après l'ensemble des éprouvettes.

REMARQUES

Les deux plâtres présentent des comportements similaires, suivant le lien $\rho = f(E/P)$, en accord avec les références, avec des valeurs comprises entre ≈ 1400 et ≈ 850 kg.m⁻³ pour des E/P = 0,45 à 1. Les modèles sont ajustés avec fiabilité, et les valeurs obtenues par différents moyens sont en accord avec d'autres plâtres issus d'hémihydrate β .

b. Comportement et résistance à la contrainte

Les comportements des différentes formulations de plâtre sans additif, variables selon les rapports massiques, sont étudiés lors des sollicitations mécaniques en compression et en flexion 4 points⁸³.

Facilement identifiables en compression, le comportement et le type de rupture varient selon les formulations, avec une même tendance pour les plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA®. Les taux E/P les plus bas (concentrés en plâtre) présentent des comportements avec des phases élastiques importantes et des ruptures très nettes spécifiques d'un matériau fragile. Alors que les E/P élevés (peu concentrés en plâtre) ont des phases élastiques peu importantes, et un schéma de rupture caractéristique d'un matériau plastique écouvissable (Fig. 51).

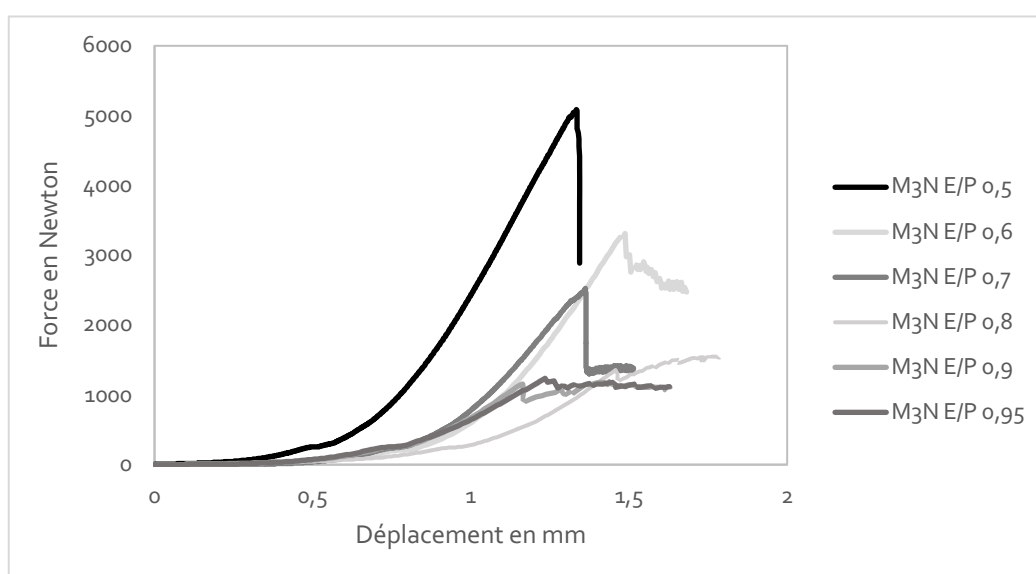


Figure 51 : courbes de déplacement selon la force appliquée en essai de compression pour différents rapports massiques E/P du plâtre Molda® 3 Normal montrant différents profils de résistances.

Les valeurs de résistances maximales suivent, elles-aussi, une même tendance (Fig. 52). Plus la formulation est concentrée en plâtre, avec un rapport massique bas, plus la résistance maximale est élevée. Au contraire, les plâtres aux rapports massiques élevés, et donc peu concentrés en matrice liante, présentent des résistances basses. Ainsi la résistance maximale est renforcée lorsque la concentration en plâtre est accrue, en accord avec les données et les références de la littérature, traduisant bien un lien fonctionnel tel que $R_c = f(E/P)$ pour la compression, et $R_f = f(E/P)$ pour la flexion.

Les résistances maximales des plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA® sont dans les mêmes ordres de grandeur, allant de ≈ 20 à 3 MPa en compression, et de $\approx 4,5$ à $\approx 1,7$ MPa en flexion 4 points pour des taux E/P de $0,5$ à $0,95$. Ces valeurs s'accordent avec celles de références, telles que $R_c \approx 35$ à 3 MPa pour E/P de $0,35$ à $0,95$.

⁸³ Données de résistances R_c et R_f pour toutes les formulations en annexe IV, p. 529 et 530.

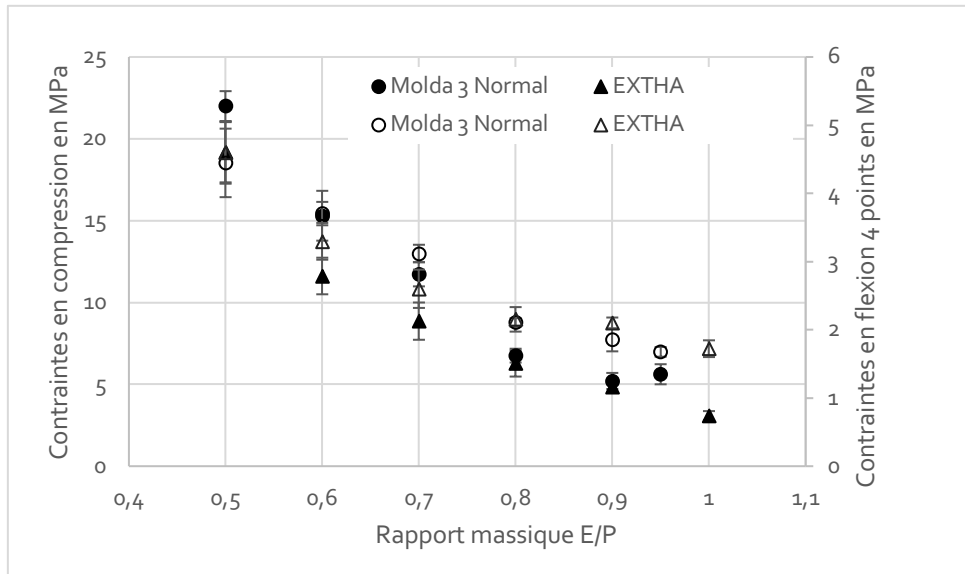


Figure 52 : moyennes des mesures de contraintes de rupture en compression (marqueur plein) et en flexion 4 points (marqueur transparent) des plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA® en fonction du rapport massique.

Toutefois, un léger décalage de valeurs est observable entre les deux plâtres, suivant le même constat que pour les masses volumiques et indiquant une éventuelle différence de demande en eau des hémihydrates, qui semble confirmée par les structures finales du milieu poreux. Pour vérifier cette tendance, le traitement des données est approfondi, en considérant plus particulièrement les résultats en compression. Ainsi, de la même façon que pour la masse volumique et la représentation unique de $\rho = f(E/P)$, il doit être possible d'obtenir une corrélation des valeurs d'un plâtre à l'autre pour le lien $R_c = f(E/P)$, en imposant les valeurs de glissement $\Delta(E/P)$ obtenues précédemment (Tabl. 4). Alors les valeurs de résistance maximales R_c d'une sélection de plâtre sont ajustées au Molda® 3 Normal confirmant la tendance unique (Fig. 53). Le champ de données est ajusté par une loi puissance, telle que $R_c = 3,946 \cdot ((E/P)_{\text{recalé}})^{-2,606}$, avec $a = -2,606$ et $b = 3,946$. Le coefficient de détermination $R^2 = 91,04 \%$ est acceptable.

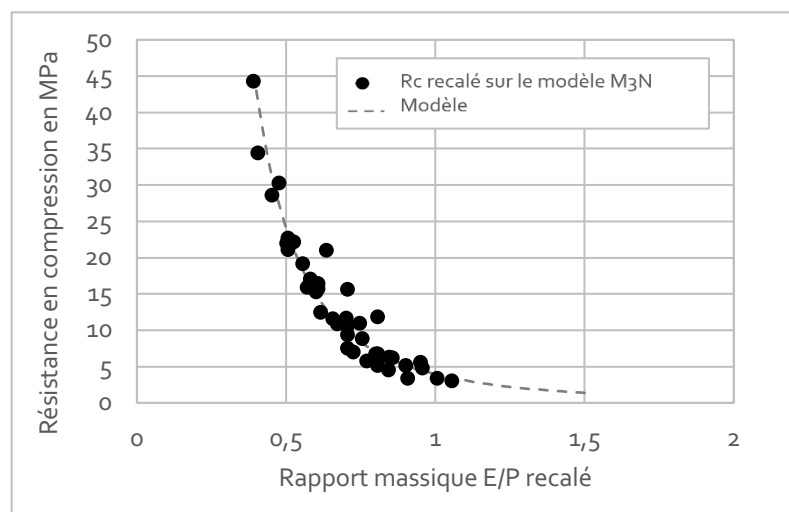


Figure 53 : représentation de différentes valeurs de référence en résistance en compression, ajustées au modèle établi pour le plâtre Molda® 3 Normal, et à E/P recalés.

Ce constat, à travers une courbe unique, indique un comportement-type, communs aux différents hémihydrates β , et donc la possibilité de substituer un plâtre par un autre, tout en obtenant les mêmes propriétés mécaniques relatives. Il est toutefois nécessaire de vérifier la demande en eau pour garantir la concordance des données. Pour se soustraire de la différence d'hydratation, l'analyse est réalisée en considérant la masse volumique, tel que $R_c = f(\rho)$ (Fig. 54). Pour rappel, la résistance en compression ou en flexion est une mesure indépendante de la masse volumique ρ , le paramètre ρ est représentatif de la structure du matériau à l'état solide et par conséquent il conditionne la résistance.

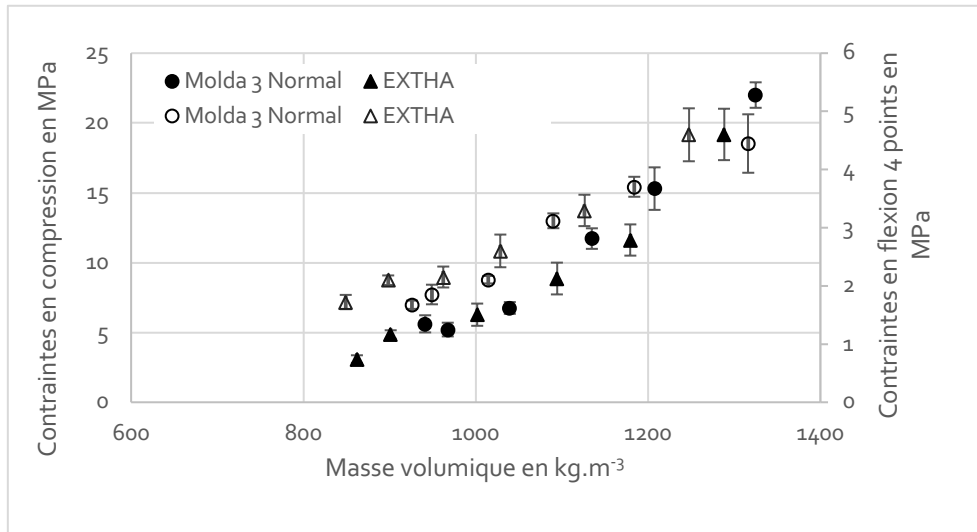


Figure 54 : moyennes des mesures de rupture en compression (marqueur plein) et en flexion 4 points (marqueur transparent) des deux plâtres, fonctionnelles des masses volumiques.

En considérant la masse volumique, l'ajustement des valeurs de différents plâtres au modèle Molda[®] 3 Normal prend la forme suivante avec $R_c = 1,007 \cdot 10^{-12} \cdot (\rho)^{4,277}$. Le coefficient de détermination $R^2 = 89,2 \%$ est satisfaisant. Les données des différents plâtres s'accordent avec le modèle et confirment une tendance unique de comportement en compression pour les hémihydrates β (Fig. 55).

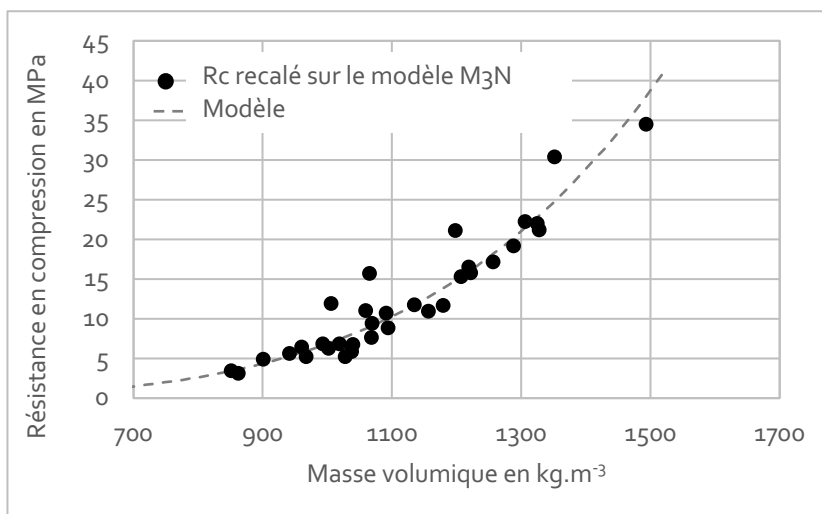


Figure 55 : représentation des valeurs de référence en résistance en compression, ajustées au modèle établi pour le plâtre Molda[®] 3 Normal en fonction de la masse volumique.

En flexion 4 points, les comportements sont similaires à ceux de la sollicitation en compression. Plus la quantité de poudre de plâtre augmente, et plus la résistance à la flexion est élevée. Un lien fonctionnel existe tel que $R_f = f(E/P)$ et $R_f = f(\rho)$, par conséquent les données peuvent être représentées telles que $R_f = f(R_c)$ (Fig. 56). Comme énoncée précédemment, la capacité de résistance en flexion est inférieure à la capacité de résistance en compression. Cette spécificité est caractéristique des matériaux de type minéral poreux, dont la structure est faite d'un agencement plus ou moins aléatoire de cristaux aciculaires, qui supportent d'être comprimés.

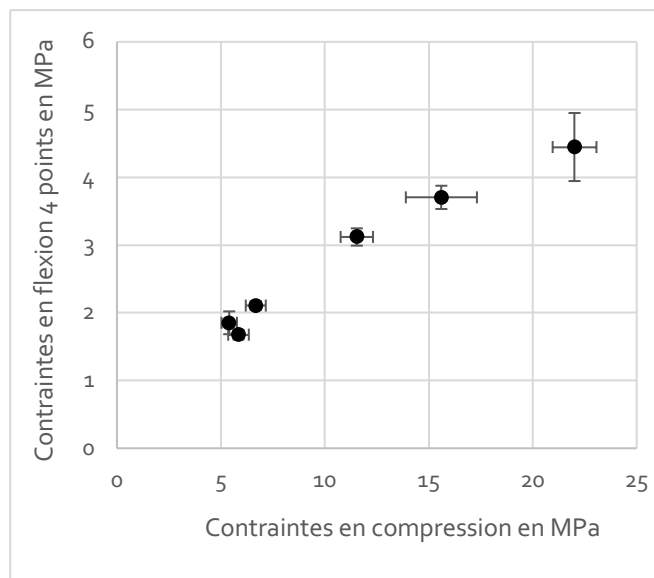


Figure 56 : représentation des mesures de résistances en flexion 4 points et en compression pour le plâtre Molda® 3 Normal confirmant le lien $R_f = f(R_c)$.

c. Module de Young et module E dynamique⁸⁴

Les modules élastiques du plâtre Molda® 3 Normal pour des E/P de 1 à 0,5 sont compris entre $\approx 3,2$ et $\approx 6,4$ GPa en statique et ≈ 4 et ≈ 10 GPa en dynamique. Les valeurs varient pour le plâtre EXTHA®, de $\approx 2,7$ à $\approx 8,9$ GPa en statique et de $\approx 3,1$ et $\approx 9,1$ GPa en dynamique (Fig. 57). Les références indiquent des modules E statique compris entre $\approx 0,5$ et ≈ 10 GPa pour des E/P de 0,9 à 0,35 ; et E dynamique de $\approx 0,5$ à ≈ 8 GPa pour des E/P de 2 à 0,6.

Les mesures en dynamique sont moins dispersées qu'en statique. Un lien fonctionnel est établi en considérant les valeurs E dynamique en fonction des rapports massiques tel que $E = f(E/P)$ et $E = f(\rho)$ (Fig. 57 c et d). Ce constat s'accorde avec les tendances des références considérant que plus le taux de gâchage est bas (mélange plus concentré en poudre) et la masse volumique haute, plus le module élastique est élevé et le matériau est rigide.

⁸⁴ Données de modules élastiques pour toutes les formulations en annexe IV, p. 531.

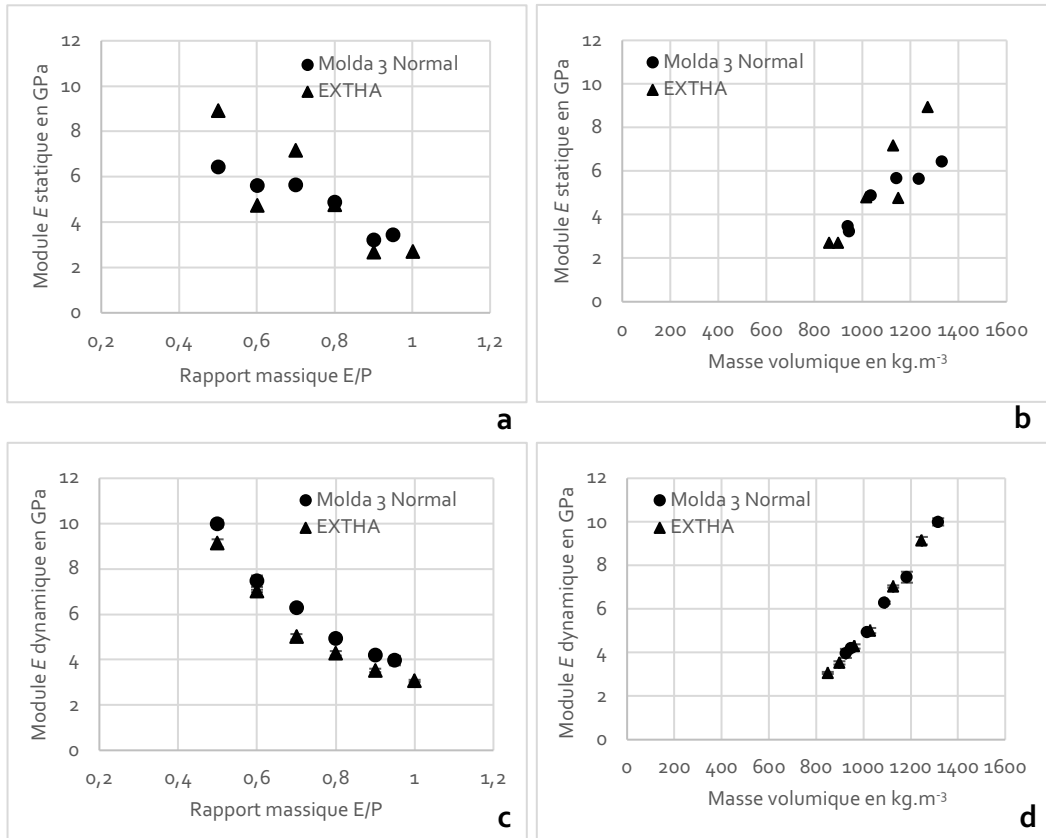


Figure 57 : modules de Young E statique (a et b) et module E dynamique (c et d), en fonction du rapport massique E/P (a et c) et de la masse volumique (b et d), des plâtres **Molda® 3 Normal et **EXTHA®**.**

À structure ou E/P fixés, les données en statique et en dynamique sont comparables, les deux méthodes permettant donc d'obtenir des résultats similaires (Fig. 58). La méthode dynamique a l'avantage d'être non destructive avec des résultats facilement collectés, contrairement à la méthode en statique qui requiert des équipements plus complexes par l'instrumentation des éprouvettes et qui nécessite la destruction de l'éprouvette.

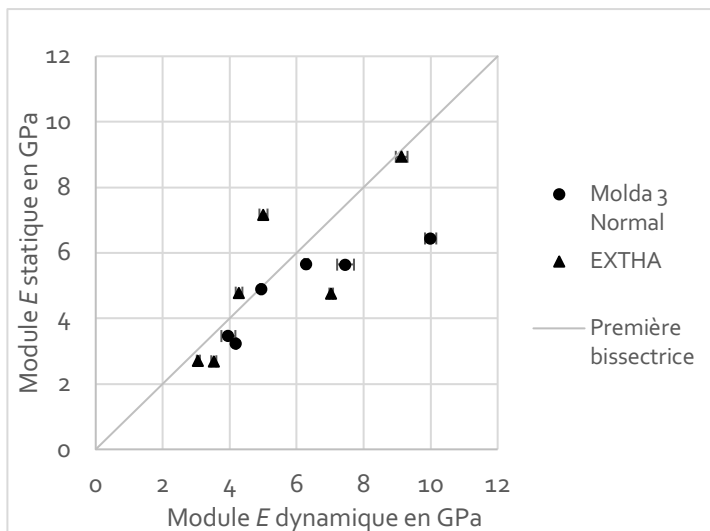


Figure 58 : module E statique en fonction du module E dynamique des deux plâtres, montrant la similitude des ordres de grandeur des valeurs obtenues par mesure des éprouvettes cylindriques instrumentées de jauge de déformation, évaluée en compression, et par mesure en fréquence de résonance des éprouvettes prismatiques.

Les données collectées en statique sont ensuite comparées à un modèle établi d'après la loi de Coquard [8], afin de vérifier l'évolution du module élastique selon la structure, et afin de prévoir un modèle pour l'analyse des formulations avec additifs. Les données des deux plâtres sont associées et moyennées afin de ne représenter qu'une seule série de données, leurs résultats étant similaires.

$$\text{Loi de variation de Coquard : } E = 27(1 - 1,15P)^{1,84} \quad [8]$$

Avec E le module élastique statique et P la porosité.

Pour ajuster les données à ce modèle, ne connaissant pas la porosité des mélanges mais connaissant les rapports massiques E/P , et considérant que $P = f(E/P)$, les valeurs de porosité sont déterminées par la relation de Satava [7] telle que :

$$P = \frac{(E/P - 0,15)}{(E/P + 0,36)} \quad [7]$$

Avec P la porosité et E/P le taux de gâchage.

Ainsi les valeurs de module E statique de l'étude sont ajustées au modèle établi selon la loi de Coquard, avec $P = f(E/P)$. Pour comparaison, les modules élastiques sont représentés en fonction de la masse volumique, calculée d'après la loi de calibration établie précédemment⁸⁵, telle que $\rho = b.(E/P)^a$ avec $a = -0,606$ et $b = 880,18$. Les résultats présentent une corrélation acceptable (Fig. 59). Les aléas de valeurs sont très certainement liés aux défauts intrinsèques du matériau. Pour rappel, en statique, les données sont obtenues avec une mesure unique par mélange, puisque seule une éprouvette cylindrique pour chaque formulation a été équipée d'une jauge biaxiale.

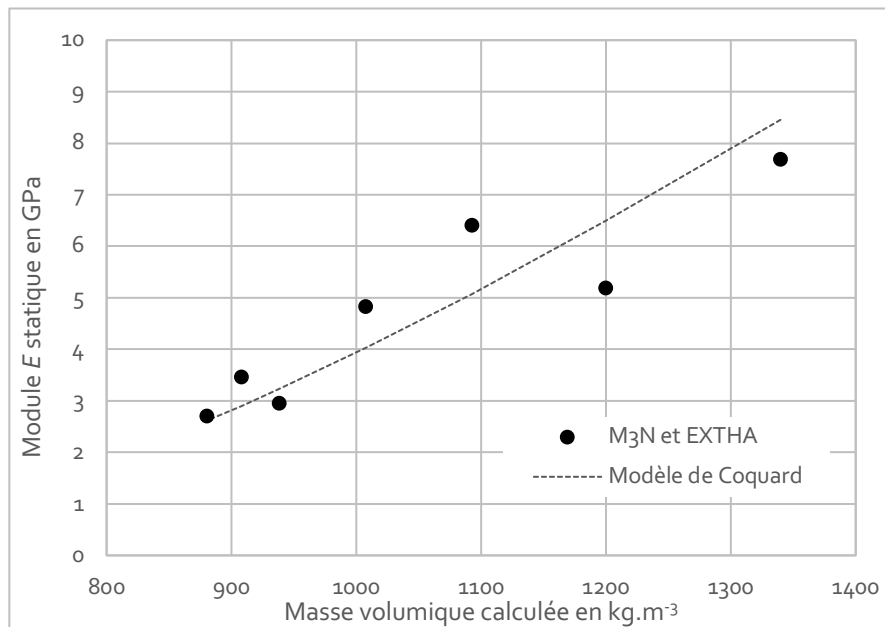


Figure 59 : représentation des valeurs de modules E statique ajustées au modèle établi d'après la loi de variation de Coquard [8] indiquant un lien fonctionnel entre la rigidité d'un matériau et sa structure, en considérant la porosité calculée d'après la relation de Satava [7] qui donne P selon le taux massique E/P .

⁸⁵ Voir partie III. Résultats, 1. Plâtres, a. Masses volumiques, p. 283.

d. Porosité

Les données de références sont compilées et représentées en fonction du rapport massique E/P, selon un lien fonctionnel tel que $P = f(E/P)$ (Fig. 60). Les valeurs de références suivent le modèle établi selon la relation de Satava⁸⁶ [7].

Ce lien fonctionnel est clairement identifiable et la relation proposée semble bien adaptée aux plâtres β . La tendance montre que la porosité augmente lorsque le rapport massique est accru, et donc lorsque la concentration en poudre de plâtre diminue. Les rapports massiques étant liés à la masse volumique, la porosité doit donc être évaluée en fonction de ce paramètre, représentatif de la structure du matériau (Fig. 62). Un lien fonctionnel tel que $P = f(\rho)$ confirme ce constat. Ainsi, en accord avec les références, la modification du rapport massique, et donc de la concentration en matrice liante, conditionne directement la structure poreuse du matériau à l'état solide.

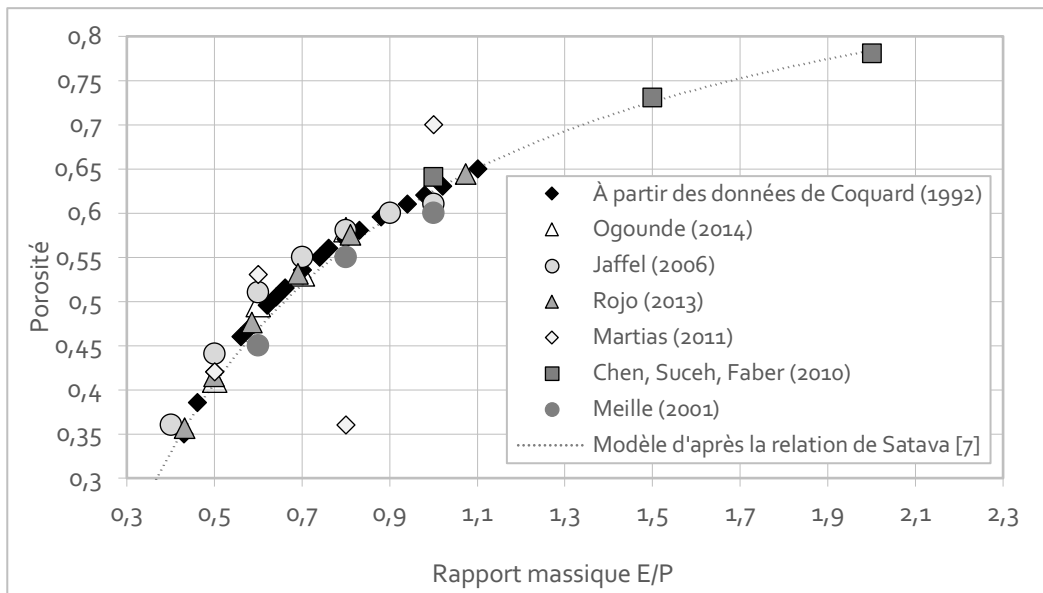


Figure 60 : données de référence de porosité en fonction du rapport massique, ajustées selon la relation de Satava [7], illustrant bien le lien fonctionnel $P = f(E/P)$.

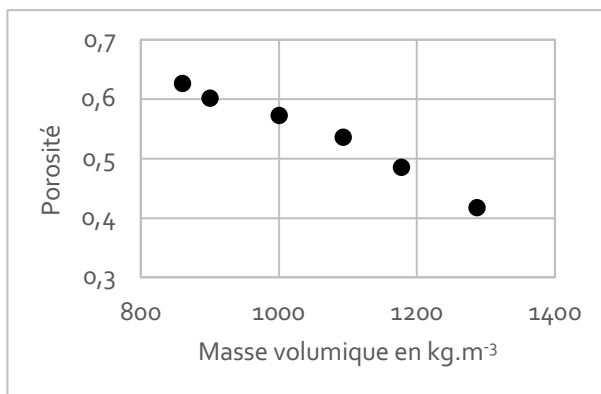


Figure 61 : représentation de la porosité d'après les références, illustrant le lien fonctionnel avec les rapports massiques.

⁸⁶ CHEN Z., et al., « A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum », *Journal of Materials Science*, 45 / 16 (2010), p. 4445.

2. Addition de carbonate de calcium

a. Masses volumiques

L'effet de l'ajout de carbonate de calcium est constaté dans un premier temps en considérant le rapport massique. Pour cela, le modèle $\rho = f(E/P)$ établi pour le plâtre seul d'après les données de Molda®3 Normal est repris (Fig. 62). Puis les valeurs des formulations chargées sont reportées : E/P = 0,7 ; 0,9 et 1,1 à ratio plâtre-carbonate de calcium 1-0,5 ; 1-1 et 1-1,5 (Fig. 63). Les formulations additionnées sont décrites selon le rapport massique eau/masse solide, soit E/Ms, qui correspond à la masse totale des poudres mélangées.

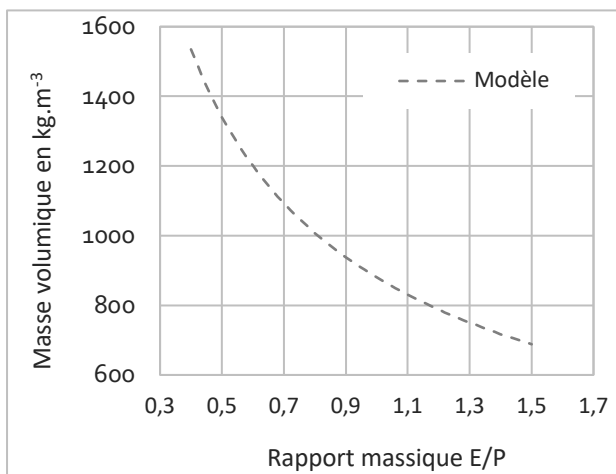


Figure 62 : représentation du modèle $\rho = f(E/P)$ établi pour le plâtre seul.

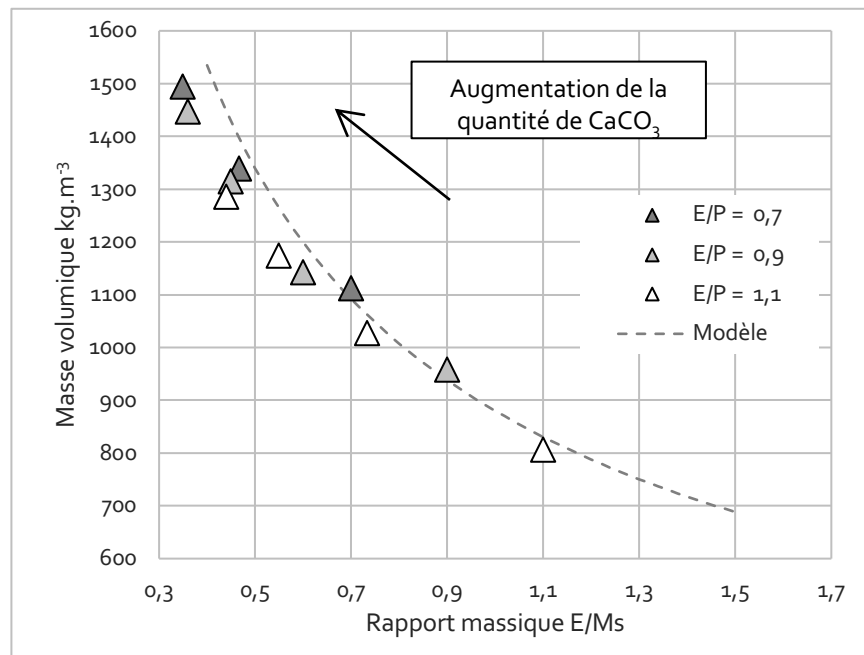


Figure 63 : représentation des mesures de masses volumiques pour les mélanges chargés de CaCO_3 et associées au modèle du plâtre seul montrant une augmentation de ρ et modification du rapport E/Ms avec l'ajout de la charge.

Cette représentation (Fig. 63) illustre l'effet du carbonate de calcium, qui, logiquement, augmente la masse volumique de la formulation, pour une teneur en eau fixée. Malgré le nombre restreint de formulations testées à différents rapports massiques E/P, les résultats suggèrent une tendance représentative de l'effet de carbonate de calcium similaire à celle du modèle $\rho = f(E/P)$ établi pour les mélanges eau-plâtre. Il semblerait donc que le carbonate de calcium ne modifie pas l'hydratation générale de la formulation, ayant plutôt un rôle de charge inerte dit *filler*.

Pour vérifier cette hypothèse et montrer l'effet de l'additif, les données peuvent être analysées en considérant uniquement l'effet du CaCO_3 et en s'affranchissant du mélange eau-plâtre par un adimensionnement. Ainsi, pour chaque formulation, une masse volumique relative et un rapport massique relatif, ou demande en eau relative, sont calculés par rapport aux données à $E/P = 0,7$; $0,9$; $1,1$ sans CaCO_3 , entourées sur le graphique (Fig. 64).

Calcul des données relatives pour l'adimensionnement :

$$\text{Masse volumique } \rho \text{ relative} = \frac{\rho (E/Ms)}{\rho (E/P \text{ référence})} \quad [12]$$

$$\text{Rapport massique relatif, ou demande en eau relative} = \frac{(E/Ms)}{(E/P \text{ référence})} \quad [13]$$

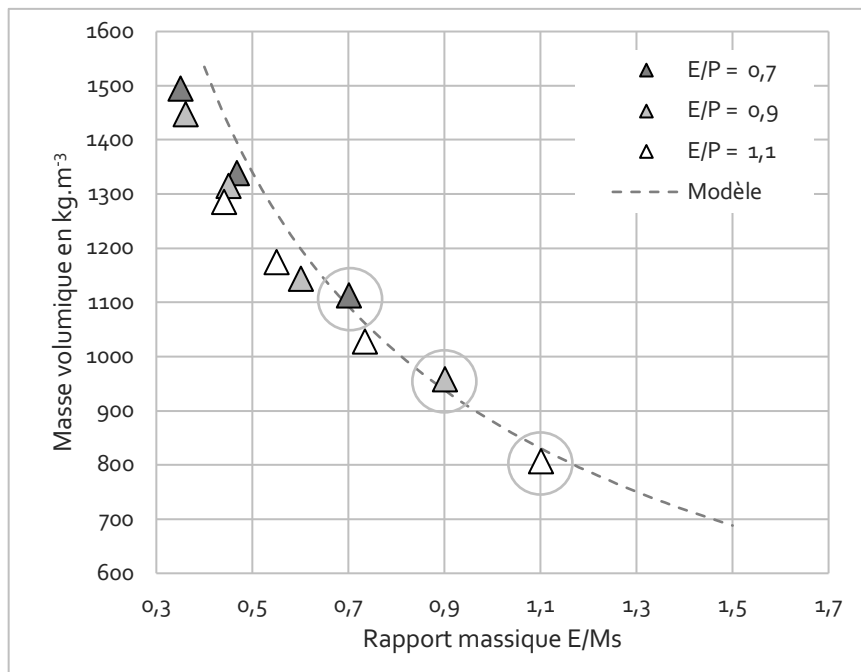


Figure 64 : représentation des données mesurées, avant adimensionnement.

Après adimensionnement, les données relatives montrent que les additions de carbonate de calcium présentent la même modification de la masse volumique quel que soit le rapport massique E/P (Fig. 65). Ainsi, pour des mélanges avec de l'eau en excès, la tendance identifiée suggère que l'additif agit comme une charge inerte sans modifier la réactivité ou le processus d'hydratation du plâtre. Ce constat concorde avec les références indiquant l'élévation de la masse volumique par l'addition de telles charges.

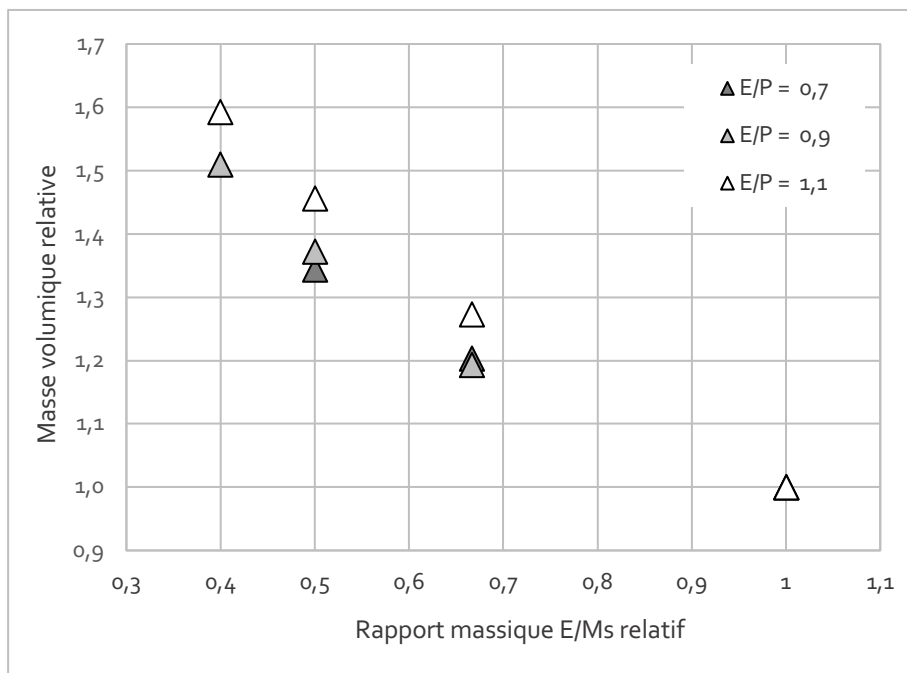


Figure 65 : représentation des valeurs de masses volumiques relatives en fonction des rapports massiques relatifs, après adimensionnement, pour identifier l'effet du CaCO_3 indépendamment du plâtre.

Pour la poursuite de l'analyse des formulations, l'effet de l'ajout de CaCO_3 peut être modélisé par une loi puissance de type $\rho = b \cdot (E/Ms)^a$. Toutes les données sont regroupées dans un même champ et les paramètres a et b sont calculés par régression linéaire dans le plan ln-ln, avec $a = -0,476$ et $b = 1,002$. La démarche est confirmée par la valeur de coefficient de détermination avec $R^2 = 97,33\%$.

b. Comportement et résistance à la contrainte

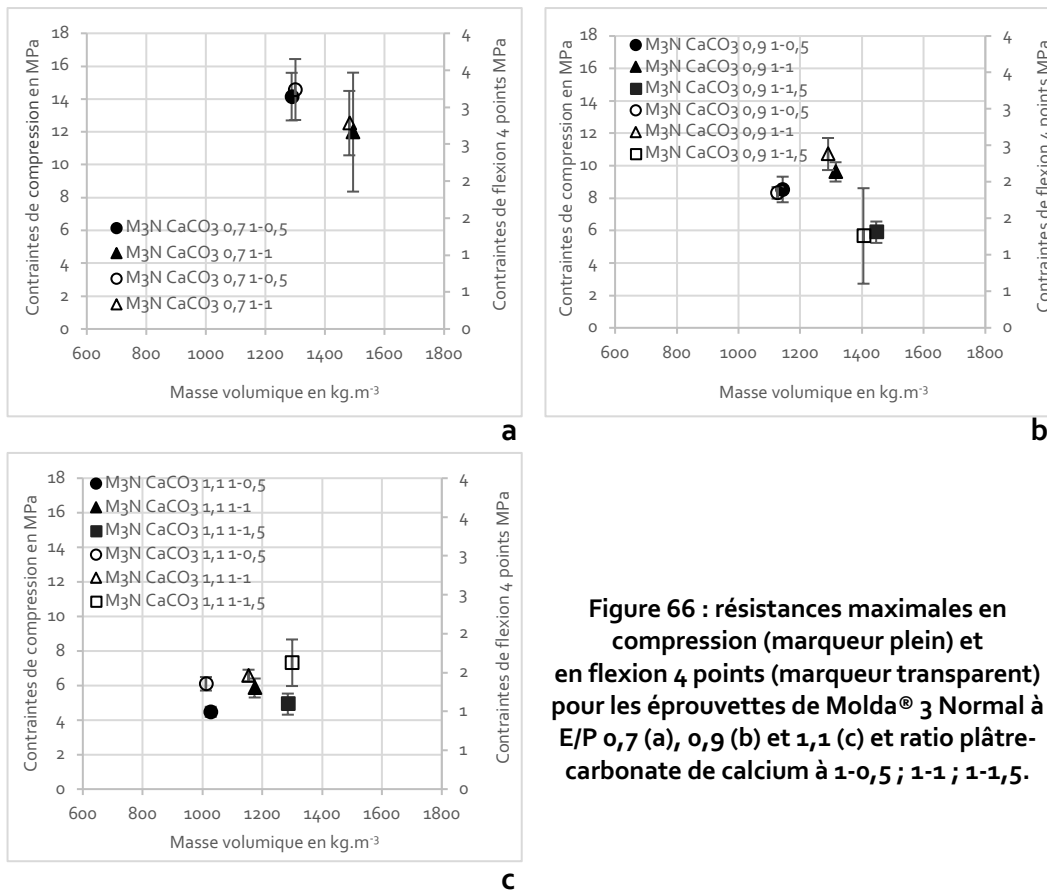


Figure 66 : résistances maximales en compression (marqueur plein) et en flexion 4 points (marqueur transparent) pour les éprouvettes de Molda® 3 Normal à E/P 0,7 (a), 0,9 (b) et 1,1 (c) et ratio plâtre-carbonate de calcium à 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5.

Les ajouts de carbonate de calcium dans les formulations de plâtre Molda® 3 Normal à E/P = 0,7 ; 0,9 et 1,1 modifient les résistances maximales en compression et en flexion 4 points avec des augmentations ou des baisses de valeurs, selon les rapports massiques et ratios de carbonate de calcium (Fig. 66).

À partir des données de compression, et après ce premier constat, il faut distinguer l'effet spécifique du carbonate de calcium, en s'intéressant plus particulièrement aux données par rapport aux taux E/P non additionnés de carbonate de calcium (Fig. 67). La courbe modèle pour le plâtre Molda® 3 Normal est utilisée et les valeurs à E/P = 0,7 ; 0,9 et 1,1 sans additif sont placées. Ensuite, les valeurs des formulations avec additifs sont ajoutées, en considérant la masse volumique comme paramètre de comparaison. En observant les allures des courbes pour les différents rapports massiques E/P, une même tendance est constatée avec un effet de renfort mécanique, puis, un effet d'effondrement au-delà d'un certain seuil de carbonate de calcium. Cette perte de résistance est conditionnée par la fragilisation de la structure de la matrice liante de plâtre, en cas de surdosage de CaCO₃ dans les liaisons cristallines du plâtre. La tendance est similaire d'un taux E/P à un autre, à condition que le seuil d'ajout de carbonate de calcium soit atteint, variable selon les rapports massiques. Ces constats de seuil et d'effondrement des résistances concordent avec les références citées précédemment et s'accordent aux données établies pour le plâtre additionné de charges diverses, ainsi que pour les matrices cimentaires additionnées de CaCO₃.

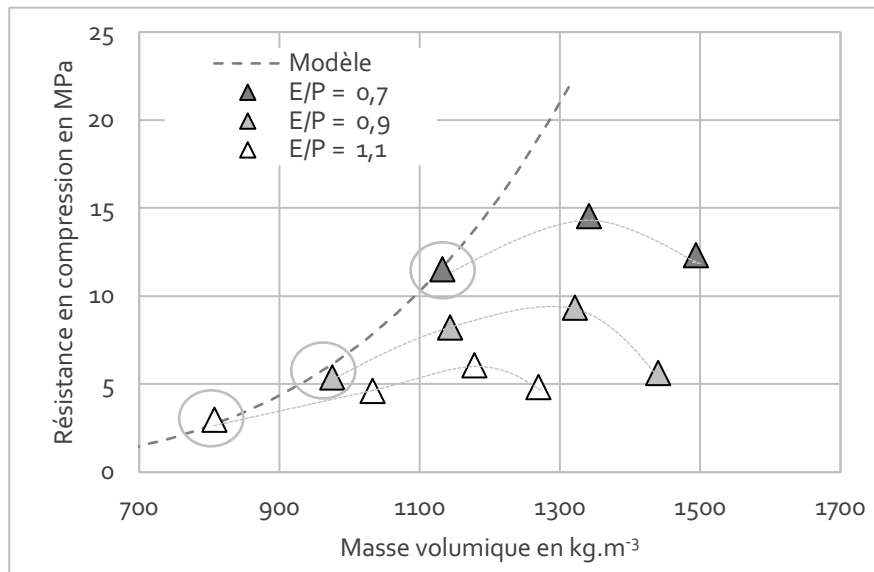


Figure 67 : représentation des mesures Rc des formulations avec et sans CaCO₃ à E/P choisis, selon la masse volumique, montrant une tendance similaire de renfort puis d’effondrement, selon la quantité de charge ajoutée.

Pour vérifier l’effet du carbonate de calcium indépendamment du plâtre, la même démarche d’adimensionnement peut être employée (Fig. 68). Les données pour chaque taux E/P étudié (0,7 ; 0,9 ; 1,1) sont rapportées à des valeurs relatives de masses volumiques et de résistances en compression telles que :

$$\rho_{\text{relative}} = \frac{\rho(E/Ms)}{\rho(E/P \text{ référence})} \quad [12] \quad \text{et} \quad R_{c \text{ relative}} = \frac{R_c(E/Ms)}{R_c(E/P \text{ référence})} \quad [14]$$

Un lien fonctionnel de type $R_{c \text{ relative}} = b.(\rho_{\text{relative}})^a$ est alors clairement identifiable pour la majorité des données, c’est-à-dire celles qui ne dépassent pas le seuil d’ajout maximal avant effondrement, avec $a = 1,0001$ et $b = 1,828$ modélisant l’effet de l’ajout du CaCO₃ dans une matrice de plâtre. Ainsi, tant que le seuil n’est pas dépassé, la résistance maximale est renforcée par l’ajout de carbonate de calcium (Fig. 68), sans modifier la prise.

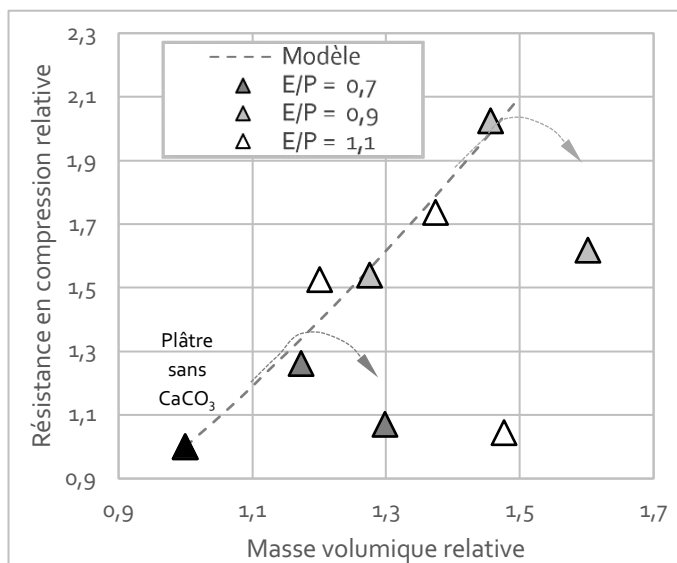


Figure 68 : représentation des Rc relatives selon la masse volumique relative, après adimensionnement, identifiant clairement l’effet de l’additif avec un renfort de Rc suivi d’une baisse drastique au-delà du seuil à ratio 1-0,5 pour E/P 0,7 et à ratio 1-1 pour E/P 0,9 et 1,1.

c. Module de Young et module E dynamique

Les modules élastiques des formulations additionnées de carbonate de calcium sont compris entre $\approx 2,3$ et $\approx 7,7$ GPa en statique, et $\approx 3,1$ et $\approx 8,7$ GPa en dynamique, qui correspondent aux formulations à $E/P = 0,7$ et ratio plâtre-carbonate de calcium 1-1 pour les valeurs plus hautes et $E/P = 1,1$ à ratio 1-0,5 pour les plus basses (Fig. 69). Le même constat de liens fonctionnels tels que $E = f(\rho)$ et $E = f(E/P)$ est observé pour les formulations avec additifs.

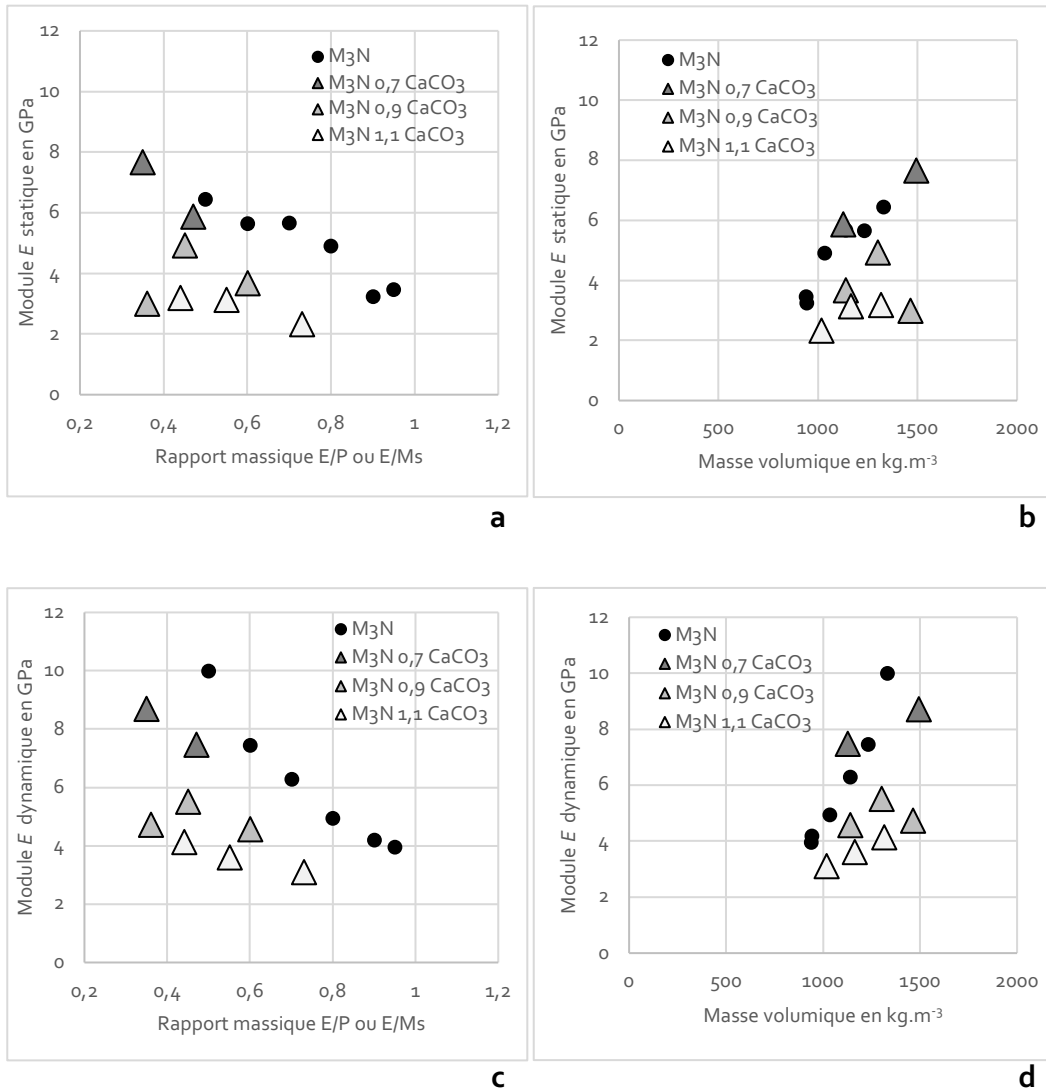


Figure 69 : module élastique E statique (a) et module E dynamique (b), en fonction de la masse volumique, des formulations de plâtre Molda[®] 3 normal avec ou sans CaCO₃.

À rapport massique E/Ms fixé, les valeurs en statique et en dynamique sont cohérentes et s'accordent avec celles du Molda® 3 Normal sans additif (Fig. 70).

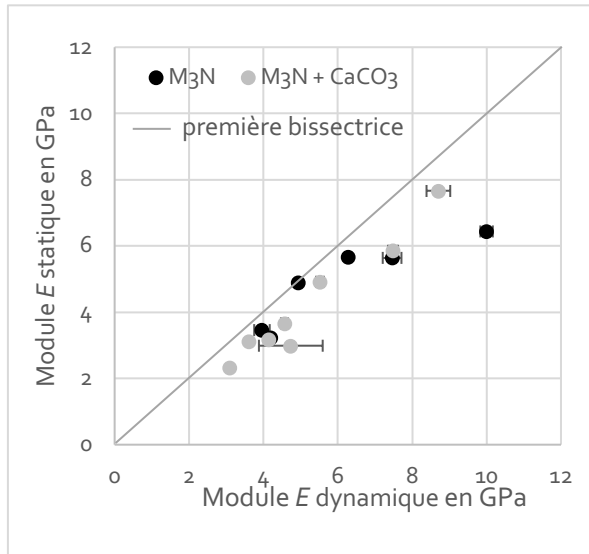


Figure 70 : module E en fonction du module E dynamique des formulations de plâtre Molda® 3 normal avec ou sans CaCO_3 , montrant la similitude des ordres de grandeur des valeurs obtenues par mesure des éprouvettes cylindriques instrumentées de jauge de déformation, évaluée en compression, et par mesure en fréquence de résonance des éprouvettes prismatiques.

Suivant le même protocole que celui établi pour la masse volumique et la résistance en compression, un test est réalisé avec le paramètre élastique pour distinguer l'effet du carbonate de calcium dans les formulations. Pour cela, le modèle $E = f(\rho)$ est utilisé, tel qu'établi précédemment à partir de la loi de Coquard [8] pour le plâtre seul. Les masses volumiques des formulations à différents E/P et ratios de carbonate de calcium sont rapportées selon la loi de calibration $\rho = b.(E/P)^a$ avec $a = -0,606$ et $b = 880,18$ (Fig. 71). Une tendance similaire au comportement identifié en résistance en compression montre un effet premier d'augmentation de la rigidité, combiné à l'accroissement de la masse volumique, suivi d'un affaiblissement du matériau au-delà d'un certain seuil, comme pour la formulation à E/P = 0,9 avec un ratio plâtre-carbonate de calcium de 1-1,5.

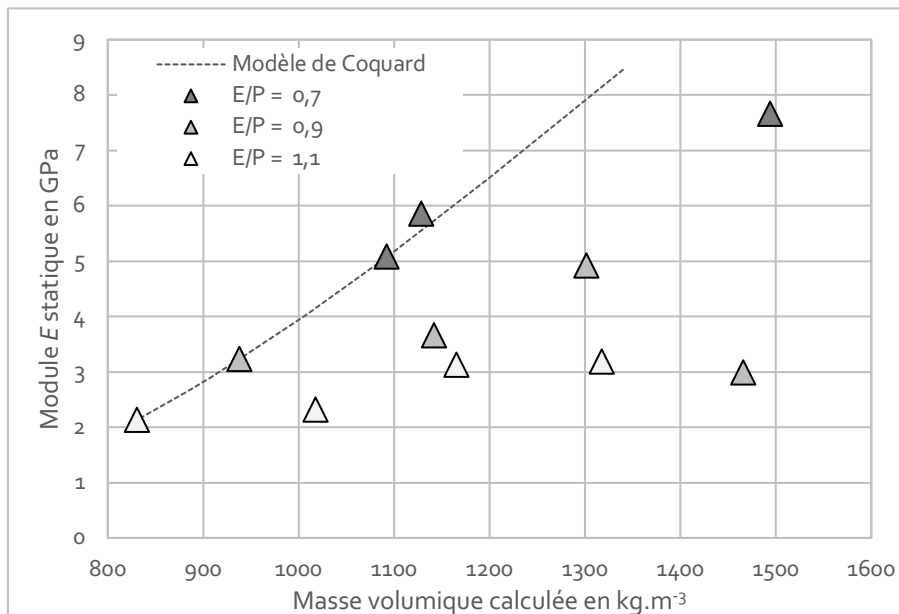


Figure 71 : représentation des modules E statique pour les formulations de plâtre et de carbonate de calcium, à partir des masses volumiques calculées et de l'ajustement selon la loi de variation de Coquard.

En soustrayant l'effet du plâtre seul, et en introduisant un adimensionnement, le rôle du carbonate de calcium peut être identifié de façon acceptable (Fig. 72). Une tendance principale apparaît montrant l'effet d'augmentation du module E avec l'élévation de la masse volumique, jusqu'à un seuil maximal d'ajout de carbonate de calcium. Au-delà du seuil, la matrice liante n'ayant plus une capacité suffisante d'enrobage de la charge, le module E baisse.

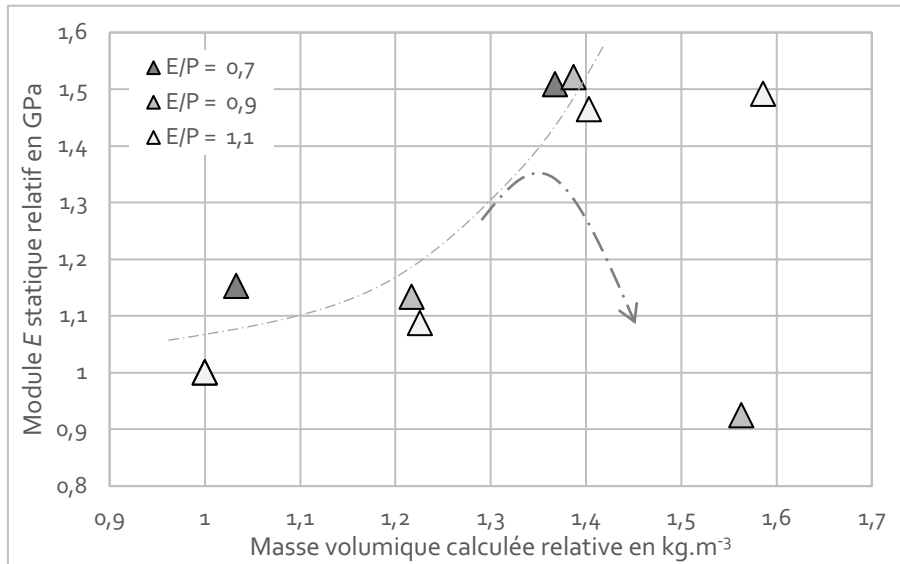


Figure 72 : représentation des données après adimensionnement, identifiant l'effet du CaCO_3 , avec une première phase de renfort puis un effondrement des modules E statiques, au-delà d'un seuil maximal d'ajout de charge inerte.

Pour la suite des analyses de formulations additionnées de CaCO_3 et TiO_2 , cette évolution est modélisée, en retenant un modèle de la forme : $E_{\text{relative}} = b \cdot \rho_{\text{relative}}^a$, avec $a = 1,093$ et $b = \exp(0,0022) = 1,0022$. Le coefficient $R^2 = 82\%$ est considéré comme acceptable, en raison de l'échantillonnage limité de la population. Les valeurs au-delà du seuil ($E/P = 0,9$ et $1,1$ à ratio 1-1,5) ont été retirées de cette modélisation (Fig. 73).

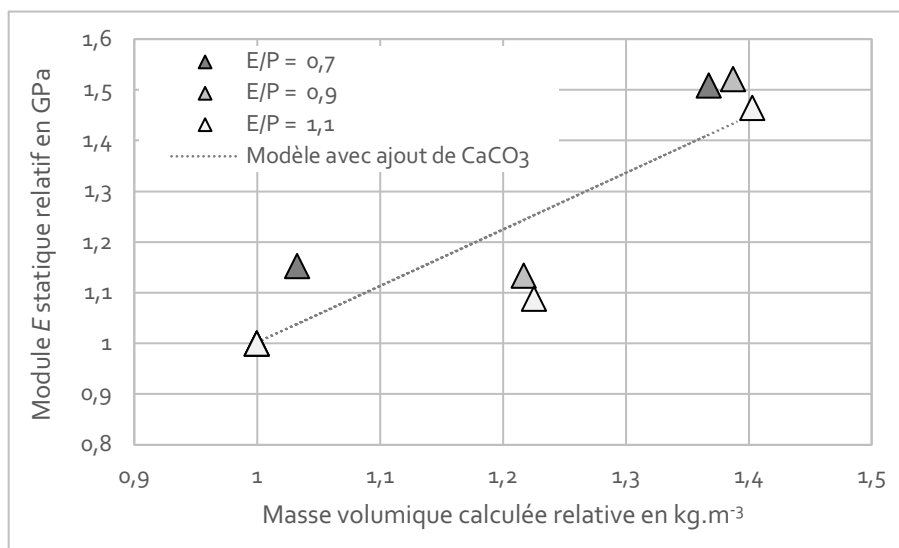


Figure 73 : représentation des valeurs après adimensionnement et modélisation de l'ajout de CaCO_3 .

3. Addition de dioxyde de titane

a. Masses volumiques

Pour identifier l'effet du dioxyde de titane comme additif dans les formulations de plâtre et de carbonate de calcium, deux démarches sont effectuées en substitution et en addition.

Effet en substitution

Dans un premier temps, les données sont traitées pour des formulations additionnelles⁸⁷ à $E/P = 0,7$; $0,9$; $1,1$ et ratio plâtre-carbonate de calcium à 1-1, à 2 % de dioxyde de titane substitués à la masse totale des poudres. Le dosage en dioxyde de titane est effectué en substitution, c'est-à-dire en retirant 2 % de la masse totale de matière solide. Par exemple, pour les mélanges à ratio 1-1, il a été retiré 1 % à la quantité de plâtre et 1 % à celle de carbonate de calcium, les masses volumiques des poudres étant respectivement de $\approx 2630 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\approx 2750 \text{ kg.m}^{-3}$. Pour information, la masse volumique du dioxyde de titane est largement supérieure, à $\approx 3850 \text{ kg.m}^{-3}$.

Pour les données des formulations à $E/P = 0,7$; $0,9$; $1,1$ à ratio 1-1 (Fig. 74), l'effet de l'ajout de 2 % de dioxyde de titane semble négligeable.

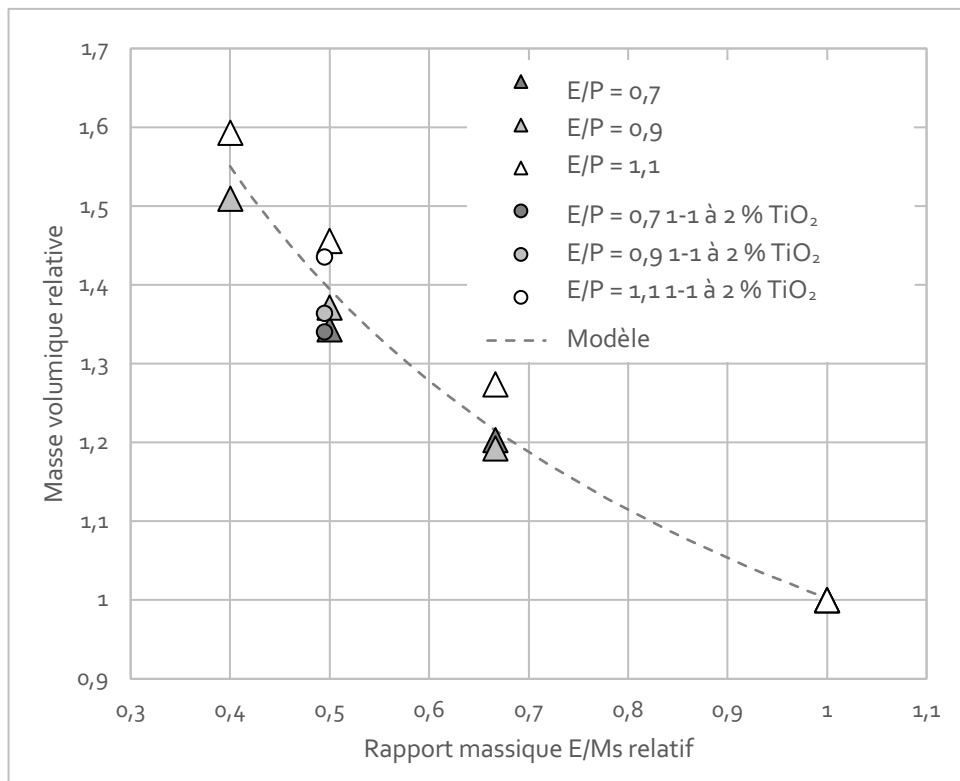


Figure 74 : représentation des données pour les formulations additionnelles avec substitution de 2 % de dioxyde de titane, après adimensionnement.

⁸⁷ Ces formulations ont été testées en fin de travaux pour compléter les données de résistance mécanique solide et ne figurent donc pas dans le plan d'expérience général.

Effet en addition

Dans un second temps, la formulation à $E/P = 1,5$ à ratio 1-2 et additionnée de 2 % de TiO_2 est évaluée, rapportée au modèle établi pour le plâtre seul puis selon l'addition de $CaCO_3$ à deux parts et de 2 % de TiO_2 (Fig. 75).

Pour identifier l'effet du dioxyde de titane en addition dans cette formulation, il est d'abord nécessaire de la modéliser. Pour cela, les modèles établis précédemment permettent l'extrapolation des données pour $E/P = 1,5$; puis pour l'addition de carbonate de calcium à ratio 1-2 ; et enfin en comparant les données modélisées avec les mesures pour la formulation additionnée de 2 % de dioxyde de titane.

Pour figurer le point $E/P = 1,5$ le modèle eau-plâtre seul est utilisé, selon la formule établie précédemment, avec $\rho = b.(E/P)^a$ et $a = -0,606$ et $b = 880,18$ soit :

$$\rho = 880,18.(E/P)^{-0,606}$$

Puis, le modèle adimensionné est utilisé pour figurer le point incluant le carbonate de calcium (Fig. 76), avec $\rho = b.(E/Ms)^a$ et $a = -0,476$ et $b = 1,002$ soit :

$$\frac{\rho}{\rho(E/P=1,5)} = 1,002.\left(\frac{E/Ms}{(E/P=1,5)}\right)^{-0,476}$$

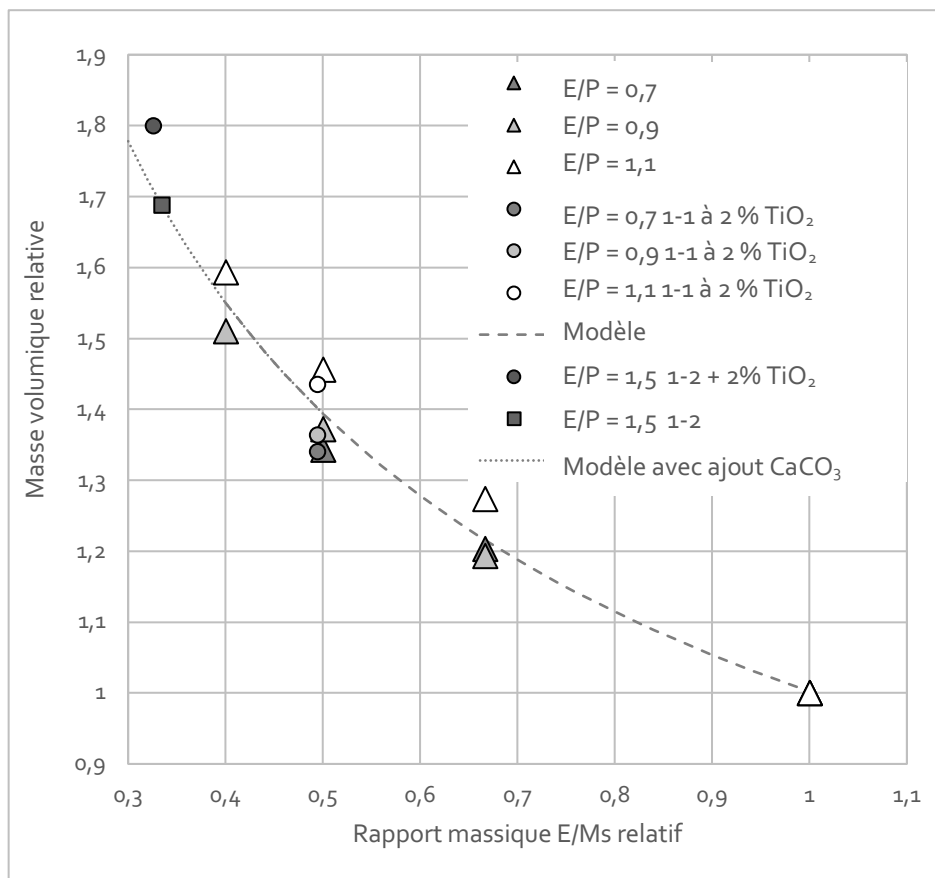


Figure 75 : représentation des données de masses volumiques pour les formulations chargées de $CaCO_3$ et de TiO_2 , avec ajustement aux modèles et après adimensionnement.

Enfin, le point mesuré pour la formulation complète peut être figuré et servir à la comparaison, afin de distinguer un effet de l'ajout du pigment de marquage, en reconstruisant l'évolution $\rho = f(E/Ms)$ (Fig. 76). Le dioxyde de titane semble avoir un effet densifiant notable, avec une augmentation de la masse volumique de $\rho \approx 6\%$, malgré la faible quantité d'ajout.

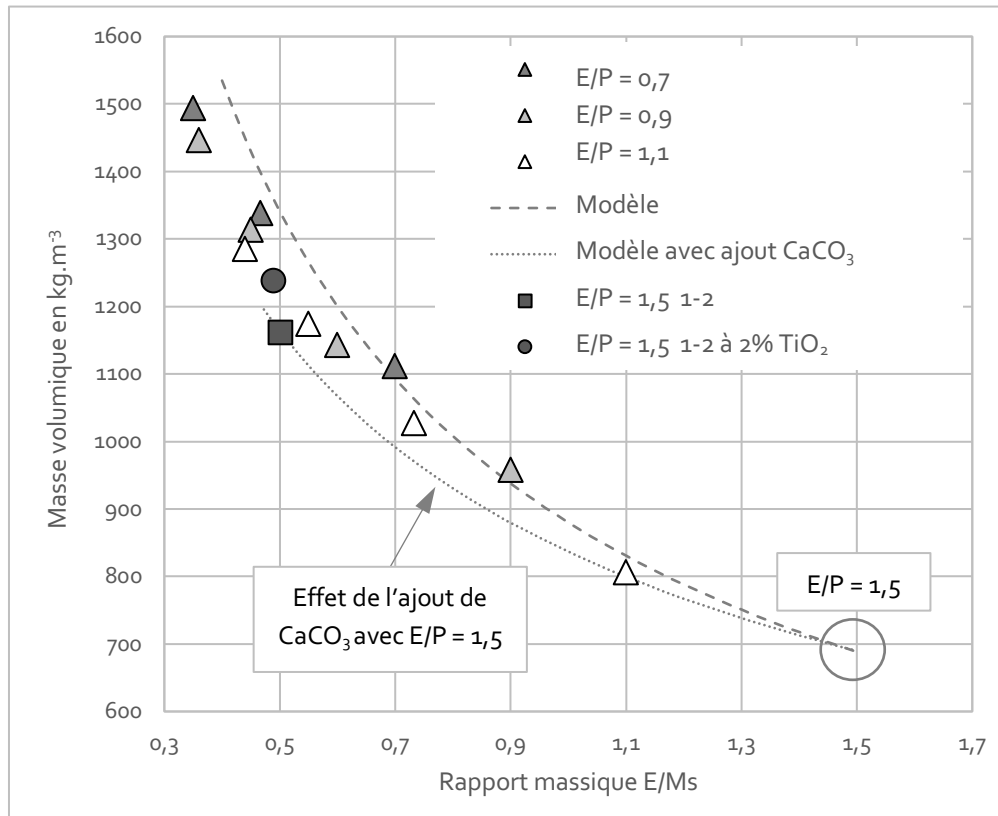


Figure 76 : représentation des données mesurées et comparaison avec les modèles et les valeurs extrapolées, mettant en avant l'effet densifiant du TiO₂.

REMARQUES

L'effet densifiant est mis en parallèle des observations en microscopie pour lesquelles il a été constaté une occupation des espaces interstitiels de la matrice poreuse du plâtre par des amas de très fines particules identifiées comme du TiO₂.

b. Comportement et résistance à la contrainte

L'effet d'un ajout de TiO_2 sur la résistance peut être étudié, après avoir constaté les comportements des mélanges de plâtre avec et sans carbonate de calcium. Pour cela, les formulations additionnées sont représentées en compression et en fonction de la masse volumique (Fig. 77). En considérant qu'à $E/P = 1,5$ le carbonate de calcium ajouté est en-deçà du seuil d'effondrement et qu'il agit donc comme un renfort mécanique, le modèle établi est utilisé pour extrapoler le point $E/P = 1,5$ à ratio plâtre-carbonate de calcium 1-2 afin de le comparer à la mesure avec une addition de 2 % de dioxyde de titane. En l'absence d'un plan d'expérience exhaustif, la démarche construite peut permettre d'identifier l'effet de l'additif sur les propriétés physiques et mécaniques. Le résultat suggère que l'ajout du marqueur, en densifiant la structure du matériau, conduit à une baisse de la résistance mécanique en compression.

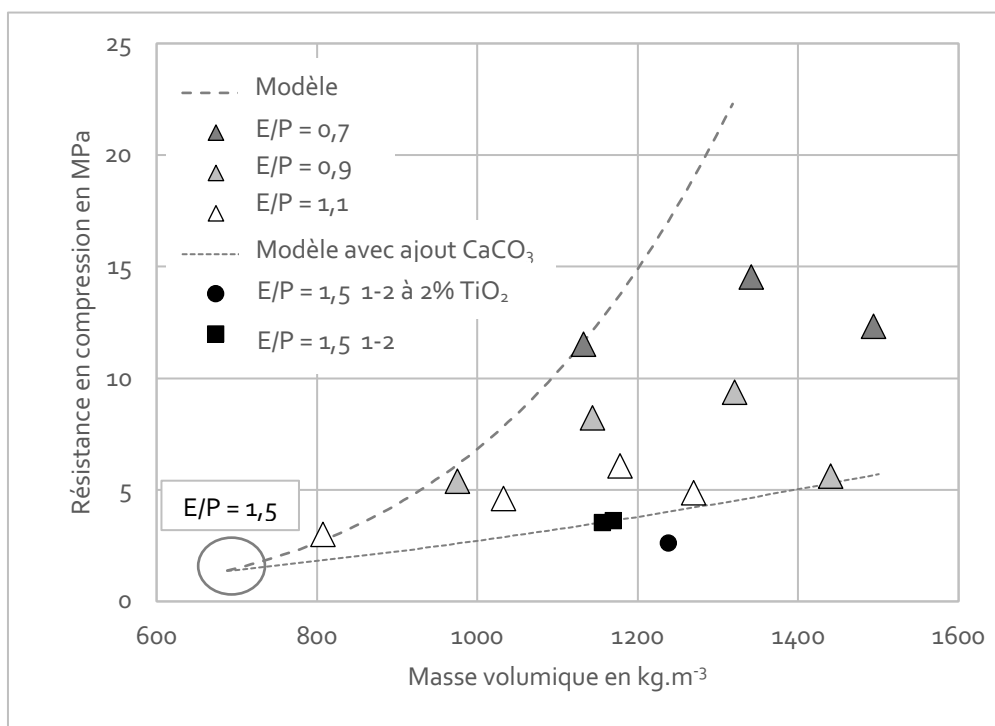


Figure 77 : représentation des valeurs de R_c pour les formulations chargées, après ajustement aux modèles et mesures, révélant la baisse de résistance lors de l'ajout de TiO_2 .

L'effet modificateur du TiO_2 peut alors être vérifié par les représentations adimensionnées, en évaluant des formulations additionnelles à $E/P = 0,7$; $0,9$; $1,1$ et à ratio plâtre- CaCO_3 à 1-1, avec une substitution de 2 % de TiO_2 (Fig. 78). Dans ce cas, la substitution de 1 % de plâtre et de 1 % de CaCO_3 au profit de 2 % de TiO_2 pour les trois mélanges évalués, ne semble pas modifier la masse volumique de façon notable, mais elle affecte la résistance ultime en compression, en comparaison des formulations sans dioxyde de titane. Seul le taux $E/P = 0,7$ à ratio 1-1 voit sa résistance améliorée avec la substitution de 2 % de TiO_2 . Dans le cas de $E/P = 0,9$ et $1,1$ la résistance est plus faible, avec une baisse très importante pour $E/P = 1,1$. La modification de la résistance en compression serait donc plutôt liée aux rapports massiques.

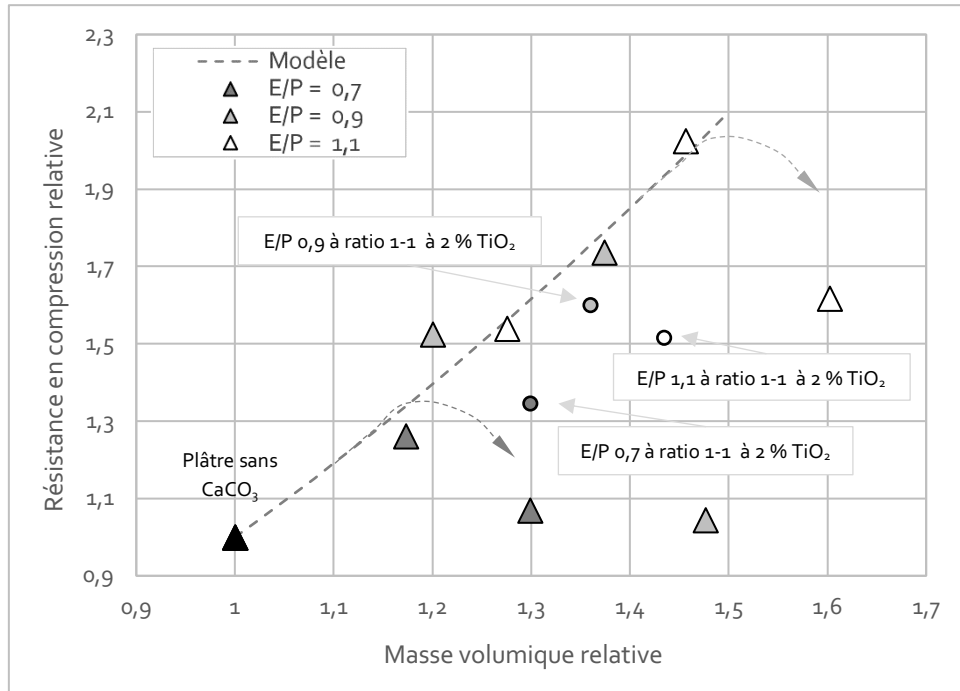


Figure 78 : représentation des données après adimensionnement, montrant un effet de baisse de R_c provoqué par le TiO_2 pour E/P 0,9 et 1,1 mais une augmentation pour E/P 0,7.

Lorsque les formulations sont testées en flexion 4 points, les résultats montrent une même tendance que celle établie en compression. Il est alors possible de proposer la même représentation de $R_f = f(R_c)$ (Fig. 79). Plus la formulation est concentrée en plâtre, et plus le matériau est résistant. Le carbonate de calcium renforce bien les propriétés mécaniques à l'état solide selon la quantité d'ajout et en-dessous d'un seuil maximal au-delà duquel la résistance à la rupture est inférieure. Dans le cas présenté ici, l'addition de dioxyde de titane, même en faible quantité, tend à abaisser la résistance d'un plâtre peu concentré et très chargé en $CaCO_3$.

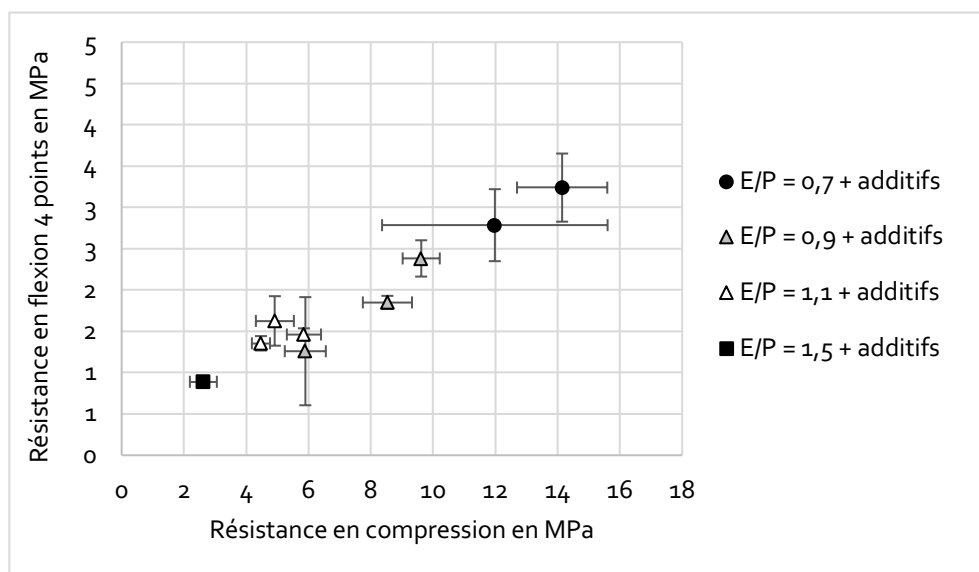


Figure 79 : représentation des données mesurées de R_c et R_f pour les formulations chargées en $CaCO_3$, avec ou sans TiO_2 .

En rapportant les valeurs à l'ensemble des données (Fig. 80), le lien fonctionnel $R_f = f(R_c)$ est observé pour le plâtre seul, avec le Molda® 3 Normal ou le EXTHA®, en accord avec un modèle établi à partir d'une sélection de données de références. La représentation des données du Molda® 3 Normal et des additifs de carbonate de calcium et de dioxyde de titane suit ce même constat.

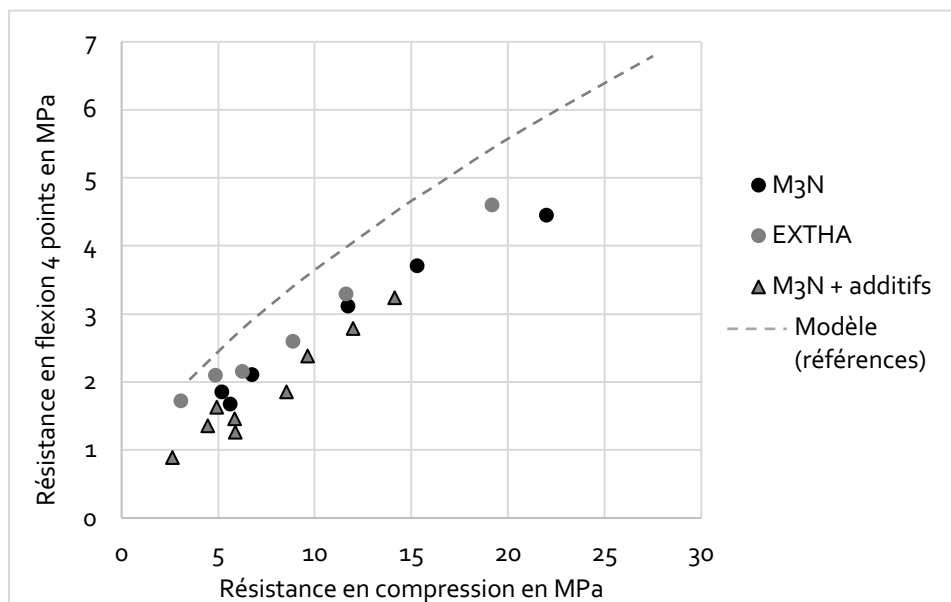


Figure 80 : représentation des différentes mesures de R_c et R_f pour les plâtres seuls et les formulations chargées, comparées à un modèle établi à partir de références, montrant des tendances similaires.

REMARQUES

L'effet du dioxyde de titane sur la résistance mécanique, indiqué ici, confirme le constat de Lucas⁸⁸ indiquant une baisse des résistances des mortiers de plâtre et de sable lors de l'ajout de TiO_2 à l'exception d'un ajout de 1% à 2,5% qui, au contraire, augmente la résistance mécanique du matériau. Suivant ce constat, une quantité optimale de dioxyde de titane, de la même façon que pour le carbonate de calcium, pourrait alors être admise pour les formulations étudiées dans ces travaux, et différerait du taux testé de 2%. Néanmoins, la baisse de résistance est généralement considérée comme un atout en conservation-restauration puisqu'elle garantit une rupture préférentielle du matériau de restauration, et non pas de l'original en cas de reprise d'altération, comme évoqué précédemment. D'après ces résultats, une formulation de comblement, marquée au TiO_2 afin de permettre l'identification de la restauration lors d'analyses, posséderait certainement des propriétés mécaniques inférieures à celles du plâtre original non chargé.

⁸⁸ Lucas, « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », *op. cit.*

c. Module de Young et module E dynamique

La formulation additionnée de dioxyde de titane, telle que $E/P = 1,5$ à ratio 1-2 et avec une addition de 2 % de TiO_2 présente des valeurs de modules élastiques inférieures à la plupart des formulations testées, de plâtre seul et de plâtre additionné de $CaCO_3$, et ce malgré une masse volumique plutôt élevée (Fig. 81). La forte quantité de carbonate de calcium et l'addition de dioxyde de titane, même à faible apport, semblent abaisser les modules élastiques considérablement, à $\approx 2,8$ GPa en statique et à $\approx 2,6$ GPa en dynamique.

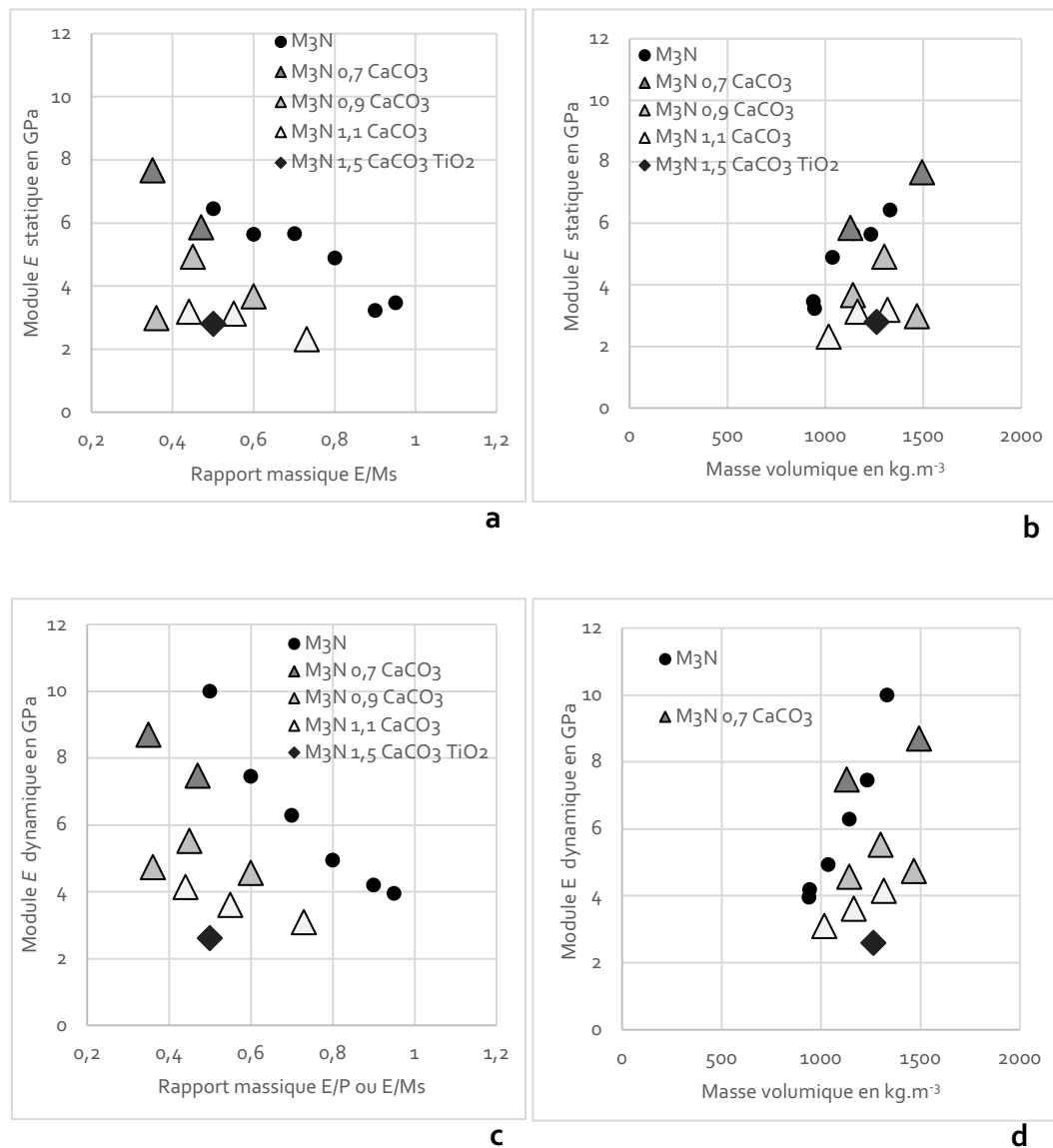


Figure 81 : module élastique E statique (a et b) et module E dynamique (c et d), en fonction du rapport massique et de la masse volumique, des formulations adjuvantées de plâtre Molda® 3 normal.

Les valeurs en statique et en dynamique sont presque identiques, comme le montre la représentation suivante (Fig. 82).

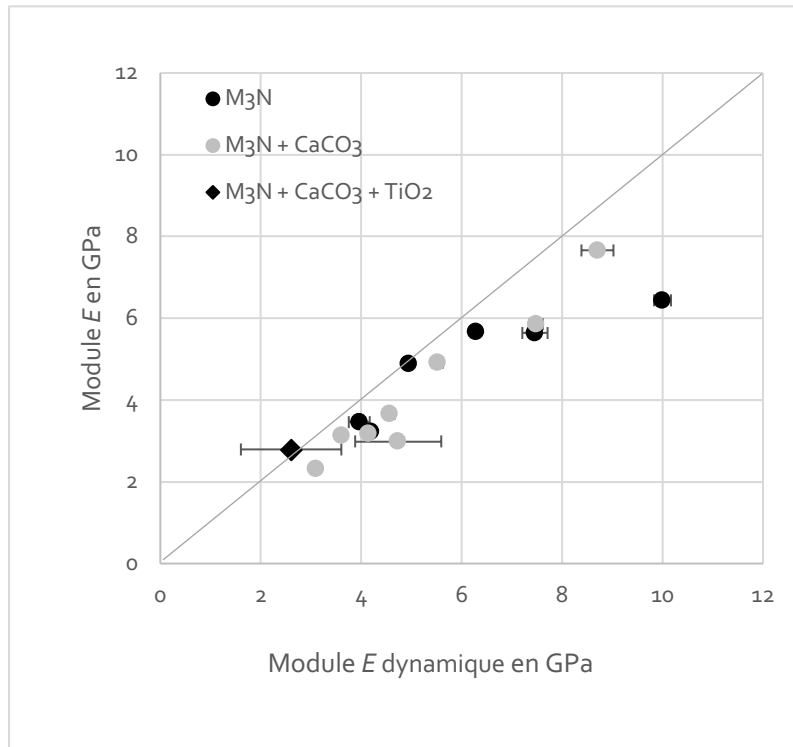


Figure 82 : représentation des modules élastiques, bien ajustés à la première bissectrice.

Pour approfondir l'analyse et distinguer l'effet du dioxyde de titane en addition, le module E pour $E/P = 1,5$ et l'effet de l'ajout de CaCO_3 sont extrapolés à partir du modèle établi tel que : $E_{\text{relative}} = b \cdot \rho_{\text{relative}}^a$, avec $a = 1,093$ et $b = \exp(0,0022) = 1,0022$.

L'ajout de carbonate de calcium à ratio 1-2 est extrapolé de la même façon, selon le modèle $\rho = f(E/M_s)$. Le module E de la formulation additionnée de TiO_2 , ayant été mesuré, peut être rapporté sur la représentation (Fig. 83).

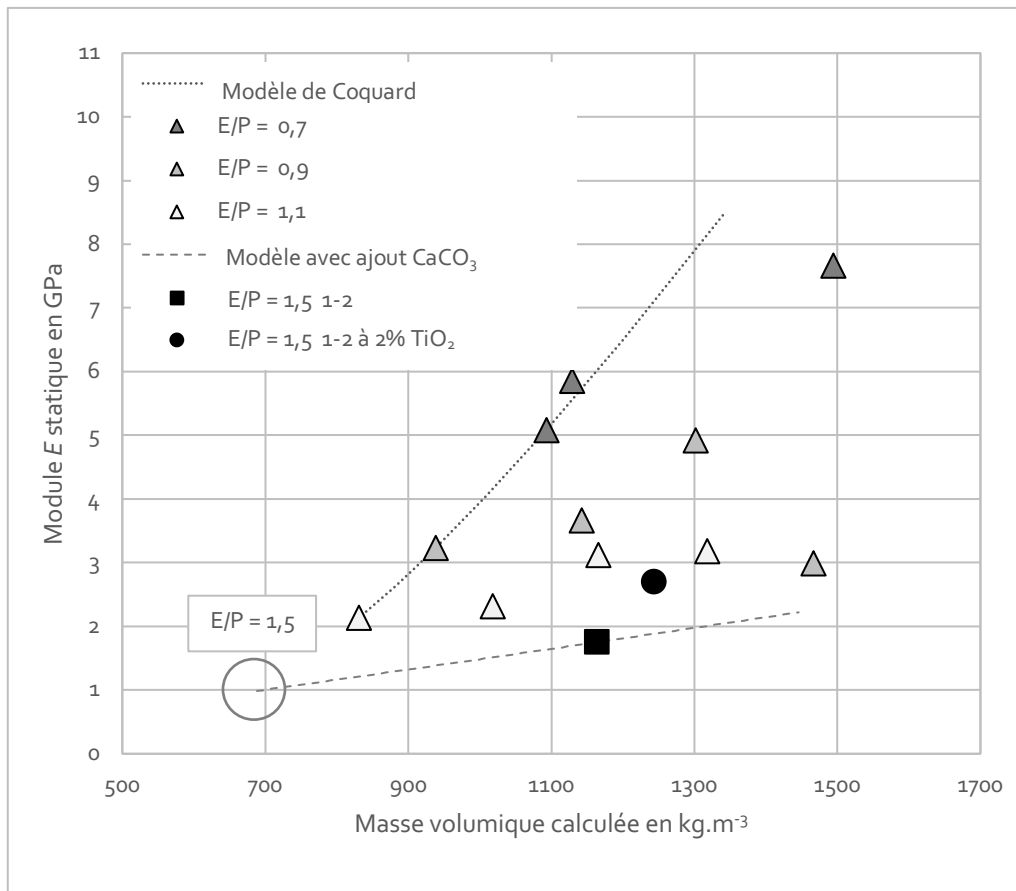


Figure 83 : représentation des modules élastiques statiques après modélisations et extrapolations, et comparaison avec la valeur mesurée pour $E/P = 1,5$ à ratio 1-2 + 2 % de TiO_2 , montrant une élévation de la rigidité malgré la faible quantité ajoutée.

L'extrapolation des données pour $E/P = 1,5$ et un ratio plâtre-carbonate de calcium de 1-2 permet de suggérer que l'ajout du dioxyde de titane augmenterait le module élastique E (Fig. 83). L'addition, même minimale de 2 % semble avoir un effet suffisamment important. Ce phénomène corrobore les références, indiquant qu'un très faible pourcentage de charges diverses permet d'améliorer les propriétés élastiques d'un matériau à matrice liante comme le plâtre.

REMARQUES

Ce constat d'amélioration de la rigidité contrebalance l'effet de baisse de résistance en compression observé avec l'apport de dioxyde de titane dans les formulations aux rapports massiques élevés (peu concentrés en plâtre) et très chargés en $CaCO_3$. En considérant d'autres mélanges, il est possible que cette faible quantité de pigment soit suffisante pour conditionner une élévation de la rigidité tout en améliorant la résistance en compression.

4. Coefficient de Poisson

Les coefficients de Poisson⁸⁹, obtenus en statique (Fig. 84) et en dynamique (Fig. 85), ont des valeurs comprises entre $\approx 0,22$ et $\approx 0,32$ pour les deux plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA®, et entre $\approx 0,17$ et $\approx 0,33$ pour les formulations de Molda® 3 Normal additionnées de carbonate de calcium et de dioxyde de titane. Les valeurs combinées semblent majoritairement comprises entre $\approx 0,25$ et $\approx 0,3$ sans qu'il soit possible d'établir un lien fonctionnel entre les rapports massiques ou les masses volumiques (Fig. 86). En statique et en dynamique, la valeur moyenne est de $\approx 0,26$.

Ces données concordent avec les valeurs de références, telles que $\nu \approx 0,3$; $0,33$ ⁹⁰ ou $0,34$ ⁹¹.

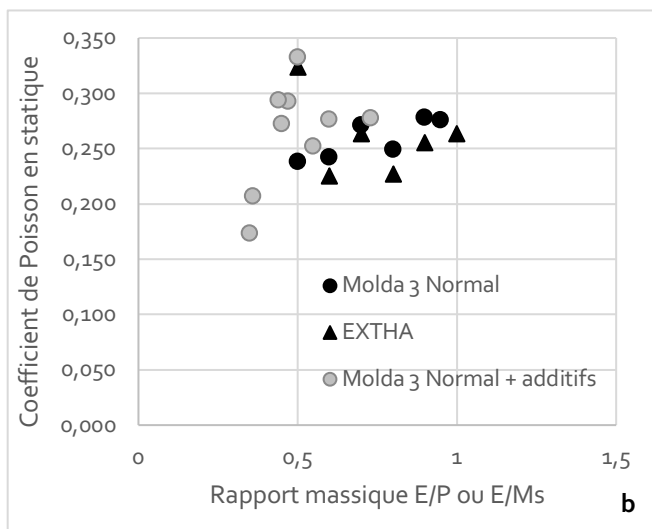
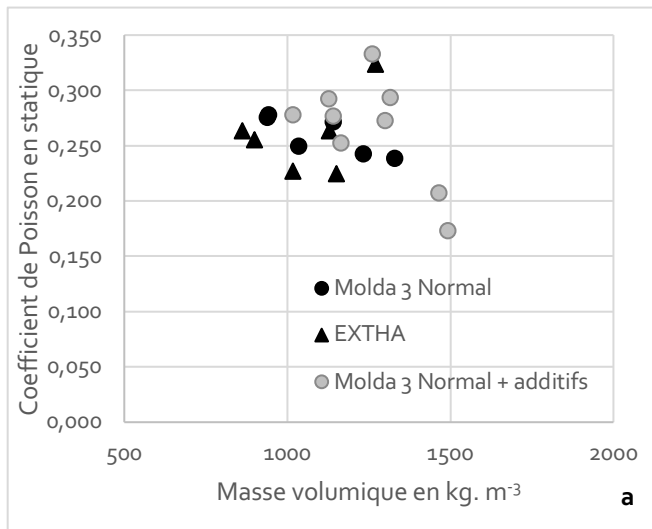


Figure 84 :

représentation des coefficients de Poisson en statique, selon la masse volumique (a) et selon le rapport massique (b) ; ces valeurs sont obtenues par calculs des données en essai de compression instrumenté de jauges biaxiales.

⁸⁹ Données de coefficient de Poisson pour toutes les formulations en annexe IV, p. 532.

⁹⁰ Meille, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, op.cit. p. 92 ; Plachý, et al., « Monitoring of Mechanical Properties Evolution of the Cast Gypsum », op. cit., p. 564.

⁹¹ Betene Ebanda, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, op. cit., p. 174.

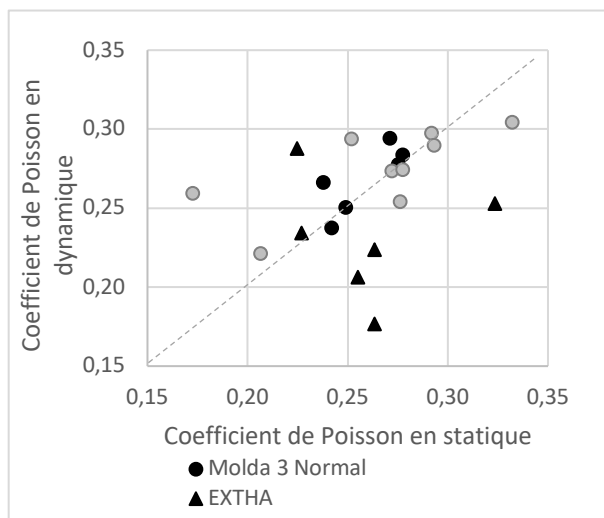
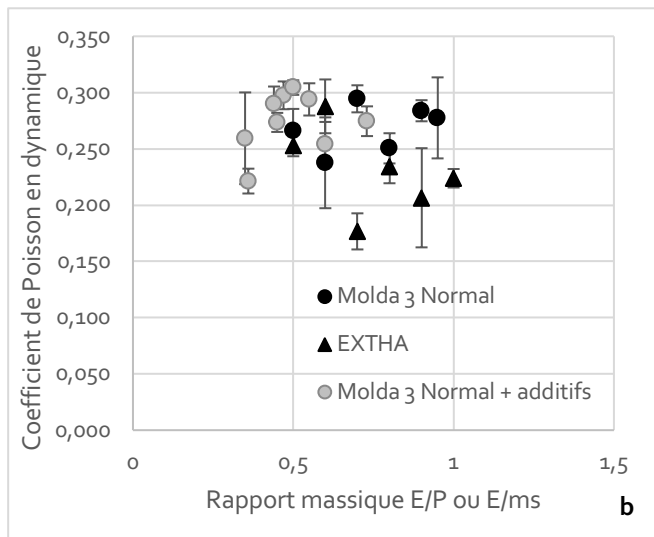
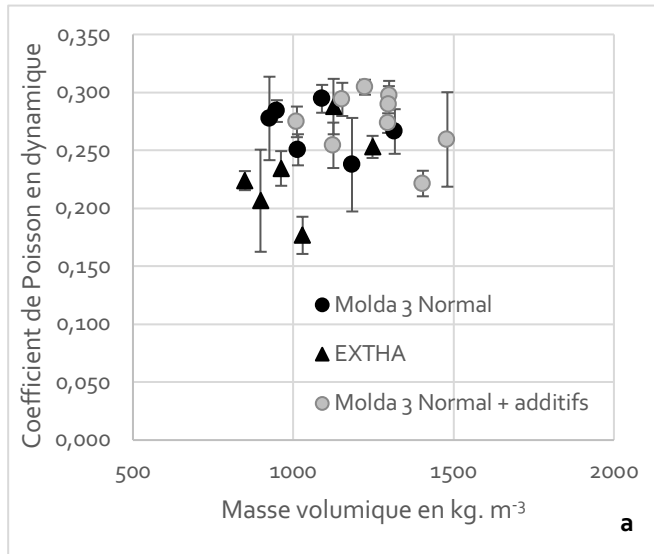


Figure 85 :

représentation des coefficients de Poisson en dynamique, selon la masse volumique (a) et selon le rapport massique (b) ; ces valeurs sont obtenues par mesures des fréquences de résonances des éprouvettes prismatiques (calculs par logiciel Genemod®).

Figure 86 :

représentation des différentes valeurs de coefficient de Poisson d'après les mesures et les calculs, avec des données comprises dans un même ordre de grandeur malgré la dispersion.

5. Autres formulations

Masses volumiques

Les mélanges de craie de Bologne et de colle, avec ou sans TiO_2 , présentent des masses volumiques très élevées, à $1620,74 \text{ kg.m}^{-3}$ pour le mélange sans TiO_2 , et à $1591,96 \text{ kg.m}^{-3}$ pour la formulation marquée (Fig. 87). Ces préparations sont très chargées en poudre et la colle animale contient peu d'eau, comme le représente le rapport massique liant/matière solide calculé à $\approx 0,33$. Le dioxyde de titane semble abaisser la masse volumique de la formulation, contrairement aux constats précédents. Cette différence est plutôt à interpréter comme une variable dans la préparation des éprouvettes.

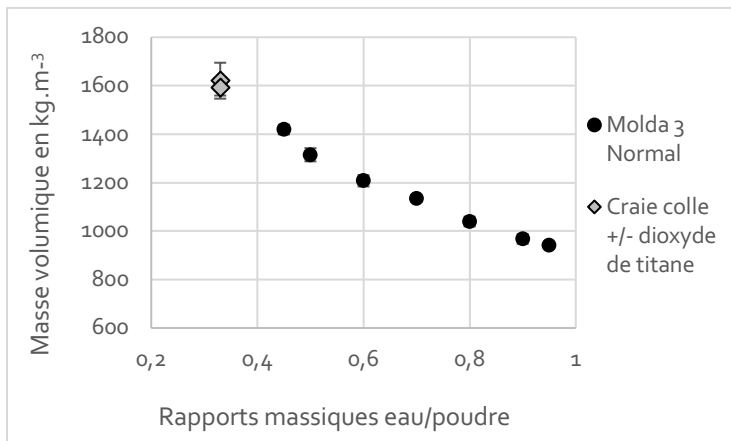


Figure 87 : rapports massiques eau/poudre en fonction des masses volumiques des formulations additionnées, mesures des cylindres.

Les mélanges composés de craie de Bologne et de colle qui ont été testés en compression présentent des courbes effort-déplacement semblables à celles obtenues avec les autres formulations de l'étude (Fig. 88). Les maximums mesurés s'apparentent aux préparations très peu concentrées et chargées de carbonate de calcium. Ces valeurs sont plutôt surprenantes car la colle animale seule est connue pour ses valeurs de résistance très élevées. De plus, le rapport massique eau/poudre estimé à $\approx 0,33$ est parmi les plus faibles, et les masses volumiques sont très importantes. Toutefois les éprouvettes ont été difficiles à mettre en œuvre et présentaient des défauts. Il est possible que le mauvais séchage à cœur n'ait pas permis d'obtenir des éprouvettes optimales. Il semble que la présence de dioxyde de titane modifie nettement le profil de déformation, avec une rupture précoce.

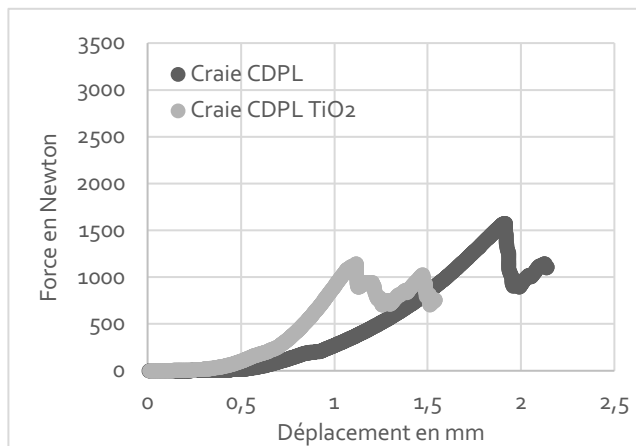


Figure 88 : profils de déplacement en fonction de la force appliquée en compression sur les éprouvettes de craies de Bologne et de colle, avec ou sans dioxyde de titane.

Les formulations de craie de Bologne ont des résistances maximales à la rupture en compression de $\approx 8,4$ MPa sans pigment, et de ≈ 6 MPa avec dioxyde de titane (Fig. 89). Cependant la proximité des écart-types permet de considérer une résistance maximale similaire, aux alentours de 7 MPa. Ces valeurs sont relativement importantes, légèrement supérieures à celles d'un plâtre seul à E/P = 0,8. Ce constat corrobore les résultats d'Elert qui indiquent que la colle augmente la résistance mécanique des formulations composées de sulfate de calcium⁹². D'après Mecklenburg⁹³, les formulations de colle et de carbonate de calcium montrent un effet de seuil en fonction de la concentration en charge, avec une phase de renforcement puis une baisse drastique lorsque l'ajout de carbonate de calcium est trop important. Dans le cas étudié, le ratio de colle et de craie de Bologne semble plutôt optimal.

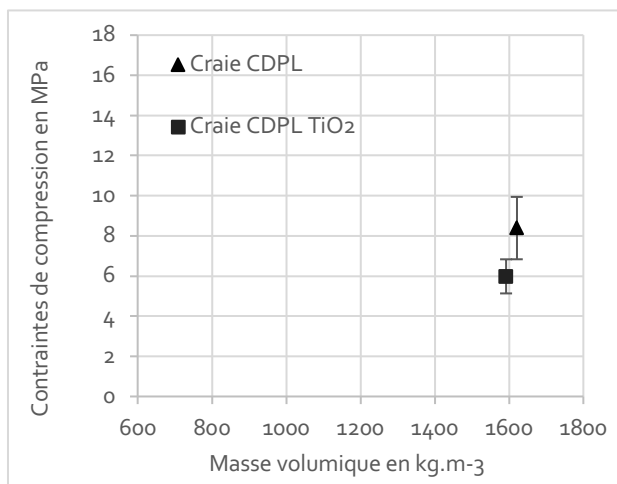


Figure 89 : mesures de résistance en compression pour les éprouvettes de craie et de colle, avec ou sans TiO₂.

Les éprouvettes de craie de Bologne et de colle présentent des ruptures très marquées, de type fragile, avec un éclatement des fragments autour d'un noyau central (Fig. 90 a et b). Ceci peut être lié à la mise en œuvre spécifique du « gros blanc », avec un façonnage par adjonction progressive de poudre en roulant la pâte.



Figure 90 : éprouvettes cylindriques de craie de Bologne et colle animale (a) à 2 % de TiO₂ (b), après essai de compression.

Les modules élastiques ainsi que le coefficient de Poisson n'ont pas pu être évalués pour ces formulations, en raison des difficultés à façonner des éprouvettes optimales.

⁹² ELERT Kerstin, *et al.*, « Effect of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of calcium sulfate-based composite materials », *Cement and Concrete Composites*, 96 (2019), p. 274-283.

⁹³ MECKLENBURG Marion F., « Some Mechanical and Physical Properties of Gilding Gesso », dans BIGELOW Deborah (éd.), *Gilded Wood, Conservation and History*, Madison, Sound View Press, 1991, p. 170.

Synthèse

À l'état solide et sec, les mélanges eau-plâtre forment des milieux inorganiques poreux dont le comportement mécanique est décrit ici grâce à un modèle élasto-plastique à rupture fragile. Comme indiqué dans la littérature, les caractéristiques et les paramètres tels que la résistance limite à la rupture en compression et en flexion, le module de Young et la masse volumique sont liés fonctionnellement à la concentration en plâtre. Dans ce chapitre, la caractérisation des formulations à partir du plan d'expérience a permis d'affiner les connaissances et d'établir des gammes de données adaptées à des usages selon la qualité de renfort structurel ou non. Les outils mathématiques employés sont simples mais suffisants pour permettre la prédiction des principales propriétés des matériaux étudiés. En comparant deux types d'hémihydrate β , des caractéristiques similaires sont constatées. Les masses volumiques, les comportements sous contrainte en compression et en flexion 4 points, les modules E , les coefficients de Poisson, ainsi que les contraintes maximales sont dans les mêmes ordres de grandeur, malgré un faible décalage des valeurs en fonction des rapports massiques E/P, induit par une légère différence de demande en eau. La substitution d'un hémihydrate β pour un autre aux caractéristiques techniques similaires (par exemple le degré de pureté ou la taille des grains), semble donc possible. Ceci confirme les propos énoncés au chapitre III, d'après l'étude à l'état fluide.

Les propriétés physiques et mécaniques du plâtre seul sont variables selon les préparations. Ainsi, plus le taux d'hémihydrate par rapport à l'eau est augmenté, plus la masse volumique traduisant la densification du mélange est élevée, plus les résistances aux contraintes sont hautes, et plus le matériau est rigide avec des modules E élevés. Le type de rupture fragile est particulièrement bien identifiable pour les rapports massiques inférieurs à $E/P = 0,8$ (à forte concentration en plâtre). Dès que la concentration en plâtre baisse, le matériau perd en résistance et la structure tend à s'effondrer. Ceci est particulièrement bien représenté en compression. Les valeurs de flexion 4 points sont inférieures à celles en compression, en lien avec la structure cristalline du matériau qui résiste moins bien à des sollicitations en traction ou en flexion.

Un cadre méthodologique a été mis en place pour identifier l'effet de l'addition des additifs sur les propriétés mécaniques du plâtre. Des modèles mathématiques ont été utilisés pour interpoler et extrapoler les données à partir des valeurs mesurées et fiabilisées.

Lors de l'addition de carbonate de calcium, les rapports massiques eau/matière solide sont modifiés et les masses volumiques augmentent de façon non linéaire mais selon une seule tendance, sans impact sur la demande en eau ou l'hydratation générale de la formulation, indiquant alors un rôle de charge inerte de l'additif. L'effet densifiant du CaCO_3 est confirmé par les observations des plans de cassure des éprouvettes et des matrices aux aspects très compacts avec l'apport de CaCO_3 . Pour identifier l'effet de la charge sur les propriétés mécaniques indépendamment du comportement du plâtre, un principe d'adimensionnement a été utilisé et a permis de mettre en évidence une tendance particulière sur les résistances en compression et en flexion. L'addition de CaCO_3 tend vers un effet de renfort avec une augmentation de la résistance lorsqu'une certaine quantité de carbonate est ajoutée, puis, au-delà d'un seuil d'ajout empêchant le processus d'hydratation du plâtre (ratio 1-0,5 pour $E/P = 0,7$; ratio 1-1 pour les $E/P = 0,9$ et 1,1), la résistance décroît et la charge fragilise le matériau. Ces mêmes tendances sont identifiées pour les modules élastiques.

Le dioxyde de titane densifie les formulations, même à faible concentration. D'après les essais et l'extrapolation des données selon le cadre méthodologique établi, il semblerait que l'addition de TiO_2 tende à faire baisser la résistance mécanique en compression et en flexion. En revanche, les modules élastiques semblent plus élevés avec cette addition. Des mesures complémentaires permettraient de vérifier ces constats ou d'identifier d'autres tendances de comportement.

Le coefficient de Poisson a pu être estimé avec une valeur moyenne de $\nu \approx 0,26$ pour les deux plâtres β et les formulations additionnées. Ce résultat semble cohérent avec les données de la littérature, et les valeurs couramment admises pour ces types de matériaux.

Par la difficulté de fabriquer des éprouvettes aux calibres normés en mélange de type « gros blanc », il n'a pas été possible de tester ce matériau avec la série d'essai. La formulation constituée de craie de Bologne et de colle animale a une masse volumique très importante, largement supérieure à la plus concentrée des préparations de plâtre. Ceci laisse penser que la résistance maximale à la compression devrait être très importante. Or les données mesurées sont plutôt moyennes, dans les ordres de valeurs du plâtre β à $E/P = 0,8$ ou $0,9$. Les défauts présents dans les éprouvettes sont probablement à l'origine de ruptures prématurées en compression, ou bien le matériau ne présente pas la résistance mécanique attendue. Des essais complémentaires sur ces formulations seraient à développer, afin de mieux qualifier les résistances et de mieux maîtriser ces mélanges complexes.

En proportions mesurées, une addition de charge inerte semble assurer un rôle de renfort. Cela est très certainement obtenu par un effet de remplissage d'une partie de la porosité. Mais au-delà d'un seuil d'ajout, les charges modifient considérablement la microstructure du plâtre seul et induisent la baisse des résistances ainsi que l'affaiblissement des propriétés mécaniques. Cet effet présente toutefois un intérêt technique dans la pratique des comblements, puisqu'il est généralement attendu que le matériau de restauration soit moins résistant que l'original. Les données obtenues peuvent ainsi être liées aux critères techniques de l'intervention de comblement.

Par exemple, les différentes valeurs de contrainte maximale en compression aident à la sélection d'une formulation dans les cas de comblement d'une terrasse, d'un socle ou tout autre élément porteur ; celles en flexion sont plutôt adaptées aux comblements de parties saillantes, en porte-à-faux, ou encore dans des cas apparentés à des effets de traction ou de cisaillement. Les mesures des modules élastiques renseignent sur le comportement du matériau lors de sollicitation en-deçà de la résistance maximale et indiquent ainsi les gammes d'usage des formulations évitant l'altération du comblement et de l'original environnant. Si une formulation est trop rigide, il risque de se produire une rupture forte ; si un matériau est trop élastique, le renfort peut être insuffisant, provoquant également des altérations importantes. La rigidité ou l'élasticité du matériau de comblement doit permettre de compenser les éventuelles déformations du matériau original et les effets des sollicitations mécaniques. La méthode d'évaluation de la fréquence de résonance pour obtenir le module E dynamique présente un avantage considérable pour la recherche adaptée au patrimoine culturel puisqu'elle permet de mesurer une caractéristique mécanique essentielle de façon non invasive ou destructive, peu coûteuse, et relativement rapide. Elle pourrait être adaptée pour des mesures *in situ* sans besoin de prélèvements ou d'éprouvettes fabriquées.

Les mesures établies dans cette étude, cohérentes avec les données des références comparables, permettent de proposer des formulations alternatives aux caractéristiques mécaniques solides connues et adaptées aux différents besoins en comblement.

Les valeurs de résistances mécaniques du plâtre, assimilé au matériau original, sont comprises dans les gammes des taux E/P = 0,6 à 0,8 employés par les mouleurs, ou, plus précisément au taux E/P = 0,75 aux valeurs de masse volumique de 1020 kg.m⁻³, et de résistance à la flexion 3 points comprises entre $\approx 4,9$ et $\approx 9,8$ MPa identifiées et calculées par Cascio et Biesel⁹⁴ d'après une sculpture de Bugatti. Cela laisse donc un panel de valeurs, proches ou très distinctes, conseillées comme formulations alternatives en fonction des besoins (Tabl. 5). Non analysé, le produit commercial Modostuc® n'est pas listé dans le tableau, cependant les avis techniques et les retours d'expérience des professionnels invitent à le classer dans la catégorie des matériaux sans renfort structurel ou à renfort faible. Un protocole d'étude serait nécessaire afin d'en connaître les caractéristiques précises, en intégrant d'autres produits commerciaux prêts-à-l'emploi tels que ceux cités par les professionnel·les dans l'enquête présentée au chapitre I. La variété des données obtenues en étudiant le plâtre et les formulations additionnées laissent penser que les comportements mécaniques du matériau sont complexes et divers. Il semble donc nécessaire de se pencher sur des problématiques concrètes, en mêlant les connaissances sur la résistance des matériaux, originaux et de restauration à des cas d'étude, de façon à identifier des comportements mécaniques particuliers, comme une résistance élevée ou au contraire une tendance à l'altération rapide. Dans le chapitre V, les matériaux sont étudiés en milieu muséal par un protocole de suivi d'artefacts restaurés, pour établir des liens avec les expériences professionnelles ainsi que les séries de données et les comportements identifiés dans l'étude mécanique solide.

⁹⁴ Biesel et Cascio, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, op. cit., p. 6.

Formulation	Rapport massique E/P ou eau/poudre	Masse volumique en kg.m ⁻³	Module E et E dynamique en GPa		Résistance maximale à la contrainte en compression en MPa	Résistance maximale à la contrainte en flexion en MPa	Type de comblement
<i>Référence Biesel et Cascio</i>	0,75	1020	-	-	-	≈ 4,9 à ≈ 9,8	Renfort structurel
Molda® 3 Normal et EXTHA®	0,5 à 0,7	≈ 1300 à ≈ 1100	≈ 9 à 5,6	≈ 10 à 5	≈ 22 à ≈ 8,9	≈ 4,5 à ≈ 2,6	
0,7 1-0,5 CaCO ₃	0,47	≈ 1300 à ≈ 1100	≈ 5,9	≈ 7,5	≈ 14,1	≈ 3,2	
0,7 1-1 CaCO ₃	0,35	≈ 1500	≈ 7,7	≈ 8,7	≈ 12	≈ 2,9	
0,9 1-1 CaCO ₃	0,45	≈ 1300	≈ 4,9	≈ 5,5	≈ 9,6	≈ 2,4	
Molda® 3 Normal et EXTHA®	0,8	≈ 1050 à ≈ 950	≈ 5	≈ 5 à ≈ 4,3	≈ 6,5	≈ 2	Renfort moyen
0,9 1-0,5 CaCO ₃	0,6	≈ 1100	≈ 3,7	≈ 4,6	≈ 8,5	≈ 1,9	
0,9 1-1,5 CaCO ₃	0,36	≈ 1500	≈ 3	≈ 4,7	≈ 5,9	≈ 1,3	
Craie de Bologne + colle de peau de lapin, avec ou sans 2 % TiO ₂ , en pâte	0,33	≈ 1600	-	-	≈ 8,4 à ≈ 6	-	
Molda® 3 Normal et EXTHA®	0,9 à 1	≈ 950 à ≈ 850	≈ 3,5 à ≈ 2,5	≈ 4 à ≈ 3	≈ 5 à ≈ 3,5	≈ 1,9 à ≈ 1,7	Sans renfort ou renfort faible
1,1 1-0,5 CaCO ₃	0,73	≈ 1020	≈ 2,3	≈ 3	≈ 4,5	≈ 1,4	
1,1 1-1 CaCO ₃	0,55	≈ 1150	≈ 3,1	≈ 3,6	≈ 4,5	≈ 1,4	
1,1 1-1,5 CaCO ₃	0,44	≈ 1300	≈ 3,2	≈ 4,1	≈ 5,9	≈ 1,5	
1,5 1-2 CaCO ₃ 2 % TiO ₂	0,5	≈ 1250	≈ 2,8	≈ 2,6	≈ 2,6	≈ 0,9	

Tableau 5 : correspondances des valeurs selon les formulations et les types de comblement.



Chapitre V

Évaluation d'artefacts restaurés
et suivi dans le temps

Sommaire

Ce cinquième chapitre est dédié au suivi de l'état de conservation de trois artefacts restaurés entre 2015 et 2017, et de l'évolution des interventions de comblement. Complétant les données recueillies lors de campagnes d'observations et de constats d'état, deux méthodes ont été mises en place : un monitoring par relevés numériques en trois dimensions à haute définition et par corrélation d'images pour comparer l'état des artefacts sur une période donnée, et un équipement par capteurs de déplacement sur un des artefacts afin d'évaluer les mouvements avec et sans chargement. Les résultats sont interprétés selon les conditions de conservation et fournissent des informations sur les facteurs d'altérations des artefacts moulés en plâtre.

I.		II.	
Cas		Méthodologies	
d'étude : suivi de		développées	
trois artefacts	p. 327	pour le suivi de	
		l'état de	
1. Présentation	p. 327	conservation	p. 354
		des artefacts	
a. Contextes et besoins	p. 327		
		1. Numérisation	
b. Méthodes d'évaluation	p. 329	3D et	
		corrélation	
		d'images	p. 354
2. Artefacts			
sélectionnés	p. 330	2. Suivi de	
		déplacements	
a. Relief pour un des		localisés par	
pilastres de <i>la Porte de</i>	p. 332	capteurs LVDT	p. 356
<i>l'Enfer</i> , musée Rodin			
b. Cadre ICMO 190, musée			
du Louvre	p. 339		
c. <i>Molosse</i> de			
la gypsothèque du	p. 346		
Louvre – Gy 0236			
3. Contextes de			
conservation	p. 351		

III.

Résultats	p. 360
1. Présentation par méthode	p. 360
a. Numérisation 3D et corrélation d'images	p. 360
b. Évaluation du cadre et des déplacements par capteurs	p. 376
c. Analyse des contextes de conservation	p. 381
2. Aspects mécaniques et altérations	p. 384
a. Évaluation des mouvements du bois	p. 384
b. Résistance mécanique du plâtre	p. 388
3. Apports en conservation-restauration	p. 389
a. Suivi par numérisation 3D	p. 389
b. Suivi par capteurs de déplacement	p. 390
Synthèse	p. 391

I. Cas d'étude : suivi de trois artefacts

Après avoir caractérisé les formulations à l'état fluide et à l'état solide, selon leurs aspects micro-structuraux, physico-chimiques, et mécaniques, il est nécessaire de se pencher sur la durabilité des matériaux de comblement et des interventions de restauration. Ainsi, la stabilité, l'innocuité ou encore la compatibilité des comblements avec les matériaux originaux peuvent être évaluées, en considérant les facteurs d'altérations du plâtre. Pour cela, plusieurs méthodes peuvent être employées par les professionnel·les telles que des suivis par observations et constats d'état, ou encore par des techniques empruntées à d'autres spécialités comme de l'imagerie numérique ou des mesures in situ.

1. Présentation

a. Contextes et besoins

Critères déontologiques

La durabilité d'un traitement de conservation-restauration, ainsi que la compatibilité avec l'original, l'innocuité, et la réversibilité ou la possibilité de retraiter l'artefact et l'intervention sont parmi les critères primordiaux d'un protocole conservatoire¹. Ces principes théoriques, hérités d'années de recherches et de précisions de la déontologie, sont bien ancrés dans la réflexion et dans le quotidien des professionnel·les². Afin d'optimiser la pérennité des interventions, les méthodes et les matériaux employés sont sélectionnés avec attention, testés et validés par expérience ainsi que par des études variées comme l'évaluation des propriétés physico-chimiques ou encore par vieillissement accéléré. Dans le cas spécifique des interventions de comblement, le matériau de traitement ne doit pas s'altérer en mettant l'artefact en péril, ni provoquer de dommage du matériau original tout en assurant un rôle de renfort ou d'amélioration esthétique. Il doit donc répondre aux critères de stabilité, de compatibilité et d'innocuité, évalués lors de la sélection de la formulation ou du produit de comblement, et des techniques de mise en œuvre, tout en permettant de réintervenir si nécessaire.

Facteurs d'altérations

Plusieurs facteurs conditionnent la bonne conservation des artefacts, ou au contraire leur détérioration. Ces aspects sont étudiés et affinés par les recherches en conservation préventive, visant à améliorer les conditions de conservation de toutes les typologies d'artefacts selon leurs milieux. Généralement, les premiers critères présentés concernent l'environnement et le contexte de conservation de l'artefact, comprenant le climat et le mode de présentation. Ainsi la température liée au taux d'humidité relative, et la stabilité de ce contexte sont des paramètres à évaluer, en concentrant une attention particulière sur les fluctuations climatiques pouvant causer de véritables processus d'altérations.

¹ BERGEON Ségolène et BRUNEL Georges, *La restauration des œuvres d'art : vade-mecum en quelques mots*, Paris, Hermann, 2014 ; E.C.C.O [En ligne ; URL : <https://www.ecco-eu.org/home/ecco-documents/>] ; ICOM [En ligne ; URL : <https://www.icom-musees.fr/index.php/toutes-les-ressources>] ; BRANDI Cesare, BASILE Giuseppe et CORDARO Michele (éd.), *La restauration : méthode et études de cas*, Paris, Institut national du patrimoine, Éditions Stratis, 2007.

² Bergeon et Brunel, *La restauration des œuvres d'art : vade-mecum en quelques mots*, op. cit., p. 133.

L'environnement comprend également la qualité de l'air, en évitant la présence de polluants divers, de composés organiques volatils, ou encore de poussières.

Des risques biologiques sont aussi à prendre en compte, avec les infestations d'organismes microbiologiques, d'insectes, ou encore d'animaux comme des rongeurs ou des oiseaux qui peuvent coloniser les espaces patrimoniaux et endommager les artefacts.

L'exposition lumineuse peut également être un facteur de modification d'état, avec les rayons UV qui peuvent causer des dommages directement sur les artefacts et certains matériaux, ou provoquer une augmentation rapide de la température dans l'espace de conservation, et par conséquent une modification très importante du taux d'humidité relative, variation qui est considérée comme une des plus dangereuses pour les artefacts.

Les modes de présentation, d'exposition ou d'accrochage sont d'autres facteurs qui influencent l'état de conservation. Ceux-ci font plutôt intervenir les aspects mécaniques et physiques de l'artefact. La distribution des contraintes et des masses est un paramètre important qui s'applique aux manipulations ponctuelles mais aussi à la présentation à long terme, variables si l'artefact est présenté en condition d'exposition ou de stockage, par un accrochage sur cimaise ou grille ou par un stockage à plat, dans un conditionnement fermé et isolé. Ainsi un système d'accrochage mal disposé ou un socle inadapté peuvent être des sources d'altération mécanique qu'il convient d'éviter.

Enfin, la nature du matériau détermine également la durabilité de l'artefact. Certains matériaux sont effectivement plus sensibles que d'autres, en fonction des contextes climatiques, des manipulations, du stockage ou encore des mesures préventives comme le dépoussiérage régulier. Tel que présenté aux chapitres précédents, le plâtre est un matériau ayant une rupture mécanique de type fragile, avec une structure poreuse, et une faible dureté. Il est donc sensible aux chocs et aux rayures, lorsqu'un soin suffisant n'est pas accordé. Liée à la porosité, sa nature hygroscopique est considérée comme vulnérable aux fluctuations climatiques et aux taux d'humidité relative trop élevés. La dévalorisation du matériau et des typologies d'artefacts a entraîné un délaissement et l'absence de soins ou des conditions de conservation adaptés. Ainsi les collections d'artefacts en plâtre présentent souvent des altérations qui auraient pu être évitées ou limitées.

Ces mécanismes de dégradation sont des sources d'altération du matériau original mais peuvent aussi influencer sur le bon vieillissement des interventions de conservation-restauration. Un matériau de comblement inadapté peut en effet provoquer des dégâts considérables dans de mauvaises conditions. Il peut être plus dur ou plus rigide que le matériau original et entraîner des fissures et des cassures des zones alentour. Mais si un matériau ayant une résistance insuffisante n'assure pas son rôle structurel, le substrat original risque alors une rupture prématurée. Les tensions physiques et la mauvaise répartition des forces et des contraintes peuvent être très dommageables pour les artefacts.

b. Méthodes d'évaluation

Pour assurer le suivi de traitement de conservation-restauration, de la même façon que pour évaluer l'état général d'une collection, il est nécessaire d'examiner les artefacts visuellement. Cela peut être conduit dans différentes situations, adaptées aux besoins et aux capacités des institutions. Dans certains cas, l'évaluation est faite par lots avec la sélection d'artefacts représentatifs qui permettent d'estimer des ensembles considérables, comme par exemple des collections d'archives. Dans d'autres cas, l'étude est faite pièce par pièce au cours de chantiers ou de missions. Ainsi des évaluations sont souvent réalisées lors de campagnes de constat d'état ou pendant des chantiers de dépoussiérage, intervention qui permet une inspection attentive de l'artefact pendant un temps dédié.

Dans tous les cas, l'évaluation nécessite l'action de professionnel·les de la conservation et comprend, en plus d'une observation minutieuse, des prises de vues photographiques, des annotations graphiques, un compte-rendu plus ou moins détaillé selon les besoins, ainsi que des préconisations. La documentation rédigée offre alors la possibilité de renseigner tout changement d'état de l'œuvre et alimente les dossiers d'œuvres, conservant une trace des observations à un moment donné.

Des suivis sont ainsi organisés et commandés par les institutions françaises. Souvent au sein des collections les plus denses, et en raison de l'ampleur des travaux, des missions sont organisées sur une longue durée. Par exemple, le programme EPICO-European Protocol In preventive Conservation³, rattaché au Château de Versailles depuis 2018, permet un suivi des conditions de conservation et une évaluation des collections, associés à un programme d'accord-cadre de dépoussiérage et d'entretien des artefacts menés par des professionnel·les de la conservation-restauration.

Les artefacts et les collections qui ne peuvent pas bénéficier de ce type de suivi sont plutôt surveillés ou évalués par les différents professionnel·les du milieu muséal, équipes de la conservation, de la conservation-restauration, de la conservation préventive, de la régie, de la documentation, parfois de la médiation et de la sécurité, en fonction des personnes les plus au contact des artefacts qui peuvent mener une veille des collections grâce à leurs bonnes connaissances de l'état des œuvres et alerter les services responsables en cas de besoin. De cette même façon, les traitements de conservation-restauration antérieurs peuvent aussi être évalués, et leurs évolutions prises en considération. Il est cependant rare de constater l'endommagement des interventions de comblement depuis l'instauration des règles déontologiques, comme en témoignent les professionnel·les consultés par le biais de l'enquête⁴, qui confirment le bon vieillissement des traitements menés au cours de leurs carrières.

De façon complémentaire, d'autres méthodes sont mises au point et développées, afin de suivre l'évolution de l'état d'œuvres sélectionnées et généralement précieuses ou présentant des problématiques spécifiques.

³ FORLEO Danilo, *et al.* (dir.), *EPICO - European Protocol In Preventive Conservation, phase 1. Méthodes d'évaluation de conservation des collections dans les demeures historiques*, gènes, Sagep Editori, 2017.

⁴ Les spécialistes consultés et interrogés ont tous affirmés que les précédentes interventions ayant pu être observées plus tard ne présentaient pas de changement d'état ou de mauvais vieillissement. Voir l'analyse des résultats de l'enquête au chapitre I p. 79-82 et les formulaires en annexes I, p. 470-491.

Ces méthodes alternatives comprennent notamment des mesures *in situ* (photographie d'ensemble et de détails, numérisation 3D, ou encore suivi de mouvements locaux ou d'efforts) en relevés ponctuels ou permanents. Par exemple en 2020, un monitoring a été mis en place au musée Fabre pour évaluer le comportement de *La Sainte Trinité couronnant la Vierge*, peinture sur panneau datée du XVI^e siècle ayant reçu un doublage contraignant au revers provoquant des dégradations structurelles⁵. La peinture a été placée en caisson climatique étanche et sollicitée mécaniquement par des faibles variations de températures et d'humidité relatives imposées. Les mouvements et les déformations ont été évalués par pesées, avec une prise de masse indiquant un gonflement des matériaux, et enregistrées par stéréométrie. Par cette méthode, les photographies prises par quatre caméras disposées spécifiquement et les repères placés sur l'œuvre permettent une reconstitution des images en 3D. Les campagnes de prises de vue peuvent donc être comparées afin de distinguer des modifications telles que des déformations et des mouvements de l'ensemble de l'artefact. D'autres techniques d'imagerie numérique et d'outils d'analyses peuvent servir à mieux connaître l'état des artefacts, comme dans le cas de la micro-tomographie aux rayons X⁶, utilisée pour identifier des altérations non visibles à l'œil nu et assister les interventions de conservation-restauration.

2. Artefacts sélectionnés

Trois artefacts (Fig. 1, 2, 3) ont été choisis pour intégrer cette étude de cas et comparer l'évolution des comblements, en fonction des formulations et des conditions de conservation. Deux éléments de statuaire et un cadre permettent de comparer les typologies. Ces artefacts présentent des altérations, des historiques ainsi que des protocoles de conservation-restauration qui diffèrent et qui offrent un aperçu des situations diverses que les professionnel·les peuvent rencontrer. De plus, leurs conditions actuelles de conservation, bien que toutes trois muséales, présentent des variations qui encouragent la mise en place d'évaluations et de comparaisons.

⁵ BOUSVAROU Marina, *et al.*, « Un cas d'exposition au musée Fabre. « Dans le Secret des œuvres d'art » », *Patrimoines du Sud*, 12 (2020).

⁶ BADDE Aurelia et ILLERHAUS Bernhard, « Three Dimensional Computerized Microtomography in the Analysis of Sculpture », *Scanning*, 30 / 1 (2008), p. 16-26.



Figure 1 : relief pour *la Porte de l'Enfer* (S. 03598), musée Rodin, dépôt au Musée des Beaux-Arts de Calais, 160 x 38,5 x 13,5 cm, © 2021 Musée Rodin – J. Robin Dupire



Figure 2 : cadre sans titre, nommé « ICMO 190 », musée du Louvre, 175 x 145 x ≈ 15 cm, © 2016 Musée du Louvre/ INP – G. Vanneste



Figure 3 : *Molosse du Belvédère* (Gy 0236), gypsothèque du musée du Louvre, Versailles, 122 x 109 x 74,5 cm, © 2015 Musée du Louvre – H. Lewandowski

a. Relief pour un des pilastres de *la Porte de l'Enfer*, musée Rodin

Présentation et historique⁷

Le premier artefact est un relief moulé en plâtre, lié à *la Porte de l'Enfer* d'Auguste Rodin (Fig. 4), appartenant aux collections du musée Rodin à Meudon et portant le numéro d'inventaire S. 03598. Il mesure environ 160 cm de hauteur, 38,5 cm de largeur et de $\approx 1,5$ cm à 13,5 cm d'épaisseur, au plus large. Sa masse est estimée à 10-15 kg. Le relief représente trois couples, évoquant le deuxième cercle de l'Enfer où sont condamnés les Luxurieux, décrit dans le chant V de la *Divine Comédie* de Dante dont Rodin s'inspire pour l'ensemble de sa création monumentale. Le thème figure en partie haute du pilastre dextre de la *Porte*.

Cette épreuve originale⁸ a servi de modèle pour la mise en œuvre et l'édition du relief de l'œuvre finale, qui varie uniquement dans les postures de deux des personnages⁹. Il est très probable que le plâtre ait été mis en œuvre au début des années 1880, après l'établissement de la commande du projet général¹⁰. D'après la description de l'écrivain Octave Mirbeau, parue dans la presse en 1885, le thème du relief étudié est déjà choisi et il illustre « les amours maudites qui s'enlacent toujours et ne s'assouvissent jamais »¹¹. Dès 1887, une photographie de la *Porte de l'Enfer* faite par William Elborne montre le relief dans sa version modifiée et achevée.

Le plâtre étudié est représentatif du travail de Rodin, par le emploi de modèles et de formes de son répertoire, qui, tirés en plusieurs exemplaires, sont modifiés, découpés, ou déplacés pour un meilleur ajustement de la composition générale.

Après sa mise en œuvre et son utilisation pour façonner le modèle final, le relief a probablement été stocké au Dépôt des Marbres où Rodin travaillait à son projet monumental, avant d'être transféré dans la maison-atelier du sculpteur à Meudon. D'après les altérations constatées, il est probable que le relief ait été déposé et laissé sur le sol et à proximité d'une chaudière pendant une longue durée, avant d'être déplacé en réserve et mis à l'abri de dégradations supplémentaires lors des travaux de rénovations vers 1997. Il a été étudié et restauré en 2016 et 2017 à l'Institut national du patrimoine¹².

⁷ ROBIN Juliette, *Conservation-restauration d'un relief en plâtre d'Auguste Rodin, pour un des pilastres de la Porte de l'Enfer (vers 1885, Meudon, musée Rodin). Étude de l'influence de l'état hydrique sur la déformabilité du plâtre*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2017, p. 10-67.

⁸ Cet artefact correspond au premier plâtre tiré du moule à creux perdu, mis en œuvre à partir du modelage original en terre. La terre et le moule sont généralement détruits pour obtenir ce premier exemplaire en plâtre qui sert ensuite à la mise en œuvre d'un moule à bon creux, constitués de nombreuses pièces, permettant l'édition de nouveaux tirages, cette fois-ci sans casser ni modèle ni moule à bon creux.

⁹ L'inclinaison de la tête du Centaure et la position du bras senestre du personnage masculin en partie basse ont été modifiés sur la version finale.

¹⁰ BLANCHETIÈRE François, *et al.* (éd.), *L'enfer selon Rodin*, Paris, Norma éditions : Musée Rodin, 2016.

¹¹ MIRBEAU Octave, « Auguste Rodin », *La France*, 1885, p. 116-119.

¹² ROBIN Juliette, *Conservation-restauration d'un relief en plâtre d'Auguste Rodin, pour un des pilastres de la Porte de l'Enfer (vers 1885, Meudon, musée Rodin). Étude de l'influence de l'état hydrique sur la déformabilité du plâtre*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2017 ; ROBIN DUPIRE Juliette, « Étude et restauration d'un relief en plâtre pour un des pilastres de *la Porte de l'Enfer* d'Auguste Rodin, musée Rodin. Recherche de traitements adaptés à la restauration d'une œuvre contenant des sels. », *CeROArt*, EGG 6 (2017).



Figure 4 : vue générale du relief S. 03598, après installation en salle d'exposition au musée des Beaux-Arts de Calais, en avril 2021. © Musée Rodin / Musée des Beaux-Arts de Calais – J. Robin Dupire

Altérations et interventions

Le relief était cassé en trois fragments principaux, partiellement maintenus par un doublage en plâtre ainsi que par deux barres profilées en métal, fixées par des polochons de plâtre au revers. Bien que non datées, ces interventions semblent plutôt tardives et menées dans le but de réparer le relief, déjà cassé et recouvert de salissures, d'intensité variable selon les zones. Des fentes ainsi que des réseaux de fissures parcouraient le plâtre. Plusieurs zones étaient lacunaires, comme une importante partie de moulure sur le côté senestre, et de plus petits fragments sur le bord dextre, sur le fond et le long des volumes figuratifs. Ces altérations, causées par un mauvais conditionnement, des manipulations peu soignées ainsi que des réparations structurelles inadaptées et contraignantes mécaniquement, perturbaient très fortement l'intégrité structurelle du relief (Fig. 5). La couche de surface du plâtre présentait également de nombreuses altérations comme des pulvérulences, des boursouflures, et des soulèvements de l'épiderme (Fig. 6 et 7). Ces fragilités préoccupantes étaient particulièrement concentrées en partie basse. Une couche de salissure recouvrait l'ensemble du relief et plus particulièrement les dessus des reliefs. La partie basse, cassée et remplacée avec un maintien en plâtre au revers, était plus sombre, présentant une couche noire homogène et épaisse (Fig. 6). Ces salissures semblent caractéristiques de suies ou de fumée de chauffage, et ont été mises en lien avec un probable conditionnement à proximité d'une chaudière. Une seconde cause d'altération constatée dans ce cas est la présence de sels solubles dans le substrat¹³. L'état de conservation du relief a laissé penser qu'un dépôt sans protection sur le sol a pu occasionner une absorption de l'humidité et des remontées capillaires, provoquant alors une contamination en sels solubles. Ceci a aussi pu être causé par l'emploi d'additifs lors du gâchage, comme des retardateurs ou des accélérateurs de prise¹⁴ et/ou par les agents de démoulage utilisés lors du surmoulage, généralement des huiles, ou des savons obtenus par procédé de saponification à partir de bases telles que de la soude ou de la potasse. Des cycles d'hydratation et de cristallisation des sels solubles, lors de changement de taux d'humidité relative, ont provoqué la désagrégation granulaire du plâtre de façon localisée et causé les altérations constatées sur la couche de surface, de la pulvérulence jusqu'aux déplaquages. De très nombreux manques et des lacunes de l'épiderme aux dimensions variables, aggravés par des chocs ou des mauvaises manipulations, ont résulté de cette contamination. Afin d'identifier les sels solubles présents, des prélèvements de plâtre ont été analysés, révélant la présence d'ions chlorures et nitrates en quantités importantes, associés à du sodium, et à du potassium. La teneur en ions sulfates, constitutifs du matériau, est plus importante dans un prélèvement de matière altérée que celle du matériau sain. Ces anions semblent également associés aux cations sodium et potassium¹⁵. La problématique de la présence de sels solubles est fréquemment rencontrée dans le milieu des monuments historiques sur des édifices et des artefacts en pierre calcaire, ou encore pour les artefacts en terre, mais elle est bien plus rare dans le domaine des artefacts muséaux en plâtre à notre connaissance. Il a donc été nécessaire d'établir un protocole d'interventions adapté, en limitant principalement l'apport d'eau afin d'éviter l'hydratation et la recristallisation incontrôlée des sels solubles.

¹³ Des cristaux ont pu être observés et identifiés par analyses au MEB-EDS par Véronique Vergès-Belmin, au LRMH ; les images MEB et spectres d'analyses sont présentés en annexes V, p. 536.

¹⁴ Le chlorure de magnésium est listé parmi les retardateurs ; le chlorure de sodium, les sulfates de potassium ou de soude, et le nitrate de potasse sont connus comme accélérateurs de prise du plâtre, Compagnons du devoir et du tour de France (éd.), *La plâtrerie, le staff et le stuc*, Paris, Librairie du Compagnonnage (Encyclopédie des métiers), 1994, volume 1, p. 109 et p. 479-480.

¹⁵ Le rapport d'analyses du laboratoire ERM est présenté en annexes V, p. 537-538.



Figure 5 : relief avant les interventions de conservation-restauration de 2017, cassé en trois fragments principaux, avec des lacunes (des bords moulurés notamment), d'importants réseaux de fissures, des surfaces boursoufflées et pulvérulentes en partie basse causées par la présence de sels solubles, ainsi que des salissures hétérogènes
© Musée Rodin – J. Robin Dupire

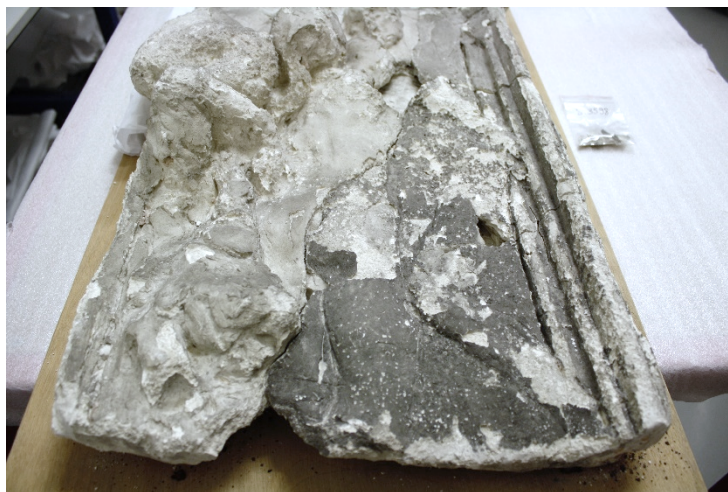


Figure 6 : détail de la partie basse, la plus altérée, cassée en deux fragments lacunaires, présentant une couche de salissure noire sur le fragment à senestre, ainsi que des déplaquages et des pulvérulences (zones très blanches)
© Musée Rodin – J. Robin Dupire



Figure 7 : détail du couple en partie médiane et des soulèvements de la couche de surface avec des zones pulvérulentes sous-jacentes et des pertes de petits fragments
© Musée Rodin – J. Robin Dupire

Les objectifs étaient de stabiliser la structure générale ainsi que les zones fragilisées de la surface, puis de permettre la présentation du relief en améliorant la lisibilité et les aspects esthétiques.

Il a été décidé avec l'équipe de la conservation du musée Rodin de redonner une bonne stabilité à l'œuvre en retirant les barres métalliques oxydées, non originales, et génératrices de contraintes mécaniques, puis en remontant et en recollant les différents fragments de l'œuvre. Ensuite, des traitements de nettoyage, de consolidation des zones soulevées et pulvérulentes, de collage des petits fragments de surface déplaqués, puis de comblement et de retouche, avaient pour objectifs de stabiliser la matière et d'améliorer la lisibilité générale et l'appréciation esthétique de l'œuvre. Un niveau d'intervention a donc été défini, de façon à garantir la bonne conservation du relief, sans pousser la restitution formelle des détails figuratifs lacunaires.

La dépose des fragments cassés et le retrait des barres profilées ont été effectués manuellement. Au préalable, les zones fragiles, telles que les fragments déplaqués ou les boursouffures, ont été protégées et fixées temporairement par des dépôts de cyclododécane, une matière hydrocarbure solide qui a la propriété de se sublimer en quelques jours, et qui est donc employée comme consolidant temporaire, sans risque d'altérer les matériaux fragiles ni laisser de résidu.

Puis les parties du relief ont été collées avec un adhésif fortement concentré, afin d'obtenir un pouvoir collant adapté aux masses présentes et à la finesse des plans de collages, ainsi qu'une viscosité élevée qui ne pénètre pas dans la porosité du plâtre. Des essais de collage de fragments d'éprouvettes, cassés expérimentalement à la main, ont permis par comparaison, de classer différents adhésifs testés. Des tests à la goutte d'eau ont aussi été réalisés sur des éprouvettes de plâtre recouvertes de différents adhésifs, pour vérifier la perméabilité et donc l'absence d'un effet barrière ; dans le cas contraire, la circulation éventuelle des sels solubles aurait été perturbée en cas de nouvelle dissolution, provoquant alors de nouvelles cristallisations dommageables. Enfin, pour vérifier l'aspect des adhésifs vieillissants et le non-jaunissement, un cycle de 30 heures d'exposition aux rayons UV-C a été réalisé. Le Mowital® B60HH, un polybutyral de vinyle, préparé à 20 % dans l'éthanol, a été retenu pour les collages structurels. Ce même adhésif a été utilisé pour coller des pièces de doublage en tissu de fibre de verre au revers, pour renforcer les zones d'assemblage. Les collages de surface, visant à réintégrer tous les petits fragments déplaqués ou déposés, mais ayant été conservés, ont été réalisés avec de la Klucel® G, une poudre d'hydroxypropylcellulose pouvant former un gel, concentrée à 4 % dans l'éthanol.

Après comparaison des aspects esthétiques de différents produits consolidants couramment utilisés en conservation-restauration, les consolidations des zones pulvérulentes ont été faites par deux à trois applications localisées de CaLoSiL® E25, une solution concentrée de nanoparticules d'hydroxyde de calcium dans l'éthanol qui, par carbonatation, crée une structure solide dans une matrice poudreuse. Ce consolidant a également montré une bonne perméabilité lors de tests à la goutte d'eau, et malgré un léger aspect de blanchiment non gênant sur le substrat de plâtre, ne présentait pas d'effet d'auréole ou de tache comme d'autres consolidants testés tels que des silicates d'éthyle.

Habituellement, les œuvres en plâtre présentant d'importantes couches de salissures mais un bon état du matériau, sont nettoyées par application et retrait de gel pelable à l'attapulgite qui est très efficace, homogène, et non invasif. Dans le cas présent, cette méthode ne pouvait être employée puisqu'il était nécessaire d'harmoniser les différentes zones très contrastées, et impératif de limiter l'apport d'eau.

Une combinaison de trois méthodes a donc été appliquée : les zones les plus sombres ont été traitées au laser El.En® EOS Combo¹⁶, et le résultat de ce nettoyage a servi de niveau de référence. Les dépôts légers, principalement en partie haute, ont été atténués par gommage à la Whishab®, gomme en latex vulcanisé à pH neutre, alors que les salissures plus localisées, comme sur les reliefs saillants de la partie médiane, ont été traitées par application de cataplasmes de gel d'agar broyé finement, qui, appliqué à la spatule permettait la captation de poussière et de salissures incrustées, en diffusant très peu d'eau de constitution.

Afin de redonner une bonne stabilité et d'améliorer la lisibilité générale du relief, des comblements ont été réalisés selon deux méthodes et deux types de formulations adaptées aux besoins structurels et de surface, aux aspects esthétiques et aux textures similaires au plâtre. Les comblements des lacunes de grandes dimensions, ayant un rôle structurel, ont été réalisés avec un mélange de plâtre Molda® 3 normal et de carbonate de calcium selon le ratio 1-3. Ils ont été mis en œuvre *in situ* pour créer des pièces ajustées aux plans de cassure du relief, en isolant et en protégeant les surfaces originales avec un film plastique souple, permettant également de créer des pièces amovibles qui sont collées après leur séchage avec du Mowital® B6OHH, garantissant une bonne réversibilité de l'intervention, sans dommage pour le matériau original. Dans cette formulation, la présence de plâtre dans le mélange permet d'obtenir un matériau faisant prise, et à la résistance mécanique suffisante pour assurer un renfort structurel. L'addition de carbonate de calcium rend le mélange différenciable du plâtre original en cas d'analyse. À l'état fluide, le matériau est facilement modelable à la spatule, sans retrait ou fissuration lors du séchage. Les propriétés à l'état solide sont abaissées, garantissant une rupture préférentielle dans le matériau de restauration, et non pas dans le plâtre original de l'œuvre. Les comblements moyens et de petites dimensions sans besoin structurel fort, comme ceux des fissures et des zones déformées et soulevées, ont été formulés avec un mélange de carbonate de calcium et un gel d'éther de cellulose Klucel® G à 4 % dans l'éthanol. Cette préparation forme une pâte modelable pouvant être travaillée à la spatule à l'état frais, et au pouvoir adhésif suffisant pour maintenir les zones très fragiles, sans générer de contrainte mécanique lors du séchage. En effet, à l'état solide, le matériau est de faible dureté, inférieure à celle du plâtre seul, et il est facilement réversible et perméable, d'après un test à la goutte d'eau.

L'ensemble des comblements a été retouché en combinant des rehauts d'aquarelle peu diluée et de pastels secs, sur des sous-couches de glacis aux Gamblin®, peinture composée de résine aldéhyde, soluble dans les hydrocarbures ou les solvants polaires comme l'éthanol, très stable à la lumière. À l'issue de ces interventions en 2017, le relief a regagné les réserves du musée Rodin.

En 2020, une seconde phase d'intervention a été menée avec Marcel Molac, conservateur-restaurateur indépendant, afin de présenter le relief à la verticale sur une structure mise en œuvre spécialement. Il a pour cela été nécessaire de procéder à une réintervention sur le relief, en démontant les collages des principaux fragments et des comblements amovibles, afin de remonter le relief en toute sécurité sur la nouvelle structure. Le démontage et le remontage ont permis de vérifier deux points essentiels : la bonne réversibilité des matériaux employés et la bonne conservation du relief depuis les traitements.

¹⁶ Laser El.En® EOS Combo, longueur d'onde 1064 nm ; source xénon, Nd :YAG ; mode SFR (Short Free Running) et LQS (Long Q-Switch).

Depuis les interventions

Au début de l'année 2021, le relief a été transporté à Calais pour un prêt par dépôt au musée des Beaux-Arts. Il est désormais exposé dans l'importante galerie située au rez-de-chaussée du musée (Fig. 8), dédiée au sculpteur et à ses travaux sur le groupe des *Bourgeois*. Le musée des Beaux-Arts de Calais ne dispose pas d'un contrôle climatique général des espaces d'exposition, mais les températures et les taux d'humidité relatives sont enregistrés par des capteurs thermo-hygrométriques placés en différents points du musée, dont un à proximité du relief (Fig. 8). La galerie du rez-de-chaussée, très haute sous plafond, est éclairée par une façade vitrée. Mais depuis 2018, au constat de fortes élévations de température en été, les équipes de conservation ont fait installer des filtres anti-UV, qui ont permis de réguler le climat en évitant les fluctuations trop importantes. Il n'y a pas eu de nouvelles hausses de la température depuis l'installation des filtres. Les problématiques et les questionnements liés aux interventions de conservation-restauration, à la présentation sur la structure et à l'exposition à la verticale, associés aux altérations inhérentes du relief et à sa fragilité ont encouragé son inclusion dans l'étude de cas et le travail de suivi. Le relief pose diverses interrogations :

- Le relief présente-il des altérations depuis son transport et sa nouvelle présentation à la verticale ?
- Les deux méthodes de comblements et les formulations assurent-elles bien leurs rôles de maintien, de renfort structurel, et d'amélioration esthétique ?
- Comment se comporte l'ensemble dans ce contexte ?
- Si de nouvelles altérations sont observées, où se situent-elles ?



Figure 8 : relief présenté dans la salle d'exposition dédiée à Rodin au musée des Beaux-Arts de Calais, accroché par sa structure sur la cimaise et mis à distance par une estrade, avec un suivi climatique possible grâce au capteur thermo-hygrométrique placé à côté
© Musée Rodin / Musée des Beaux-Arts de Calais
– J. Robin Dupire

b. Cadre ICMO 190¹⁷, musée du Louvre

Présentation

Le deuxième artefact de cette étude est un cadre daté du XIX^e siècle et conservé au musée du Louvre. Il a été étudié et restauré en 2015 et 2016 au cours d'un diplôme de master de conservation-restauration à l'Institut national du patrimoine¹⁸. Le cadre ICMO 190, nommé selon un numéro d'inventaire du musée d'Orsay, est fait d'une structure en bois et d'ornements moulés en plâtre. Les profils en bois sont recouverts d'un encollage protéinique et d'une couche d'apprêt, analysée comme étant composée de colle, de carbonate de calcium et de sulfate de calcium. Les ornements en plâtre les plus lourds sont fixés à l'aide de pointes métalliques et collés à la colle protéinique. Le cadre mesure 145 cm de hauteur sur 175 cm de longueur. Sa masse est estimée à 30 kg. Il présente un décor typique des cadres dit « de paysage » ou « cadres Barbizon », dont les registres ornementaux sont constitués de frises de motifs empruntés aux périodes stylistiques antérieures, comme les tores de lauriers et les rubans, les feuilles d'acanthes et les fleurons, la frise de perles, ou encore la frise tressée visible sur le talon du cadre (Fig. 9).

Historique

Un tampon au revers a permis d'attribuer sa fabrication au sein de l'atelier de M. Dutocq, entre les années 1870 et 1900. Sa mise en œuvre aurait été commanditée par les collectionneurs Hermann ou Edouard Martell, pour l'encadrement du tableau *Le Passeur* de Camille Corot (Fig. 10). Le cadre et la peinture intègrent les collections du musée du Louvre par don dès 1928. Ils auraient été séparés durant la Seconde Guerre mondiale, et le cadre déplacé au musée d'Orsay vers 1986, peut-être par erreur d'attribution¹⁹. C'est au cours de ce séjour qu'il est inventorié sous le numéro ICMO 190. Il n'y a pas de documentation permettant de connaître précisément son historique ni même ses conditions de conservation²⁰. Souffrant de multiples altérations, comme de nombreux cadres de cette typologie, il a été traité à l'Institut national du patrimoine par Élise Lopez entre 2015 et 2016. Il a bénéficié d'une étude technique, d'une évaluation de son état et d'un traitement de conservation-restauration novateur, avant de réintégrer les collections du musée du Louvre à l'automne 2016.

¹⁷ Le cadre ICMO 190 et sa mise en œuvre sont présentés au chapitre I, p. 50-51.

¹⁸ CHASTEL-ROUSSEAU Charlotte et LOPEZ Élise, « S'unir « très doucement avec les couleurs sans les offenser » : redécouverte et restauration d'un cadre des collections du musée du Louvre », *Patrimoines*, 13 (2017), p. 140-145 ; LOPEZ Élise, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2016.

¹⁹ *Ibid.*, p.36-38.

²⁰ *Ibid.*, p.39.



Figure 9 : cadre ICMO 190 après les traitements de conservation-restauration menés par Élise Lopez en 2016 © Musée du Louvre / INP – G. Vanneste.



Figure 10 : Camille Corot, *Le passeur. Souvenir de l'étang Moutier aux environs de Montfermeil (Seine-Saint-Denis)*, 1873, huile sur toile, RF 2670, musée du Louvre © RMN-Grand Palais (musée du Louvre) – F. Raux.

Altérations

Le cadre présentait d'importantes altérations de la structure et de la surface ne permettant ni son usage ni son exposition (Fig. 11). Une déformation générale de l'ensemble semblait liée à l'ouverture des assemblages au niveau des angles ainsi qu'à la fissuration des renforts de la structure en bois. Plusieurs parties d'ornements moulés étaient lacunaires, avec des manques plus ou moins importants en épaisseur, parfois jusqu'à la couche d'apprêt et révélant le bois du support (Fig. 12). Des fissures plus ou moins répandues ont été constatées, et notamment une principale sur les quatre montants, localisée parallèlement aux bords longs dans la partie la plus fine de la frise d'acanthé (Fig. 12).



Figure 11 : cadre ICMO 190 avant interventions de conservation-restauration, présentant d'importantes lacunes des ornements moulés (zones blanches), des ouvertures des angles, des fissures, des pertes de dorure, ou encore des salissures
© Musée du Louvre / INP
– G. Vanneste.

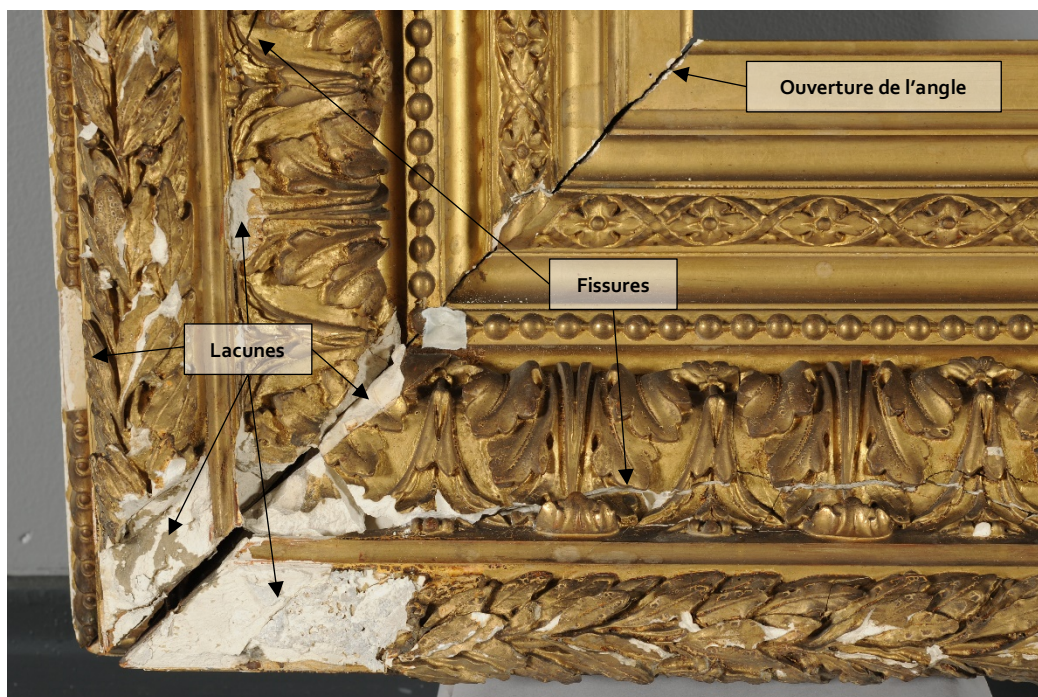


Figure 12 : détail de l'angle dextre bas montrant des lacunes d'ornement à différentes profondeurs, l'ouverture de l'angle, et des fissures dans les frises d'acanthé
© Musée du Louvre / INP – G. Vanneste.

Interventions²¹

Après le nettoyage des surfaces dorées, les assemblages instables de la structure en bois ont été consolidés par injection de colle animale, permettant un collage fort, et de sciure de bois qui augmente la viscosité de l'adhésif. Les soulèvements d'apprêt, ne pouvant être replaqués, ont été consolidés avec de l'adhésif Paraloid® B72²² chargé de microsphères de verre, ayant pour rôle d'épaissir la colle. Des solins²³ ont été réalisés pour maintenir les fragments mobiles et les ornements avec de l'adhésif Regalrez® 1126²⁴ et des microsphères de verre, choisis pour la réversibilité, la compatibilité avec les matériaux originaux et la faible rigidité du film chargé²⁵. Après consolidation et stabilisation des zones fragiles, les ornements lacunaires, comme des portions de frises ou des ornements de feuillage isolés, ont été restitués afin de retrouver la lisibilité de l'ensemble du cadre et de ses motifs (Fig. 13).

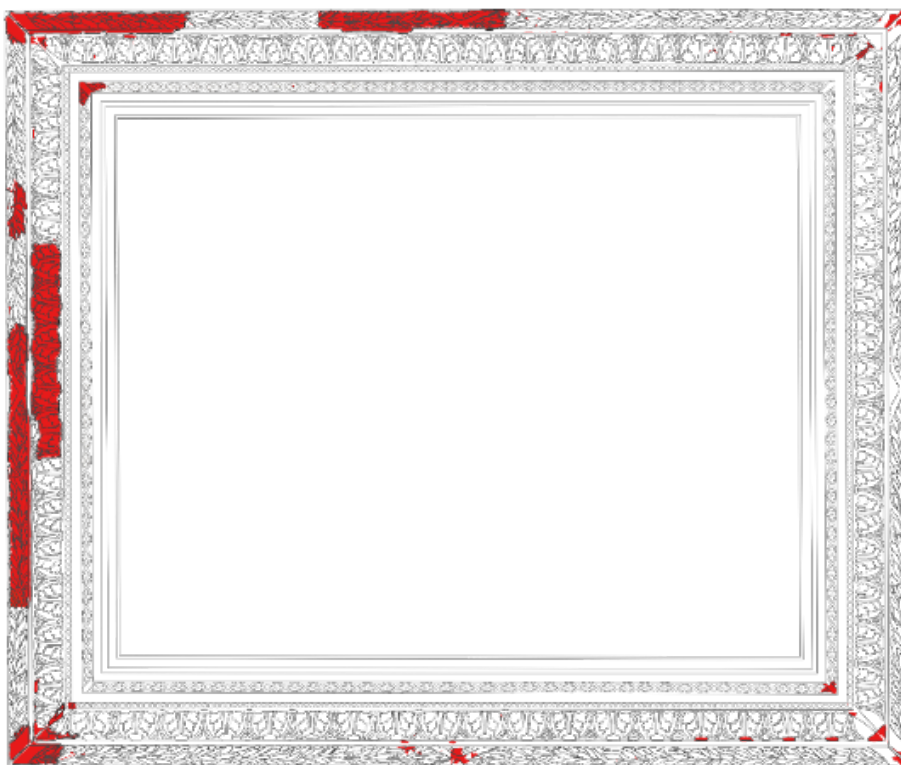


Figure 13 : représentation des zones lacunaires ayant été comblées, en rouge
© INP – É. Lopez.

²¹ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 230-265.

²² Le Paraloid® est une résine copolymère de méthacrylate d'éthyle et d'acrylate de méthyle, soluble dans les solvants de type hydrocarbure, cétone, alcool, et ester.

²³ Les solins sont des dépôts de formulations variables de type mortier ou mastic, c'est-à-dire d'un mélange constitué d'un liant et de charges, mis en œuvre *in situ*, qui agissent comme des cales pour supporter ou maintenir des éléments fragiles, soulevés ou déformés, lorsqu'ils ne peuvent être remis à plat ou en contact total avec le substrat d'origine.

²⁴ Le Regalrez® est une résine hydrocarbure, soluble dans les solvants hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, ainsi que certains esters et cétones.

²⁵ *Ibid.*, p.241.

Deux méthodes de comblement ont été employées selon le type de zones à traiter. Les ornements de grandes dimensions ont été mis en œuvre par moulage²⁶ (Fig. 14 a) et ceux de plus petites dimensions sans rôle structurel ont été façonnés par modelage aux outils directement en place (Fig. 14 b).

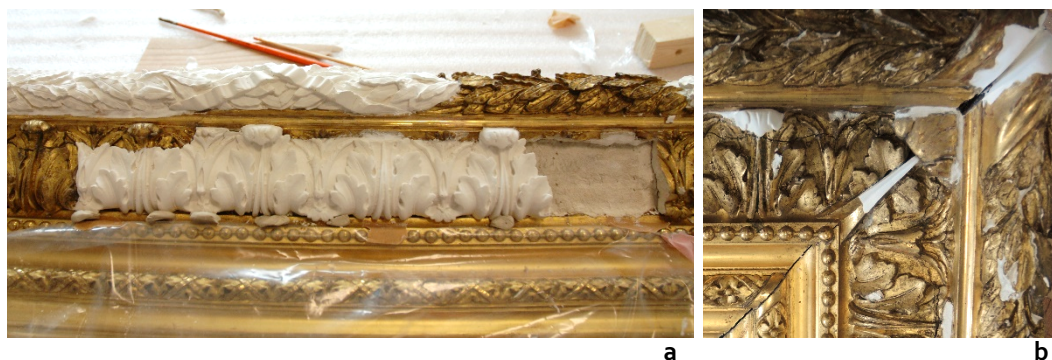


Figure 14 : détails des complements d'ornements, de grandes dimensions par moulage (a) et de petites dimensions, par modelage (b), © Musée du Louvre / INP – É. Lopez.

La recherche d'un matériau de comblement résistant et différenciable de l'original a été approfondie au cours de travaux menés par Élise Lopez²⁷ et Hugo Spini²⁸. La formulation devait pouvoir être distinguée de l'original, tout en garantissant une résistance suffisante et une bonne compatibilité. Après recherches et essais comparant des hémihydrates α et β , associés à des charges radio-opaques, avec ou sans fibrage, le plâtre Molda® 3 Normal, renforcé avec des fibres de verre de 6 mm de longueur, à concentration massique de 0,5 % a été sélectionné. Ce plâtre a été retenu car il est adapté pour le moulage, avec une bonne définition²⁹ et un temps de prise adéquat. Des fibres de verre ont été ajoutées afin de distinguer le matériau de comblement du plâtre original et de limiter le retrait au séchage, en faible proportion pour ne pas altérer la structure cristalline ni modifier la résistance mécanique, mais de longueur suffisante pour augmenter l'accroche avec le substrat. En effet, les essais mécaniques de flexion 3 points et de compression ont montré que l'apport d'une faible quantité de fibres dans un matériau assure un maintien après la rupture de la matrice, traduit par un comportement de type plastique, sans influencer considérablement sur la résistance mécanique et la limite de résistance. Ces observations ont également été vérifiées lors d'essais complémentaires par Hugo Spini avec des fibres de polypropylène³⁰. L'ajout d'une charge radio-opaque n'a pas été retenu par Lopez en raison de la baisse notable des propriétés mécaniques telles que la dureté de la surface ou encore les résistances à la flexion et à la compression³¹.

²⁶ Des empreintes en élastomère ont été relevées sur des portions d'ornement en bon état afin de réaliser des moules aux bons motifs et de garantir une reproduction formelle fidèle.

²⁷ *Ibid.*, p. 155-228.

²⁸ SPINI Hugo, *Formulation et évaluation de complements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, Rapport de stage de Master, Paris Centre, 2017.

²⁹ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 206.

³⁰ Spini, *Formulation et évaluation de complements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, op. cit., p.15-17 et 19-20.

³¹ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p. 208-221.

Après le séchage, les pièces moulées ont été collées au Paraloid® B72 à 40 % dans un mélange de solvants, afin de garantir une adhérence forte mais réversible. Pour améliorer le collage des pièces moulées, les plans de contact et d'assemblage ont préalablement été encollés avec une solution du même adhésif, limitant une trop grande absorption de l'adhésif dans le substrat original de bois et de plâtre.

Les lacunes de petites dimensions, sans rôle structurel, ont été comblées par modelage *in situ* avec un mélange de carbonate de calcium et de Klucel® G³² concentrée à 10 % (Fig. 14 b). Cette formulation est facilement modelable grâce au composé cellulosique qui forme un gel épais. La formulation a une adhérence suffisante pour être appliquée sans imposer de contraintes mécaniques. Elle peut être retravaillée après séchage et elle est réversible. De plus, elle ne peut pas être confondue avec les matériaux traditionnels liés à la colle animale et de dureté supérieure après le séchage. Les comblements ont été retouchés en mettant en place une méthode de dorure différenciable des techniques traditionnelles de dorure au bol ou à la mixtion³³. Une mise en teinte à l'aquarelle et à la peinture acrylique a d'abord été faite, puis une couche d'adhésif Plextol® B500³⁴ a servi à l'accroche des feuilles d'or. Cette méthode est notamment identifiable en cas d'observation sous lumière de fluorescence UV.

Évolution depuis la restauration

Entre 2018 et 2019, à l'occasion du chantier de récolement des collections du musée du Louvre, et en prévision du déménagement d'une partie des cadres vers les réserves externalisées, il a été constaté par l'équipe de la conservation, la régie, la documentation et ainsi que par la conservatrice-restauratrice qui menait l'étude, que certaines altérations ou zones fragiles semblaient de nouveau instables, particulièrement du côté dextre (Fig. 15) et en partie basse (Fig. 16 a et b). Ce constat a donc fait naître une réflexion sur les traitements et leur durabilité, ainsi que sur les conditions de conservation de cet artefact ou tout autre élément fragile de ce type, pour comprendre la reprise des altérations. Ayant bénéficié de nombreux comblements mêlant techniques traditionnelles et non-traditionnelles, le cadre ICMO 190 a donc été considéré comme cas d'étude central. Un suivi a été programmé, afin de recueillir des données objectives permettant d'évaluer le processus d'altération et de répondre aux interrogations suivantes :

- Y-a-t-il une réelle reprise des altérations et où sont-elles localisées ?
- S'agit-il d'altérations dans le matériau original ou dans celui de comblement ?
- La fragilité et la nature composite de l'artefact sont-ils des facteurs d'altération ?
- Y-a-t-il un lien avec les conditions de conservation comme le climat ou l'accrochage ?
- Est-il possible d'améliorer la future conservation, la stabilité et la durabilité des traitements ?

³² La Klucel® G est une poudre d'hydroxypropylcellulose, soluble dans l'eau et les alcools, qui forme un gel ayant un pouvoir collant léger.

³³ Les dorures traditionnelles sont couramment faites sur bol, dit aussi assiette, ou à la mixtion, qui correspondent aux matériaux des couches d'accroche permettant de fixer la feuille d'or. Le bol est un mélange d'argile, généralement rouge, et de colle animale ; la mixtion est un composé huileux, souvent appliqué sur une sous-couche jaune.

³⁴ Le Plextol® B500 est un adhésif acrylique en émulsion aqueuse.

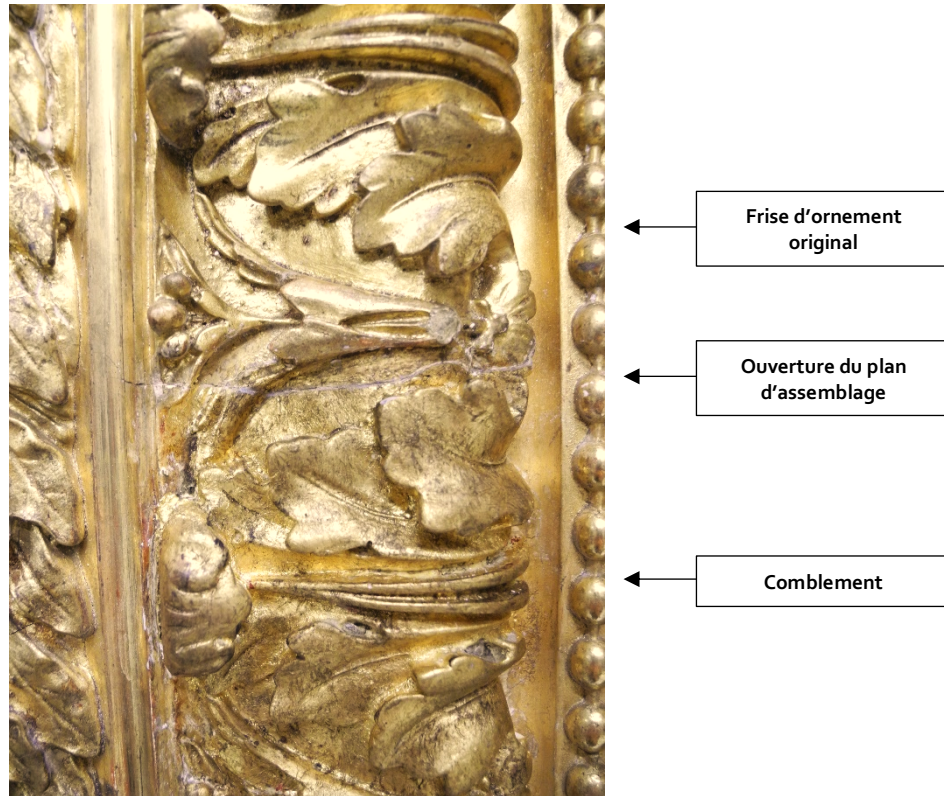


Figure 15 : détail d'une légère ouverture du plan d'assemblage entre ornement original et comblement sur le montant vertical dextre
 © Musée du Louvre – J. Robin Dupire

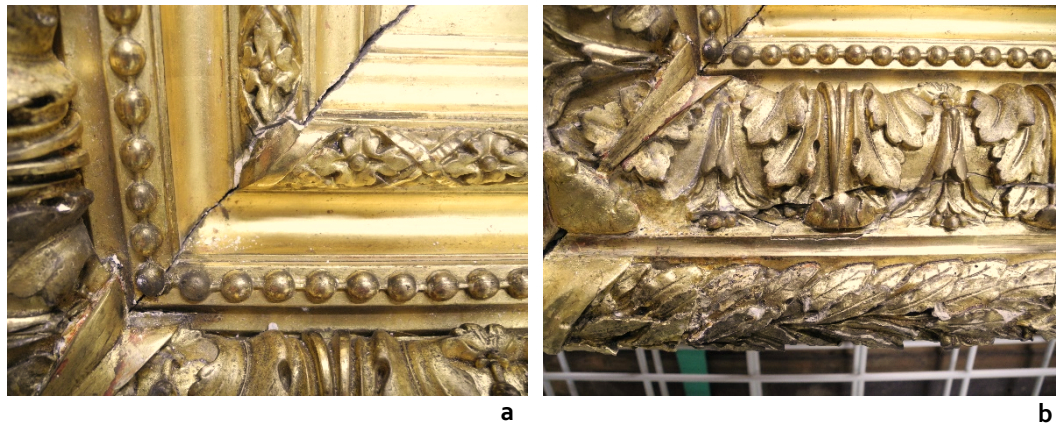


Figure 16 : détails des reprises d'altération sur l'angle bas dextre, avec une déformation provoquant l'ouverture de l'angle (a) et de la fissure longitudinale (b)
 © Musée du Louvre – J. Robin Dupire

c. Molosse de la gypsothèque du Louvre – Gy 0236

Présentation historique et technique

Le troisième artefact est une statue en ronde-bosse qui représente une figure de *Molosse* (Fig. 17), copiée d'après un marbre antique conservé dans la cour du Belvédère aux Musées du Vatican à Rome. Cette statue s'inscrit dans l'importante collections d'artefact en plâtre de la gypsothèque du département des Antiquités grecques, étrusques et romaines du musée du Louvre depuis 2001³⁵. Elle est le pendant d'une seconde figure de *Molosse* (Gy 0920), d'après un modèle du Belvédère également³⁶. Le *Molosse* Gy 0920 a été identifié comme faisant partie des envois d'Ingres lors de la première moitié du XIX^e siècle³⁷. Les deux statues étaient auparavant conservées au sein des collections de l'École nationale supérieure des Beaux-Arts de Paris. Lors de la phase de sauvetage des copies en plâtre dans les années 1970, les artefacts de cette collection ont été déplacés et stockés à Versailles, certains dans des espaces non adaptés mais qui permettaient le dépôt et la préservation malgré la quantité et les formats imposants. Au début des années 2000, les plâtres ont été mis sur palettes et placés dans les galeries des Petites Écuries au cours d'un important chantier d'aménagement et aux côtés des copies monumentales déjà remontées antérieurement. La statue du *Molosse* Gy 0236 mesure 122 cm de hauteur, pour 109 cm de largeur et 74,5 cm de profondeur. Sa masse est estimée à 30 kg. Il a été moulé selon une technique spécifique appelée staff, mise au point par le mouleur Alexandre Desachy au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle³⁸. La statue est creuse et le plâtre peu épais : la couche d'impression, ou première couche, est doublée par une seconde couche de plâtre. De la toile en fibres végétales renforce la structure de façon à maintenir une certaine résistance mécanique tout en abaissant la masse totale de l'artefact. La trame de cette toile est discernable par endroit, affleurant la surface (Fig. 18 a et b). Ce processus technique produit toutefois des artefacts d'une grande fragilité, sensibles aux chocs et *a priori* plus réactifs aux variations des conditions climatiques, en raison d'une part de leur nature composite, et d'autre part de la construction en couches fines comme des feuillets.

³⁵ La notice du *Molosse* Gy 0236 est consultable sur la base de données en ligne du musée du Louvre : <https://collections.louvre.fr/ark:/53355/cl010270721>

³⁶ La notice du *Molosse* Gy 0920 est consultable sur la base de données en ligne du musée du Louvre : <https://collections.louvre.fr/ark:/53355/cl010271233>

³⁷ LE BRETON Élisabeth et MARTINEZ Jean-Luc, *Une antiquité moderne : [exposition, Rome, Académie de France, Villa Médicis, 7 novembre 2019 - 1er mars 2020]*, Milan, Officina Libraria, 2019, p. 168.

³⁸ PINATEL Christiane, « La " Restauration " en plâtre de deux colonnes du temple de Castor et Pollux dans la Petite Écurie royale de Versailles : histoire et archéologie », *Revue archéologique*, 35 / 1 (2003), p. 75.



Figure 17 : vue de face du *Molosse*, Gy 0236, état en 2021 dans la galerie de la gypsothèque
© Musée du Louvre – J. Robin Dupire



a



b

Figure 18 : détail de la toile de renfort apparente, sur la crinière côté dextre (a) et dans les creux de l'œil dextre (b)
© Musée du Louvre – J. Robin Dupire

Altérations et interventions

La statue a été restaurée en 2015 par deux conservatrices-restauratrices indépendantes, Genovefa Le Bris du Rest et Fanny Kurzenne, missionnées à l'occasion d'une campagne de traitements conservatoires à la gypsothèque. D'après le dossier documentant l'intervention³⁹, l'œuvre était très altérée en raison de la fragilité de sa mise en œuvre et à cause de mauvaises manipulations et d'accidents divers liés très certainement à son histoire. Elle avait de nombreuses lacunes, des zones cassées et fissurées, des enfoncements, et donc de très nombreuses zones d'instabilité structurelle (Fig. 19 a et b). Certaines lacunes avaient déjà été comblées lors d'une intervention non documentée et non datée, comme une zone de la terrasse à l'avant ou encore une partie du museau, au niveau de la mâchoire inférieure et son intérieur (Fig. 20 a), avec un matériau blanc, lissé, non retouché, et identifié comme du plâtre par les professionnelles. Sur la terrasse, le matériau de comblement ancien était lui-aussi fissuré et cassé (Fig. 20 b).

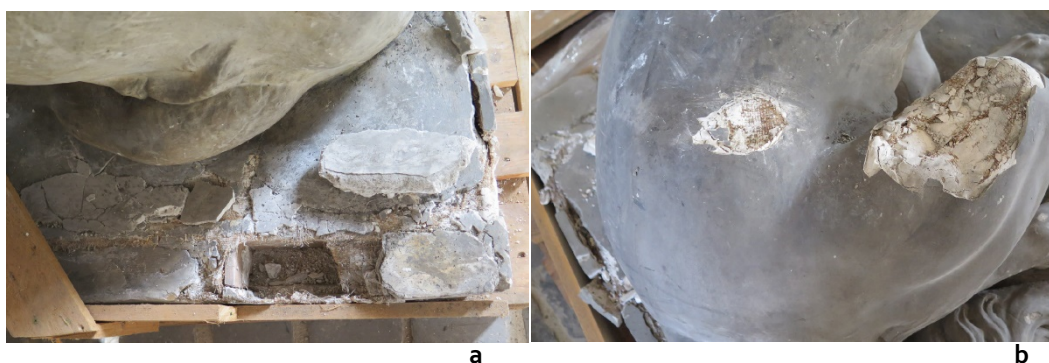


Figure 19 : détail des lacunes sur la terrasse (a) et sur le dessus de la patte droite (b), montrant des cassures, des zones fissurées, des mobilités, des enfoncements, ainsi que des lacunes et des pertes de matière

© Musée du Louvre – G. Le Bris du Rest

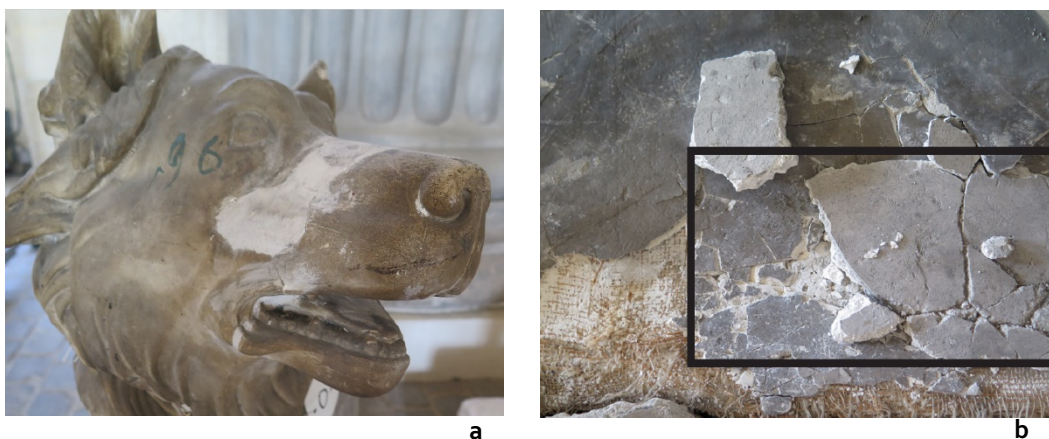


Figure 20 : détail des anciens comblements avec un matériau blanc très ressemblant à du plâtre, sur le museau et dans la mâchoire (a) et sur la terrasse (b)

© Musée du Louvre – G. Le Bris du Rest

³⁹ Rapport d'intervention pour le *Molosse du Belvédère*, Genovefa Le Bris du Rest, adressé au Département des arts grecs, étrusques et romaines, Musée du Louvre, 2015.

Le traitement de 2015 a consisté en un nettoyage et une consolidation générale afin de stabiliser la structure fragile de l'artefact. Pour cela, des bandes textiles emplâtrées et des renforts en bois ont été placés à l'intérieur de la statue et sous la terrasse. Les fissures ont été consolidées par injection d'un adhésif vinylique en solution dans l'eau, concentré à 50 %, au pouvoir collant suffisant et à la texture adaptée (assez fluide pour être injecté dans des espaces très fins, mais assez épais pour rester à l'interface sans trop pénétrer dans la porosité du substrat). Les comblements restituant les éléments formels lacunaires ont été faits avec un mélange modelé à frais, constitué de plâtre et de blanc de Meudon⁴⁰, à parts égales. À l'état frais, cette formulation est modelable à la spatule et offre une bonne ouvrabilité. À l'état solide le matériau est compatible avec le substrat original tout en étant différenciable du matériau original en cas d'analyses. Sa résistance mécanique et sa dureté sont suffisantes. Il permet aussi la retouche. Ces comblements sont localisés sur la terrasse (Fig. 21), avec la restitution des angles, sur le dessus de la patte avant senestre ou encore le dessus de la patte arrière droite (Fig. 22). Ils ont ensuite été mis au ton et retouchés pour améliorer les aspects esthétiques et visuels.



Figure 21 : détail des comblements (blancs) et consolidations sur la terrasse, état en 2021
© Musée du Louvre – J. Robin Dupire



Figure 22 : détail des comblements de lacunes sur la patte arrière droite, avant retouche et harmonisation
© Musée du Louvre – G. Le Bris du Rest

⁴⁰ Carbonate de calcium pouvant contenir un faible pourcentage d'argiles.

Depuis la restauration

Le relief est disposé sur une palette et conservé dans les galeries des Petites Écuries à Versailles, selon les mêmes conditions de conservation depuis le réaménagement des espaces et l'installation des artefacts dans les galeries à partir de 2001. Depuis les interventions de 2015, il n'y a pas eu de signalement d'altération du *Molosse* bien que quelques zones fissurées seraient susceptibles d'avoir bougé (Fig. 23 a et b). Il semblerait que l'artefact soit relativement acclimaté à son espace de conservation et aux conditions de température et d'humidité. L'absence d'équipements de contrôle ou de suivi ne permet pas de vérifier les conditions climatiques ou de les ajuster de façon à garantir la stabilité. Toutefois, les équipes de la conservation et de la régie témoignent de leur ressenti qui est celui d'un climat plutôt stable, aux températures inférieures à 20°C, et aux variations lentes, certainement grâce à la bonne inertie du bâtiment. Jusqu'à présent, ce paramètre de conservation ne semble pas être cause d'altération de l'ensemble de la collection. La statue du *Molosse* a intégré l'étude de cas de suivi et de monitoring en raison de son apparente bonne évolution de conservation, tant des matériaux originaux et de l'artefact entier, que des matériaux de restauration appliqués, et surtout des comblements au plâtre et au carbonate de calcium. Cette formulation couramment employée par les spécialistes de la conservation-restauration de sculptures, testée et étudiée dans ces travaux à l'état fluide et solide, est particulièrement intéressante à évaluer, plusieurs années après sa mise en œuvre, et, de plus, en étant conservée dans un contexte climatique potentiellement variable. Ce cas d'étude pose les interrogations suivantes :

- Dans quel état est l'artefact depuis les interventions de 2015 ?
- Est-ce que le matériau original ou ceux de restauration subissent les effets des variations climatiques ?
- Les éventuels mouvements ou déformations, non visibles à l'œil nu avec certitude, peuvent-ils être détectés par une méthode de suivi sur une longue durée ?
- Y-a-t-il des zones de tension ou de déformation ?
- La formulation de comblement est-elle bien compatible ?



a



b

Figure 23 : deux détails d'anciennes zones de fissures, restaurées et consolidées, sur la gueule côté dextre (a) et la patte avant senestre (b), état en 2021

© Musée du Louvre – J. Robin Dupire

3. Contextes de conservation

Les divers facteurs et paramètres de conservation, présentés ultérieurement, ont une influence sur la bonne conservation d'un artefact et de ses traitements de conservation-restaurations. Les études en conservation préventive ont établi des conditions idéales pour les artefacts ou les matériaux spécifiques, tout comme des collections plus générales pour lesquels les paramètres sont plus larges de façon à satisfaire un ensemble, avec les valeurs généralement données à $\approx 18-20^{\circ}\text{C}$ en température et $\approx 50\%$ d'humidité relative⁴¹.

Dans de nombreux cas d'institutions muséales, le climat n'est pas toujours contrôlé ni monitoré. Toutefois les œuvres présentes dans ces espaces ont souvent des états de conservation satisfaisants, étant acclimatées et rarement soumises à des conditions critiques. Ainsi les artefacts restaurés semblent conserver leur bon état sur une durée acceptable dans ces conditions. L'acclimatation des objets à leurs espaces est un phénomène connu et il est généralement préconisé de conserver un artefact dans les conditions qu'il connaît depuis longtemps, plutôt que de le soumettre brutalement à des conditions théoriquement plus adaptées, lorsqu'un changement lent de condition n'est pas envisageable. Les comportements des trois artefacts évalués doivent être mis en lien avec les contextes de conservation, pour aider à comprendre les mécanismes observés, qu'ils soient positifs, garantissant une bonne conservation, ou négatifs, et donc à risque.

Le cadre ICMO 190 est conservé en réserve au musée du Louvre depuis son retour de l'INP à l'automne 2016. Il a été changé d'espace au début de l'année 2021. Le climat de la précédente réserve n'était pas contrôlé et des fluctuations étaient ressenties par les équipes chargées de la conservation et de la régie. Il est toutefois possible que la dimension importante de la réserve et sa localisation en sous-sol aient permis une inertie suffisante pour limiter les variations trop extrêmes. Après des travaux de réaménagements adaptés, la nouvelle réserve bénéficie désormais d'un climat contrôlé par une centrale de climatisation. Les conditions peuvent être suivies directement dans les espaces grâce aux capteurs thermo-hygrométriques disposés. De plus des déshumidificateurs mobiles ont été déployés pour ajuster le climat dans les différentes zones de la réserve, selon les besoins. Depuis la mise en service de ces nouveaux espaces de stockage et de réserves, des périodes de variations ont toutefois été constatées par les équipes de la conservation et de la régie, en lien avec les conditions climatiques extérieures, comme les épisodes de froid ou de chaleur, survenus au printemps et à l'été 2021.

Le *Molosse* est présenté dans les galeries des Petites Écuries du château de Versailles depuis les années 2000. Les espaces versaillais ne sont pas contrôlés ni monitorés. Toutefois, le bâti, ses dimensions, ainsi que les matériaux de construction, permettent une bonne inertie climatique et donc des variations ralenties. D'après les équipes œuvrant sur place les températures ne sont jamais extrêmes mais il est possible que le taux d'humidité relatif soit assez variable d'une saison à l'autre. Cependant, il est possible que les fluctuations soient suffisamment lentes pour ne pas causer de dommages importants.

⁴¹ Le vade-mecum de la conservation préventive fourni par le C2RMF propose aux pages 11-12 les données générales de $18-20^{\circ}\text{C}$ et $40-65\%$ d'humidité relative, pouvant permettre la bonne conservation de collections variées aux matériaux divers. Toutefois, il est précisé que certaines typologies d'artefacts et leurs matériaux, comme certains métaux, verres, céramiques ou pierres à l'état altéré, peuvent nécessiter des conditions d'humidité relative très basses, inférieures à 40% .

Le relief pour *la Porte de l'Enfer* a réintégré les réserves du musée Rodin à Meudon à l'automne 2017 après une année d'étude et de traitements de conservation-restauration. Il est resté stocké à plat sur une structure de manipulation temporaire jusqu'à l'automne 2020, date de réintervention pour l'installation sur une structure définitive, spécialement conçue pour permettre un accrochage sécurisé à la verticale et donc son exposition. En avril 2021, il a pu être déposé au musée des Beaux-Arts de Calais, et présenté en salle d'exposition. Le relief a connu plusieurs changements de lieux de conservation ces dernières années, dont deux contextes différents récemment. Le climat de la réserve du musée Rodin est contrôlé, monitoré, et reconnu comme très stable par les équipes de la conservation et de la régie. En revanche à Calais, le climat n'est pas contrôlé. Mais une attention particulière est portée à cette problématique. Toutefois, le suivi des températures des taux d'humidité relative, par la pose de capteurs et l'évaluation des données enregistrées, a permis de procéder à l'amélioration des espaces avec la pose de filtres anti-UV sur les grandes baies de la façade. Des équipements mobiles et temporaires, comme des déshumidificateurs d'appoint, peuvent aussi être installés ponctuellement. Les données relevées pour l'année de monitoring du relief ont été fournies par l'équipe du musée.

Artefact	Cadre	Molosse	Relief de Rodin
Disposition	Accroché à la verticale, suspendu par deux pitons placés en partie haute au revers.	Installé debout, sur palette depuis les années 2000.	À plat jusqu'en 2021 puis accroché à la verticale.
Climat	Avant 2021 : contexte muséal inconnu, puis réserve non contrôlée et possibles fluctuations d'humidité. - Depuis 2021 : Réserve contrôlée et monitorée, avec quelques fluctuations climatiques.	À partir des années 1970 : espaces temporaires de stockage, sans contrôle ni suivi. - Depuis les années 2000 : dans les galeries des Petites Écuries, espace non contrôlé et non monitoré mais bonne inertie thermique ressentie.	Avant 2021 : réserves au climat contrôlé et monitoré. - Depuis 2021 : salle d'exposition au climat monitoré, avec possibles fluctuations climatiques.
Date des traitements	2016	2015	2017 et 2020

Tableau 1 : présentation des conditions de conservation des trois artefacts.

Ces trois situations (Tabl. 1) sont très spécifiques et ne sont donc pas immédiatement comparables, mais elles sont caractéristiques des variétés de conditions climatiques muséales en France. Les suivis et les résultats pouvant fournir des informations complémentaires, il est donc bénéfique d'évaluer chacun des artefacts et leurs évolutions par rapport à leurs contextes, et d'en déduire conclusions et préconisations pour participer à leur bonne conservation préventive et pour enrichir la connaissance des matériaux de comblement des artefacts en plâtre.

REMARQUES

Ces trois exemples illustrent le processus de traitement des collections d'artefacts muséaux. Une première phase est dédiée à l'étude de leur état, qui est documenté par des observations et la compilation des données recueillies sous forme de constat et de diagnostic. De ces conclusions il est ensuite possible d'établir un protocole d'intervention, en adaptant les méthodes et les moyens techniques pour conserver et restaurer selon les besoins et les critères. Après traitements, les artefacts sont replacés en situations muséales, soit en exposition, soit en réserve. Dans ces milieux aux conditions variées, telles que présentées au début de ce chapitre, les artefacts restaurés sont destinés à demeurer le plus longtemps possible sans fragilisation de leur état. Après stabilisation, l'état de l'artefact restauré constitue alors une référence pour le suivi : un état initial post-interventions de conservation-restauration permettant d'assurer la bonne préservation de l'œuvre et de ses traitements conservatoires.

II. Méthodologies développées pour le suivi de l'état de conservation des artefacts

La durabilité d'un traitement de conservation-restauration est un des objectifs de la profession. Afin d'évaluer le comportement de différentes formulations de comblement, un suivi des artefacts présentés précédemment a été mis en place en utilisant deux méthodes complémentaires qui enrichissent les méthodes d'examen habituelles, en lien avec les conditions de conservation. La première méthode, testée avec les trois artefacts, consiste en la numérisation 3D et la corrélation d'images. Ceci permet de comparer des relevés effectués à différents moments sur une période donnée, avec une définition très précise. La seconde méthode, appliquée à un seul artefact, est un suivi permanent effectué par des capteurs de déplacement et visant à constater le déplacement ou la déformation d'une partie de l'artefact au cours du temps, en fonction des fluctuations climatiques.

1. Numérisation 3D et corrélation d'images

Des relevés à haute définition et en trois dimensions sont faits par numérisation avec un scanner portable go!SCAN SPARK™ n° 9220305 de Creaform⁴², qui présente les avantages d'être mobile, plutôt léger, et sans contact avec l'artefact (Fig. 24). Avec cette technologie portable contenant les cinq capteurs nécessaires, c'est le manipulateur qui déplace l'appareil autour de l'objet à scanner, à une distance d'environ 20 à 30 cm. La numérisation est alors transmise en direct sur l'ordinateur de support. Il est possible de mettre le relevé en pause et d'en évaluer la qualité avant de reprendre et de compléter l'acquisition. Selon les dimensions de l'artefact, un relevé total peut prendre plusieurs dizaines de minutes. Cette méthode permet de numériser une partie ou la totalité de l'élément, avec ou sans la « texture », qui correspond aux informations de surface comme les couches polychromées ou la couleur. Les données sont ensuite traitées avec le logiciel VXelements – 3D. La résolution la plus fine est de 0,100 mm. Cependant, il est possible d'observer des détails très précis tels que des griffures, des fissures ou encore des bulles d'air sur les images numérisées à partir du réglage de la résolution à 1 mm. Des relevés ont été réalisés à intervalle régulier (Tabl. 2), avec un rythme plus resserré pour le cadre, plus facilement accessible et en raison des suspicions de reprises d'altérations. Neuf relevés ont été faits pour le cadre ICMO 190 en une année. Le *Molosse* a pu être scanné trois fois, au cours de trois saisons différentes. Le relief de Rodin a été numérisé trois fois également, entre avril 2021 et mai 2022. Le premier relevé de chaque artefact, souligné dans le Tableau 1, a constitué le relevé de référence.

Artefact	2021			2022					
	Cadre ICMO 190	<u>Juillet</u>	Octobre	Novembre	Janvier	Mars	Avril	Mai	Juin
<i>Molosse</i>	<u>Décembre</u>			Mars			Juin		
Relief de Rodin	<u>Avril</u>	Novembre		Mai					

Tableau 2 : campagnes de relevés par numérisation des trois artefacts.

⁴² La fiche technique du scanner est consultable en annexe V, p. 539.



Figure 24 : séances de numérisation sur deux artefacts évalués : le cadre ICMO 190 et le *Molosse Gy 0236* de la gypsothèque © Musée du Louvre – A.-S. Le Hô.

Les relevés sont traités par corrélation d'images, ce qui correspond à la comparaison de deux images « superposées » l'une sur l'autre par le biais de points d'ancrage ou de références (Fig. 25). Ces points, environ une quinzaine, sont choisis et placés manuellement sur les deux images en parallèle, après le nettoyage des bruits ou des défauts de numérisation sur chaque fichier. La multiplication du repérage de points communs entre deux images accroît la qualité d'un traitement par comparaison. Cette étape est donc cruciale avant de débiter l'analyse par corrélation. Il est alors possible d'évaluer la différence d'une image à une autre et ainsi de détecter des déplacements ou des mouvements au sein de l'artefact. La technologie présente ici l'avantage de permettre une superposition en trois dimensions, en inscrivant des points de référence dans toutes les directions. Cependant la corrélation réalisée par l'équipement utilisé considère uniquement le champ z , et donc les changements ou déformations éventuels du plan xy ne sont pas prises en compte. Cela offre néanmoins une première approche et une première indication, les altérations des artefacts étant généralement distinguables dans différents plans.

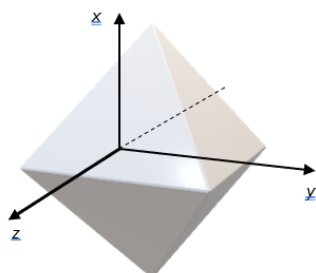
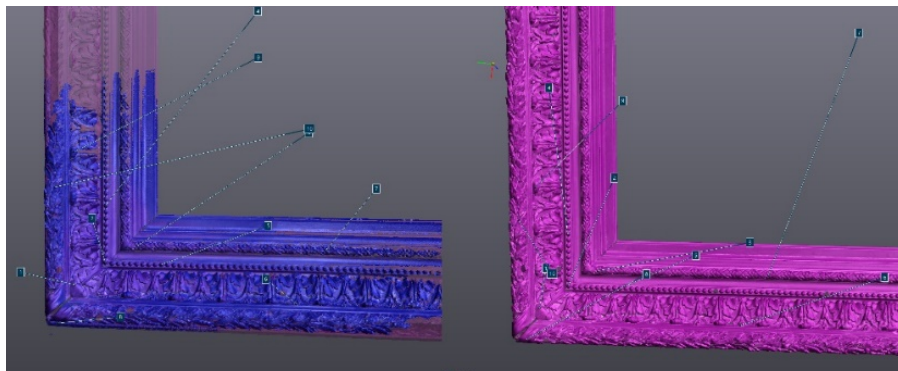


Figure 25 : exemple de placement de points de correspondances pour la corrélation de deux numérisations de l'angle bas dextre, à partir de la référence en bleu © Musée du Louvre – J. Robin Dupire

2. Suivi de déplacements localisés par capteurs LVDT

Afin compléter les informations momentanées obtenues par la numérisation 3D pour le cadre ICMO 190, un second dispositif de suivi a été mis en place avec des capteurs de déplacement. Le mouvement des montants du cadre a été évalué dans deux conditions : en condition permanente et « normale », c'est-à-dire accroché et soumis à son poids propre, puis en condition « normale » en imposant ponctuellement un chargement acceptable. Les capteurs de déplacement LVDT Eddylab® de type palpeur avec une pointe arrondie et montée sur ressort⁴³, sont placés au contact de la surface à monitorer (Fig. 27), ici les montants des côtés et du bas du cadre. Lorsque le ressort est actionné, enfoncé ou relâché, la tension électrique transmise est modifiée. Cette valeur de tension peut être transformée en déplacement et donc indiquer le changement de position de l'élément au contact du capteur.

Pour ces protocoles, le cadre a été accroché à la verticale sur une grille fixe pendant toute la durée du suivi, sans déplacement et ni manipulation. Les trois capteurs ont été disposés à l'aplomb au milieu de chaque montant et fixés à la grille. Ils étaient reliés à une centrale d'acquisition permettant de programmer les mesures et d'enregistrer les données (Fig. 26). Un thermocouple de type K, également relié à la centrale, a permis de relever la température à proximité du cadre. Les capteurs et le système d'acquisition de données a pu être mis en place lors d'une visite en réserve au mois de novembre 2021 et l'ensemble a été démonté au mois d'août 2022.



Figure 26 : espace et équipement du cadre ICMO 190 avec les trois capteurs de déplacement (n°8, n°7, et n°6, de gauche à droite), la centrale d'acquisition des données et la sonde thermocouple K pour relever la température à proximité de l'artefact
© Musée du Louvre – J. Robin Dupire

⁴³ Les informations techniques des capteurs sont indiquées en annexe V, p. 540-543.

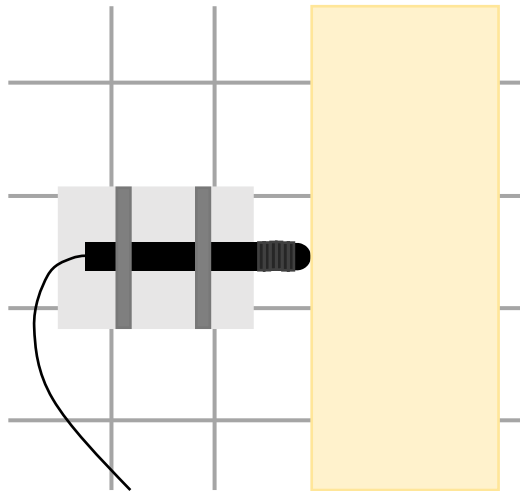


Figure 27 : schéma de disposition d'un capteur (en noir), installé par liaison complète au contact du montant du cadre (en jaune), pour mesurer son déplacement tout en garantissant l'immobilité du capteur.

Étalonnage des capteurs et calibration des données

Un étalonnage a été effectué en plaçant les capteurs dans une presse Instron® afin d'obtenir un déplacement étalon. Reliés à la centrale d'acquisition, les capteurs transmettent une tension proportionnelle au déplacement (Fig. 28). Dix mesures ont été effectuées avec un déplacement de 0,5 mm imposé toutes les 150 secondes. Une loi de calibration peut alors être calculée selon le modèle de régression linéaire $y = Ax + B$, avec y = le déplacement ; A = le coefficient directeur ou de déplacement ; x = la tension aux bornes du capteur ; et B = la tension initiale. Le coefficient de déplacement A a pu être calculé (Tabl. 3) pour calibrer les données relevées en monitoring du cadre ICMO 190. Les trois capteurs ont des coefficients très similaires, et fiables, confirmés par les valeurs de R^2 .

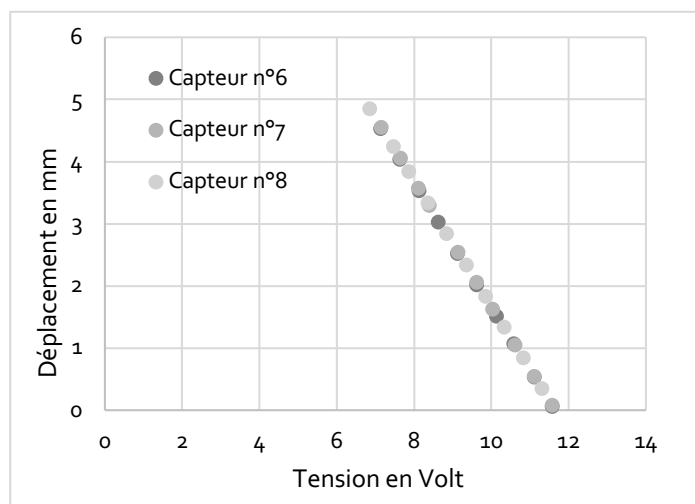


Figure 28 : représentation du lien tension/déplacement après établissement d'une loi de calibration pour chaque capteur.

Valeurs	Capteur 6 (côté senestre)	Capteur 7 (centre, bas)	Capteur 8 (côté dextre)
A, coefficient de déplacement	-1,007	-1,009	-1,009
R ²	1	1	0,995

Tableau 3 : valeurs mesurées pour l'étalonnage et la loi de calibration.

Pour évaluer le déplacement des capteurs lors des essais, sans et avec chargement, et donc pour mesurer les déformations ou les mouvements des trois montants, le modèle $y = Ax + B$ a également été utilisé, avec y = le déplacement ; A = le coefficient établi par étalonnage, x = la tension à chaque chargement ; B = la tension initiale, avant la mise en place du système et des charges. Les valeurs de tension initiale sont rapportées à zéro selon la formule : $B = -A \cdot \text{valeur de tension initiale mesurée}$.

Suivi sans chargement

La première évaluation est un suivi sans chargement, en étudiant les mouvements de l'artefact uniquement sous poids propre et selon les conditions d'accrochage et de conservation. Les valeurs de tension et de température sont enregistrées toutes les heures. De cette façon, il est possible d'analyser le comportement grâce aux déplacements localisés des trois montants du cadre équipés de capteurs, en fonction des variations du climat à proximité de l'artefact et de l'activité en réserve. Ces données de suivi permanent ont été sauvegardées à chaque visite (Tabl. 4), et représentent une surveillance d'une durée de 9 mois. Chaque visite a permis de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure, la justesse de positionnement des capteurs, et d'identifier d'éventuels événements perturbateurs. Les données ont ensuite été analysées en comparant les courbes de déplacement pour chaque capteur et la température.

Dates des visites et des relevés de données	
Installation et démarrage	2021_11_10
Relevés et redémarrage des enregistrements	2021_11_17
	2021_12_01
	2022_01_12 et 26
	2022_03_15
	2022_04_18
	2022_05_20
2022_06_14	
Relevé et démontage	2022_08_02

Tableau 4 : calendrier des relevés du suivi par capteurs de déplacement du cadre ICMO 190.

Essais de chargement statique

Deux essais en chargement statique ont été effectués afin d'identifier un ou plusieurs profils de déplacement et de déformation en cas d'application d'une contrainte ou de mise sous tension. Ils sont menés en plaçant une charge en suspension sur la traverse inférieure, suivant un modèle simplifié de portique. Le chargement est progressif, avec un ajout de masses marquées, placées selon un laps de temps défini et régulier.

Pour cela, un système de chargement en suspension a été mis en œuvre : il est composé d'un support souple en mousse haute densité permettant d'isoler les surfaces du cadre, sur lequel un crochet en fil de fer est positionné, puis un sac léger est accroché, destiné à recevoir les masses de chargement (Fig. 29). L'ensemble est installé à ≈ 61 cm du bord intérieur dextre du cadre, soit légèrement désaxé par rapport au milieu, de façon à ne pas interférer avec le capteur positionné et centré sous la traverse.

Ce système constitué du support en mousse, du crochet, et du sac, pèse 85 g. Les masses marquées utilisées sont des cylindres en pierre étalonnés ainsi que des doses de sable. Les mesures de tension ont été relevées toutes les secondes par la centrale d'acquisition. Afin d'assurer la stabilisation des données au cours du chargement, un délai de 30 secondes a été prévu après l'ajout d'une nouvelle charge. Pour chaque palier de chargement, une valeur moyenne et son écart-type ont été calculés.

Le premier essai, réalisé le 01.12.2021, a consisté en un chargement progressif de treize cylindres de 250 g à 275 g, pour obtenir une masse totale de 3500 g. Afin d'évaluer le comportement au-delà de ce chargement, le système a été retiré et une charge de 4090 g a été appliquée avec du sable et le système d'accroche. Le même protocole d'ajout de masses marquées en cylindres de pierre a été repris, jusqu'à l'obtention d'un chargement total de 6710 g. Le second essai, réalisé le 02.08.2022, a consisté en un chargement de vingt cylindres d'environ 220g chacun, permettant d'obtenir une masse totale de 4525 g. Pour évaluer le comportement au-delà de ce chargement, le système a été retiré et une dernière mesure a été effectuée, en appliquant directement une charge de 6221 g, composée de sable et de quatre poids de 534 g chacun. Un essai complémentaire a été mené pour vérifier la réactivité du capteur 6 dont le déplacement était peu visible dans les conditions initiales de test, c'est-à-dire avec le système légèrement excentré vers le côté dextre, à ± 61 cm du bord. Un chargement de 6221 g a été appliqué pendant ± 150 secondes en déplaçant le système vers le montant senestre, placé alors à 55 cm du bord interne.

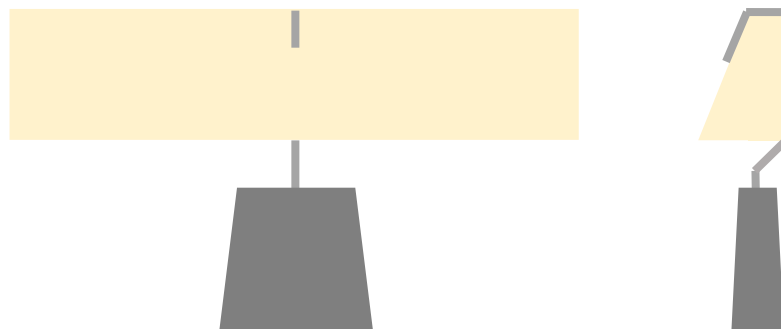


Figure 29 : schéma du chargement en suspension (de face à gauche et de profil à droite) composé de crochets et d'un sac recevant les charges (en gris), placé sur le montant horizontal bas du cadre (en jaune).

III. Résultats

1. Présentation par méthode d'évaluation

a. Numérisation 3D et corrélation d'images

Les numérisations des trois artefacts ont été réalisées par partie pour faciliter les prises de vues et garantir l'obtention d'images les plus complètes possibles sans alourdir les fichiers. La résolution de 1 mm a été préférée dans la plupart des cas, mais quelques essais ont été faits à 0,5 mm afin de comparer les définitions. Les numérisations à résolution 1 mm ont permis de relever des détails très précis comme l'importante fissure dans la frise d'acanthé du cadre (Fig. 30), les zones fissurées et comblées sur la partie avant du *Molosse* de la gypsothèque (Fig. 31), ou encore les comblements et les anciennes altérations du relief de Rodin, comme les déplaquages laissant un aspect granuleux sur certaines surfaces, ou encore les plans de cassures et les fissures (Fig. 32).



Figure 30 : deux détails de numérisation 3D de l'angle bas dextre du cadre ICMO 190, relevé de mai 2022, permettant de distinguer les altérations comme la fissure dans la frise d'acanthé sur la traverse ou encore l'ouverture de l'angle © Musée du Louvre – J. Robin Dupire



Figure 31 : trois vues de la numérisation 3D de décembre 2021 du *Molosse Gy 0236* de la gypsothèque, montrant la tête sous deux angles différents et l'avant de la terrasse ; les détails, comme la fissure sous la mâchoire ou les compléments des restaurations de 2015, sont bien identifiables © Musée du Louvre – J. Robin Dupire



Figure 32 : trois vues de la numérisation 3D d'avril 2021 du relief S. 03598 de Rodin, observable sous tous les angles et avec une très haute précision montrant les détails de l'artefact comme les aspérités des surfaces altérées, les anciens plans de cassure et les fissures ou encore les comblements effectués (flèches)

© Musée Rodin / Musée des Beaux-Arts de Calais – J. Robin Dupire

Les corrélations sont représentées sur les images numérisées selon un code couleur (Fig. 33). Les zones vertes correspondent aux déformations ou aux déplacements inférieurs à 0,5 mm. Les mouvements supérieurs à 0,5 mm sont représentés par une échelle de couleurs du jaune au rouge quand le déplacement est saillant dans le champ z , c'est-à-dire par rapport au plan xy , ou bleu quand la déformation est rentrante par rapport au plan xy . Les mouvements, déformations, ou déplacements constatés doivent être considérés uniquement dans ce plan xy , selon l'axe z . Cette échelle permet d'évaluer les changements ou les différences entre l'image de référence et l'image à évaluer au moment du relevé et donc à un moment précis. Ainsi, une altération permanente peut être perçue d'un relevé à l'autre, mais, au contraire, un changement réversible tel que la dilatation de la matière sous l'effet de variations climatiques, qui ne provoque pas de dommage, est probablement non détecté par cette méthode d'analyse ponctuelle, si l'état initial est retrouvé avant le prochain relevé. Pour obtenir des valeurs de déplacement précises, des pointés peuvent être effectués directement sur l'image corrélée.

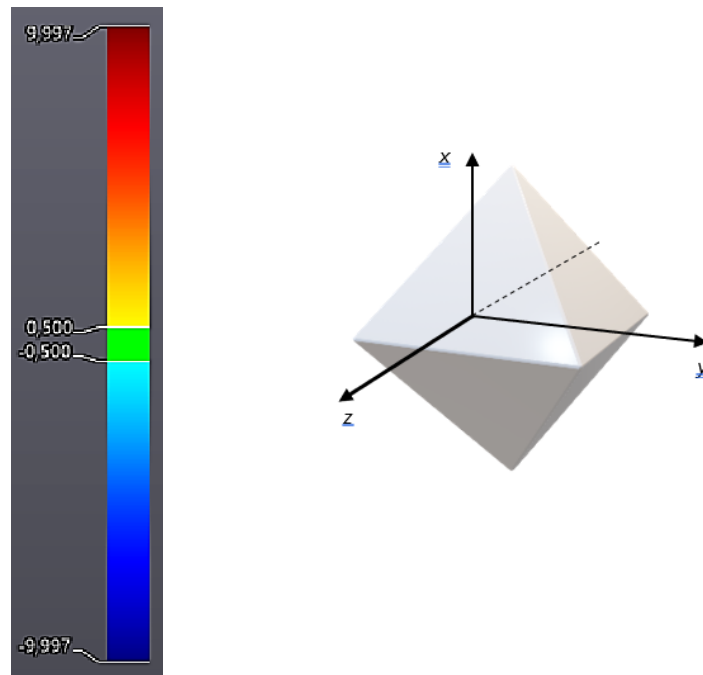


Figure 33 : détail de l'échelle de déformation dans le champ z , avec des différences représentées par les zones vertes comprises entre +0,5 mm et -0,5 mm. Au-delà, les changements sont considérés comme supérieurs à 0,5 mm, jusqu'au maximum de 10 mm, en positif ou en négatif par rapport au plan xy .

Chaque corrélation comporte deux images complémentaires : de l'image à évaluer par rapport à l'image de référence, et inversement. Dans cette partie, les images présentées sont celles contenant le plus d'informations⁴⁴. L'allure général des corrélations, qui reflètent les tendances de déplacement d'un relevé à l'autre, ainsi que des changements spécifiques, ponctuels et localisés, sont observés afin d'évaluer les comportements généraux des trois artefacts dans leurs milieux de conservation. Les zones altérées et restaurées sont examinées plus particulièrement.

⁴⁴ Les autres corrélations sont consultables en annexe V, p. 544 à 556.

Relief du musée Rodin

La partie centrale du relief, la plus altérée et qui comporte le plus de zones restaurées, a été numérisée trois fois, permettant deux corrélations : avril-novembre 2021 et avril 2021-juin 2022⁴⁵.

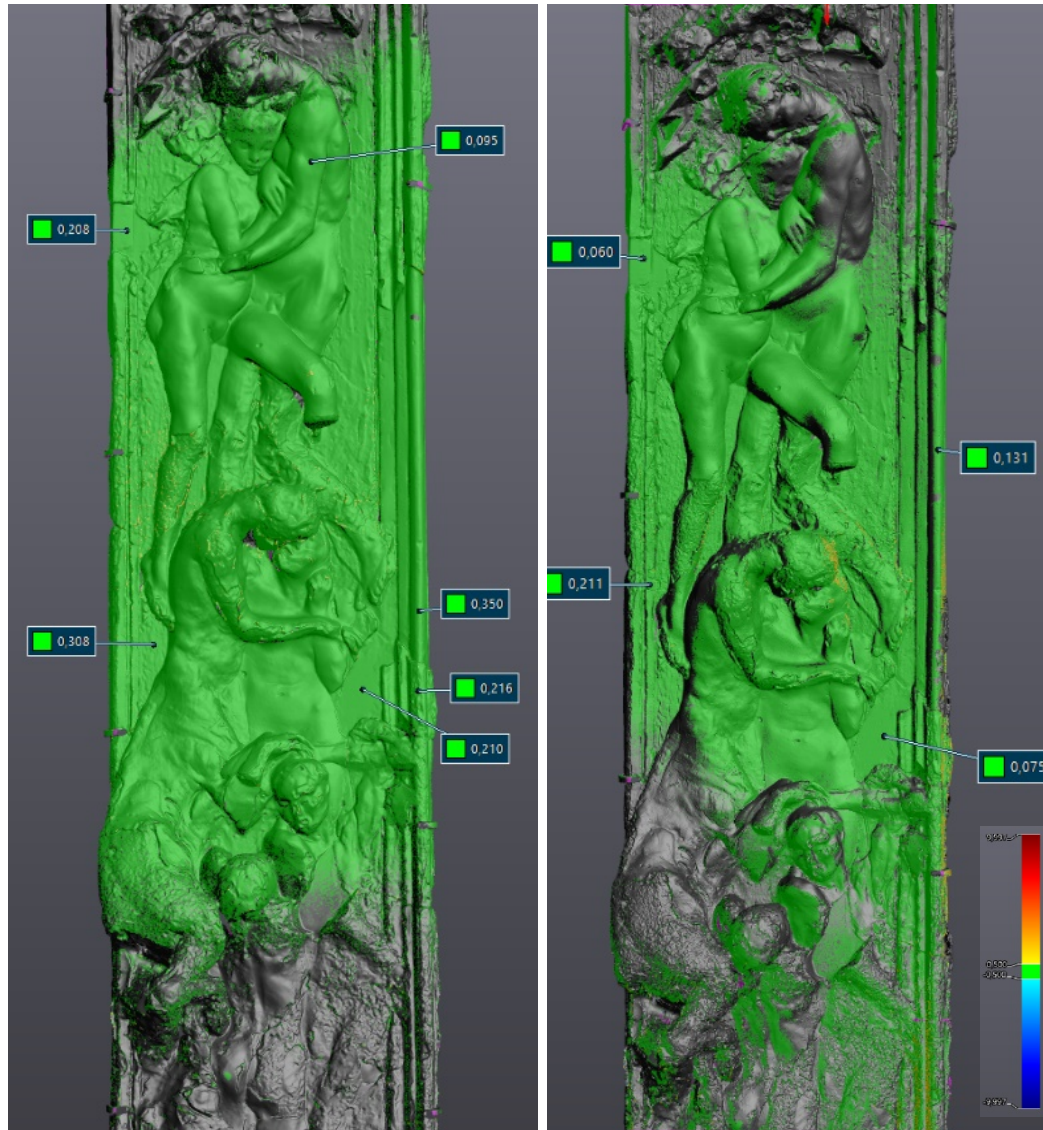
Pour cet artefact, il a été possible de faire des relevés comparant deux résolutions de 1 mm (Fig. 34 a et 35 a) et de 0,5 mm (Fig. 34 b, c et 35 b).

Dans les deux cas, les zones sont principalement vertes indiquant une différence inférieure à 0,5 mm entre le relevé de référence et le relevé à évaluer (Fig. 34 et 35). Les pointés donnent des indications variées selon les zones, avec des valeurs de $\approx 0,06$ mm à $\approx 0,35$ mm.

La corrélation d'avril-novembre 2021, à partir de numérisations à résolution de 0,5 mm, montre des zones jaunes aux mouvements de $\pm 0,7$ mm très localisés sur les têtes du couple central et sur le bord extérieur d'un comblement (Fig. 34 b et c). Ces zones n'ont cependant pas été constatées sur la seconde corrélation (Fig. 35 b), ni sur les relevés de résolution 1 mm (Fig. 34 a et 35 a). Ces indications de déplacement seraient donc liées à des défauts de numérisation ou de réglage des points de corrélation, plutôt qu'à une véritable déformation ou altération de l'artefact.

Les zones altérées et restaurées du relief ne montrent pas de comportement de déformation significatif. Les différents fragments recollés, les lacunes comblées, les réseaux de fissures constatés ne présentent pas de variations révélatrices d'un nouveau processus d'altération. Il semble alors que les méthodes et les matériaux employés présentent une bonne compatibilité avec l'artefact, son comportement général, et le milieu dans lequel il est actuellement conservé.

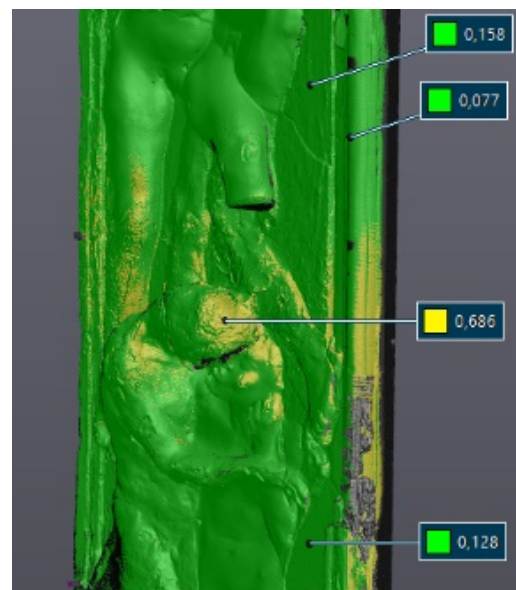
⁴⁵ Les autres corrélations sont consultables en annexe V, p. 544 à 547.



a

b

Figure 34 : corrélations du relief S. 03598 entre avril et novembre 2021, à résolution 1 mm (a) et 0,5 mm (b), montrant une majorité de zones à faibles différences, avec quelques localisations au-delà de 0,5 mm de décalage indiquant une éventuelle déformation ou un défaut de numérisation visibles sur le détail (c)
 © Musée Rodin / Musée des Beaux-Arts de Calais – J. Robin Dupire



c

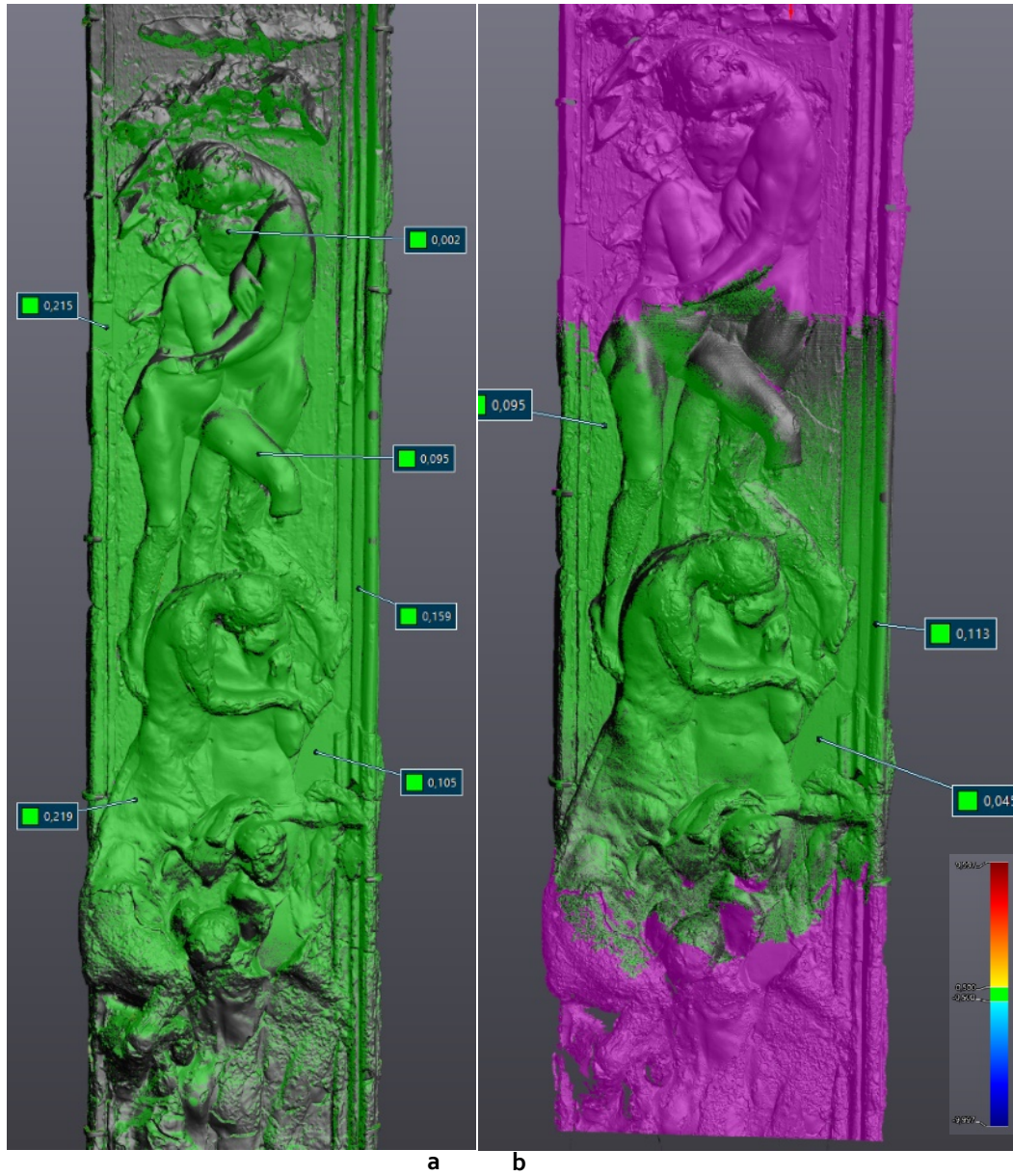


Figure 35 : corrélations du relief S. 03598 entre avril 2021 et juin 2022, à résolution 1 mm (a) et 0,5 mm (b)

© Musée Rodin / Musée des Beaux-Arts de Calais – J. Robin Dupire

Cadre ICMO 190 du musée du Louvre

Les neuf numérisations du cadre ont permis d'obtenir huit corrélations⁴⁶, dont trois sont sélectionnées et présentées ici : le fichier de référence de juillet 2021 est comparé à ceux de novembre 2021 (Fig. 37), mars (Fig. 38) et juillet 2022 (Fig. 39).

Pour faciliter la numérisation et les étapes de corrélation, le cadre a été numérisé en quatre parties, découpées selon les angles dextres et senestres, haut et bas, à résolution 1 mm.

D'après ces exemples représentatifs de l'année d'étude, les corrélations indiquent majoritairement des déplacements inférieurs à 0,5 mm. Les pointés précisent plutôt des valeurs comprises entre $\approx 0,07$ et $\approx 0,2$ mm signifiant alors de très faibles déplacements d'un relevé à l'autre.

Des pointés localisés sur les quatre angles renseignent des valeurs supérieures, aux alentours de $\approx 0,3$ à $\approx 0,5$ mm, variables d'un relevé à l'autre et selon les corrélations. Cette différence de valeurs semble logique puisque les angles sont susceptibles de connaître des déformations selon les fluctuations climatiques, étant des zones d'assemblage. De plus, l'ouverture des angles et la reprise de certaines altérations adjacentes ont été constatées par Lopez en 2018.

En revanche, l'angle haut senestre présente des zones localisées avec une différence de $\approx 0,6$ mm à $\approx 0,9$ mm, variant en étendue selon le relevé et la corrélation. Ce comportement peut renseigner sur la nature instable de cette zone qui, pourtant, ne présentait pas d'altération majeure avant les interventions de conservation-restauration, à part quelques petites lacunes sur les bords de l'assemblage de l'angle ayant donc été comblées (Fig. 36)

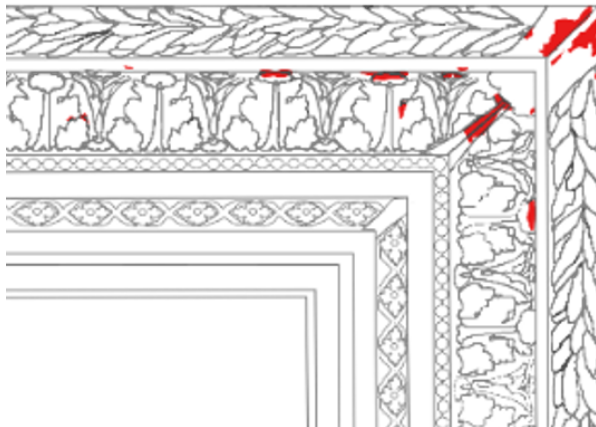


Figure 36 : détail de l'angle haut senestre schématisé indiquant les zones comblées (en rouge) ; tiré de Lopez, 2016.

Les zones les plus susceptibles de s'altérer de nouveau, comme les deux traverses, le montant et les angles du côté dextre, ayant bénéficié d'importantes interventions de consolidation et de comblement, semblent relativement stables. Différentes interprétations peuvent être proposées pour l'angle haut senestre : il subirait désormais des déformations, par répercussion de la stabilisation du reste du cadre ; ou bien il présenterait une meilleure stabilité, avec de plus faibles mouvements réversibles et non dommageables mais mal évalués par la méthode de numérisation 3D et de corrélation.

⁴⁶ Les autres corrélations sont consultables en annexe V, p. 548 à 552.

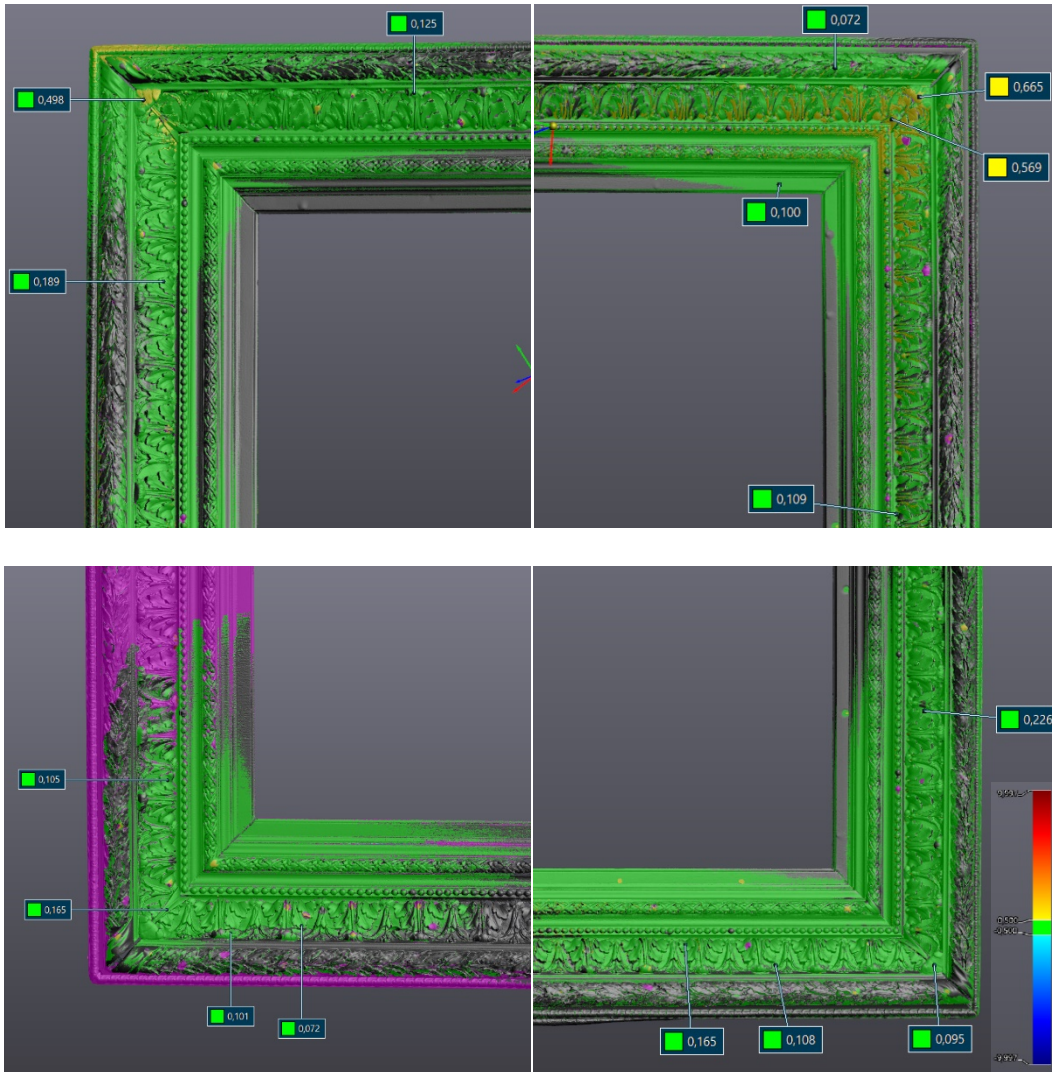


Figure 37 : corrélations des angles du cadre ICMO 190 entre juillet et novembre 2021
© Musée du Louvre – J. Robin Dupire

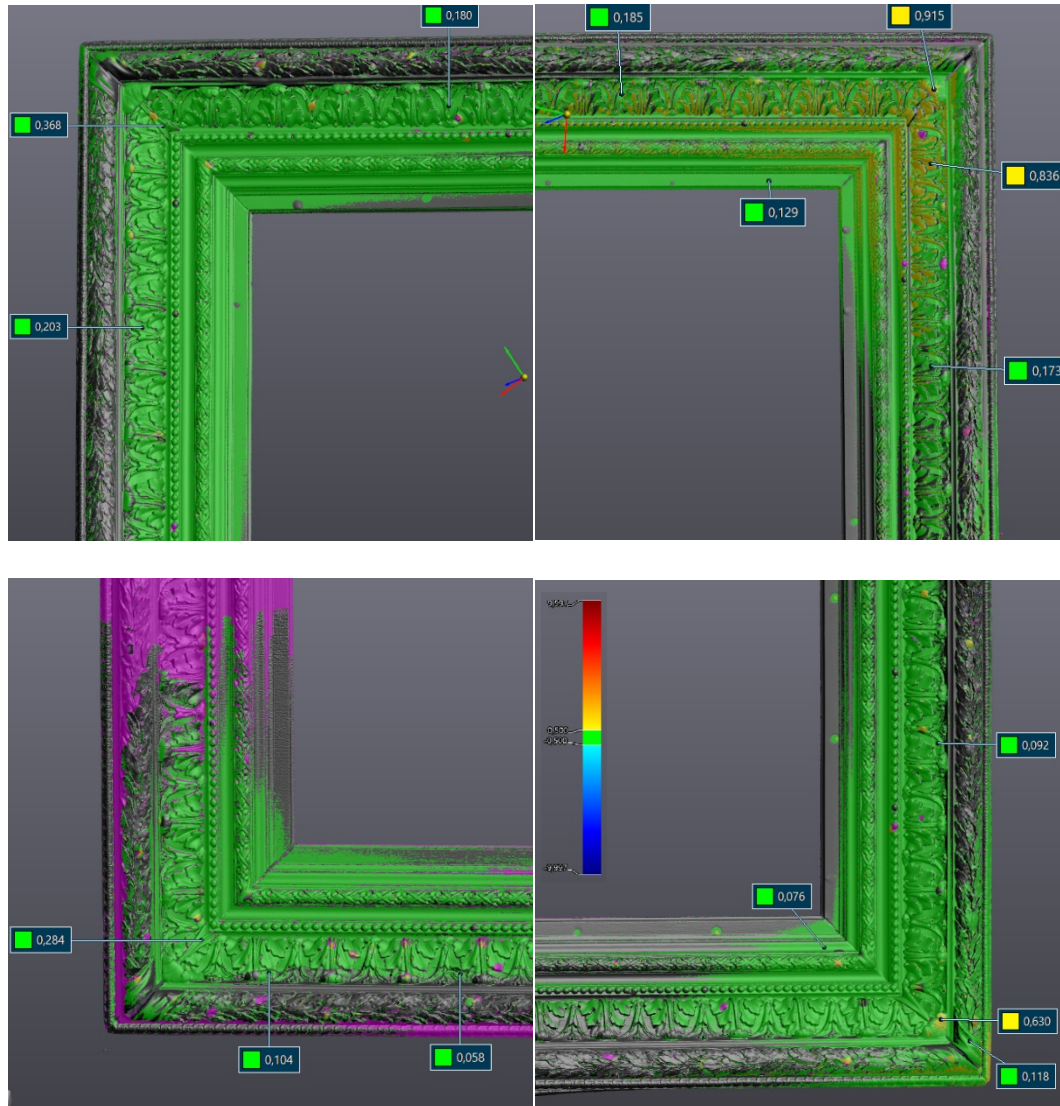


Figure 38 : corrélations des angles du cadre ICMO 190 entre juillet 2021 et mars 2022
 © Musée du Louvre – J. Robin Dupire

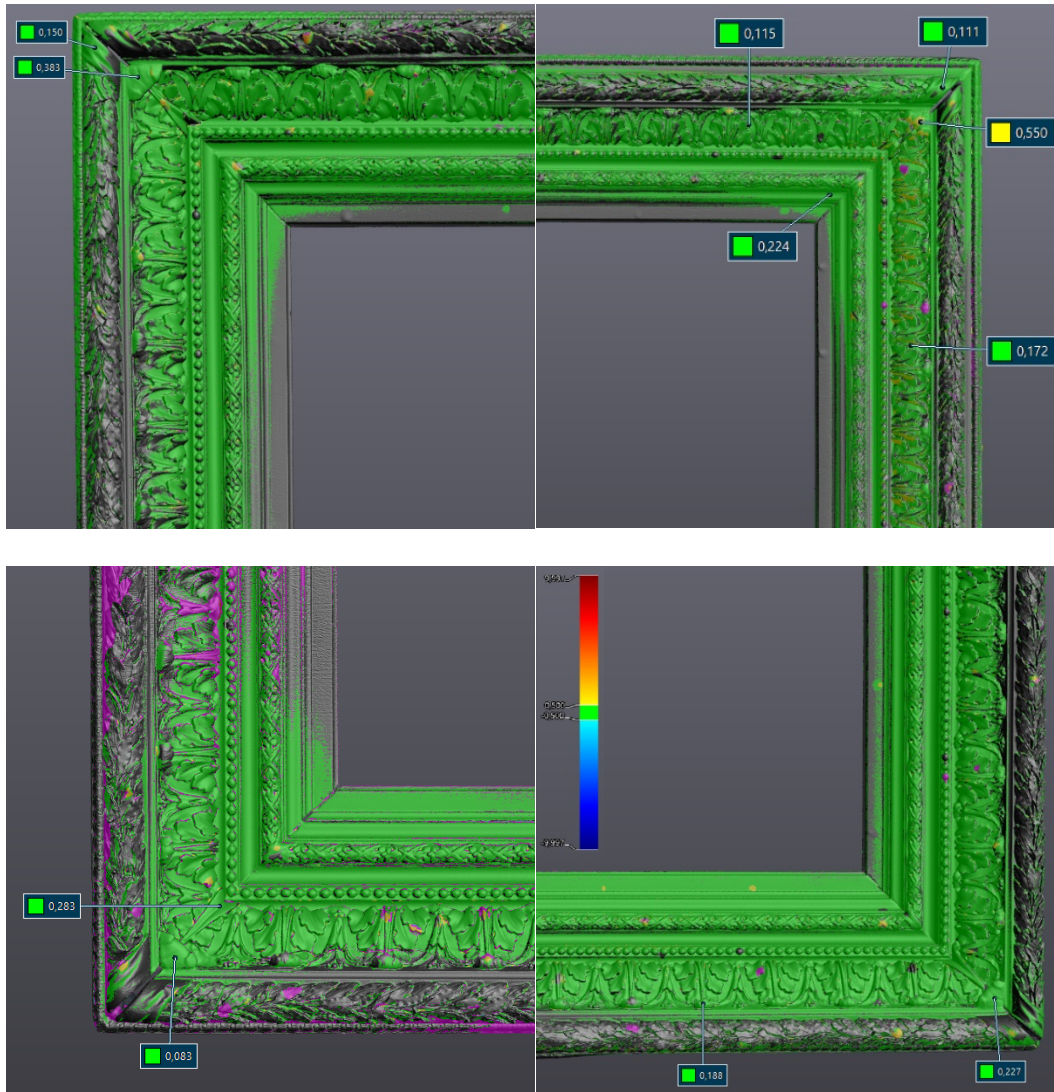


Figure 39 : corrélations des angles du cadre ICMO 190 entre juillet 2021 et juin 2022
© Musée du Louvre – J. Robin Dupire

Molosse de la gypsothèque

La statue du *Molosse* a été numérisée en trois parties sur les zones les plus restaurées : la tête et la partie arrière, ainsi que la partie avant (Fig. 40).

Trois numérisations ont été programmées sur une période de près de six mois, permettant de réaliser deux corrélations : décembre 2021-mars 2022 et décembre 2021-juin 2022, avec une résolution réglée à 1 mm⁴⁷.

Toutes les vues évaluées ont montré les mêmes résultats avec une absence de déformation supérieure à 0,5 mm. Les pointés aux indications précises ont des valeurs comprises entre $\approx 0,02$ mm et $\approx 0,2$ mm (Fig. 40 et 41). Ces déplacements minimes suggèrent une bonne stabilité de l'artefact dans son milieu de conservation. Les légères différences peuvent être provoquées par les fluctuations climatiques qui adviennent dans les galeries des Petites Écuries à Versailles. Les zones fragiles, restaurées en 2015, comme la terrasse consolidée et comblée, ne semblent présenter ni nouvelle altération, ni reprise d'endommagement. La zone fissurée de la mâchoire du *Molosse* semble également stable, la tête du *Molosse* étant la zone aux variations les plus basses.

⁴⁷ Les autres corrélations sont consultables en annexe V, p. 553 à 556.

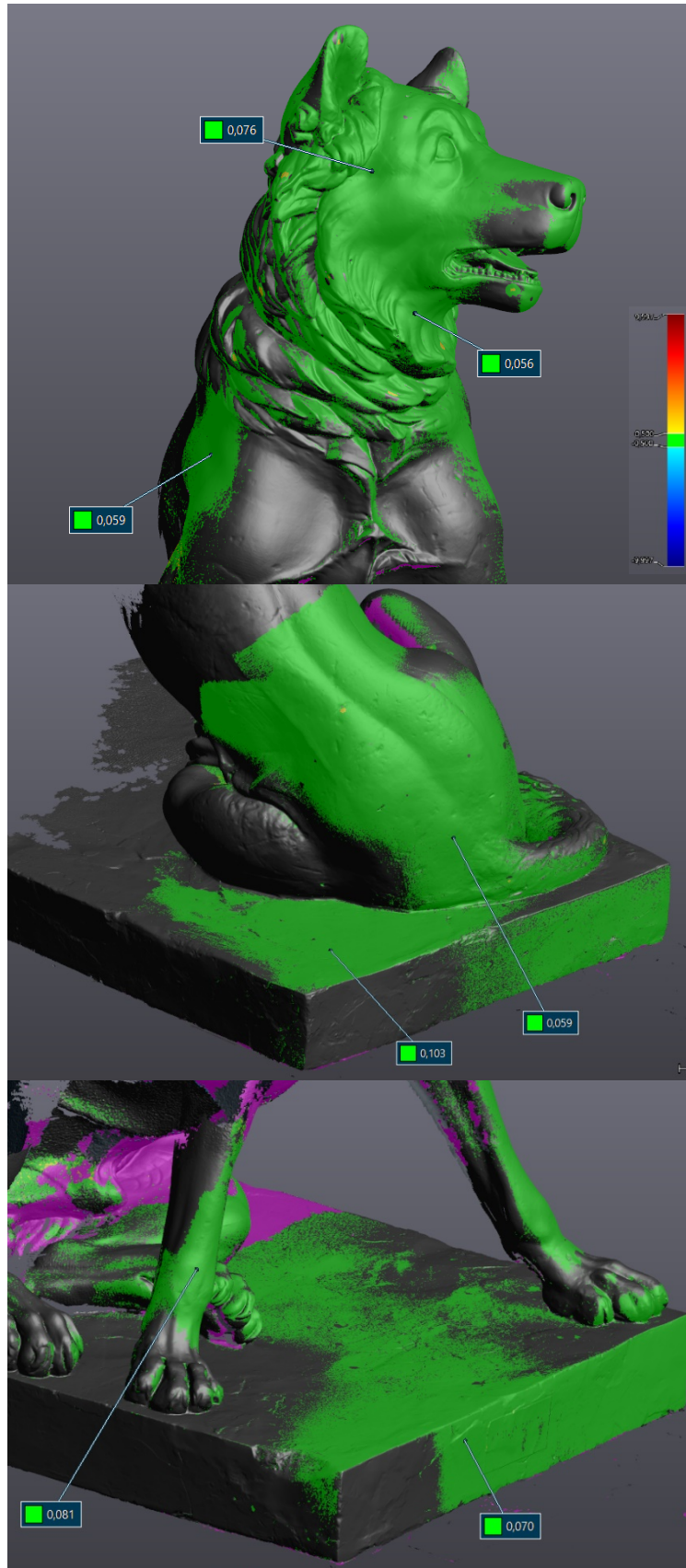


Figure 40 : corrélations des parties numérisées du *Molosse Gy 0236* de la gypsothèque entre décembre 2021 et mars 2022 © Musée du Louvre – J. Robin Dupire

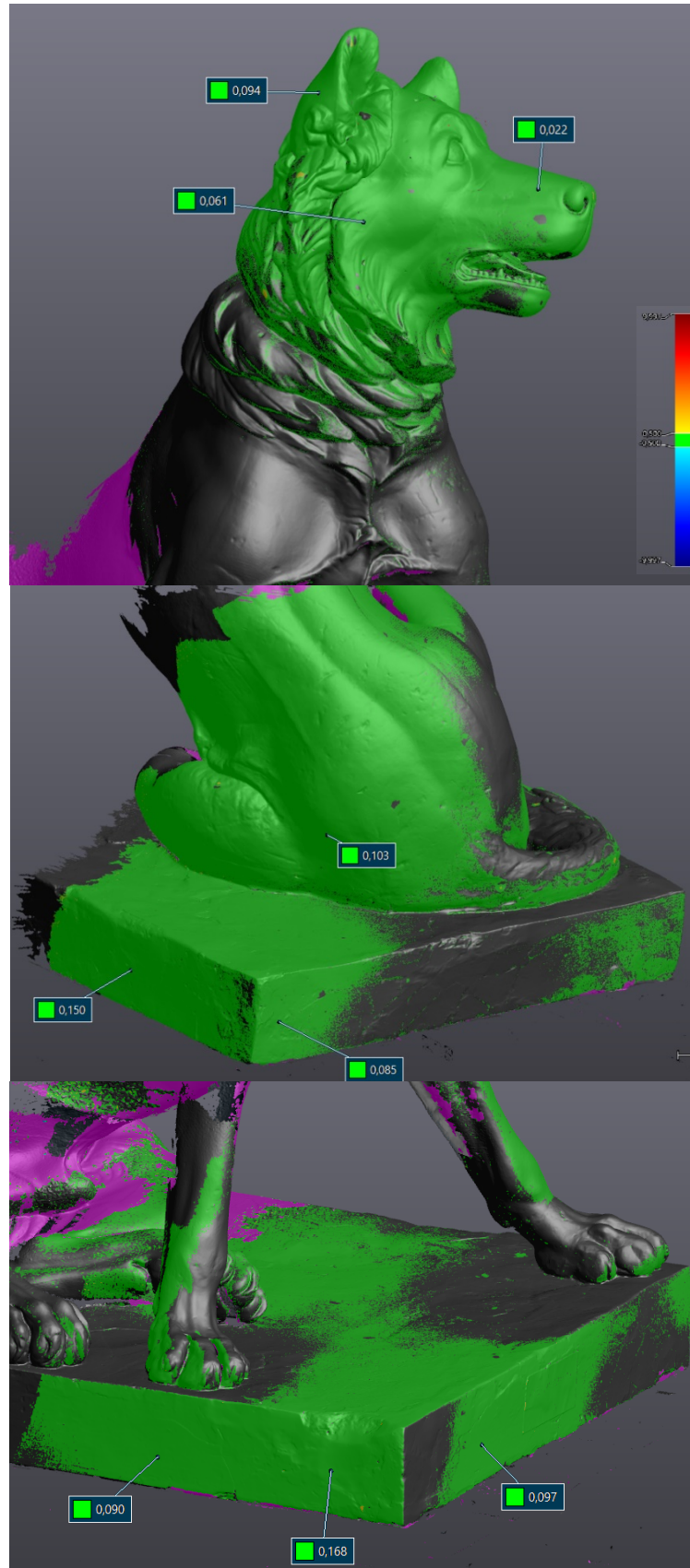


Figure 41 : corrélations des parties numérisées du *Molosse Gy 0236* de la gypsothèque entre décembre 2021 et juin 2022 © Musée du Louvre – J. Robin Dupire

REMARQUES

Au cours d'une année d'évaluation, les numérisations des artefacts n'ont pas révélé de mouvement ou d'altération majeure, ni générale, ni localisée au niveau des zones de fragilités telles que les plans d'assemblages des anciennes cassures, les zones de comblements, ou encore les fissures. Les corrélations d'images montrent principalement des iso-valeurs de déplacement réparties uniformément sur l'ensemble des zones scannées, indiquant que les éventuels mouvements sont inférieurs à 0,5 mm. Ce résultat est important et révèle une signature suggérant un avancement ou un recul général d'une image par rapport à l'autre. Le fond « vert » constitue alors la référence des déplacements à analyser. Un tel déplacement de 0,5 mm pour le plâtre soumis à une sollicitation en compression peut néanmoins causer une situation critique. En considérant trois cas de rapports massiques échelonnés et des échantillons cylindriques ($\varnothing = 16 \text{ mm}$; $h = 32 \text{ mm}$) soumis à un test de compression, les reconstitutions du signal effort-déplacement (Fig. 42) d'après les données mesurées (Tabl. 5) indiquent que cet ordre de grandeur de déplacement de 0,5 mm devrait provoquer l'altération ou la rupture du matériau.

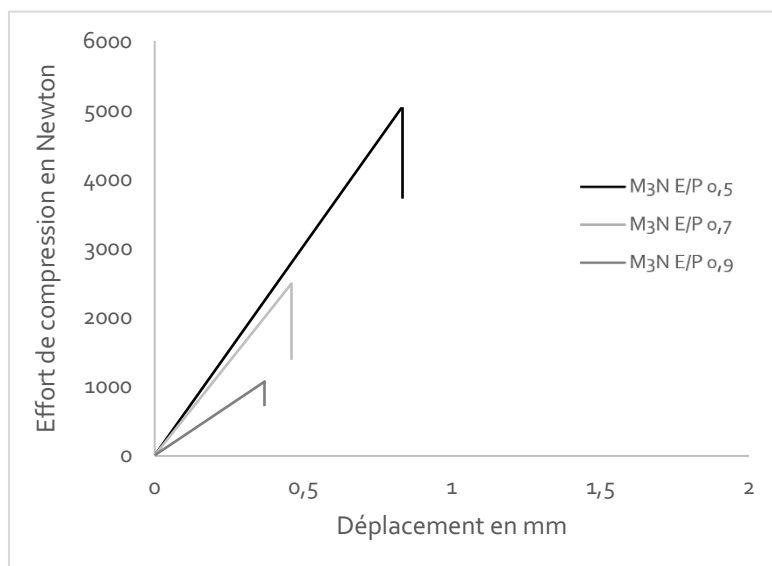


Figure 42 : reconstitution d'un signal effort-déplacement pour trois corps d'épreuve de plâtre et d'eau à E/P = 0,5 ; 0,7 ; 0,9 pour le Molda® 3 Normal, d'après les essais en compression présentés au chapitre IV.

Rapport massique E/P	ρ (en kg.m^{-3})	E (en GPa)	R_c (en MPa)
0,5	1325	6,4	22
0,7	1135	5,7	11,7
0,9	968	3,2	5,2

Tableau 5 : propriétés mécaniques des trois mélanges eau-plâtre à E/P = 0,5 ; 0,7 ; 0,9 pour le Molda® 3 Normal, d'après les essais mécaniques présentés au chapitre IV.

Par référence aux zones générales, identifiées principalement en « vert », les quelques localisations « jaunes » voire « orange » visibles sur certaines corrélations sont rares et ponctuelles. Selon les cas, elles peuvent être considérées comme des zones légèrement instables mais aussi comme des aléas et des défauts de numérisation, plutôt que de véritables changements d'état des artefacts. À l'exception de l'angle haut senestre du cadre ICMO 190, dont le comportement de déplacement semble attesté par les différentes campagnes de relevés et de corrélation, sans qu'il soit toutefois possible de l'affirmer avec certitude, en raison des quelques variations de localisation. Le meilleur ajustement constaté correspond à la tête du Molosse, seul artefact en ronde-bosse sur les trois sélectionnés qui permette un maillage de points répartis sur l'intégralité du volume, et donc une véritable corrélation en trois-dimensions. Cet aspect technique est peut-être la cause des différences, bien que minimes, constatées sur certaines corrélations.

Au-delà de cette considération et des détails techniques qui sont à affiner et à perfectionner pour une future étude plus approfondie sur un artefact muséal, il est possible de distinguer par cette méthode des tendances générales de comportement, et donc de permettre la réalisation de travaux patrimoniaux à visée de conservation préventive ou de suivi. En documentant l'état en trois-dimensions d'un artefact, donnant la possibilité de manipuler le relevé, d'agrandir l'image et d'observer des détails d'une grande finesse, l'outil et cette technique constituent alors un support d'archivage de données, complétant l'œil et le travail des professionnel·les du patrimoine.

b. Évaluation du cadre et des déplacements par capteurs

Test ponctuel en chargement statique

Les deux essais de chargement statique (Fig. 43 a et b), menés le 01.12.2021 et le 02.08.2022⁴⁸ ont montré des résultats similaires pour le capteur central, le n°7, positionné sous la traverse horizontale. Pour les deux essais, le déplacement du capteur est principalement linéaire en fonction du niveau de chargement, indiquant un domaine de sollicitation élastique. Dans un tel contexte de mesures, le caractère répétable du lien niveau de chargement-déplacement serait à confirmer, mais la tendance obtenue est acceptable, de l'ordre de $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ mm.g}^{-1}$ pour l'essai 1 et de $5 \cdot 10^{-5} \text{ mm.g}^{-1}$ pour l'essai 2.

Les déplacements obtenus par les capteurs n°6 et 8 pour les niveaux de chargement imposés sont négligeables, et plus particulièrement pour l'essai 1. Lors de l'essai 2, le premier chargement induit un déplacement qui n'est pas confirmé en poursuivant et en augmentant le chargement.

D'après ce constat en considérant le type d'accrochage, les spécificités d'assemblages des montants et des traverses du cadre, le mode de chargement et sa faible amplitude, la configuration simulée est très probablement équivalente à un test de flexion de la traverse inférieure encastrée à ses deux extrémités. Le comportement serait alors apparenté à celui d'une poutre en condition statique, et les montants subiraient alors une sollicitation en traction. Cette interprétation est renforcée par le fait que la traverse inférieure est en contact avec la grille d'accrochage, par un coussin fixé au revers servant à protéger les bords du cadre. Pour obtenir une signature de type portique dans ces conditions d'essai et d'instrumentation, il conviendrait probablement d'augmenter le niveau de chargement.

Le comportement général de l'ensemble, montre toutefois une bonne capacité de chargement en supportant des masses élevées, supérieures ou égales à celles d'un tableau aux dimensions équivalentes, généralement de ≈ 3 à 7 kg , selon la nature du bois du châssis. Le tableau de Corot, *Le Passeur*, qui était associé au cadre ICMO 190, est estimé à $\approx 2 \text{ kg}$ ⁴⁹.

⁴⁸ Données des essais de chargement statique et calibration en annexe V, p. 557-558.

⁴⁹ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré* (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes, op. cit., p.266.

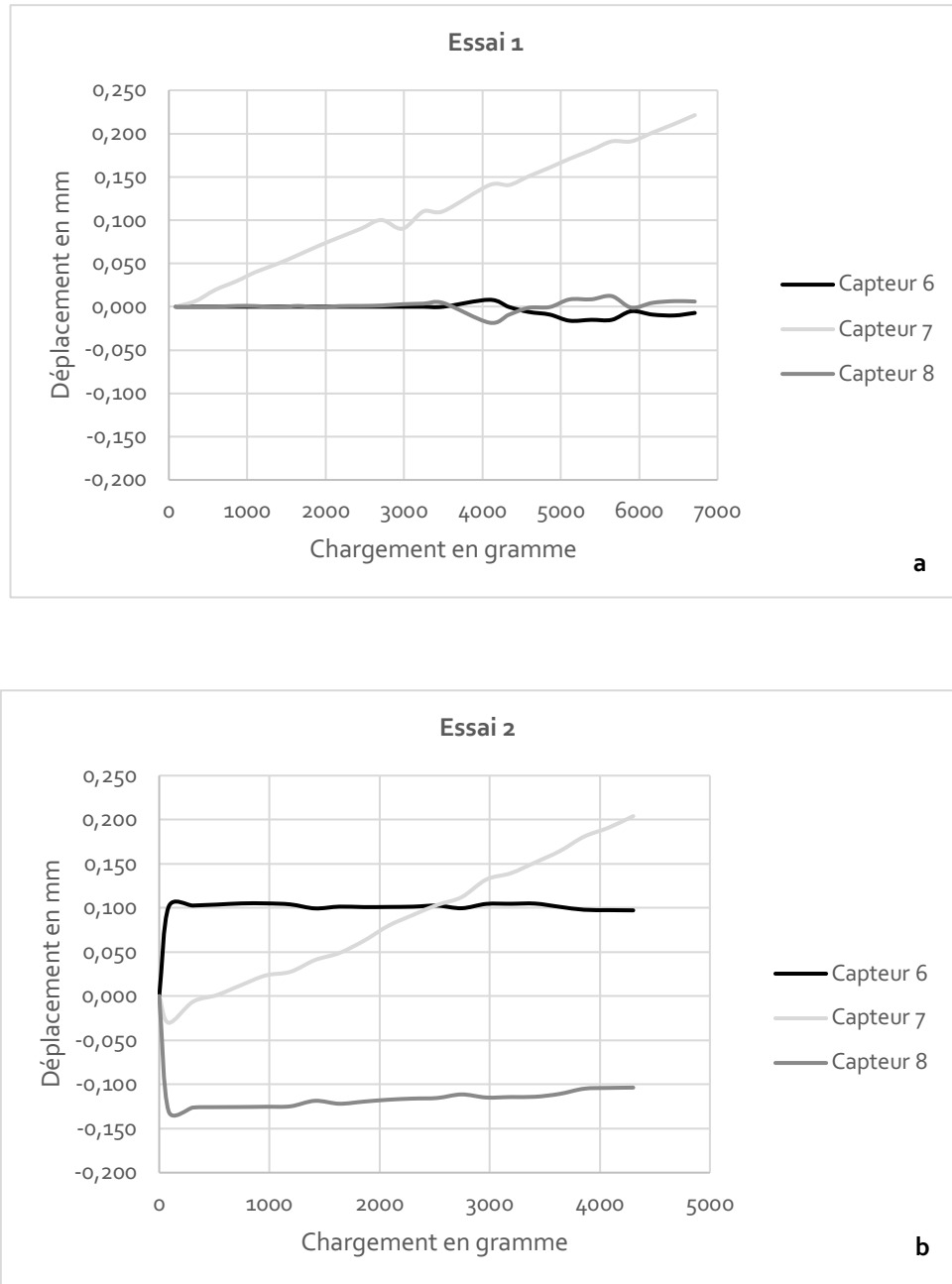


Figure 43 : représentation des déplacements calculés à partir des tensions relevées par les capteurs de déplacement, en fonction des chargements lors des essais 1 (a) et 2 (b).

Afin de vérifier la cohérence des résultats obtenus pour les capteurs 6 et 8, un essai complémentaire a été fait en modifiant la position du système de chargement vers le côté senestre et en appliquant immédiatement la charge maximale de 6221 g (Tabl. 6). Les résultats sont similaires pour le capteur n°7, et une légère différence de tension est notée pour les capteurs n°6 et n°8, alors considérée négligeable (Fig. 44). Un test complet avec les paliers aurait peut-être montré un autre comportement, mais l'écart entre les tensions relevées est faible et semble confirmer la fiabilité de la méthodologie générale.

Capteur	Essai 2 Chargement côté dextre		Essai complémentaire Chargement côté senestre	
	Tension en Volt	Ecart-type	Tension en Volt	Ecart-type
6	8,008	0,009	7,899	0,013
7	11,195	0,077	11,174	0,047
8	7,662	0,005	7,769	0,041

Tableau 6 : tensions relevées à chargement maximal pour les trois capteurs, selon les valeurs de l'essai 2 (système côté dextre) et de l'essai complémentaire (système côté senestre).

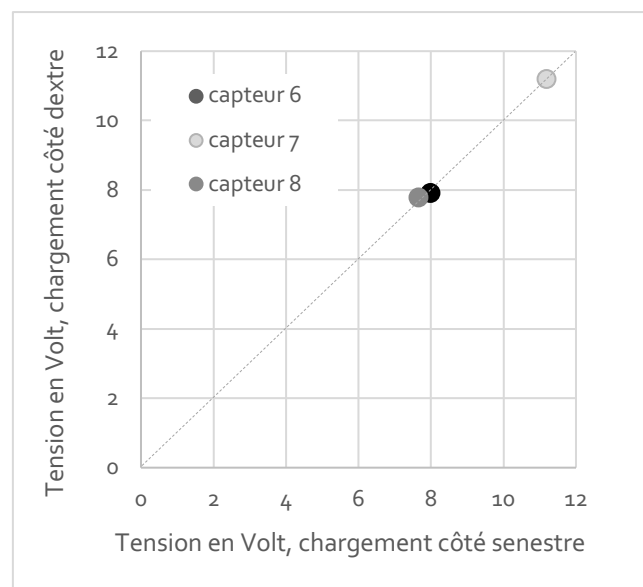


Figure 44 : représentation croisée des tensions en Volt à chargement maximal pour les trois capteurs, selon la position du système excentré du côté dextre ou du côté senestre, montrant une bonne concordance des données.

Évaluation sans chargement

Le suivi des mouvements de novembre 2021 à août 2022, sans chargement ni sollicitation autre que l'effet en suspension sous poids propre, a montré des résultats réguliers à partir du mois de décembre (Fig. 45 et 46). Sur la représentation des déplacements selon les valeurs de tension, des irrégularités sont notables entre novembre et décembre (Fig. 45). Des événements ponctuels causant des perturbations de mesures ont pu être identifiés, les 12 et 17 novembre, et les 01 et 14 décembre, et concordent avec les interventions de l'équipe de la sécurité ayant réalisé des essais de fermeture automatique des portes coupe-feu, et avec des déplacements dans la réserve telles que des manipulations d'œuvres pendant lesquelles la porte reliant les deux espaces de stockage a pu être ouverte et fermée vigoureusement. Ces activités ont provoqué des vibrations et des sursauts de la grille de support du cadre, et par conséquent des mouvements du cadre et des capteurs. Hormis ces événements, les tensions relevées sont plutôt constantes.

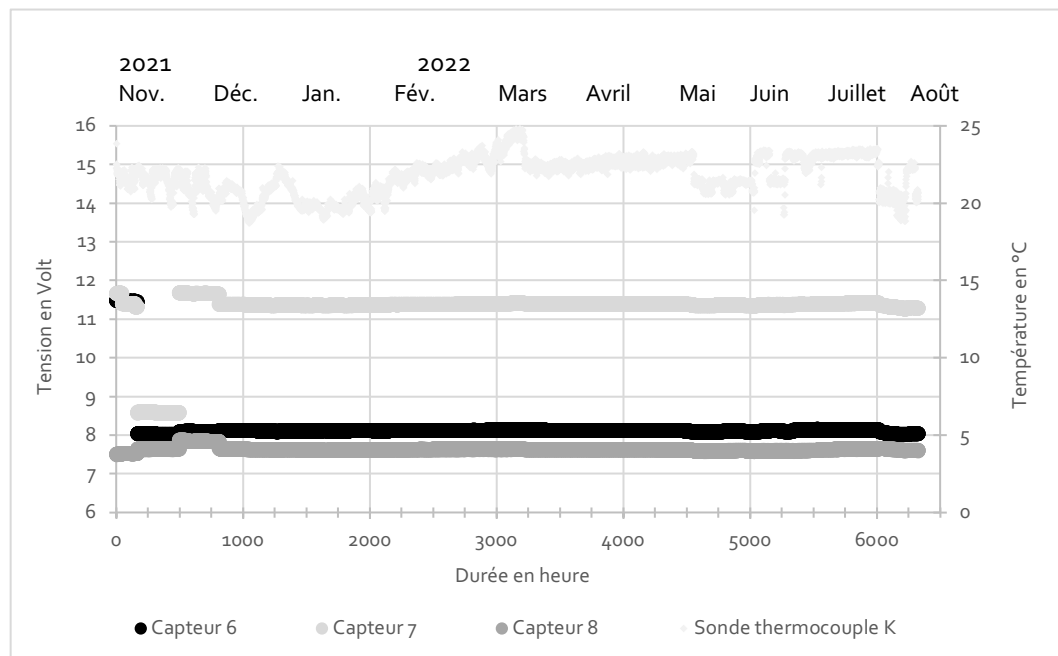


Figure 45 : représentation des tensions en Volt et de la température en fonction du temps en heure, évaluées de novembre 2021 à août 2022.

Les courbes montrent toutefois de très légères variations de tension qui indiquent de très faibles déplacements des montants (Fig. 45 et Tabl. 7). Les valeurs en millimètres ont été calculées selon la loi de calibration présentée précédemment. Pour établir le zéro, une valeur de tension a été sélectionnée à partir des mesures stables, sans considérer les périodes de novembre à mi-décembre.

Les irrégularités de faibles valeurs semblent directement liées aux conditions et aux fluctuations climatiques de la réserve, et plus particulièrement celles des périodes suivantes : fin décembre, début février, début mars, début et fin mai, juin, début et fin juillet, comme le montre la courbe des températures relevées par la sonde thermocouple K placée à proximité du cadre (Fig. 45 et 46). La faible amplitude des variations, dépassant à peine 0,15 mm, peut laisser penser qu'elles sont négligeables (Tabl. 7). Toutefois, la cinétique de déplacement est dans certains cas très rapide et les changements sont brusques, se produisant en quelques heures ou jours, comme le 19 juin avec des températures variant de 19,2°C à 22,3°C en 14 h, ou encore début août avec une élévation de la température de 18,9 °C à 22°C en moins de 24 h⁵⁰. À l'inverse, lorsque les changements de température sont lents et progressifs, les déplacements sont également plus graduels, comme aux mois de janvier et février, d'avril, et de juillet.

	Capteur n°6 Montant senestre	Capteur n°7 Montant bas	Capteur n°8 Montant dextre
Déplacement maximal à partir de zéro, en mm	≈ 0,10	≈ 0,13	≈ 0,07
Période	Début août	Début août	Début juin
Déplacement maximal entre le point le plus bas et le plus haut, en mm	≈ 0,13	≈ 0,16	≈ 0,08
Période	+ en août - en juin	+ en août - en juillet	+ en juin - en juillet

Tableau 7 : déplacement maximal en millimètres relevé par capteur entre mi-décembre 2021 et août 2022.

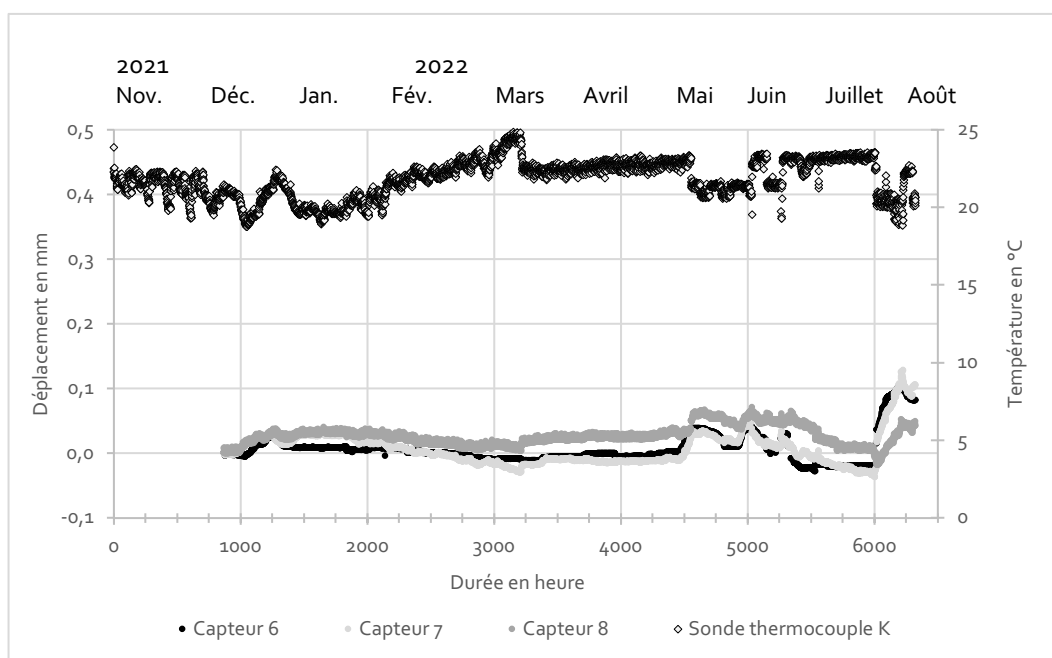


Figure 46 : représentation des déplacements en millimètres et de la température en fonction du temps en heure, évalués de mi-décembre 2021 à août 2022.

⁵⁰ Il est recommandé de ne pas excéder une variation de 2°C sur 24h, d'après le Vade-mecum de la conservation préventive du C2RMF, *op cit*, p. 12.

c. Analyse des contextes de conservation

Cadre ICMO 190 : réserve et accrochage

Les données de température, relevées par la sonde thermocouple K pendant toute la durée de l'étude des déplacements par capteurs, ont été comparées lors des visites mensuelles avec les données affichées par le thermo-hygromètre de la réserve, placé à quelques mètres de l'espace d'accrochage du cadre. Les valeurs étaient très similaires, différant seulement de quelques dixièmes⁵¹. Les températures sont comprises entre 18,8 °C au plus bas et 24,6 °C au plus haut, mesurées respectivement en août et en mars. Trois périodes aux élévations progressives sont notables de janvier à mars avec des valeurs de ≈ 20 °C à ≈ 25 °C, puis de mars à mai aux températures de ≈ 22 °C à ≈ 23 °C, et enfin de juin à juillet allant de 22,8 °C à 23,4 °C. Ces changements se produisent sur une durée relativement longue, de plusieurs jours. Tandis que d'autres fluctuations thermiques très brusques sont notables dans un délai inférieur à 24h. Les valeurs les plus extrêmes sont comprises entre ≈ 2 °C à ≈ 3 °C, comme cela s'est produit par exemple en mars, en mai et en août 2022. Ces variations, mises en parallèle avec les essais de chargement, semblent avoir une légère influence sur les mouvements des montants et traverses monitorés, qui doit être évaluée au regard de tous les éléments et selon les différentes méthodes de suivi. Un autre facteur à considérer est le mode de présentation. Le cadre est installé à la verticale, accroché à la grille par des pitons et des crochets (Fig. 47), en suspension partielle. En effet, le revers de la traverse inférieure repose sur la grille, amorti par un coussin fixé après la mise en œuvre du cadre, probablement dans les années 1930 lors de son exposition au Louvre⁵². Ce système traditionnel de présentation peut être tout à fait satisfaisant dans le cas d'une œuvre en bon état de conservation. Mais pour un cadre altéré et fragile, les contraintes et les sollicitations mécaniques peuvent induire des tensions et provoquer la rupture des éléments d'ornements ou de structure. Les pitons sont placés en haut, à l'intérieur des montants verticaux (Fig. 47 b), supportant une majeure partie de la masse totale du cadre, estimée à 30 kg⁵³. Dans ce cas présent, les pitons sont vissés avec une très légère asymétrie, le piton dextre étant situés quelques millimètres plus haut que celui du côté senestre ; un déséquilibre structurel de l'ensemble du cadre pourrait être induit par cette irrégularité.



Figure 47 : partie haute du cadre en suspensions (a) et détail du revers dextre et du piton d'accrochage placé dans le bord extérieur (b).

⁵¹ N'ayant pas pu accéder aux données climatiques générales de la réserve, l'étude considère uniquement les données de la sonde, qui présentait une bonne concordance avec le climat de la réserve affiché par le capteur.

⁵² Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, op. cit., p.33.

⁵³ *Ibid.*, p. 266.

Relief de Rodin : espace muséal et accrochage

Le relief de Rodin, exposé au musée des Beaux-Arts de Calais, est le second artefact de l'étude permettant de mettre en lien les éventuels mouvements et altérations avec le climat, qui est monitoré. Les enregistrements communiqués par l'équipe de la conservation et de la régie ont été analysés en parallèle du suivi par numérisation⁵⁴. Les valeurs de température et d'humidité relative sont relevées toutes les 4 à 5 minutes par la sonde thermo-hygrométrique d'un des équipements de mesure placé dans l'espace des collections permanentes, à proximité de l'artefact étudié. Lorsque les courbes sont observées en détail (Fig. 48), les données semblent plutôt irrégulières avec des fluctuations marquées, qui se produisent rapidement, sur une journée à plusieurs jours. Les températures varient de ≈ 1 °C à ≈ 5 °C, et les taux d'humidité relative suivent les mêmes tendances, avec des variations rapides de ≈ 15 % à ≈ 25 %. Sur toute la période évaluée d'avril 2021 à mai 2022, la température moyenne est de 20,1 °C, avec une valeur minimale de 14,7 °C en novembre et une maximale de 28,2 °C en juillet (Tabl. 8). La moyenne du taux d'humidité relative est de 49,2 %, avec 22 % au plus bas et 73,6 % au plus élevé.

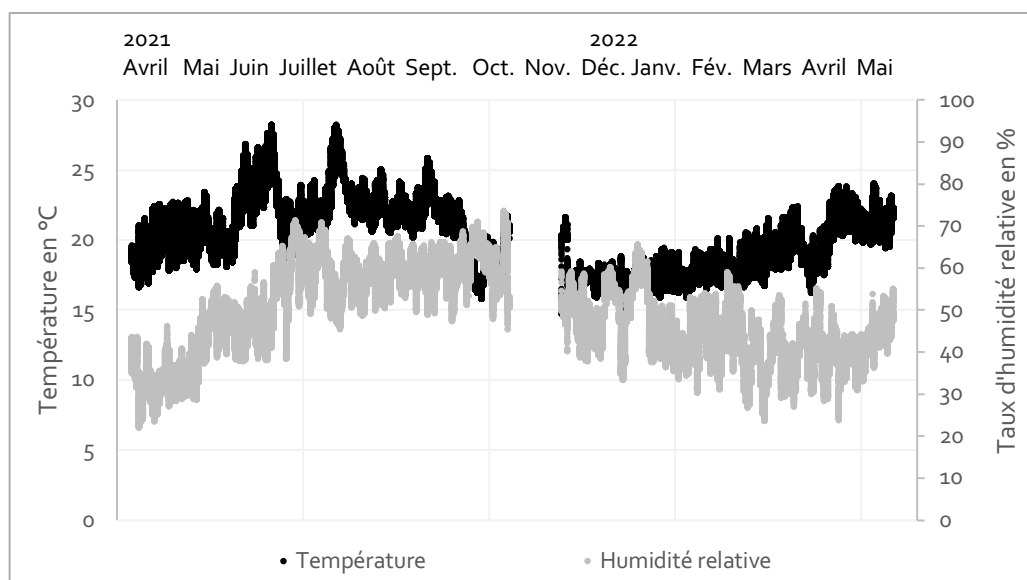


Figure 48 : représentation des données climatiques d'avril 2021 à mai 2022 dans l'espace d'exposition du relief de Rodin, au musée des Beaux-Arts de Calais.

Données compilées 2021-2022	Moyenne	Minimum	Maximum	Variations	Ecart-type
Température (°C)	20,1	14,7	28,2	≈ 5 à 8	2,49
Humidité (%HR)	49,2	22	73,6	≈ 24 à 27	10,37

Tableau 8 : analyse des données climatiques entre avril 2021 et mai 2022 dans l'espace d'exposition du relief de Rodin, au musée des Beaux-Arts de Calais.

⁵⁴ Les données du 22.10.2021 au 22.11.2021 sont manquantes en raison d'une panne d'équipement.

Les valeurs moyennes sont tout à fait celles conseillées par les recommandations en conservation préventive, mais les variations minimales et maximales sont très éloignées des valeurs moyennes, avec $\approx 5\text{ °C}$ à 8 °C d'écart en température, et $\approx 24\%$ à 27% en taux d'humidité relative. Les écart-types, calculés pour l'ensemble des données par rapport à la moyenne, sont de $\approx 2,5$ pour la température et $\pm 10,4$ pour le taux d'humidité relative (Tabl. 8). Ces valeurs laissant penser que les écarts sont moins importants que ceux constatés pour les données minimales et maximales. Néanmoins les valeurs observées sont très fluctuantes, et ce sur des délais courts, avec des valeurs extrêmes à de multiples répétitions, comme schématisées ci-dessous avec les courbes de températures moyennes de températures et de taux d'humidité relative, comparées à une tendance générale fluctuante, selon les valeurs proches des conditions idéales et conseillées (Fig. 49).

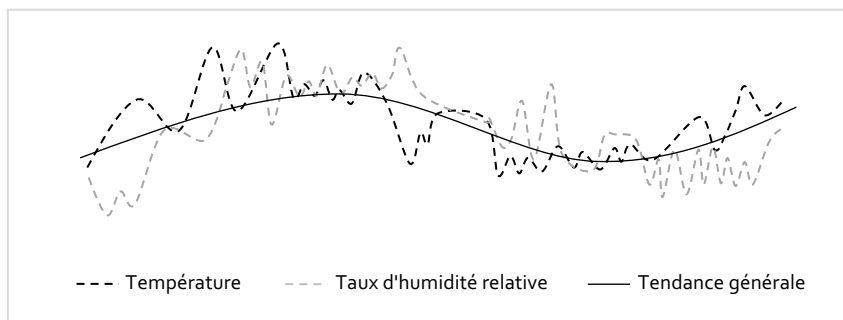


Figure 49 : représentation des courbes moyennes, montrant les variations sur des courtes périodes, par rapport à une courbe de tendance générale aux fluctuations lentes.

Le relief est présenté à la verticale, accroché par la structure de support sur une cimaise, à l'abri des contacts grâce une estrade faisant effet de mise à distance, sans gêner l'appréciation. Une structure en échelle a été conçue par le conservateur-restaurateur Marcel Molac, spécialement pour le relief (Fig. 50 a), qui a été remonté fragment par fragment et assuré en place. De nombreux plots de résine modelable ont été placés au revers, faisant un lien supplémentaire avec la structure, en plus des pattes de maintien placées sur le pourtour du relief (Fig. 50 b). L'ensemble a été fixé au mur et aux crochets placés selon les trous de la partie haute de la structure. Le bas repose le long de la cimaise, à quelques centimètres du sol de l'estrade, de façon à suggérer l'emplacement original du relief en partie basse du pilastre dextre de *la Porte de l'Enfer*.

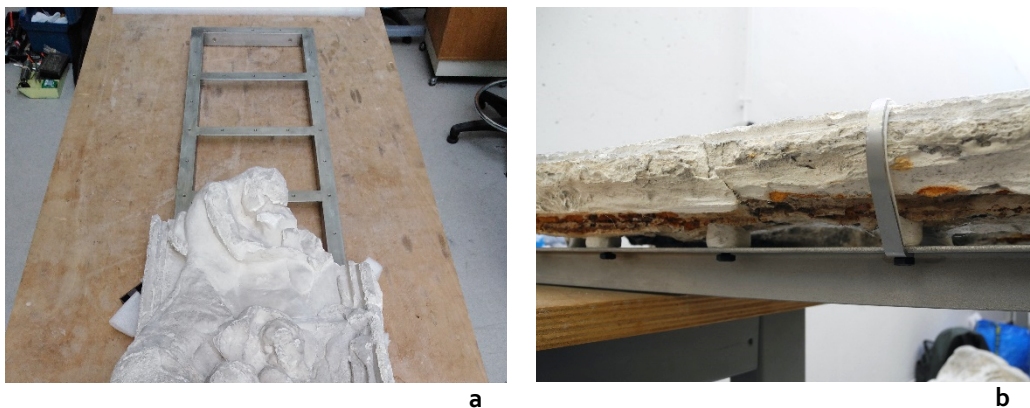


Figure 50 : détail de la structure en cours de montage du relief (a) et profil avec une patte de maintien et plusieurs plots de résine blanche, disposés entre le plâtre et la structure.

2. Aspects mécaniques et altérations

Afin de mieux comprendre les processus d'altération des artefacts observés, selon leurs matériaux constitutifs, deux approches sont présentées ici. La numérisation du cadre ICMO 190 ayant été effectuée uniquement sur la face et les profils ornés, les éventuels mouvements de la structure n'ont pas pu être évalués ni constatés. Or, la structure en bois de cet artefact composite peut être envisagée comme facteur d'altération des ornements. Les matériaux constitutifs du relief de Rodin ainsi que du Molosse peuvent être décrits en considérant les aspects mécaniques du plâtre, à partir des données établies lors des essais et présentées au chapitre IV pour identifier des éventuels seuils de rupture en fonction des sollicitations.

a. Évaluation des mouvements du bois

Afin de compléter les informations techniques sur la structure du cadre ICMO 190⁵⁵, Emmanuel Maurin, ingénieur de recherche et responsable du Pôle bois au Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), a été sollicité pour observer le cadre et plus particulièrement le revers (Fig. 51) ; et pour mieux comprendre les altérations, en lien avec les éléments techniques comme la nature du bois, son débit, les assemblages, la présence de défauts, ou encore les déformations préférentielles.



Figure 51 : vue du revers du cadre ICMO 190 et sa structure complexe en pièces assemblées
© Musée du Louvre / INP - G. Vanneste.

⁵⁵ Lopez, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Étude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIXe siècle en bois et plâtre doré* (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes, op. cit., p.81.

Le bois utilisé est de type résineux, probablement du pin. Le débit des planches est sur quartier (Fig. 52 a) et les cernes du bois sont fines, éléments qui suggèrent la sélection d'un bois de qualité. Les pièces de renfort des angles présentent des motifs similaires et semblent donc provenir d'une même planche. L'assemblage est assez complexe : la planche principale, sur laquelle sont fixés les ornements, est placée en biais (Fig. 52 c et d) ; il y a des éléments de renforts aux angles et d'autres placés perpendiculairement au milieu de chaque montant et traverse (Fig. 52 c). Quelques nœuds de petites dimensions sont présents sur la plupart des pièces. D'autres plus importants sont plus rares : il y a deux nœuds sur la traverse horizontale haute, un sur le montant vertical senestre, et trois sur le montant dextre. Ces défauts naturels du matériau peuvent induire des déséquilibres et des tensions lors des mouvements naturels du bois sous l'effet des variations d'humidité. Les éléments de ce premier examen laissent penser que la mise en œuvre et la conception ont été soignées, ce qui n'est pas courant dans cette typologie de cadres du XIX^e siècle. De plus, aucune déformation générale du bois, telles que des torsions ou des gauchissements, n'a été observée.

Malgré cela la plupart des éléments, débités sur quartier, sont soumis à des cycles de retrait/dilatation selon les variations hygroscopiques, avec des changements selon les axes tangentiels et radiaux (Fig. 52 b, c et d). Ce phénomène, associé aux défauts naturels du bois, peuvent donc provoquer des déformations de la structure suffisantes pour altérer les ornements en plâtre. En effet, il est possible à l'œil de faire le lien entre une partie des fissures et des fentes présentes sur les ornements et les zones d'assemblage, comme au niveau des quatre angles, ou encore sur le montant dextre avec la reprise d'altération et la fissuration de l'ornement restauré.

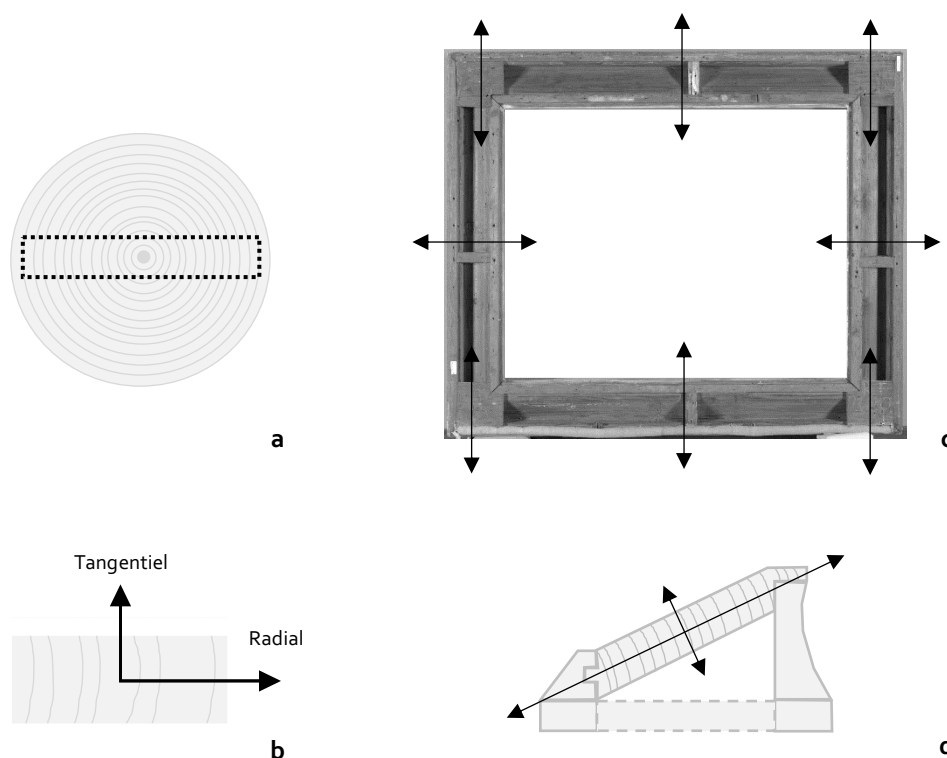


Figure 52 : schéma en coupe d'une bille de bois et d'un débit de planche sur quartier, en pointillé (a) ; axe tangentiel et axe radial d'une coupe sur quartier (b) ; revers du cadre et axes radiaux des différentes pièces (c) ; coupe du profil avec la planche principale en biais recevant les ornements moulés et les axes tangentiels et radiaux (d).

Le bois « sec » atteint un taux d'humidité intrinsèque, estimé à environ 8-9 % pour ce type d'essence, lorsque les conditions climatiques sont de $\approx 20\text{ }^\circ\text{C}$ et $\approx 50\%$ d'humidité relative. Mais lorsque le taux d'humidité de l'air change, le taux d'humidité du bois fluctue. Par exemple dans des conditions élevées à $\approx 25\text{ }^\circ\text{C}$ et $\approx 75\%$ d'humidité relative, comme constatées précédemment dans la réserve du cadre ICMO 190⁵⁶, le taux d'humidité du bois augmente jusqu'à environ 15 %. Cette augmentation produit une variation volumétrique du bois, selon des valeurs communément admises (Tabl. 9) en fonction des axes tangentiels et radiaux (Fig. 52 b). Pour estimer les mesures dans ces travaux, la valeur de 0,2 % de variation par % d'humidité du bois est retenue, donnant une variation de 1,2 % (Tabl. 10). Rapportée aux mesures des montants et des traverses (Tabl. 11), il se produirait théoriquement une déformation de 3,5 mm dans l'axe radial de la planche ornée principale (Fig. 53), et qui semble correspondre à l'ouverture de la fissure dans la frise d'acanthes.

Face du bois	Variation
Longitudinale	0,01 % / % d'humidité du bois
Radiale	0,2 % / % d'humidité du bois
Tangentielle	0,2 à 0,3 % / % d'humidité du bois

Tableau 9 : variation du taux d'humidité du bois en fonction du taux d'humidité de l'air, selon les trois axes ou faces du bois.

	Conditions « normales »	Conditions élevées	Variations
Température et taux d'humidité relative	20 °C 50 %	25 °C 75 %	+5 °C +25 %
Humidité du bois	9 % d'humidité du bois	15 % d'humidité du bois	+6 %
Variation du bois	0,2 % de variation / % d'humidité du bois		+1,2 %

Tableau 10 : estimation de la variation du taux d'humidité du bois selon une augmentation des conditions climatiques de la réserve.

Largeur ou hauteur a mesurée : 25 cm
Épaisseur b mesurée : 14,2 cm
Largeur ou hauteur L calculée de la planche en diagonale : 28,75 cm, selon la formule $L = \sqrt{a^2 + b^2}$

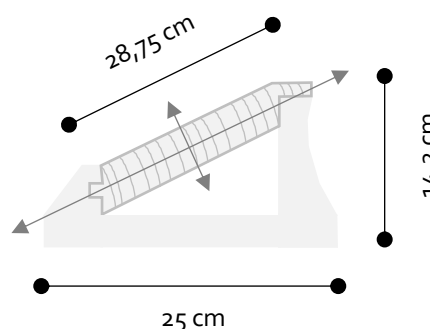


Tableau 11 : dimensions des montants et des traverses, mesurées et calculées.

Figure 53 : schéma en coupe d'un profil de montant ou traverse, avec les dimensions des pièces, et les axes tangentiels et radiaux de la planche en biais portant les ornements.

⁵⁶ La température, mesurée par la sonde thermocouple K, permet de déduire le taux d'humidité relative selon les courbes établies.

L'ouverture de cette fissure a été estimée en partie basse, afin d'identifier une correspondance avec la variation théorique du bois. Pour cela des détails de fissures ont été photographiés selon les axes x et y , en plaçant une échelle millimétrique au plus près de la fissure (Fig. 54). Les ouvertures de la fissure ont été quantifiées en calculant le nombre de pixels par millimètre. La largeur de la fissure selon l'axe z , soit la pente de la planche en diagonale, a été calculée selon la formule $z = \sqrt{x^2 + y^2}$ (Tabl. 12). Par cette méthode, l'ouverture est estimée à ± 3 mm. Cette valeur est donc très proche de celle calculée selon la variation théorique du bois.

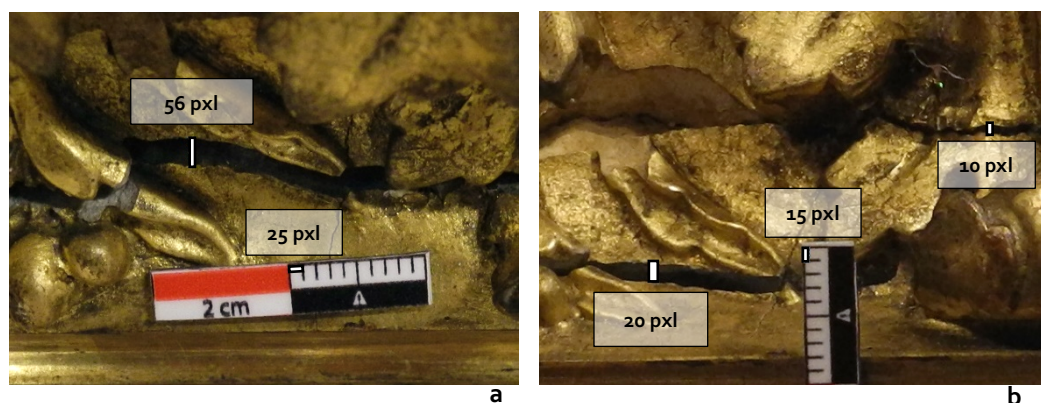


Figure 54 : mesure des ouvertures de fissures en nombre de pixels, selon les axes x (a) et y (b), pour calculer l'ouverture de la pente z .

Axe	Échelle en mm	Nombre de pixels	Fissure en nombre de pixels	Fissure en mm
x (fissure 1)	1	25	56	2,24
y (fissure 1 et fissure 2)	1	15	20 + 10	2
z		$z = \sqrt{x^2 + y^2}$		3

Tableau 12 : mesures des ouvertures des fissures selon les axes x et y à partir du nombre de pixels mesurés pour 1 mm, et calcul de l'ouverture de z selon les valeurs de x et y en mm.

Ces mesures, mises en parallèle avec la dilatation du bois pour une élévation de température et de taux d'humidité relative déjà produite en réserve, suggèrent donc une reprise d'altération causée majoritairement par les variations climatiques et les fluctuations de taux d'humidité du bois. Les éléments de la structure ont probablement atteint un seuil de résistance, causé par les tensions générées lors des phases de retrait et de dilatation, provoquant alors la fissuration puis la rupture des zones les plus fines et les plus fragiles des ornements en plâtre. Tant que les limites de ce seuil ne sont pas dépassées, il est probable que l'ensemble maintienne un équilibre relatif, sans aggravation des altérations. D'autres facteurs, comme les défauts naturels du bois participent également au déséquilibre de l'ensemble. Liés à la suspension, les effets de traction, de compression, et de masse générale, sont répercutés sur la partie basse du cadre. La fragilité de cette typologie de cadres du XIX^e siècle est donc essentiellement liée à la mise en œuvre et aux conditions de conservation, pour lesquelles des mesures préventives spécifiques semblent nécessaires.

b. Résistance mécanique du plâtre

Les artefacts et les ornements moulés en plâtre ont montré un comportement plutôt stable, sans dégradation apparente pendant la durée des suivis. D'après les données de référence et les essais de mécanique solide, présentés au chapitre IV, le plâtre des artefacts moulés au rapport massique de $E/P = 0,5$ à $0,75$ pour un plâtre β , et aux masses volumiques comprises entre 1100 et 1300 kg.m^{-3} , a une résistance variable avec des valeurs élevées pour les mélanges les plus concentrés. Ainsi en compression les valeurs maximales sont de ≈ 22 à $\approx 9 \text{ MPa}$, et en flexion 4 points les valeurs sont de ≈ 3 à $\approx 10 \text{ MPa}$. Les modules E sont compris entre ≈ 5 et $\approx 9 \text{ GPa}$. La résistance est dans certains cas assez importante, mais cela dépend également des dimensions de la couche de plâtre car plus l'élément est fin et plus il est fragile. Les artefacts évalués ont des épaisseurs variables : les ornements du cadre sont fins à épais, le relief de Rodin est moyennement épais à épais, et le plâtre de la statue du *Molosse* est peu épais. Dans ces trois cas, les anciennes altérations de fissures et de cassures se sont effectivement développées dans les zones les plus fines. Depuis les interventions de conservation-restauration, les zones fragiles de matière originale, comme les zones restaurées, semblent en bon état au regard des conditions de conservation et d'exposition comprenant des variations climatiques et des éventuelles tensions structurelles liées au mode de présentation, à l'exception du cadre ICMO 190 qui a connu une période de légère reprise d'altération mais qui semble avoir trouvé un équilibre depuis. Comme développé précédemment, les ornements du cadre ont très certainement subi des altérations liées aux tensions structurelles et aux variations du bois provoquées par les fluctuations climatiques que le cadre a pu connaître depuis ses traitements en 2016. En effet, les propriétés mécaniques d'un bois de résineux, comme le pin sylvestre, sont de ≈ 500 à $\approx 600 \text{ kg.m}^{-3}$, avec une résistance à la compression de 56 MPa , et 109 MPa en flexion, avec un module élastique de $14,5 \text{ GPa}$. Ces valeurs sont données à titre indicatif⁵⁷ car les paramètres d'essais ne sont pas connus, il est donc préférable de s'en tenir à une comparaison des ordres de grandeur pour estimer les rapports de force et de tensions entre les deux matériaux. Les valeurs du bois sont plusieurs fois supérieures à celles du plâtre. Le matériau a donc une résistance bien plus élevée en cas de sollicitation mécanique, et les tensions intrinsèques peuvent logiquement provoquer une rupture prématurée du plâtre.

Les formulations mises en œuvre et testées dans ces travaux ont toutes des résistances mécaniques inférieures à celle d'un plâtre formulé pur, à l'exception des mélanges les plus concentrés en plâtre et en carbonate de calcium aux valeurs similaires, mais aux textures très pâteuses et difficiles à manipuler, donc certainement très peu utilisés par les professionnels. Ceci conforte l'idée que les matériaux de comblement n'induisent pas de tension structurelle dans le substrat original, et que la rupture est préférentiellement dans le matériau de restauration en cas de tension ou de sollicitation générales. Ces estimations chiffrées semblent confirmées par les observations faites d'après les suivis des trois artefacts. Bien que dans certains cas les formulations diffèrent, le principe de formulation par adjonction d'additifs, en vérifiant l'infériorité des résistances, est identique. Ceci laisse donc présager un bon vieillissement des interventions et une bonne compatibilité des matériaux et méthodes de complements avec l'artefact et le substrat original.

⁵⁷ Ces données ont été recueillies sur différents sites internet.

3. Apports en conservation-restauration

a. Suivi par numérisation 3D

La numérisation 3D offre différentes approches et possibilités de suivi d'état de conservation des artefacts d'héritage culturel. Les équipements sont perfectionnés et les budgets plus accessibles. Plusieurs appareils et différentes technologies sont disponibles sur le marché. Les appareils portatifs sont les plus adaptés aux conditions de terrain, permettant le relevé des reliefs et des formes, sans manipulation de l'artefact lui-même. L'ordinateur d'acquisition et de traitement des données doit cependant être très performant, tant dans le stockage que dans le fonctionnement. En effet, les fichiers générés sont très volumineux : un fichier de numérisation équivaut à plusieurs giga-octets ; un fichier de corrélation, qui fusionne donc deux fichiers numérisés, peut quant à lui peser une dizaine de giga-octets. Il est donc préférable de stocker ces fichiers sur des disques externes dédiés aux projets.

Si l'opération de numérisation est relativement rapide et permet de générer un fichier en quelques dizaines de minutes, le temps de traitement des données est quant à lui plutôt long. Pour améliorer la comparaison, une phase de « nettoyage » des images est conseillée avant de les corrélérer, pour supprimer les éléments de fonds scannés en même temps que l'artefact, par exemple les grilles de support, les cimaises, ou le sol, ainsi que les éventuels défauts de numérisation comme les zones dédoublées ou les superpositions. La corrélation, qui nécessite l'ouverture de deux fichiers, demande également un temps important. Il faut ensuite sélectionner manuellement les points de comparaison et s'assurer de leur bonne correspondance. Les temps de traitement, d'ouverture et d'enregistrement par le logiciel sont conséquents et doivent être pris en compte. En moyenne, une journée de traitement de fichiers permet le nettoyage et la préparation de quatre à cinq fichiers et la corrélation de trois à quatre duos d'images numérisées.

La corrélation des différents axes d'un repère x, y, z , aurait peut-être révélée des altérations minimales dans des plans qui n'ont pas pu être évalués aux moments des mesures. Mais les essais mis en œuvre dans ces travaux, avec une définition qui n'est pourtant pas la plus fine, ont permis de voir les altérations déjà présentes et d'estimer une bonne acclimatation des artefacts à leurs conditions de stockage ou d'exposition, puisqu'il ne semble pas y avoir eu de dégradation de leur état pendant la durée des suivis, et ce malgré les fluctuations climatiques relevées dans les espaces.

Il est certain que cette méthode de suivi par numérisation 3D et corrélation est encore relativement coûteuse financièrement (bien que de plus en plus abordable), qu'elle demande un temps de traitement important et qu'elle génère des données lourdes nécessitant un stockage en conséquence. Si à l'avenir ce protocole pourrait être adapté à des traitements de lots ou d'ensembles de collection, cette méthode n'est actuellement pas adaptée à des suivis réguliers dans un contexte de type chantier des collections. En revanche, l'outil est particulièrement précieux dans le cas de suivis spécifiques pour des artefacts majeurs ou fragiles, pour lesquels les altérations et leurs évolutions doivent être quantifiées précisément. Il est alors possible de se servir de ce type d'équipement pour évaluer le comportement d'un artefact en fonction de son milieu et pour vérifier son état selon le contexte de conservation.

b. Suivi par capteurs de déplacement

La méthode de monitoring par capteurs est utilisée pour suivre ou étudier le comportement des matériaux en fonction des sollicitations. Elle nécessite un équipement coûteux⁵⁸ et un suivi régulier des données et du bon fonctionnement de l'appareillage. Toutefois, elle permet d'observer les mouvements d'un artefact fragile avec un protocole non-intrusif, contrairement à d'autres méthodes qui nécessitent un contact plus ou moins important en utilisant des jauges et échelles de déformation ou encore des cibles pour des mesures stéréométriques⁵⁹. De plus, cette méthode permet une évaluation complète de l'artefact, comme dans le cas de ces travaux pour lesquels trois côtés du cadre ICMO 190 ont été équipés, traduisant à la fois l'intégralité du comportement de l'artefact, mais précisant aussi le comportement plus spécifique d'une zone ciblée. En fonction de la position du capteur, il est possible d'établir un protocole de suivi avec un capteur placé au contact d'une zone de fragilité. Dans le cas de l'équipement du cadre ICMO 190, une demi-journée a été dédiée à l'installation des capteurs, leur branchement, et les raccords à la centrale d'acquisition. Pour vérifier la réactivité des capteurs, des essais de chargement ont été menés, occupant également une demi-journée. Une fois l'équipement mis en place et fonctionnel, les données peuvent être enregistrées automatiquement sur un disque dur externe par la programmation des relevés. Ceci permet donc la collecte de données de façon autonome. Il est cependant nécessaire de relever régulièrement les données et de vérifier le bon positionnement des capteurs ou le bon fonctionnement de la centrale d'acquisition. La récupération des données est très rapide mais le traitement nécessite du temps. Il a été possible de constater les profils de déformations des montants et de la traverse basse, en cas de chargement de type encadrement d'un tableau peint. Il a aussi été possible d'observer les très faibles déformations de l'artefact, sous son poids propre, en fonction des conditions climatiques de la réserve.

La méthode de suivi par capteurs est, à l'instar du suivi par numérisation 3D, bien adaptée à des besoins et à des conditions spécifiques de monitoring. Sans dommage pour les artefacts, elle permet d'identifier des mécanismes de mobilités et de déformations sur un ensemble ou dans des zones précises. La préparation de l'espace de travail et la mise en place peuvent être contraignantes puisqu'il faut placer les capteurs au contact, les conserver dans la même position et ne pas déplacer l'ensemble pendant toute la période de suivi. Aussi l'alimentation électrique ne doit pas être coupée. Enfin, il faut éviter les mouvements et les activités autour de l'artefact à évaluer. Ces conditions peuvent donc être gênantes ou difficiles à réunir et à garantir dans le cas d'un suivi sur le long terme. Dans un contexte muséal, comme une exposition en salle, la visibilité de l'appareillage peut aussi être considérée comme point négatif. Une mise en place en réserve dans un endroit dédié est tout à fait possible et adaptée, comme dans le cas de cette étude. Lorsque l'évaluation est ponctuelle, par exemple pour des essais de chargement et une étude sur le comportement mécanique en cas de sollicitations spécifiques, l'installation non pérenne n'est pas un problème. Malgré le coût, les équipements sont réutilisables et peuvent être empruntés à différents services ou à des laboratoires, ou mutualisés. Cette méthode est donc très polyvalente et adaptable aux différentes situations.

⁵⁸ L'équipement mis en place a nécessité un investissement d'environ 5000 €.

⁵⁹ BOUSVAROU Marina, *et al.*, « Un cas d'exposition au musée Fabre. « Dans le Secret des œuvres d'art » », *Patrimoines du Sud*, 12 (2020).

Synthèse

Connaître et maîtriser l'évolution d'un traitement ou d'un produit de conservation-restauration est essentiel dans la discipline. Les interventions de comblement ayant des impacts sur les aspects esthétiques mais aussi structurels des artefacts, il est primordial de s'assurer de la durabilité des formulations, de leur bon vieillissement, ainsi que de la compatibilité avec les matériaux originaux. Afin de constater l'évolution d'une sélection de formulations et des méthodes de comblement, trois artefacts restaurés entre 2015 et 2017 ont été étudiés à travers une approche de suivi de l'ensemble, présentée dans ce chapitre V. Les conditions de conservation et, plus spécifiquement le climat environnant, avec les températures, les taux d'humidité relative, ainsi que leurs variations, et le mode de présentation, ont été considérés comme potentiels facteurs de dégradation et mis en lien avec les observations. Les trois artefacts étudiés sont conservés dans des conditions différentes permettant donc d'avoir un aperçu du comportement du plâtre et de ses compléments dans trois contextes variés : en réserve ou en salle d'exposition, en climat contrôlé ou non contrôlé.

Le premier artefact évalué est un cadre du XIX^e siècle, objet d'art composite constitué d'une structure en bois et d'ornements moulés en plâtre rapportés, conservé en réserve au musée du Louvre. Des suspicions de reprise d'altération ont encouragé la mise en place d'un suivi. De façon à identifier d'autres comportements ou d'autres facteurs d'altérations de cette typologie de matériau constitutif, deux éléments du domaine de la statuaire ont intégré l'étude, une ronde-bosse de *Molosse* conservée à la gypsothèque du musée du Louvre à Versailles, et un relief pour un des pilastres de *la Porte de l'Enfer* d'Auguste Rodin en dépôt au musée des Beaux-Arts de Calais. Dans les deux cas, les artefacts sont fragiles en raison de leur mise en œuvre ainsi que de leur histoire et des anciennes conditions de conservation non adaptées.

Deux méthodes d'évaluation ont été mises en place : un suivi par numérisation 3D et corrélation d'images, avec des relevés réguliers sur une période de plusieurs mois à une année, a été mené sur les trois artefacts ; un suivi plus spécifique a été appliqué au cadre avec la pose de capteurs de déplacement au contact de trois des montants et traverses de l'artefact pour mesurer les mouvements de la structure. Une première série de mesures a été relevée au cours de plusieurs mois d'étude en examinant la position des capteurs pour identifier le comportement des éléments en fonction des conditions climatiques et sous poids propre seulement. Une seconde série de mesures, cette fois-ci ponctuelles, a été testées par des essais de chargements statiques pour identifier les profils de déplacements.

La numérisation 3D et les corrélations d'images du *Molosse* n'ont pas montré de tendance particulière à l'altération. La tête, la partie avant et la partie arrière, étant les plus altérées et les plus restaurées en 2015, ont été évaluées. La conservation dans un espace au climat non contrôlé et non monitoré, et la fragilité intrinsèque engendrée par la méthode de mise en œuvre en coulée très fine doublée de toile tissée, laissaient présager d'importantes variations dimensionnelles. Toutefois, les variations d'un relevé à l'autre sont très faibles. Le bon vieillissement de l'artefact et de ses interventions peut donc être relié à son contexte de conservation dans un même espace depuis les années 2000, voire avant, dans le bâtiment des Petites Écuries qui est décrit comme un lieu ayant une très bonne inertie thermique par les personnes qui y travaillent fréquemment. Les variations de température et d'humidité sont donc supposées très lentes et peu extrêmes.

Les matériaux constitutifs ont très probablement trouvé un équilibre avec ce contexte. Les interventions de 2015 ne semblent pas avoir modifié cet équilibre ; au contraire, l'artefact a été renforcé et stabilisé, et les matériaux de comblement ont prouvé leur compatibilité, en respectant le critère d'innocuité sans provoquer l'altération des substrats originaux tout en suivant les variations du contexte de conservation.

Le relief de Rodin, conservé au musée des Beaux-Arts de Calais depuis avril 2021 a subi plusieurs mouvements et manipulations entre 2017 et 2021. La numérisation 3D et la corrélation des images n'ont pas révélé de déformation ou de variation particulière après une année d'évaluation. Deux résolutions ont été testées et comparées, permettant d'obtenir des résultats très similaires, avec une définition légèrement plus fine pour la résolution de scanner à 0,5 mm. Dans l'ensemble, les variations sont très faibles. Localisée en partie médiane vers les têtes du couple au centaure et sur le bord senestre restauré, une seule zone a montré des variations supérieures à 0,5 mm. Ce constat n'étant pas visible sur la seconde corrélation, il est difficile, d'une part, de confirmer la déformation de la zone, et, d'autre part, de considérer une réelle tendance de mouvement. La présentation du relief à la verticale grâce à la structure porteuse semble satisfaisante. Le climat de l'espace de présentation n'est pas contrôlé mais il est monitoré et des ajustements sont faits lorsque les conditions de taux d'humidité relative sont trop extrêmes. Grâce aux données climatiques en température et en taux d'humidité relative, il a été possible de retracer les courbes correspondantes à l'année de suivi par numérisation. La tendance générale est plutôt bonne, avec des valeurs moyennes équivalentes aux préconisations habituelles. Cependant il est notable que des fluctuations importantes se produisent rapidement, variant parfois en quelques heures, avec certains cas de valeurs extrêmes. Mais malgré ces variations climatiques et le passage d'un stockage à plat à un accrochage vertical en condition d'exposition, il ne semble pas y avoir de reprise d'altération ou de détérioration des interventions de comblement, l'ensemble ayant pu s'acclimater à ses nouvelles conditions. Toutefois, en raison de la fragilité de l'artefact et des préconisations de taux d'humidité relative à ne pas dépasser, le climat et son impact sont des facteurs à surveiller, et une veille doit être poursuivie.

Artefact composite, fragile, et identifié comme en reprise d'altération, le cadre ICMO 190 a bénéficié d'un suivi mêlant les deux méthodes citées précédemment, de façon à obtenir une évaluation plus complète. Par la numérisation 3D et la corrélation d'images, seule une zone, celle de l'angle senestre haut, a montré des variations supérieures à 0,5 mm, plutôt ponctuelles mais visibles sur plusieurs corrélations. Ces mouvements de déplacement dans le champ z, ne dépassent jamais 1 mm de différence. D'après cette méthode d'évaluation, le cadre ne présente de motif de déformation considérable, mais il est possible qu'elle ne soit pas suffisamment fine pour déceler des reprises d'altérations minimales.

En étudiant les données recueillies par les capteurs de déplacement lors des essais en chargement et sans chargement, les comportements généraux peuvent être précisés. Sans chargement et en lien avec les conditions thermiques, les trois montants subissent des mouvements de $\approx 0,01$ mm à $\approx 0,03$ mm lorsqu'il y a des fluctuations thermiques entre ≈ 2 °C à ≈ 3 °C dans un délai inférieur à 24 h, comme cela s'est produit par exemple en mars, en mai et en août. Hormis quelques événements ponctuels et les variations associées qui dépassent les recommandations de conservation préventive, les fluctuations climatiques de la réserve ont des amplitudes plutôt basses. Ainsi les déplacements des trois montants sont plutôt réguliers et les variations dimensionnelles sont très faibles, entre 0,08 mm et 0,16 mm au maximum des variations mesurées par les trois capteurs.

La précision des données et les faibles valeurs confortent dans l'idée que le climat de la nouvelle réserve a peu d'influence sur les déformations des montants et donc que le processus d'altération constaté en 2018 ne s'est peut-être pas accentué, confirmant le premier constat plutôt positif de l'évaluation par numérisation 3D et corrélation des images relevées pendant une année. Lorsqu'un chargement progressif est appliqué, un mouvement est relevé par les capteurs, plus marqué pour le capteur de la traverse horizontale basse, de l'ordre de $\approx 0,25$ mm. Les montants verticaux ont de légers déplacements irréguliers compris entre $\approx 0,10$ mm à $\approx 0,17$ mm au plus fort, avec des valeurs légèrement supérieures pour le montant dextre, indiquant un déplacement plus accentué que le côté senestre. Ces valeurs identifient une gamme de variations dimensionnelles que le cadre et sa structure peuvent *a priori* supporter sans risque, et celles observées sans chargement, en lien avec le contexte climatique, sont bien inférieures. Dans cette situation d'artefact composite et fragile, les déplacements, même minimes, provoqués par des fluctuations thermiques brusques pourraient toutefois être considérés à risques. De plus, il a été noté que le montant et l'angle dextres semblaient être les parties aux reprises d'altération les plus marquées. Pourtant, ces zones ne montrent pas de déplacement particulièrement inquiétant lors des essais.

D'autres facteurs ont alors été envisagés pour expliquer ces phénomènes. D'une part, il a été constaté en observant le revers du cadre qu'au moins un nœud de taille importante dans la planche principale de structure du montant dextre pourrait induire une irrégularité de comportement. Les essais en chargement statique et les valeurs de déplacement légèrement variables d'un montant à l'autre peuvent appuyer cette hypothèse, bien que les différences de valeurs soient faibles. D'autre part, un léger décalage des pitons d'accrochage pourrait aussi participer à un déséquilibre dans la répartition des mouvements inhérents aux matériaux et donc induire une altération première du côté dextre.

Les activités humaines ainsi que les moments de variations climatiques excessives, associées aux manipulations de l'artefact et aux sollicitations mécaniques engendrées par ces facteurs, sont peut-être plus en lien avec les altérations, dépassant la zone d'amplitude tolérée des matériaux et de la structure générale. Le cadre est un artefact composite complexe, constitué d'un assemblage rigide de pièces de bois, et d'éléments en plâtre collés à la colle animale. Ces matériaux ont des résistances mécaniques différentes et leurs comportements peuvent logiquement différer, soumis à des tensions fluctuantes. Lors des essais en chargement statique, les déplacements mesurés sont limités, ce qui traduit une certaine rigidité de la structure, avec une répartition des tensions plus ou moins équilibrée et une résistance mécanique caractérisée par des valeurs élevées de module élastique et de contrainte maximale à la rupture, non évaluées dans ces travaux. Ce sont plutôt ces différences de comportement face aux sollicitations diverses et trop rapides qui peuvent entraîner des mécanismes d'altérations tels que des ruptures préférentielles, ne laissant pas suffisamment de temps aux matériaux de bouger de façon équilibrée ou de s'adapter. Enfin, le cadre étant dans une nouvelle réserve mieux contrôlée depuis 2021, il est possible que les reprises d'altérations constatées en 2018 aient été provoquées par les conditions de conservation de l'espace de stockage entre 2017 et 2021, associé aux éléments techniques et intrinsèques décrits ci-dessus. Depuis sa nouvelle installation, il pourrait avoir atteint un état d'équilibre, fragilisé certes, mais lui permettant de ne pas subir plus d'altérations.

Le protocole d'étude mis en place dans ces travaux permet non seulement de suivre le comportement des interventions de comblement mais aussi l'évolution des artefacts dans leur contexte par des méthodes de suivi qui semblent adaptées. La définition suffisante du scanner permet d'observer les détails les plus fins, ainsi que les altérations.

Les capteurs de déplacement, utilisés en essais ponctuels ou en suivi longue durée, ont une sensibilité très fine qui relève des déplacements minimes, tels que ceux produits par les vibrations de la cimaise d'accroche lors d'activités environnante.

Les comblements observés grâce à ces études de cas semblent plutôt compatibles, car aucune véritable reprise d'altération n'a été constatée à une interface ou à proximité des zones restaurées au cours des mois de monitoring. Ces constats confortent l'idée que le plâtre est un matériau polyvalent et adaptable, malgré sa nature fragile. Il autorise une variété de matériaux de comblement, tant que les critères physico-chimiques tels que ceux préconisés par le code de déontologie sont respectés. Soumis à des variations climatiques, et parfois des fluctuations à risques, les artefacts en plâtre montrent une bonne adaptation, permettant de considérer qu'ils trouvent une forme d'équilibre dans leur milieu et s'ajustent à leurs contextes de conservation, dans une certaine mesure.

En cas de conditions climatiques extrêmes, les artefacts en plâtre n'étant plus dans leur gamme d'équilibre ou de tolérance, peuvent alors s'altérer. Ceci peut également être provoqué ou renforcé par les aspects techniques et la mise en œuvre, lorsque d'autres matériaux aux comportements très différents sont associés, comme dans le cas du cadre. Alors les sollicitations mécaniques accentuées par des fluctuations de température et surtout de taux d'humidité relative induisent des déformations ou des déplacements trop contraignants pour le plâtre qui présente généralement des fissures puis des ruptures.

L'évaluation des artefacts au sein d'une collection est donc d'un grand intérêt, en ciblant par exemple quelques artefacts fragiles et d'autres plus stables ou plus résistants, de façon à déterminer les gammes de variations acceptables, en fonction des conditions de conservation qu'il est nécessaire de mieux connaître.



Livret technique

Présentation des formulations et
guide d'usage

Sommaire

Ce livret présente les matériaux et les formulations de l'étude, assimilés aux matériaux originaux et utilisés pour les interventions de comblement, ainsi que leurs usages. Les caractéristiques techniques, à travers les aspects visuels et physico-chimiques, sont synthétisées par fiches de formulation, de façon à assister l'identification des matériaux originaux. Les propriétés mécaniques à l'état fluide et frais ainsi qu'à l'état solide sont détaillées pour conseiller les professionnel·les dans les choix des formulations de comblement adaptées, selon les besoins en résistance mécanique et en texture. À la fin de ce livret, pour faciliter les prises de décisions, un guide de réflexion et des synthèses graphiques sont proposés en fonction des différentes formulations et des types d'interventions. Toutes les données obtenues par mesures ou calculs, présentées dans ce livret, sont arrondies.

Présentation des matériaux et des formulations	p. 401
Sulfate de calcium dihydraté Taux E/P de 0,45 à 0,95	p. 407
Sulfate de calcium dihydraté + carbonate de calcium Taux E/P 0,7 ; 0,9 ; 1,1 à ratio 1-0,5 ; 1 ; 1,5 de CaCO ₃	p. 419
Sulfate de calcium dihydraté + carbonate de calcium + dioxyde de titane Taux E/P 1,5 à ratio 1-2 de CaCO ₃ et à 2% de TiO ₂	p. 431
Sulfate et carbonate de calcium + colle animale avec ou sans dioxyde de titane	p. 437
Guide de réflexion Pour le choix d'une formulation	p. 445
Arborescence des formulations	p. 446
Classification des formulations Selon le renfort et la texture	p. 447
Synthèse	p. 448

Présentation des matériaux et des formulations

Dans cette partie, les matériaux et les formulations de l'étude sont présentés et répartis en deux catégories : ceux assimilés aux matériaux originaux¹, dont les compositions chimiques sont proches ou identiques aux matériaux constitutifs des artefacts à restaurer ; et ceux dits de comblement, employés uniquement pour la restauration, et dont la composition chimique ne peut pas être confondue avec celles des artefacts.

Matériaux assimilés aux matériaux originaux

Sulfate de calcium dihydraté (plâtre), de type hémihydrate β

Taux de gâchage E/P entre de 0,5 et 0,8

Le plâtre, sulfate de calcium dihydraté, est un matériau couramment employé pour le moulage. Issu d'une roche et transformé par cuisson et broyage, le matériau à l'état d'hémihydrate, ou semi-hydrate, est une poudre qui doit être mélangée à l'eau pour se réhydrater et faire prise, avant de durcir et sécher. La quantité d'eau servant au mélange et à la réhydratation conditionne les propriétés du matériau à l'état fluide, modifiant texture et viscosité, et à l'état solide, influant sur les microstructures et les résistances mécaniques. Le rapport massique eau/plâtre, appelé taux de gâchage et noté E/P, est variable selon la nature et la préparation du plâtre, et selon les besoins.

Dans le domaine du moulage artistique, il est généralement conseillé de préparer le plâtre à « fleur », équivalent à des taux compris entre E/P = 0,6 et 0,8 d'après les professionnels spécialistes du matériau. Par exemple, les mesures faites par Biesel et Cascio² à partir d'un artefact du début du XX^e siècle indiquent un taux de gâchage E/P = 0,75.

Pour mieux appréhender les propriétés physico-chimiques et mécaniques du matériau assimilé à l'original, des formulations de plâtre seul ont été évaluées, à des taux de gâchage similaires, considérés ici de E/P = 0,5 à 0,8.

¹ Dans cette étude, les matériaux assimilés aux originaux ont été formulés car il n'était pas possible de procéder aux analyses, invasives et destructives, à partir de prélèvements sur des artefacts patrimoniaux.

² BIESEL Dominique et CASCIO Agnès, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, Mémoire de master, Paris, IFROA, 1984, p. 6.

Craie de Bologne et colle animale

La craie de Bologne est naturellement composée de carbonate et de sulfate de calcium hydraté ; à l'état de poudre, elle s'apparente donc à une charge inerte qui doit être mélangée à un liant comme de la colle animale, généralement de peau de lapin³.

Dans ces travaux, la craie est assimilée à un matériau original. En effet, la craie de Bologne peut être utilisée pour la préparation de fonds de peinture ou d'artefacts dorés. Elle permet aussi d'observer le comportement d'un matériau similaire à la formulation de carbonate de calcium, ou blanc de Meudon, et de colle animale, utilisée traditionnellement en France pour la mise en œuvre d'artefacts dorés, tels que des ornements de cadres lorsqu'ils ne sont pas moulés uniquement au plâtre. Cette préparation présente donc l'intérêt d'être substituable aux préparations traditionnelles, en pâte de type « gros blanc », ou en matière fluide appliquée au pinceau et à chaud appelée « apprêt », selon la quantité de colle et sa dilution.

La pâte modelable est façonnée en déposant une quantité de colle chaude dans un creuset rempli de poudre, en faisant tourner la boule qui se forme au centre et qui absorbe la poudre de craie progressivement. L'ornement en pâte est généralement obtenu par pressage dans un moule ayant l'empreinte de la zone à combler, puis il est collé avec le même adhésif constitutif, et laissé à sécher. Les mélanges liquides sont préparés par dépôt progressif de poudre dans de la colle chaude, mais cette fois-ci diluée. Ils sont appliqués au pinceau et en couches superposées dans les zones à combler, généralement de petites dimensions.

Ces deux types de préparation (mesures indiquées dans les tableaux ci-dessous) ont été adaptées aux essais de l'étude, et n'ont pas pu être testées dans toutes les conditions. Des indications de la résistance mécanique de la pâte et de la texture à l'état fluide de l'apprêt liquide ont pu être évaluées et comparées aux données établies pour les autres formulations.

Préparation de la colle	Colle	Eau	
Colle pure à ≈ 20 %	15 g	75 g	
Type de formulation (ratio liquide-solide)	Colle pure à ≈ 20 %	Eau	Poudre (TiO ₂ en substitution)
Pâte (≈ 1-3)	5 g soit 1 volume	-	15 g soit ≈ 3 volumes
Apprêt (≈ 2-2)	5 g soit 1 volume	5,6 g soit ≈ 1 volume	9,15 g soit ≈ 2 volumes

REMARQUES

L'amélioration des connaissances du matériau constitutif des artefacts moulés permet ensuite d'affiner les propositions de traitements de comblement, et notamment le choix de la formulation la plus adaptée, structurellement et esthétiquement

³ BRIDAROLLI Alexandra, *et al.*, « Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity », *Journal of Cultural Heritage*, 53 (2022), p. 226 235.

Matériaux de comblement

Sulfate de calcium dihydraté (plâtre), de type hémihydrate β

Taux de gâchage alternatifs (E/P 0,45 à 0,5 et 0,8 à 0,95)

Le plâtre peut aussi être employé comme matériau de comblement, garantissant ainsi une bonne compatibilité avec l'original. Il est possible de moduler sa formulation, et son rapport eau/plâtre, de façon à obtenir des textures différentes à l'état fluide. Ainsi les comblements peuvent être mis en œuvre de deux façons : par modelage d'une matière suffisamment épaisse, ou par coulage d'une matière suffisamment fluide. En modifiant le taux de gâchage, les propriétés mécaniques à l'état solide sont également modifiées, de la même façon que pour le plâtre comme matériau original. Mais dans le cas d'un traitement de restauration et d'un comblement, ces spécificités physiques et mécaniques peuvent être exploitées et adaptées selon les besoins. Dans certains cas, ce matériau polyvalent a la capacité de fournir une matrice dense et très résistante, ou dans d'autres cas, une matrice aérée et moins résistante que le matériau original.

La mise en œuvre d'un comblement au plâtre seul peut poser un problème d'apport d'eau dans le matériau original, lorsque le comblement est fait à frais et *in situ*. Certain-es professionnel·les limitent la migration de l'eau de gâchage dans la matrice originale en isolant préalablement les plans de contact avec une résine ou un adhésif, tels que du Plextol® B500 ou du Paraloid® B72.

L'imperméabilisation n'est pas totale, mais cette méthode permet de limiter la migration d'une quantité importante d'eau de gâchage. Pour éviter l'apport d'eau tout en réalisant un comblement *in situ*, il est aussi possible de procéder à la réalisation d'une pièce amovible, collée après la prise et le séchage du plâtre.

Pour cela un matériau filmogène et souple, par exemple du film étirable, est placé sur la zone à combler, puis le plâtre de comblement est façonné à frais, par modelage ou par coulée selon la texture voulue. Après la prise et le séchage en place, la pièce et le film sont retirés. Le comblement peut ensuite être fixé avec un adhésif. En utilisant du plâtre comme matériau de comblement, une bonne compatibilité des matériaux est garantie, mais il n'est pas possible de les distinguer chimiquement dans le cas d'analyses ultérieures. Les matériaux, originaux et de comblement seront donc identifiés comme du sulfate de calcium. Ils peuvent être différenciés dans le cas où le plâtre original présente des éléments-traces particuliers, ou encore une composition et une texture spécifiques, avec par exemple la présence de particules de charbon, ou des grains d'incuits et de surcuits. Une distinction formelle peut être mise en œuvre, avec par exemple la réalisation de comblement en retrait, non-illusionniste.

Additifs

La formulation de comblement peut également être préparée avec des additifs ou des charges, ajoutés en proportions variables pour des raisons spécifiques de marquage, de modification des propriétés physico-chimiques et mécaniques à l'état fluide et à l'état solide. Dans cette étude, le carbonate de calcium et le dioxyde de titane ont été testés. Les formulations additionnées de carbonate de calcium et marquées avec un faible pourcentage de dioxyde de titane peuvent être utilisées de la même façon que le plâtre seul : à l'état fluide diverses textures, de types pâtes à modelables à liquides à couler, peuvent être préparées, et à l'état solide, différentes résistances mécaniques peuvent être obtenues selon les besoins de la restauration.

Carbonate de calcium

Le carbonate de calcium, de notation chimique CaCO_3 , est une poudre blanche, naturellement issue de roches comme la calcite. Généralement de grande pureté, il peut comporter un faible pourcentage d'impuretés, comme d'autres minéraux naturellement présents. La poudre peut être de très fine granulométrie. Le matériau est aussi appelé « blanc de Meudon », en raison d'une forte présence de ressources calcaires dans cette localité.

Citée et employée par les professionnel·les, cette charge permet de modifier de façon minime la structure du plâtre, en abaissant les résistances mécaniques et en incluant un élément différent de la matière originale, sans impacter les aspects esthétiques de texture, de couleur ou encore d'aspect granulaire.

Le carbonate de calcium est une charge inerte, alors utilisée en additif, ne prenant pas comme le plâtre. Des parts de CaCO_3 peuvent donc être ajoutées au plâtre, de façon à modifier la composition chimique du matériau, ainsi que les propriétés physiques et mécaniques.

Un effet de rétention d'eau est observé et permettrait, d'après les professionnel·les, de limiter la diffusion de l'eau de gâchage dans le substrat original.

Dans cette étude, le plâtre a été évalué avec des ajouts de 0,5 puis 1 puis 1,5 parts de CaCO_3 à des taux de gâchage $E/P = 0,7 ; 0,9 ; 1,1$; un ajout de 2 parts de CaCO_3 a été testé pour le mélange à $E/P = 1,5$ et à 2 % de TiO_2 . À l'état fluide, l'addition de carbonate de calcium permet d'épaissir la formulation, de façon à avoir un matériau modelable, avec une très bonne tenue à la spatule. À l'état solide, l'addition de carbonate de calcium a différents effets. Un effet de renfort est constaté lorsque l'addition est limitée, puis un abaissement des résistances est constaté lorsque l'ajout est conséquent, dépassant généralement un ratio d'une part de plâtre pour une part de carbonate de calcium.

Dioxyde de titane

Le dioxyde de titane, noté TiO_2 , est une poudre blanche, de très fine granulométrie. Le matériau, appelé aussi « blanc de titane », est généralement employé comme pigment blanc, en raison de son fort pouvoir couvrant.

D'après la fiche technique du fournisseur, d'autres composés minéraux comme de l'alumine et de la silice peuvent être présents.

Non constitutif des matériaux de mise en œuvre des ornements des cadres, le dioxyde de titane est aussi employé par des professionnel·les de la conservation-restauration comme élément marqueur dans une formulation de comblement et de restauration. Additionné en faible quantité, il est détectable par des techniques analytiques et élémentaires comme la micro-fluorescence X (XRF).

Il ne semble pas modifier les propriétés physico-chimiques à l'état fluide ou solide lors d'ajout à 2 %, comme testé dans cette étude.

Dans cette étude, il est testé en addition à 2 % à un mélange de plâtre et de carbonate de calcium (E/P = 1,5 à ratio 1-2) et à un mélange de craie de Bologne et de colle animale, en pâte ou en apprêt. Ce double marquage de la formulation peut être identifié par des analyses élémentaires ou structurales, mais aussi par observation au microscope électronique à balayage.

REMARQUES

La caractérisation des différents taux de gâchage du plâtre seul a permis de mieux les connaître, et de préciser un large spectre d'usages. Ces données peuvent aussi servir à l'estimation des rapports massiques des matériaux originaux, avec par exemple l'identification de taux « hors norme », ou encore de classer le taux par rapport aux extrêmes de gâchage très « serré » ou de gâchage très « clair ». Les caractéristiques des plâtres hors taux de gâchage de moulage sont également proposées pour répondre à des besoins spécifiques, comme du renfort très élevé, ou une résistance basse. Les deux additifs sont caractérisés selon les formulations employées par les professionnel·les afin d'affiner les pratiques, tout en proposant des alternatives, selon les besoins en résistance à l'état solide et en texture à l'état fluide.

Sulfate de calcium dihydraté (plâtre)

Taux de gâchage E/P de 0,45 à 0,95*

Caractéristiques générales

État fluide :

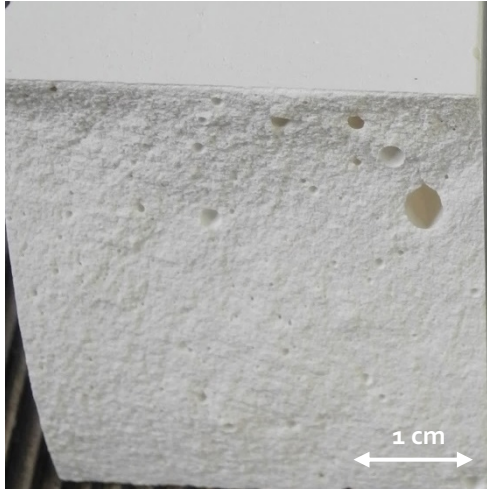
- Texture (selon E/P) : grande variété de textures de très pâteuse (en limite d'hydratation complète), à très liquide et très diluée avec un effet de séparation des grains et de l'eau.
- Ouvrabilité : variable de quelques minutes à plusieurs dizaines de minutes (prise ralentie avec l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage).

État solide :

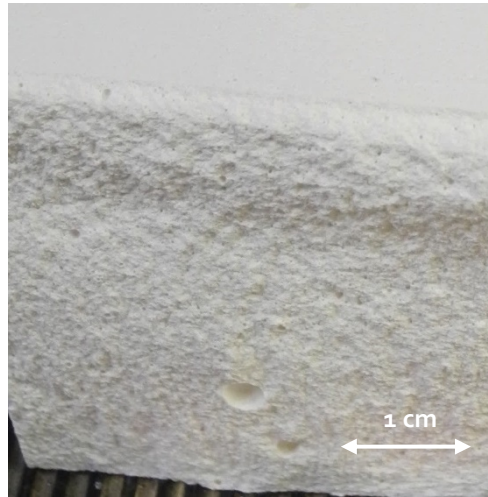
- Couleur : matrice blanche, particules colorées (noir, orange, ocre clair).
- Texture (selon E/P) : surfaces contraintes (moulées) très lisses ; aspect dur, dense et cohésif à texture poudreuse, peu compacte et peu cohésive selon le taux E/P.
- Porosité apparente (selon E/P) : fermée à très ouverte, bulles d'air de gâchage.

* Les observations en microscopie ont été menées sur des éprouvettes sélectionnées selon des taux de gâchage représentatifs des gammes de matériaux présents. Le taux E/P = 0,45 représente la gamme des plâtres très compacts et denses ; le taux E/P = 0,7 représente la gamme intermédiaire, des plâtres cohésifs mais aérés ; le taux E/P = 0,95 représente les plâtres très peu concentrés en matière ayant des matrices peu compactes, peu cohésives, voire poudreuses.

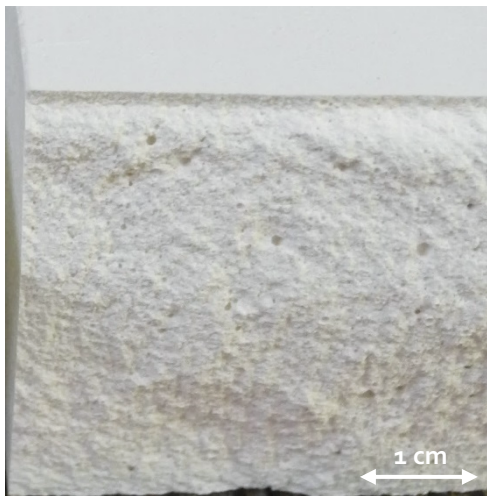
Aspects visuels à l'état solide



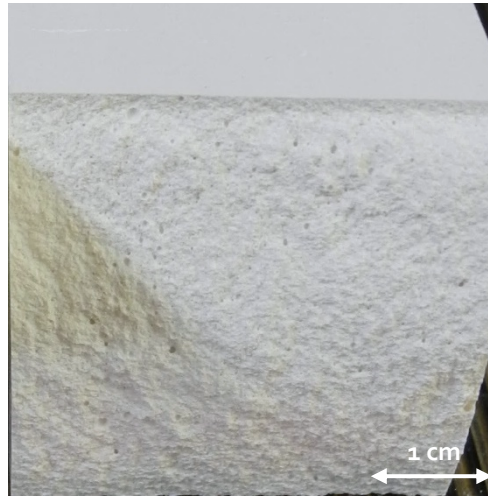
$E/P = 0,45$



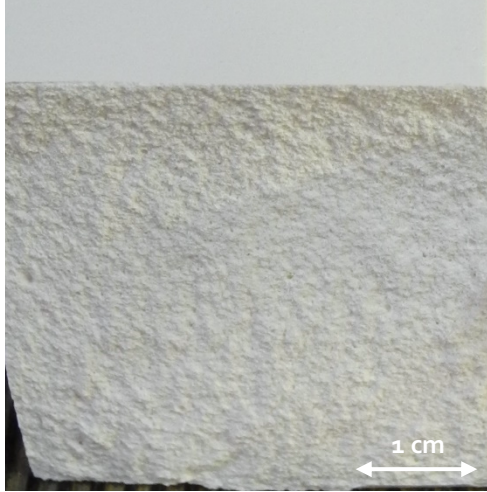
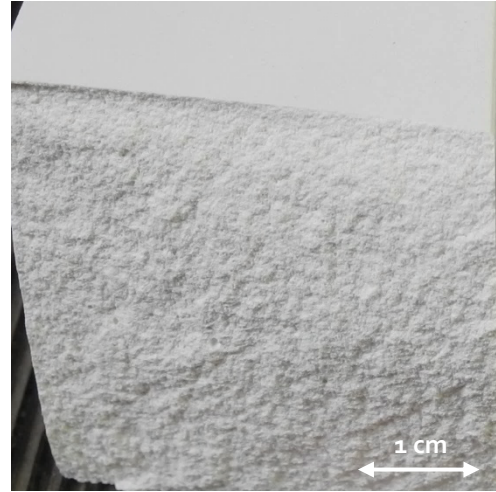
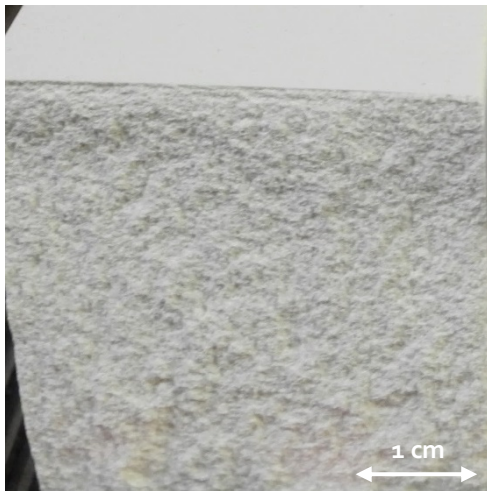
$E/P = 0,5$



$E/P = 0,6$



$E/P = 0,7$

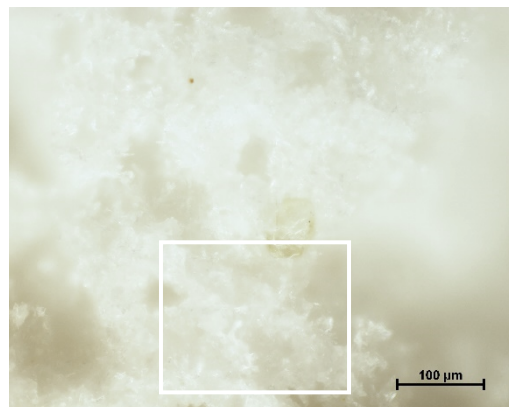
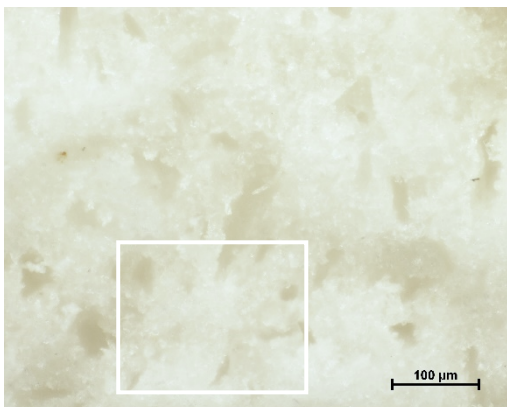
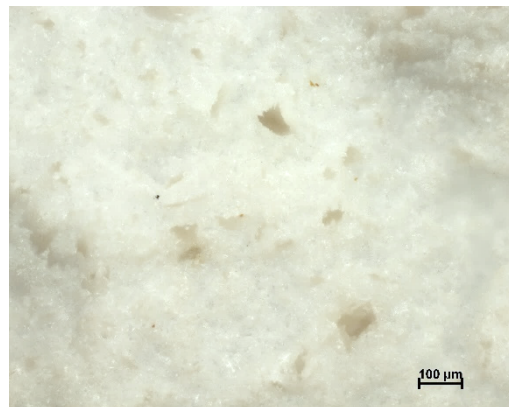
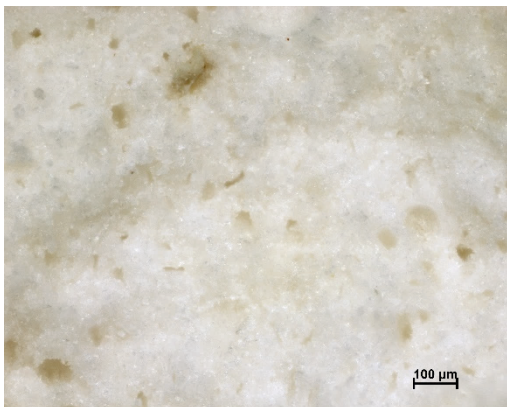
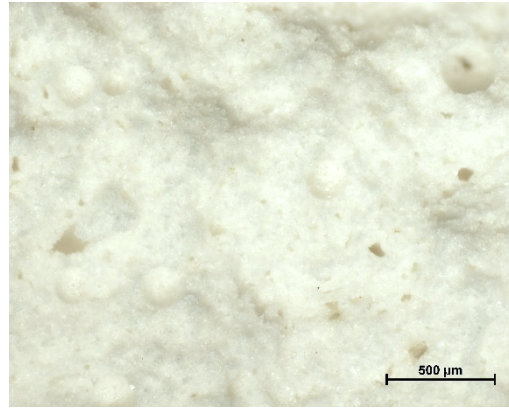
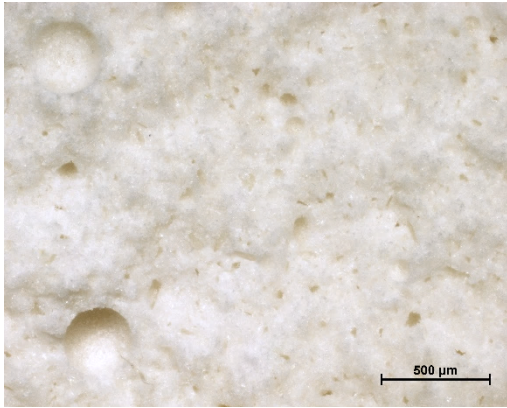
**E/P = 0,8****E/P = 0,9****E/P = 0,95**

Description

Les mélanges très concentrés en plâtre ($E/P = 0,45$ à $0,6$) ont des matrices très denses et très compactes, avec d'importantes bulles d'air liées au malaxage. Le substrat peut sembler hétérogène, avec des reliefs importants ou des zones qui semblent plus tassées que d'autres, en raison de l'importante quantité de poudre. Les taux de gâchages intermédiaires ($E/P = 0,7$ à $0,8$) permettent d'obtenir des matrices cohésives et homogènes, au plan de cassure plutôt lisse. Les taux de gâchage moins concentrés ($E/P = 0,9$ et $0,95$) ont des matrices peu compactes, et irrégulières. Le substrat est aéré, parfois peu cohésif, avec une légère pulvérulence.

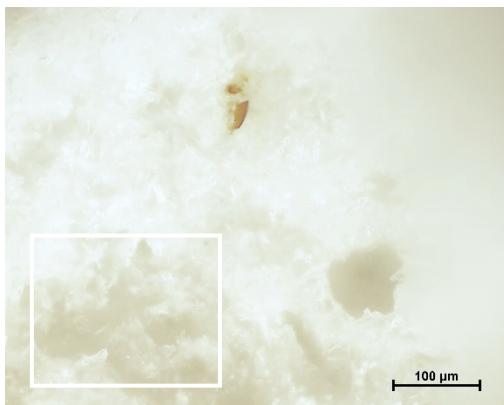
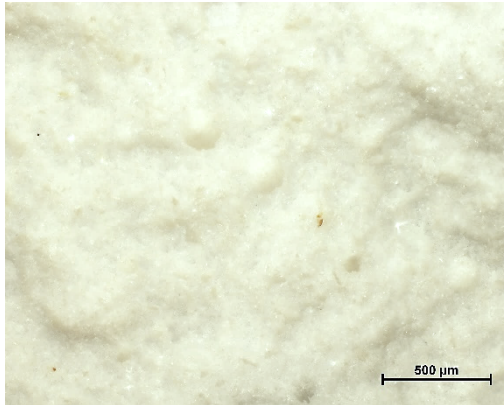
Microstructure

Images au microscope optique



Molda® 3 Normal à E/P 0,45
x5, x10, x20

Molda® 3 Normal à E/P 0,7
x5, x10, x20



Description

Les mélanges très concentrés en plâtre ($E/P = 0,45$ à $0,6$) ont des structures compactes et denses. Les cristaux sont très serrés. Les bulles d'air peuvent être de taille importante. À fort grossissement, la cohésion des cristaux aciculaires est notable et leur nombre semble plus important qu'à des concentrations en poudre moyennes ou basses.

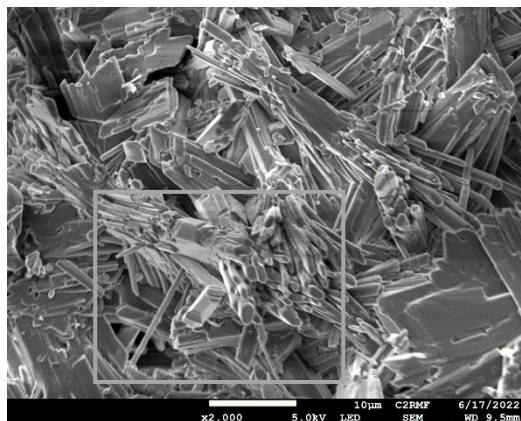
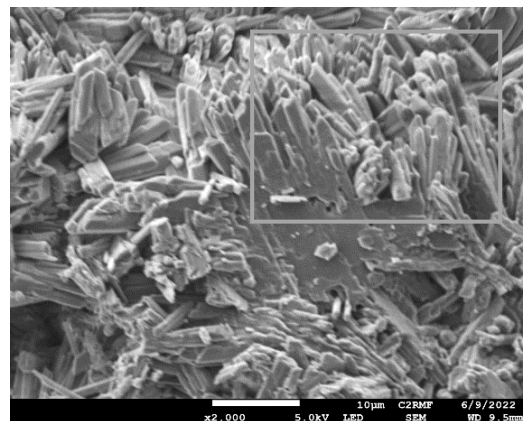
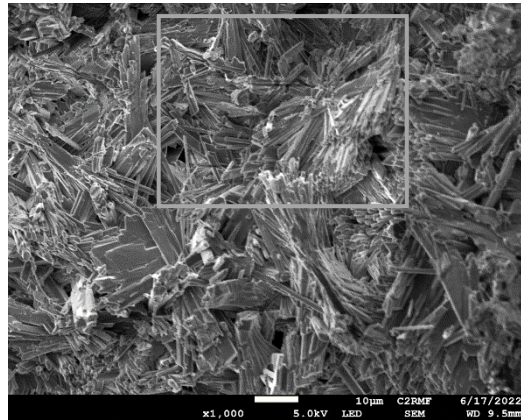
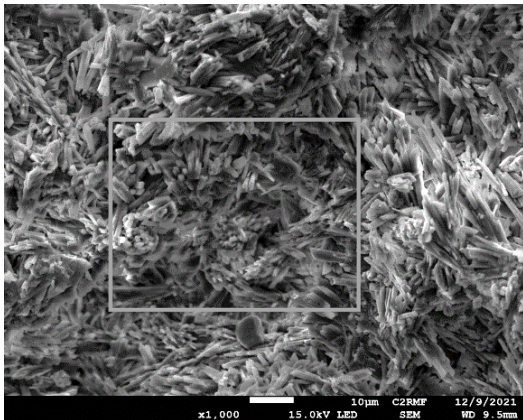
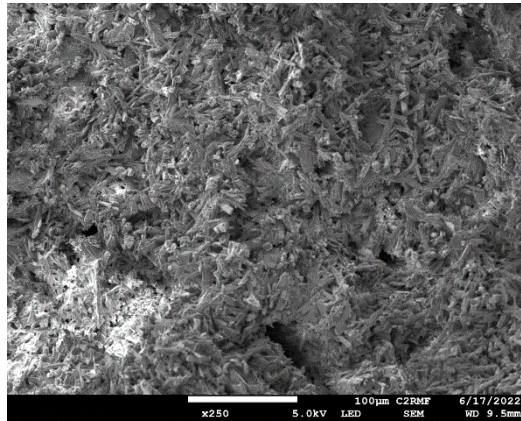
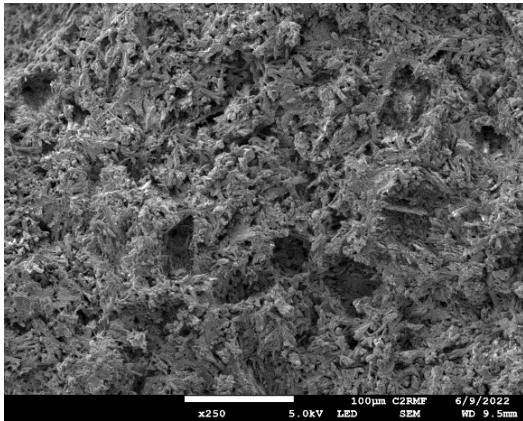
Ces caractéristiques changent avec l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage. La structure et la matrice sont moins compactes et moins denses.

Les mélanges à concentration moyenne ($E/P = 0,7$ à $0,8$) ont des textures équilibrées, la matière est suffisamment concentrée et semble cohésive, sans paraître tassée.

Les mélanges contenant peu de poudre ($E/P = 0,9$ et au-delà) ont des surfaces qui semblent poudreuses ou granuleuses. Les cristaux sont peu cohésifs et leurs formes peuvent être distinguées à fort grossissement.

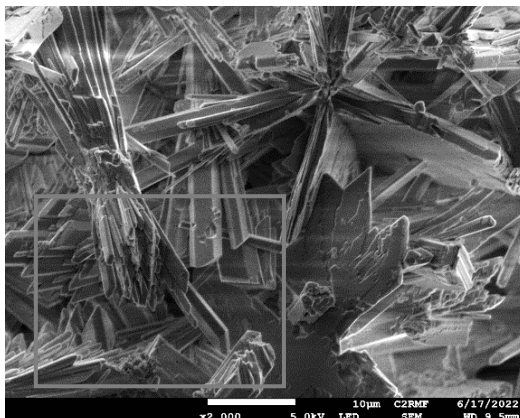
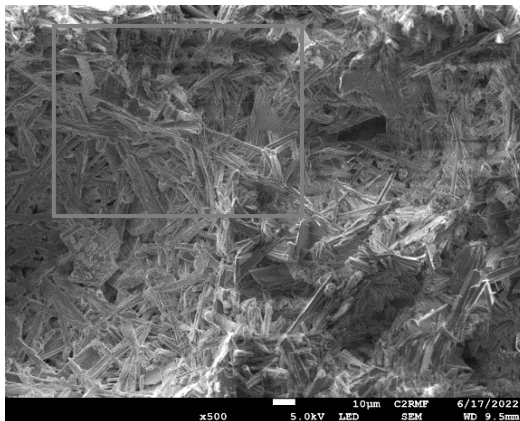
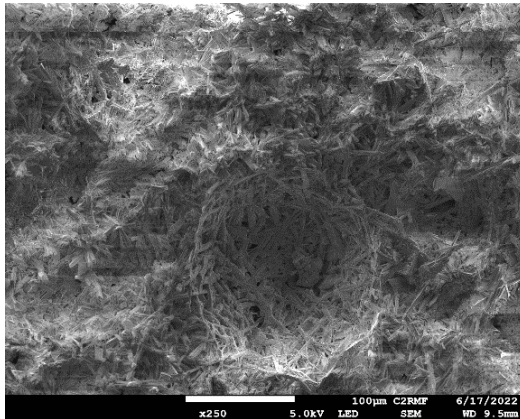
Molda® 3 Normal à E/P 0,95
x5, x10, x20

Images au microscope électronique à balayage



Molda® 3 Normal à E/P 0,45 mode LED
x250, x1000, x2000

Molda® 3 Normal à E/P 0,7 mode LED
x250, x1000, x2000



Molda® 3 Normal à E/P 0,95 mode LED
x250, x1000, x2000

Description

Les caractéristiques des différents mélanges sont encore plus distinguables au MEB. L'agencement des cristaux, leur nombre, et leur degré de finitions dépendent du rapport massique eau/plâtre.

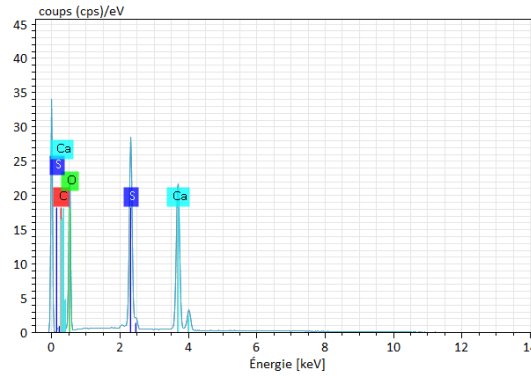
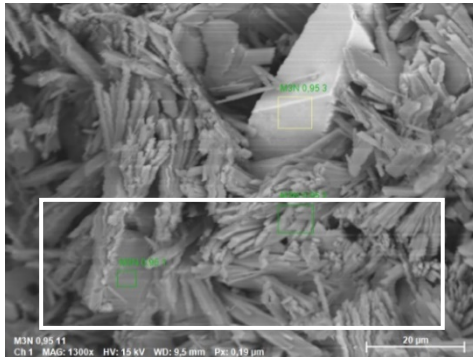
Ainsi, à forte concentration de poudre d'hémihydrate de sulfate de calcium, la matrice obtenue est très dense, les cristaux sont très serrés, très nombreux, et irréguliers. Leurs formes et les aspérités de surface sont représentatives d'une hydratation partielle et du processus de cristallisation incomplet.

À moyenne concentration, la matrice semble dense, mais plus aérée ou moins compacte qu'aux taux E/P chargés en poudre. Les surfaces lisses et les extrémités bien définies des cristaux laissent penser que l'hydratation et la cristallisation sont complètes.

À concentration faible, et avec un taux d'eau de gâchage important, la structure est bien plus ouverte et le nombre de cristaux est moindre. L'ensemble semble donc peu cohésif. Les cristaux sont bien définis, de dimensions plus importantes qu'à des taux de gâchage plus bas, et les assemblages sont plus aérés.

Composition chimique

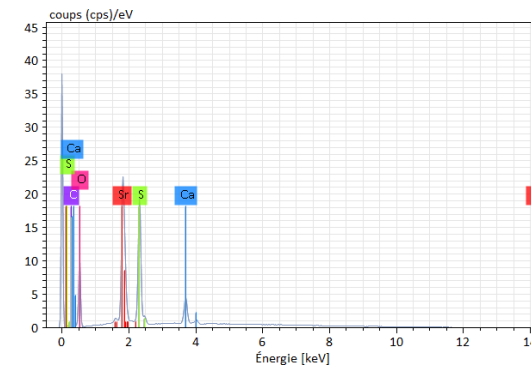
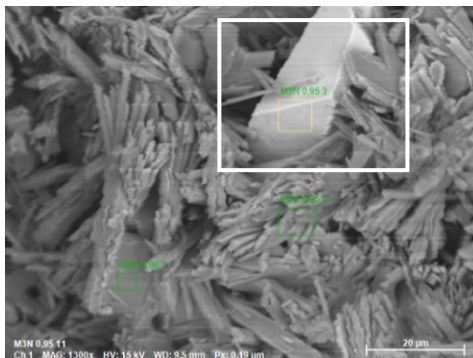
Spectre-type



**Molda® 3 Normal à E/P = 0,95
mode LED x1300**

Les deux points dans l'encadré ont donné le spectre-type présenté ci-dessus lors des analyses par sonde EDS. Les éléments caractéristiques du plâtre ont été facilement détectés : le soufre S, le calcium Ca, l'oxygène O.

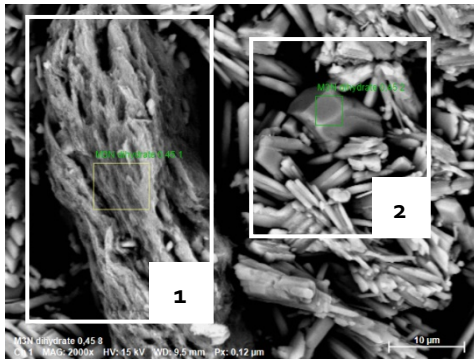
Éléments traces identifiables¹



**Molda® 3 Normal à E/P = 0,95
mode LED x1300**

L'analyse EDS révèle la présence de l'élément strontium Sr. Cet élément compose la structure de minéraux comme la célestine (sulfate de strontium SrSO_4) ou la strontianite (carbonate de strontium SrCO_3), fréquemment rencontrés dans le gypse et les roches évaporitiques.

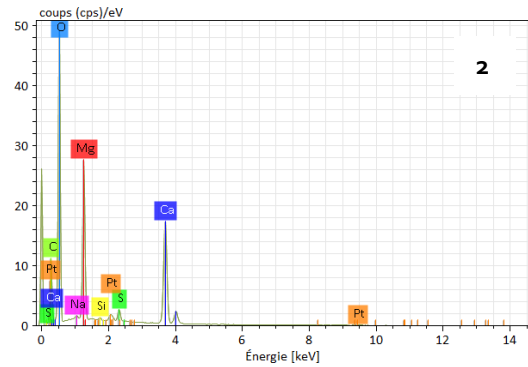
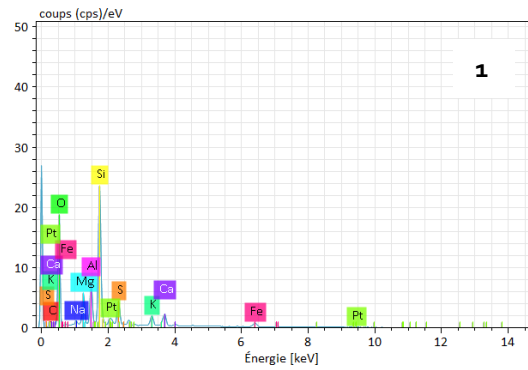
¹ L'élément platine Pt identifié sur plusieurs spectres présentés ici correspond au platine ayant servi à la métallisation de l'échantillon pour les observations et les analyses au MEB-EDS.



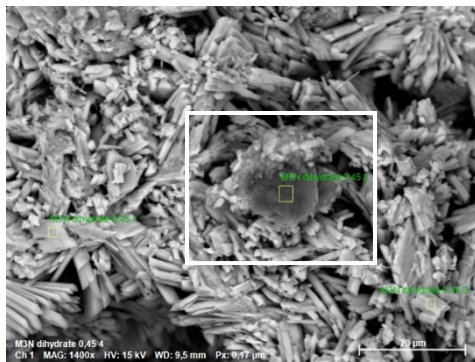
**Molda® 3 Normal à E/P = 0,45
mode LED x2000**

D'autres éléments et composés peuvent être identifiés, par leurs formes et aspects, mais aussi par leur composition élémentaire.

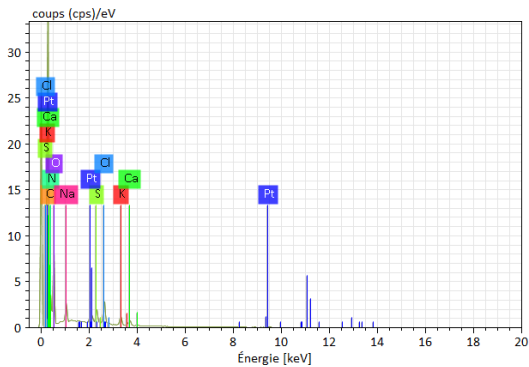
Dans la matrice de plâtre, il a été observé des oxydes métalliques avec de la silice Si, du sodium Na, du magnésium Mg, de l'aluminium Al, du potassium K et du fer Fe, sur le pointé 1, qui peuvent former de la biotite ($K(MgFe)_3(OH)_2(Si_3AlO_{10})$).



Sur le pointé 2, du calcium Ca, associé au magnésium Mg, au carbone C et à l'oxygène O, semblent former de la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), ou encore de la magnésite ($MgCO_3$), avec des traces de silice Si et de sodium Na.



**Molda® 3 Normal à E/P = 0,45
mode LED x1400**



L'analyse révèle ici des éléments comme du chlore Cl, du sodium Na, du potassium K ou encore de l'azote N. Ces éléments entrent par exemple dans la composition de l'halite (chlorure de sodium NaCl) ou de la sylbite (chlorure de potassium KCl), retrouvées fréquemment dans les gisements évaporitiques et dans le gypse à l'état naturel.

Propriétés mécaniques à l'état fluide et solide

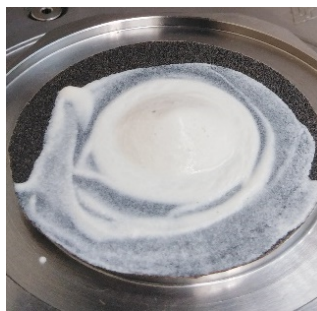
État fluide

Formulation	Consistance en Pa.s ^{0,5}	Indication rhéologique	Usages	Temps de travail en minutes
E/P 0,45	26,4	Texture pâteuse	Modelage	≈ 5
E/P 0,5	6,8	Texture pâteuse	Modelage	≈ 5-10
E/P 0,6	2,8	Texture intermédiaire	Modelage ou moulage	≈ 5-10
E/P 0,7	1,2	Texture intermédiaire	Modelage ou moulage	≈ 10-15
E/P 0,8	0,6	Texture liquide	Moulage	≈ 15-20
E/P 0,9	0,3	Texture liquide	Moulage	≈ 20
E/P 0,95	0,3	Texture liquide	Moulage	≈ 20

Données pour le plâtre Molda[®] 3 Normal, selon le modèle d'Herschel-Bulkley, avec l'indice de structuration $n = 0,5$.



E/P 0,45



E/P 0,6



E/P 0,95

À l'état fluide, trois gammes principales de textures ont été identifiées : une gamme de texture pâteuse, une gamme de texture intermédiaire, et une gamme de texture liquide. Elles sont illustrées par ces visuels de la matière fraîche après mesure au rhéomètre pour les taux E/P = 0,45 ; 0,6 ; 0,95.

La gamme pâteuse est particulièrement adaptée pour modeler des complements *in situ* avec un temps de travail et de prise permettant de monter des volumes rapidement sans risque d'écoulement de la matière. La gamme liquide permet de procéder au moulage des pièces de comblement en restituant les détails grâce à la matière qui épouse les anfractuosités du moule. La gamme intermédiaire présente les intérêts des deux gammes précédentes avec une tenue suffisante à la spatule pour être appliquée en modelage et à la spatule, avec une ouvrabilité un peu plus confortable, ou pour être coulée dans un moule pour obtenir un matériau final plutôt dense ou en couche épaisse dans un tirage à la volée.

État solide

Formulation	Masse volumique en kg.m ³	Modules <i>E</i> et <i>E</i> dynamique en GPa	Résistance maximale à la compression en MPa	Résistance maximale à la flexion 4 points en MPa	Renfort
E/P 0,45	1419	/	/	/	élevé
E/P 0,5	1325	6,44 et 10	22	4,45	élevé
E/P 0,6	1208	5,64 et 7,46	15,30	3,70	élevé
E/P 0,7	1135	5,66 et 6,29	11,72	3,12	élevé
E/P 0,8	1040	4,89 et 4,94	6,75	2,11	moyen
E/P 0,9	968	3,23 et 4,19	5,21	1,85	faible
E/P 0,95	941	3,46 et 3,96	5,62	1,68	faible

En conservation-restauration, un mélange à des rapports massiques E/P bas, comme E/P = 0,45 ou 0,5 est plus rarement utilisé en raison de la résistance mécanique très élevée. Cependant, ce type de mélange présente l'intérêt de répondre à des besoins spécifiques de renfort structurel, comme la réalisation d'un élément porteur ou de soclage. Les taux plus élevés, dès un taux E/P = 0,85 ou 0,9, ont une concentration en poudre d'hémihydrate plus faible et permettent d'obtenir un matériau à la résistance inférieure. Les caractéristiques de ces mélanges sont adaptées à des usages spécifiques, par exemple pour la mise en œuvre du comblement à part, puis collé après séchage ; dans le cas d'un besoin de densité faible, de porosité élevée, avec un renfort structurel moyen à faible.

Ces données fournissent aussi des éléments de compréhension des matériaux originaux et « anciens », indiquant des gammes de résistances du plâtre, selon les aspects visuels, par exemple dense et compacte indiquant un E/P < 0,6 ou poudreux et très aéré indiquant un E/P > 0,8.

Pour comparaison, les données mécaniques de Biesel et Cascio², pour un artefact du XX^e siècle évalué à un taux E/P = 0,75, avec une masse volumique de 1020 kg.m⁻³ et une résistance à la flexion 3 points comprise entre 5 et 10 GPa, correspondent à celles des taux de gâchages E/P = 0,5 à 0,8 étudiés ici. Il y a toutefois une différence de propriétés puisque les taux plus serrés ayant des résistances à la flexion dans les mêmes ordres de grandeur ont des masses volumiques plus élevées, alors que les taux plus dilués, aux résistances à la flexion plus faibles, ont des masses volumiques équivalentes. Il semblerait donc qu'avec l'évolution de la production du matériau³, le plâtre actuel « commun » ou de moulage, à masse volumique équivalente à celle d'un plâtre « ancien », par exemple 1020 kg.m⁻³, soit moins résistant mécaniquement. Lors d'un traitement avec un besoin de résistance élevée, le taux de gâchage choisi implique alors une masse volumique plus importante que celle de l'original, et donc un aspect plus dense et une masse plus conséquente. Cela doit être pris en compte dans le choix des matériaux lorsque le besoin de renfort structurel est nécessaire, mais que le matériau original présente des fragilités et qu'un comblement trop lourd ou trop dense pourrait altérer.

² BIESEL Dominique et CASCIO Agnès, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, Mémoire de master, Paris, IFROA, 1984, p. 6.

³ LE DANTEC Tiffanie, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2019.

Sulfate de calcium dihydraté (plâtre) et carbonate de calcium

**Taux de gâchage E/P 0,7 ; 0,9 ; 1,1
à ratio 1-0,5 ; 1 ; 1,5 de CaCO₃**

Caractéristiques générales

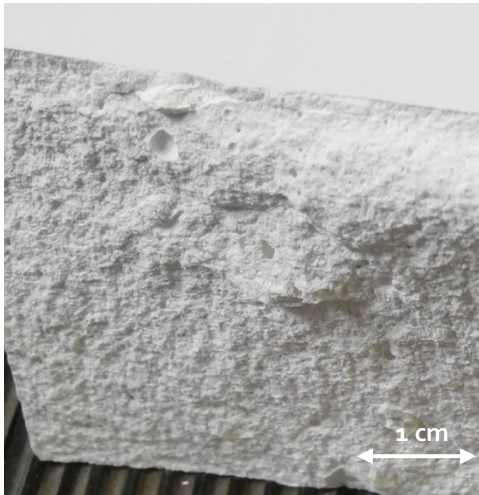
État fluide :

- Texture (selon E/P et ratio de CaCO₃) : variable, de liquide à pâteux selon la quantité de poudre et la concentration en matrice liante de plâtre. L'addition de CaCO₃ permet de lier la matière à l'état fluide, de lui donner du corps, et d'améliorer sa consistance et sa tenue pour le modelage.
- Ouvrabilité : la présence de carbonate de calcium tend à ralentir la prise ; prises des formulations en plusieurs dizaines de minutes permettant un travail confortable.

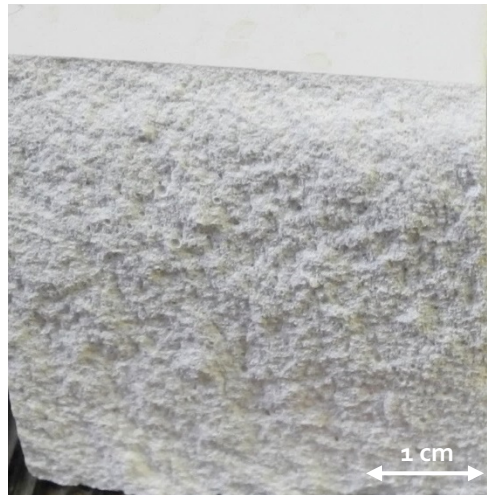
État solide :

- Couleur : matrice blanche, rares particules colorées (noir, orange, ocre clair).
- Texture (selon rapports massiques E/P et eau/poudre) : surfaces contraintes très lisses ; plus le taux E/P est concentré et plus la matière est solide, compacte, dense et cohésive ; plus la concentration en carbonate de calcium est augmentée et plus le mélange semble compact, mais de faible cohésion et poudreux.
- Porosité apparente (selon rapports massiques E/P et eau/poudre) : plus la formulation est concentrée en poudre (hémihydrate de sulfate de calcium et carbonate de calcium), plus la matrice semble peu poreuse ; le carbonate de calcium s'immisce dans la porosité du plâtre.

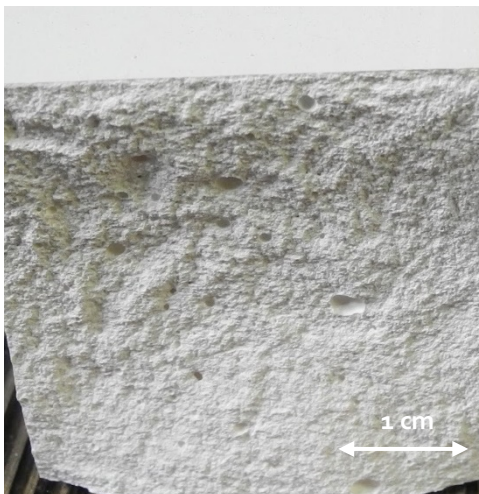
Aspects visuels à l'état solide



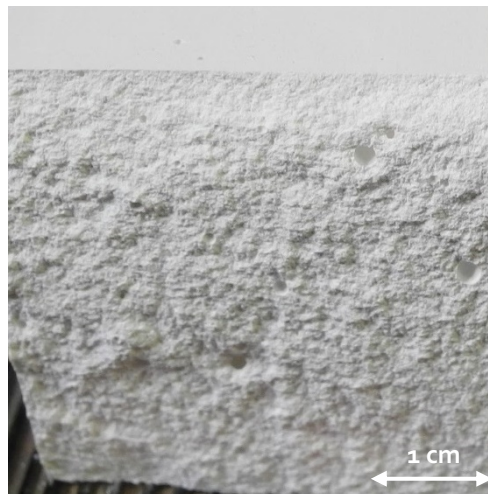
E/P 0,7 ratio 1-0,5 CaCO₃



E/P 0,9 ratio 1-0,5 CaCO₃



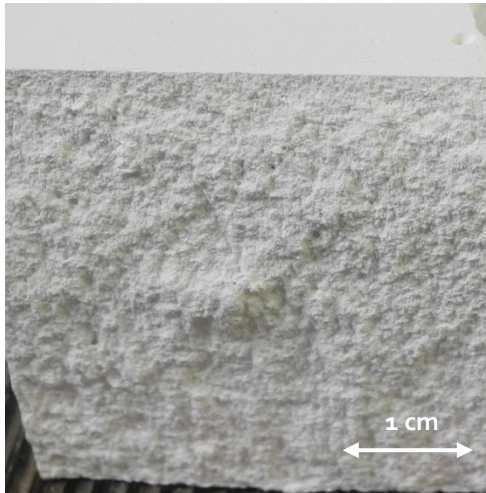
E/P 0,7 ratio 1-1 CaCO₃



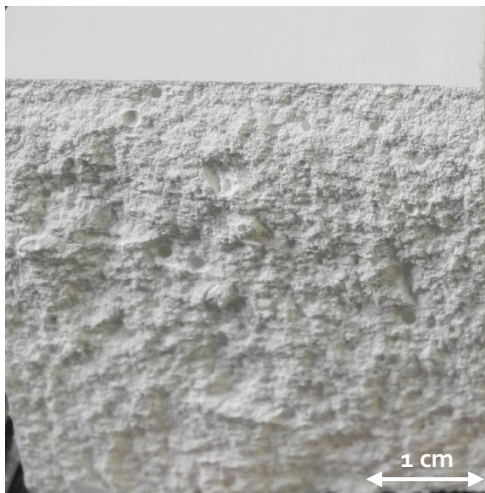
E/P 0,9 ratio 1-1 CaCO₃



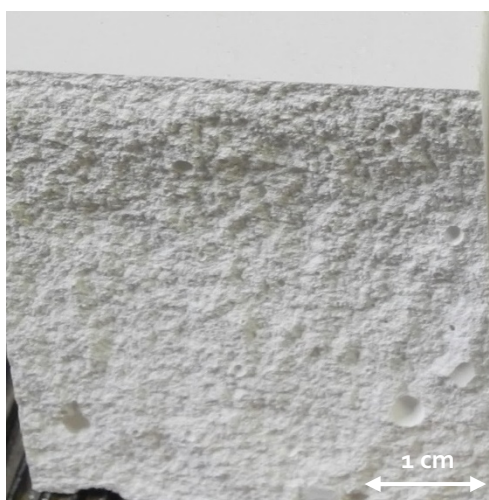
E/P 0,9 ratio 1-1,5 CaCO₃



E/P 1,1 ratio 1-0,5 CaCO₃



E/P 1,1 ratio 1-1 CaCO₃



E/P 1,1 ratio 1-1,5 CaCO₃

Description

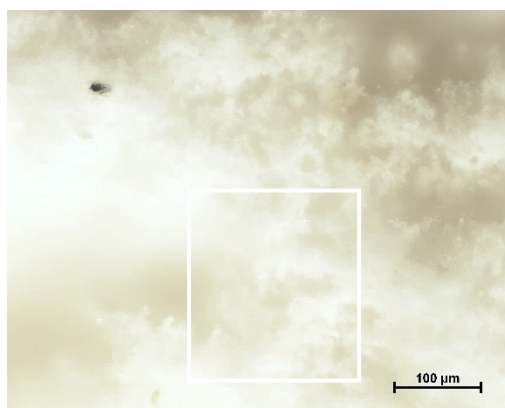
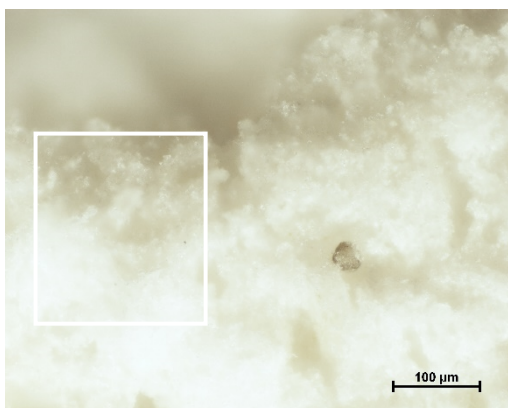
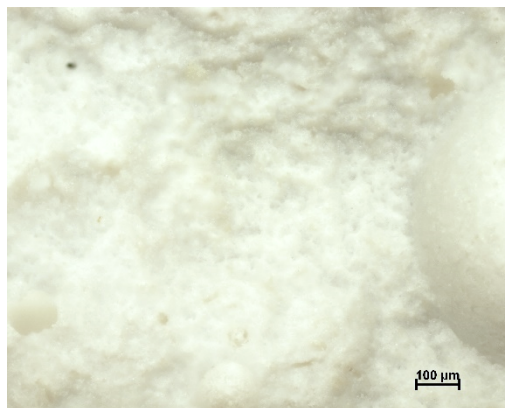
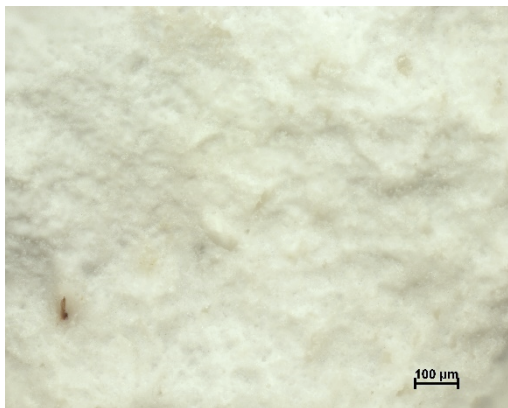
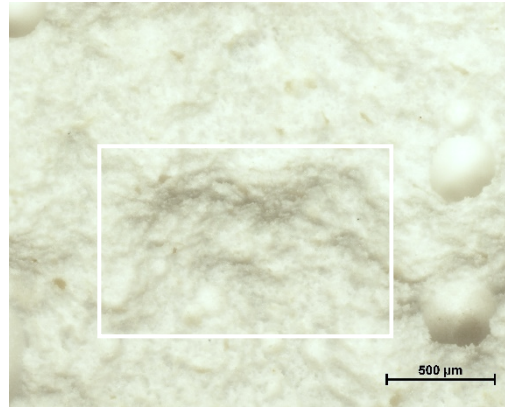
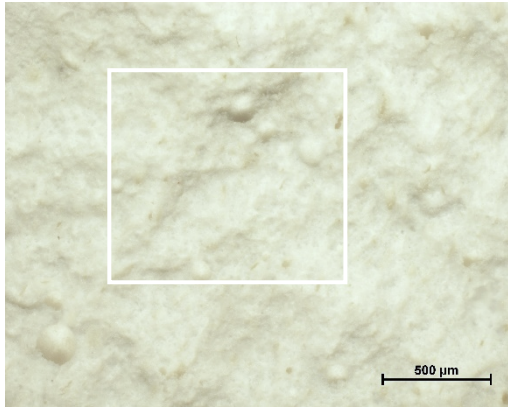
Les formulations additionnées de carbonate de calcium ont une texture qui semble plus poudreuses et moins homogène que les préparations de plâtre seul. Les plans de cassure montrent des surfaces relativement irrégulières.

Plus la quantité de poudre de plâtre et de CaCO₃ augmente, et plus la matrice est dense et compacte, comme pour E/P = 0,7 à ratio 1-1 ou E/P = 0,9 à ratio 1-1,5 qui présente des strates sur le plan de cassures.

L'augmentation de la quantité d'additif CaCO₃ semble densifier le substrat et lui donner un aspect plus poudreux, très certainement parce que la matrice liante ne compense pas suffisamment la quantité de poudre non liante.

Microstructure*

Images au microscope optique



E/P 0,7 ratio 1-1 CaCO₃
x 5, x 10, x 20

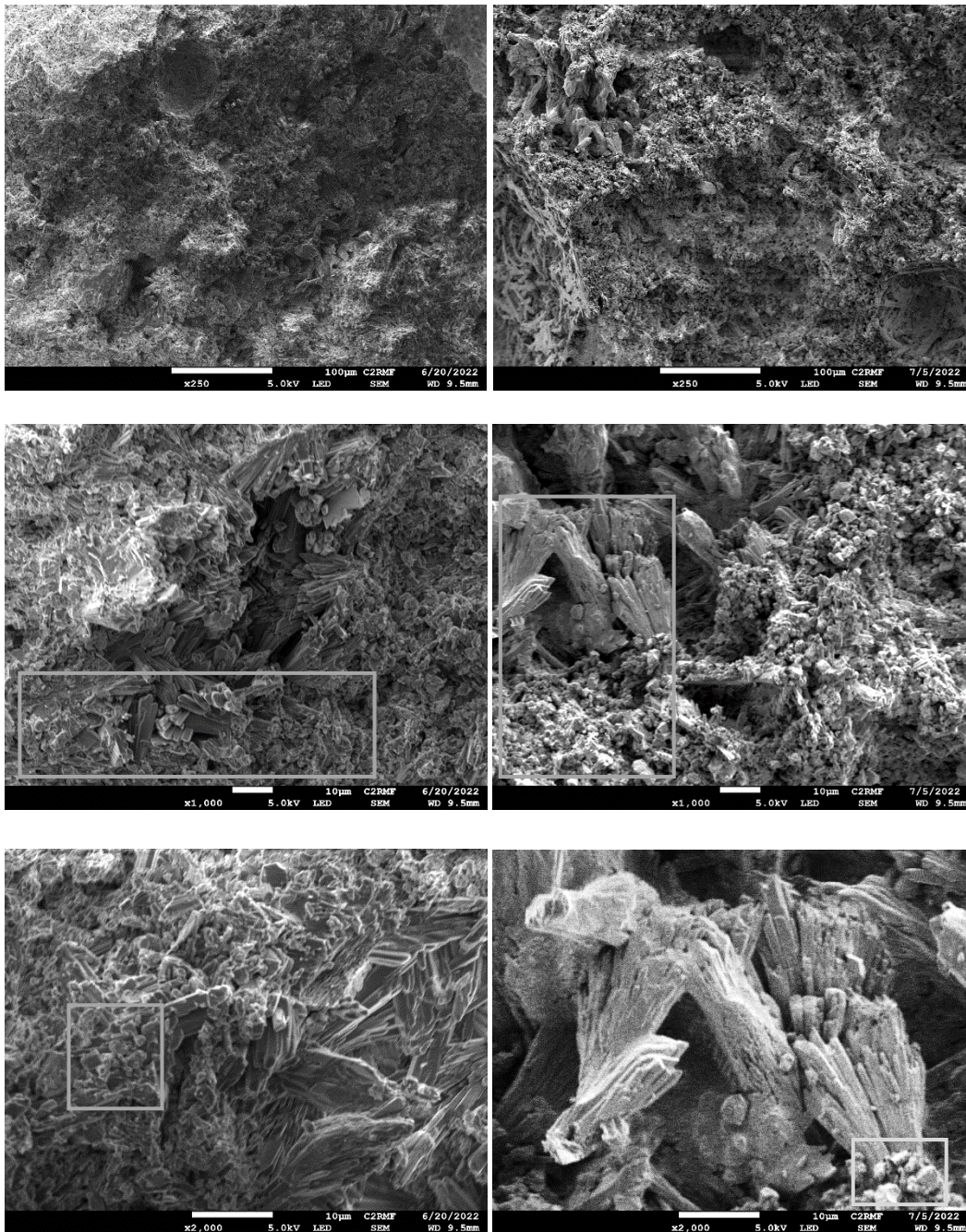
E/P 1,1 ratio 1-1 CaCO₃
x 5, x 10, x 20

* Les observations en microscopie ont été menées sur des éprouvettes aux taux de gâchage représentatifs des gammes présentes. Pour comparaison, les formulations à E/P 0,7 et 1,1 et ratio 1-1 d'hémihydrate de sulfate de calcium-carbonate de calcium sont présentées, représentatives des tendances observées. Pour complément, les photographies des plans de cassure des éprouvettes prismatiques peuvent être consultées au chapitre IV.

Description

Les matrices sont caractérisées par le taux de gâchage E/P ainsi que par la quantité de carbonate de calcium. Comme dans un mélange de plâtre et d'eau simple, plus le rapport E/P est concentré et plus la matrice est compacte et dense. Au contraire, quand la quantité d'eau augmente, la matrice devient plus ouverte, moins compacte, et un aspect poudreux est observable sur les plans de cassure et d'observation. Avec l'ajout de carbonate de calcium, la matrice est modifiée car les cristaux de CaCO_3 prennent place entre les cristaux de gypse. L'aspect compact et dense est donc toujours visible, mais la texture devient plus poudreuse et moins cohésive. Ceci est plus facilement identifiable à grossissement important (x 10 et x 20), avec des cristaux « libres » plus facilement observables. À plus faible concentration en poudre, les bulles d'air semblent plus grosses et les reliefs du plan de cassure de l'éprouvette sont plus accentués : la matrice étant moins cohésive, il se produit une rupture moins nette entre les amas de cristaux moins concentrés ; contrairement aux ruptures presque planes des mélanges très concentrés en poudre et en matrice liante (plâtre).

Images au microscope électronique à balayage



**E/P 0,7 ratio 1-1 CaCO₃
mode LED
x 250, x 1000, x 2000**

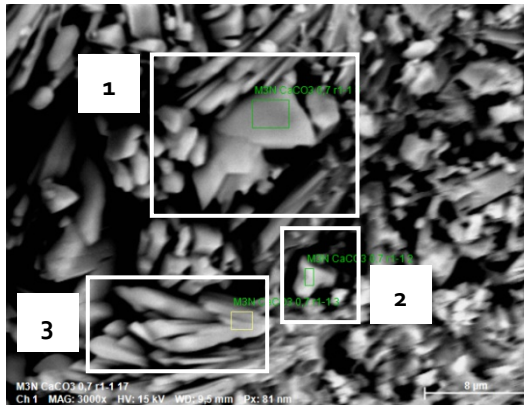
**E/P 1,1 ratio 1-1 CaCO₃
mode LED
x 250, x 1000, x 2000**

Description

Les microstructures des deux types de mélanges présentés sont très différentes en raison des concentrations de matrice liante et d'additifs. Les formulations plus concentrées en poudres d'hémihydrate de sulfate de calcium et de carbonate de calcium ont des structures très denses, très compactes, avec des amas de cristaux aciculaires très serrés dans lesquels se sont incrustés les cristaux de CaCO_3 remplissant la porosité générale de la matrice. À fort grossissement, les très petites particules de CaCO_3 sont visibles parmi les cristaux aciculaires tassés et enchevêtrés de plâtre. À concentration en matrice liante plus basse (E/P plus élevé), les structures sont plus ouvertes, moins denses et moins compactes. Les cristaux de plâtre ont une croissance plus importante et leur taille est légèrement supérieure à celles des taux de gâchage plus concentrés, bénéficiant de moins d'eau disponible. Dans toutes les conditions de concentration, le CaCO_3 remplit les espaces intergranulaires ; les particules, homogènes en dimensions et en formes, sont reconnaissables parmi les amas de cristaux aciculaires du plâtre pris.

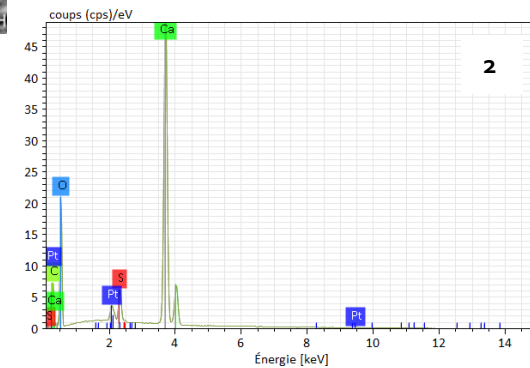
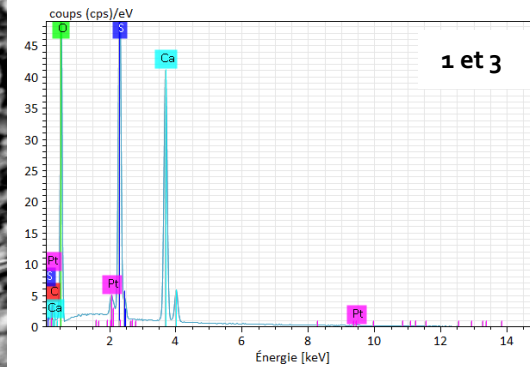
Composition chimique

Spectre-type



Formulation E/P 0,7 à ratio 1-1 CaCO₃
mode LED x 3000

Les points 1 et 3 sur des cristaux formellement identifiés comme du plâtre, avec une macle et des cristaux aciculaires, sont composés de soufre S, de calcium Ca et d'oxygène O, caractéristiques de la formule du gypse. Le pointé 2, sur une particule irrégulière et de petite dimension, révèle essentiellement du calcium Ca.



Le pic du soufre S étant plus bas que sur les identifications du sulfate de calcium, l'élément est estimé être du carbonate de calcium.

Propriétés mécaniques à l'état fluide et solide

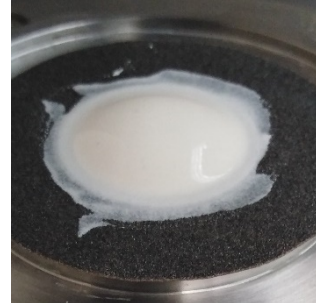
État fluide



E/P 0,7 ratio 1-0,5 CaCO₃



E/P 0,9 ratio 1-0,5 CaCO₃



E/P 1,1 ratio 1-0,5 CaCO₃



E/P 0,7 ratio 1-1 CaCO₃



E/P 0,9 ratio 1-1 CaCO₃



E/P 1,1 ratio 1-1 CaCO₃



E/P 0,9 ratio 1-1,5 CaCO₃



E/P 1,1 ratio 1-1,5 CaCO₃

Formulation	Consistance en Pa.s ^{0,5}	Indication rhéologique	Usages	Temps de travail en minutes
E/P 0,7 1-0,5 CaCO ₃	6	Texture intermédiaire	Modelage ou moulage	≈ 10-15
E/P 0,7 1-1 CaCO ₃	41,6	Texture pâteuse	Modelage	≈ 5-10
E/P 0,9 1-0,5 CaCO ₃	1	Texture liquide	Moulage	≈ 20
E/P 0,9 1-1 CaCO ₃	10,3	Texture intermédiaire	Modelage ou moulage	≈ 15-20
E/P 0,9 1-1,5 CaCO ₃	30,3	Texture pâteuse	Modelage	≈ 10-15
E/P 1,1 1-0,5 CaCO ₃	0,5	Texture liquide	Moulage	≈ 20
E/P 1,1 1-1 CaCO ₃	3,2	Texture intermédiaire	Modelage ou moulage	≈ 15-20
E/P 1,1 1-1,5 CaCO ₃	30,3	Texture pâteuse	Modelage	≈ 15

Données selon le modèle d'Herschel-Bulkley, avec l'indice de structuration $n = 0,5$.

Un apport de CaCO₃, même minime, permet de donner une consistance plus épaisse au plâtre seul, en augmentant l'apport de matière sèche, et rend le matériau modelable, avec une très bonne tenue à la spatule. Ainsi, les formulations sont majoritairement classées dans les gammes intermédiaire ou pâteuse, à l'exception des mélanges à E/P = 0,9 et 1,1 à ratio 1-0,5 qui sont plus liquides, avec une faible concentration en matrice liante et une faible addition de CaCO₃. Ces formulations sont utilisables pour des usages variés. Les grains fins de CaCO₃ mélangés au plâtre améliorent la tenue et la texture de la formulation, qui semble plus homogène, sans empêcher la prise, malgré un léger effet retardateur. Plus les mélanges sont chargés en plâtre et en CaCO₃, plus la diffusion de l'eau de gâchage dans le substrat original est limitée.

Le mélange E/P = 0,7 ratio 1-1 est presque « sec » et très compact ; il est relativement difficile à travailler. L'ouvrabilité est limitée à quelques minutes et donc la formulation doit être utilisée rapidement et/ou sur des lacunes aux dimensions moyennes voire petites. Dans le cas de pièces aux dimensions importantes, la technique de mise en œuvre *in situ* en isolant le plan à combler avec un film étirable est plus adaptée car les finitions peuvent être reprises après le séchage, sans se soucier de l'ouvrabilité. Au contraire, ceci peut être avantageux lorsque les délais d'interventions sont limités ou que la position du comblement, sur un plan vertical par exemple, nécessite une prise rapide ou une texture sans écoulement.

Le mélange à E/P = 0,9 ratio 1-0,5 présente aussi une fluidité suffisante pour être coulé dans un moule, ou avoir un bon écoulement dans les anfractuosités d'un plan de cassure ou d'une zone à combler. Le mélange à E/P = 0,9 ratio 1-1 a une texture intermédiaire, permettant à la fois un travail par modelage mais aussi par moulage. Le mélange à E/P = 0,9 ratio 1-1,5 est pâteux et permet un travail de modelage aux outils. L'apport d'eau semble moyen à limité selon le ratio de CaCO₃. L'ouvrabilité équivalente à une dizaine de minutes permet un travail plutôt confortable.

Les mélanges à E/P 1,1 et CaCO₃ à ratio 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5 ont des textures variables, de liquide à pâteuse selon la concentration en carbonate de calcium. Les trois types de texture permettent des mises en œuvre par modelage à la spatule ou aux outils, ou par coulée. Enfin, l'ouvrabilité de ces mélanges peu chargés en plâtre conditionne un travail à plat, sans risque d'écoulement prématuré du matériau, tout en offrant une durée suffisante pour la mise en place et le façonnage.

État solide

Formulation	Rapport massique eau/poudre	Masse volumique en kg.m ⁻³	Modules <i>E</i> et <i>E</i> dynamique en GPa	Résistance maximale à la compression en MPa	Résistance maximale à la flexion 4 points en MPa	Renfort
E/P 0,7 1-0,5 CaCO ₃	0,47	1288	5,85 et 7,48	14,15	3,24	élevé
E/P 0,7 1-1 CaCO ₃	0,35	1494	7,66 et 8,70	11,98	2,78	élevé
E/P 0,9 1-0,5 CaCO ₃	0,6	1143	3,66 et 4,57	8,53	1,85	moyen
E/P 0,9 1-1 CaCO ₃	0,45	1314	4,92 et 5,52	9,62	2,38	élevé
E/P 0,9 1-1,5 CaCO ₃	0,36	1447	2,99 et 4,74	5,90	1,26	moyen
E/P 1,1 1-0,5 CaCO ₃	0,73	1028	2,32 et 3,10	4,47	1,36	faible
E/P 1,1 1-1 CaCO ₃	0,55	1175	3,12 et 3,61	5,85	1,46	moyen
E/P 1,1 1-1,5 CaCO ₃	0,44	1285	3,18 et 4,15	4,92	1,63	faible

Les mélanges à E/P = 0,7 et CaCO₃ à ratio 1-0,5 et 1-1 sont des mélanges assez concentrés en hémihydrate de sulfate de calcium et présentent un renfort structurel important. Les formulations peuvent être employées pour la confection de pièce rapportée en raison de la résistance élevée.

Le mélange E/P = 0,9 à ratio 1-1 de plâtre et de carbonate de calcium a présenté les résistances mécaniques solides les plus élevées des trois formulations à E/P = 0,9 + CaCO₃. Cette formulation est pâteuse et aussi résistante qu'un plâtre seul à E/P > 0,8. Elle peut donc être employée en cas de renfort structurel important, avec un travail par modelage à la spatule. Les mélanges à E/P = 0,9 ratio 1-0,5 et 1-1,5 ont des résistances moyennes à l'état solide, permettant donc d'obtenir des formulations de comblement aux résistances inférieures à celle du plâtre seul ou du plâtre original.

Les mélanges à E/P 1,1 et CaCO₃ à ratio 1-0,5 ; 1-1 ; 1-1,5 ont des résistances mécaniques peu élevées, en raison de la faible proportion de matrice liante. Les formulations sont adaptées à des critères spécifiques, sans renfort ou à faible renfort structurel, par exemple en cas de besoin de légèreté ou de faible densité du matériau de comblement. La porosité élevée de ces mélanges peut assurer un effet tampon dans les conditions de conservation à variations climatiques importantes, ou encore en cas de présence de sels dans le matériau original. La microstructure très ouverte du matériau de comblement ne risque pas de créer un effet barrière car elle absorbe une partie de l'humidité.

Sulfate de calcium dihydraté (plâtre), carbonate de calcium, dioxyde de titane

**Taux de gâchage E/P 1,5
à ratio 1-2 de CaCO₃ et à 2 % de TiO₂**

Caractéristiques générales

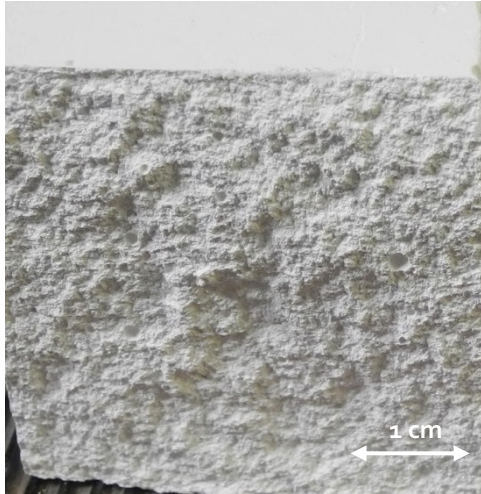
État fluide :

- Texture : bonne tenue à la spatule mais formulation suffisamment liquide pour la coulée.
- Ouvrabilité : la formulation étant peu concentrée en matrice faisant prise, le temps de travail est relativement long, de plusieurs dizaines de minutes, avec un effet ralentisseur de prise dû à la concentration élevée en additifs de CaCO₃ et TiO₂.

État solide :

- Couleur : matrice très blanche, rares particules colorées (noir, orange, ocre clair).
- Texture : surface contrainte lisse et fine, mais poudreuse et d'aspect peu cohésif en plan de cassure ou brut.
- Porosité apparente : porosité élevée et nombreux espaces intergranulaires car peu de matrice liante de sulfate de calcium dans cette formulation, malgré la présence interstitielle des additifs.

Aspects visuels à l'état solide



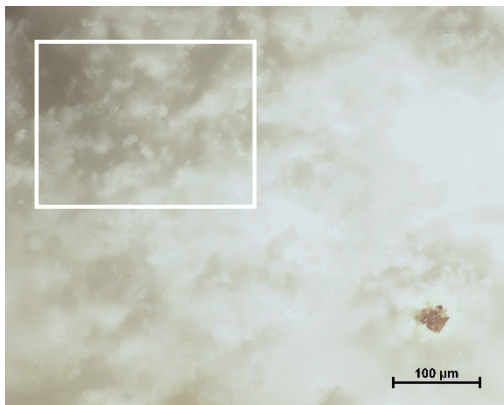
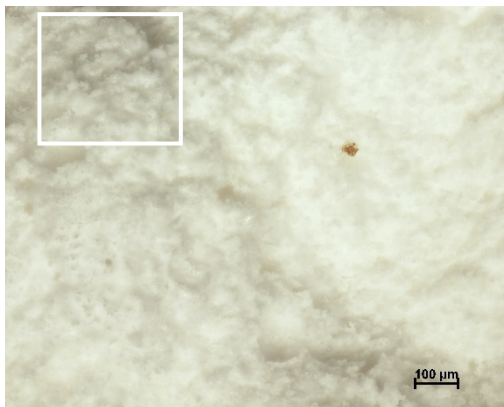
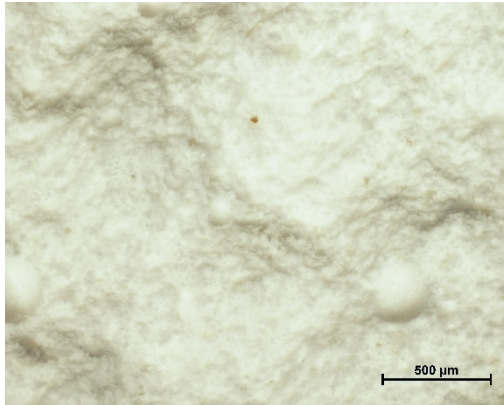
E/P 1,5 1-2 CaCO₃ à 2 % de TiO₂

Description

La formulation à E/P = 1,5 ratio 1-2 de CaCO₃ et à 2 % a un aspect dense et hétérogène, avec une surface à l'aspect poudreux caractéristique des mélanges très concentrés en charge inerte et à faible dosage de plâtre. La présence de dioxyde de titane à 2 % ne semble pas évidente à l'œil nu, même si la blancheur du matériau pourrait être accentuée.

Microstructure

Images au microscope optique

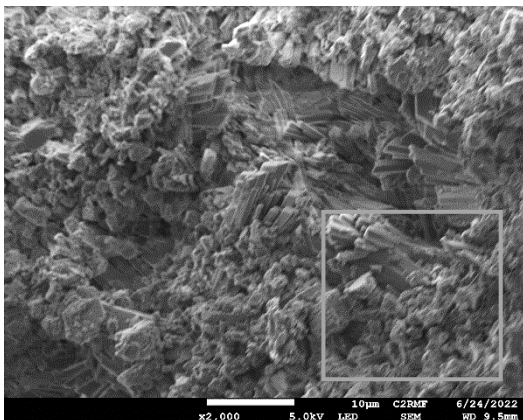
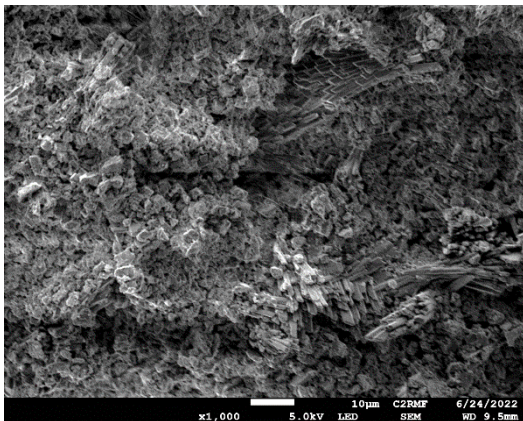
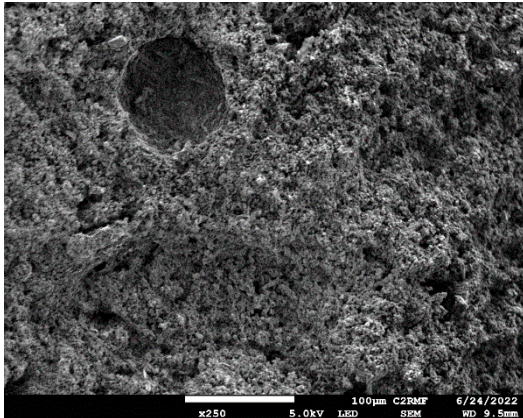


Description

À l'observation visuelle, la matrice semble dense et très concentrée en poudre mais peu compacte et peu cohésive. Les plans de cassure de l'éprouvette comportent des reliefs importants, indiquant des ruptures irrégulières. Des bulles d'air de tailles variables sont présentes. La forte concentration d'additifs et la faible concentration de matrice liante produisent une matrice aérée, avec des cristaux peu liés, bien visibles à fort grossissement.

E/P 1,5 1-2 CaCO_3 à 2 % de TiO_2
x 5, x 10, x 20

Images au microscope électronique à balayage



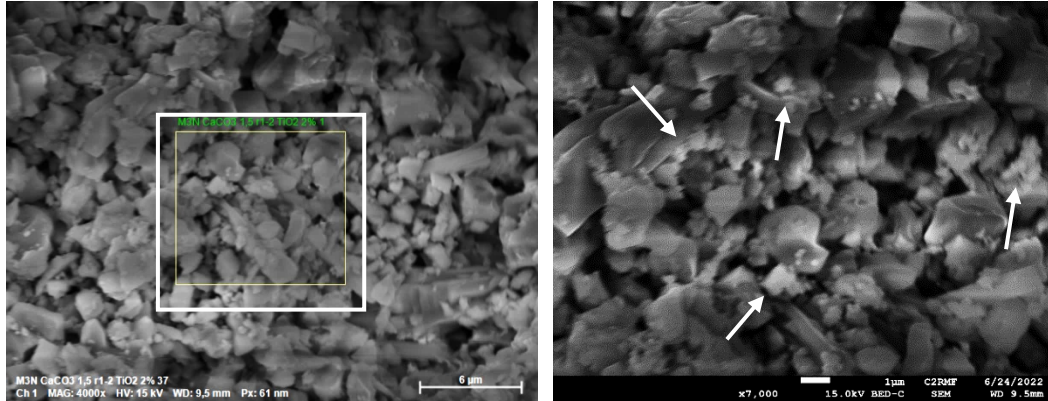
Description

La structure est dense et chargée de nombreux petits cristaux irréguliers, associés à des cristaux aciculaires caractéristiques du plâtre. De nombreux espaces intergranulaires sont visibles, rendant la structure légère, faiblement résistante, et de texture poudreuse sur les plans de cassure. Les cristaux et particules de carbonate de calcium sont présents autour d'agrégats de cristaux de plâtre. De très fines particules rassemblées peuvent être distinguées à fort grossissement, pouvant correspondre au dioxyde de titane. À ces proportions, le mélange de carbonate de calcium et de plâtre est nettement identifiable, en comparaison d'une structure de plâtre seul.

E/P 1,5 1-2 CaCO₃ à 2 % de TiO₂
mode LED
x 250, x 1000, x 2000

Composition chimique

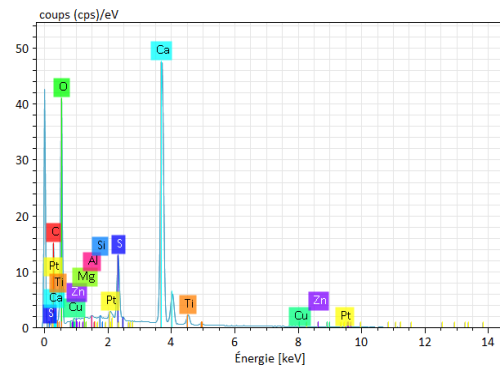
Spectre-type



Observations de la formulation à E/P 1,5 1-2 CaCO₃ à 2 % de TiO₂ en mode LED à x 4000 et x 7000

Comme les mélanges précédents, l'analyse de la formulation identifie les éléments constitutifs du plâtre, avec notamment le soufre S, le calcium Ca et l'oxygène O, mais également ceux du carbonate de calcium avec un pic plus important en carbone C et plus bas en soufre S.

L'addition de dioxyde de titane est identifiable en analysant une zone large. Les éléments correspondent à la formule du produit renseignée sur la fiche technique du fournisseur : du titane Ti, de l'oxygène O, de l'alumine (Al₂O₃) et de la silice (SiO₂). Des traces de magnésium Mg, de zinc Zn et de cuivre Cu sont aussi révélées pouvant provenir des différents matériaux analysés.



Les grains de TiO₂, inférieurs à 1 µm, peuvent être repérés visuellement car ils sont très fins par rapport aux cristaux de plâtre ou de carbonate. En mode LED, les contrastes chimiques permettent aussi dans ce cas de distinguer les particules de TiO₂. Elles apparaissent plus claires et plus blanches que la matrice de plâtre et de carbonate de calcium.

Propriétés mécaniques à l'état fluide et solide

État fluide



E/P 1,5 1-2 CaCO₃ à 2 % de TiO₂

Formulation	Consistance en Pa.s ^{0,5}	Indication rhéologique	Usages	Temps de travail en minutes
E/P 1,5 1-2 CaCO ₃ + 2 % de TiO ₂	12,6	Texture intermédiaire	Modelage ou moulage	≈ 20-25

Données selon le modèle d'Herschel-Bulkley, avec l'indice de structuration $n = 0,5$.

La formulation à l'état fluide présente un intérêt puisqu'elle a une texture intermédiaire, offrant à la fois la possibilité de modeler le matériau à la spatule ou aux outils, mais aussi de le couler dans un moule. La formulation est donc adaptée à des mises en œuvre *in situ*, dans des plans horizontaux à verticaux. Elle peut être comparée à une texture de crème onctueuse, grâce à la forte proportion de CaCO₃, et la finesse de la taille des grains. L'ouvrabilité longue permet un travail confortable. La rétention de l'eau de gâchage semble assez élevée grâce à la forte concentration de CaCO₃.

État solide

Formulation	Rapport massique eau/poudre	Masse volumique en kg.m ⁻³	Modules E et E dynamique en GPa	Résistance maximale à la compression en MPa	Résistance maximale à la flexion 4 points en MPa	Renfort
E/P 1,5 1-2 CaCO ₃ à 2 % de TiO ₂	0,5	1253	2,8 et 2,6	2,62	0,89	faible

Comme tous les mélanges peu concentrés en plâtre, ou matrice liante, la résistance mécanique est faible. Cette formulation a donc des usages spécifiques, et semble plus adaptée à des compléments esthétiques, nécessitant un matériau dense mais non compacte, ni trop résistant.

Sulfate et carbonate de calcium (craie de Bologne) et colle animale avec et sans dioxyde de titane à 2 %*

Caractéristiques générales

État fluide :

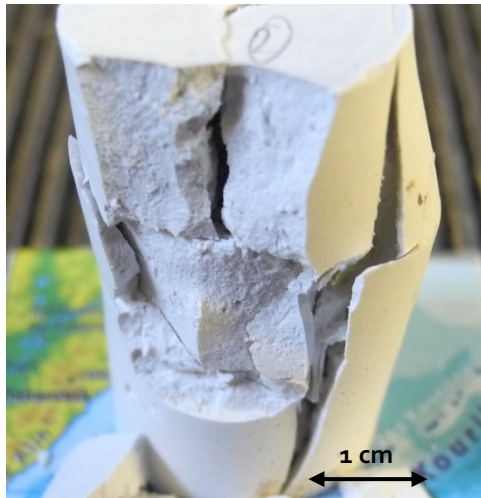
- Texture (selon préparation) : liquide (formulation en apprêt) ou pâteuse.
- Ouvrabilité : en raison du liant de colle animale préparée à chaud, les mélanges en pâte et en apprêt liquide doivent être utilisés immédiatement après la préparation afin de conserver la texture, ou maintenus à température de liquéfaction de la colle pour l'apprêt (≈ 40 °C) en veillant à garder la même concentration de mélange.

État solide :

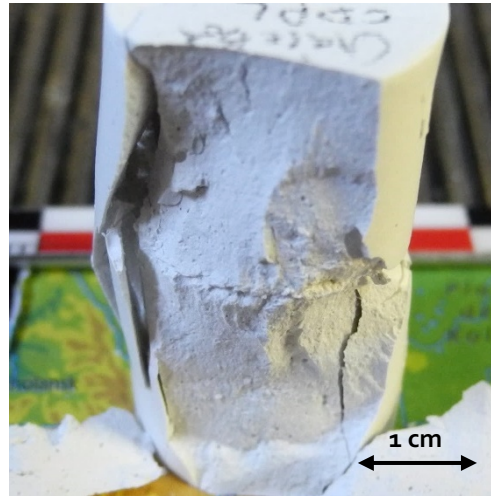
- Couleur : matrice blanche, teinte légèrement grisée, quelques cristaux brillants, nombreuses particules colorées (noires, orange), zones à forte concentration de colle plus foncées et à la teinte ocre
- Texture : surface contrainte lisse, très cohésive, et très compacte en préparation type pâte, brillance et aspect encollé identifiables
- Porosité apparente : matrice relativement aérée avec bulles d'air et espaces intergranulaires visibles

* Ces formulations ont été testées sous différentes formes en essais mécaniques solides (préparation en pâte type gros blanc) et rhéologiques (préparation liquide type apprêt). Elles ne sont donc pas incluses dans l'arborescence (page 446). La pâte n'a pas été testée en flexion car la technique de mise en œuvre n'est adaptée à la fabrication d'éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm, aux dimensions trop importantes entraînant un séchage hétérogène, du retrait et des cassures. L'apprêt liquide, monté couche à couche, n'a pas été testé dans cette configuration d'essais mécaniques.

Aspects visuels à l'état solide



Pâte de craie de Bologne et colle animale



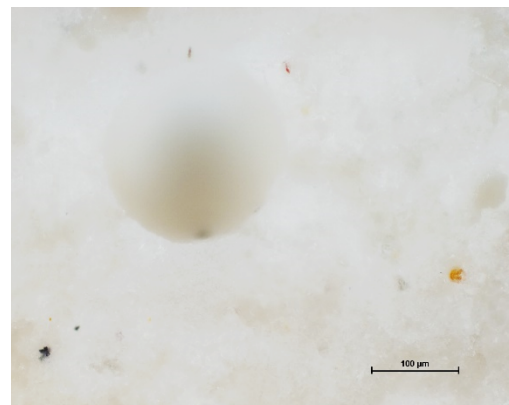
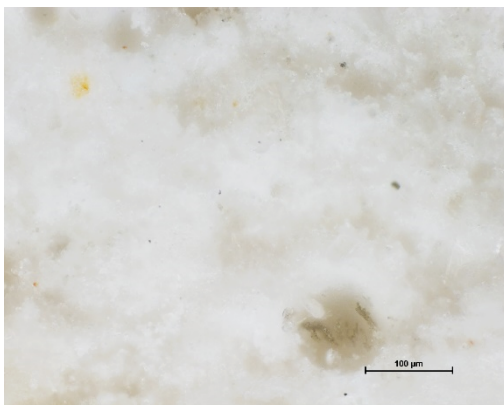
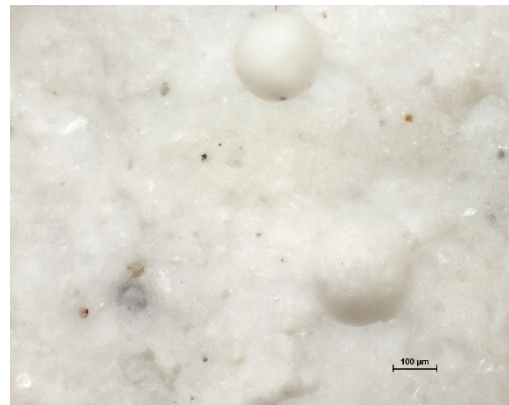
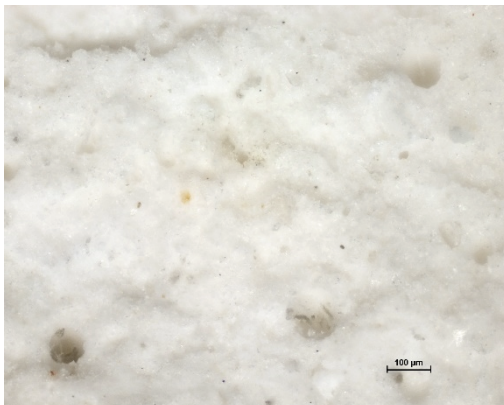
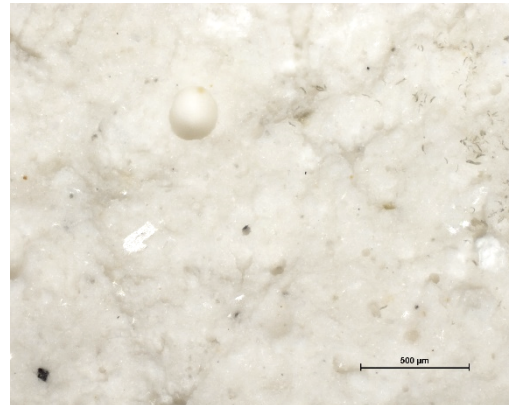
Pâte de craie de Bologne et colle animale
à 2 % de TiO₂

Description

La formulation de craie de Bologne et de colle animale, avec ou sans dioxyde de titane, a été formulée en pâte pour les essais de compression, permettant d'obtenir un visuel à l'état solide. Les plans de cassure permettent de voir les matrices très fortement liées et compactes. La présence d'un liant organique est visible par la teinte sombre et l'aspect de la matrice qui paraît peu poreuse. À cette vue et à cette faible concentration de 2 %, la présence de dioxyde de titane n'est pas identifiable.

Microstructure

Images au microscope optique



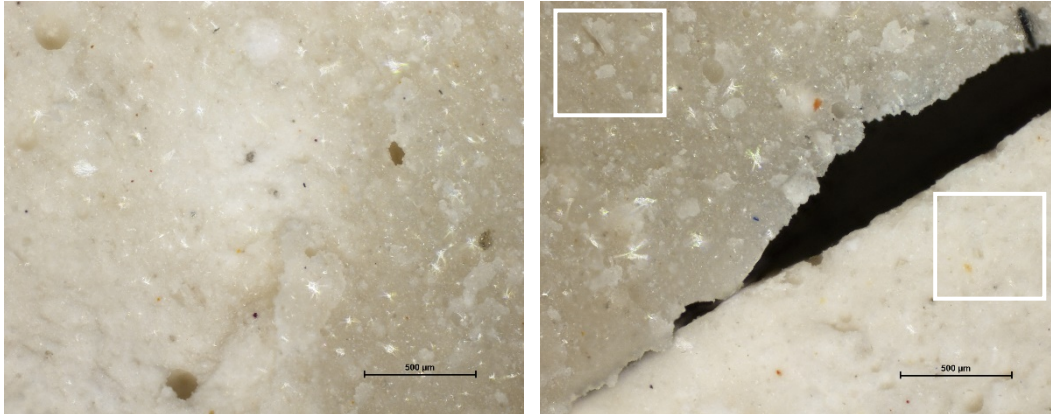
Craie et colle
x 5, x 10, x 20

Craie, colle, et dioxyde de titane
x 5, x 10, x 20

Descriptions

La matrice est constituée d'un assemblage de cristaux, liés par la colle animale. Le plan de cassure de l'éprouvette a une certaine brillance et la matrice observée semble très dure et cohésive, malgré les différences de tailles de grains, les petites aspérités ou les bulles d'air. Il n'y a pas de différence apparente entre la formulation incluant 2 % de dioxyde de titane et celle sans additif marqueur. Des développements de micro-organismes sont visibles dans les cavités de la matrice (filaments grisâtres).

Variation selon la concentration en liant

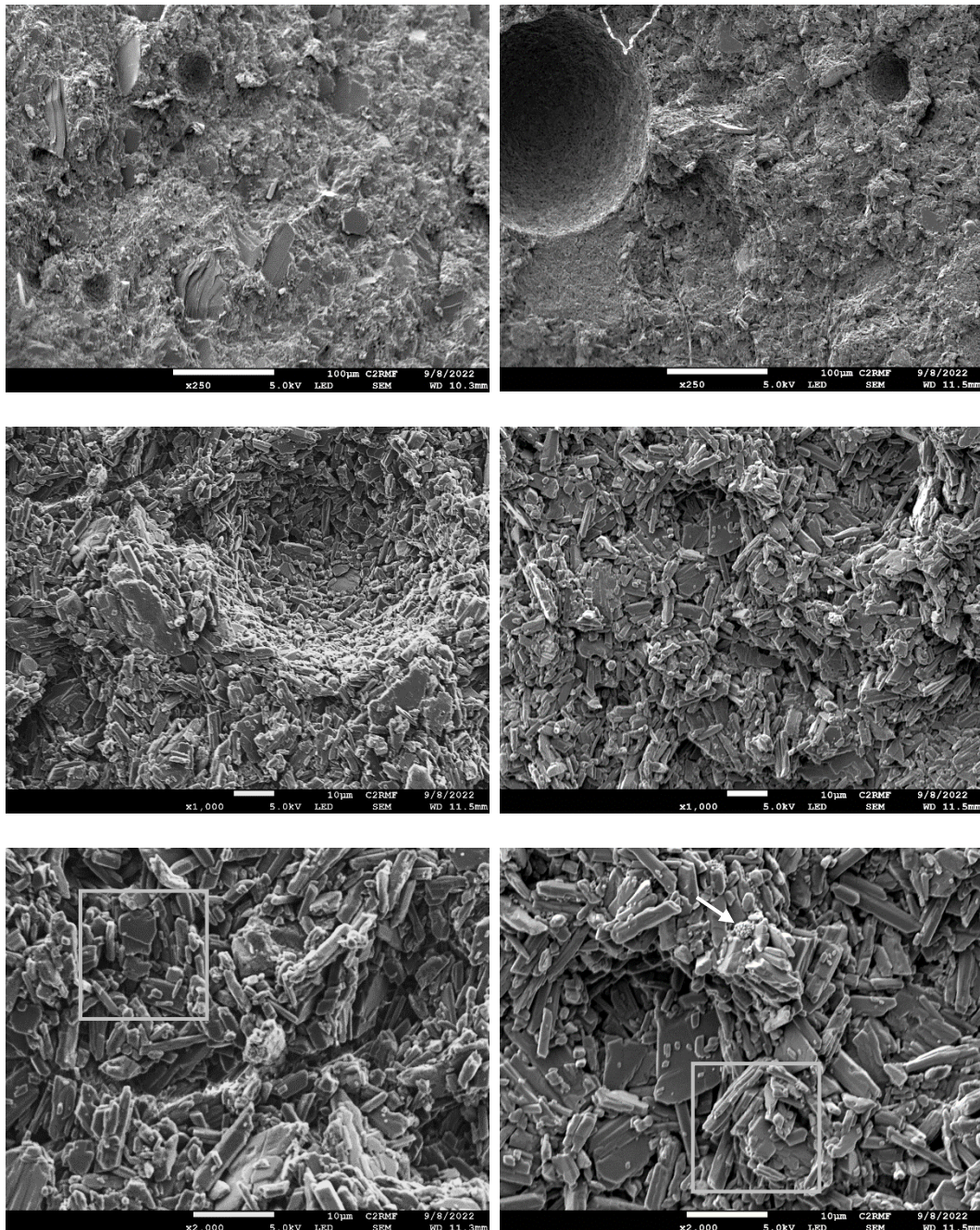


**Éprouvette du mélange craie et colle,
au microscope optique x 5,
zones de concentration importante en colle
animale.**

Description

La matrice est plus colorée, de teinte ocre, lorsque la concentration en colle augmente. L'aspect devient translucide et la différence de tailles de grain est bien distinguable. Les plus gros cristaux contrastent fortement, en comparaison d'une matrice homogène (bas à droite) sur laquelle les cristaux ne sont pas facilement observables.

Images au microscope électronique à balayage



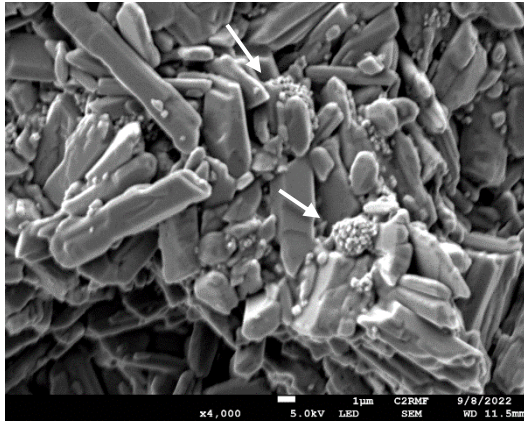
Craie et colle, mode LED
x 250, x 1000, x 2000

Craie, colle, et TiO₂, mode LED
x 250, x 1000, x 2000

Descriptions

La matrice est un amas de cristaux allongés, de plaquettes, et de fragments irréguliers. Certains cristaux ressemblent aux aiguilles du plâtre après l'hydratation et la prise. Sur ces échantillons, il n'a pas été observé d'éléments caractéristiques du CaCO₃ à l'état naturel, comme des fragments de coquilles ou des microfossiles. La matrice générale et les cristaux sont probablement très ressemblants à ceux du gypse à l'état naturel. Le TiO₂ est observable à fort grossissement, avec des amas de très fines particules (< 1 μm), visibles dans les agrégats de craie encollée.

Identification visuelle du dioxyde de titane

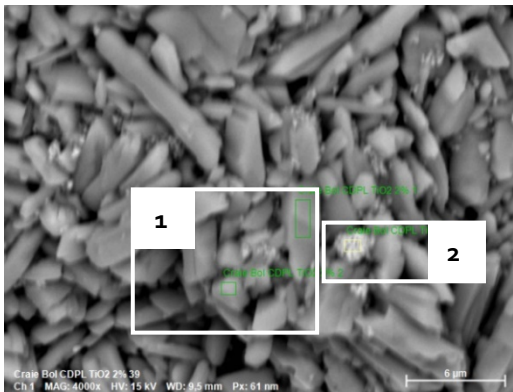


Formulation craie, colle et TiO₂, au microscope électronique à balayage, mode LED, x 4000

En mode LED, il est possible de distinguer les particules de dioxyde de titane, formellement et par différences de contrastes chimiques. Par endroit, les cristaux de la matrice de sulfate et carbonate de calcium sont recouverts d'amas de très petits grains (de taille inférieure à 1 µm). Ces grains ont des formes irrégulières, mais plutôt sphériques. À l'observation visuelle, leur contraste est plus blanc que la matrice de craie de Bologne.

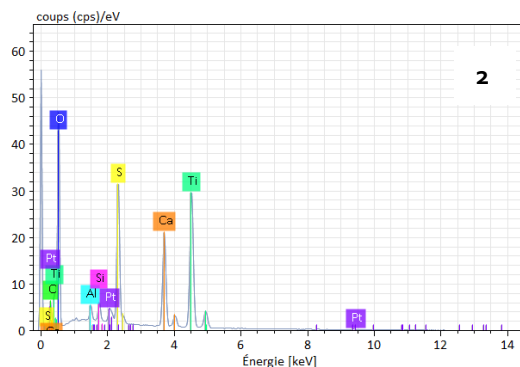
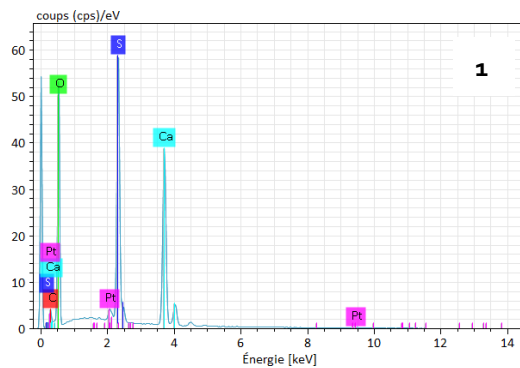
Composition chimique

Spectre-type



Formulation craie, colle et TiO₂, mode LED, x 4000

L'analyse élémentaire révèle la présence majoritaire de soufre S, d'oxygène O et de calcium Ca dans la matrice (pointé 1). Le pic du carbone est plutôt bas et laisse donc penser que cette craie de Bologne est essentiellement composée de sulfate de calcium, et non pas d'un mélange équilibré naturellement de sulfate et de carbonate de calcium.



Le dioxyde de titane est bien identifié. Les éléments correspondent à la formule du produit renseignée sur la fiche technique du fournisseur : du titane Ti, de l'oxygène O, de l'alumine (Al₂O₃) et de la silice (SiO₂).

Propriétés mécaniques à l'état fluide et solide*

* La formulation de type apprêt n'a pas été évaluée par essai mécanique solide. Les indications rhéologiques pour la pâte modelable sont données d'après les observations lors de la préparation des éprouvettes, la matière de ce type de formulation étant trop compacte pour les conditions d'essais rhéologiques de cette étude.

État fluide



Apprêt de craie de Bologne
et de colle animale



Apprêt de craie de Bologne
et de colle animale à 2 % de
TiO₂

Formulation	Consistance en Pa.s ^{0,5}	Indication rhéologique	Usages	Temps de travail en minutes
Craie, colle, avec ou sans TiO ₂	0,4 à 1,1	Apprêt liquide	Coulée ou dépôt au pinceau	≈ 5
Craie, colle, avec ou sans TiO ₂	Non mesurée	Pâte modelable	Modelage	≈ 5-10

Données selon le modèle d'Herschel-Bulkley, avec l'indice de structuration $n = 0,5$.

À l'état fluide, la préparation en apprêt a une texture liquide et souple, légèrement granuleuse en raison de la granulométrie des grains de craie. Le matériau final à l'état fluide semble dense et « lourd », comparé à un apprêt de carbonate de calcium et de colle animale. La présence de TiO₂ ne semble pas modifier les aspects à l'état fluide de cette préparation en apprêt.

Dans ces conditions, la température de la colle employée pour le mélange semble jouer un rôle primordial puisque que le mélange commence à figer en-dessous de 40 °C ou lorsqu'il entre en contact avec un support à température ambiante.

La possibilité de former une pâte modelable ou d'obtenir un film épais peut présenter d'intéressants avantages, selon les situations, par exemple lorsqu'il est nécessaire de combler *in situ* en évitant un apport d'eau ou d'humidité. À frais, la texture de pâte à modeler est avantageuse pour reproduire un motif.

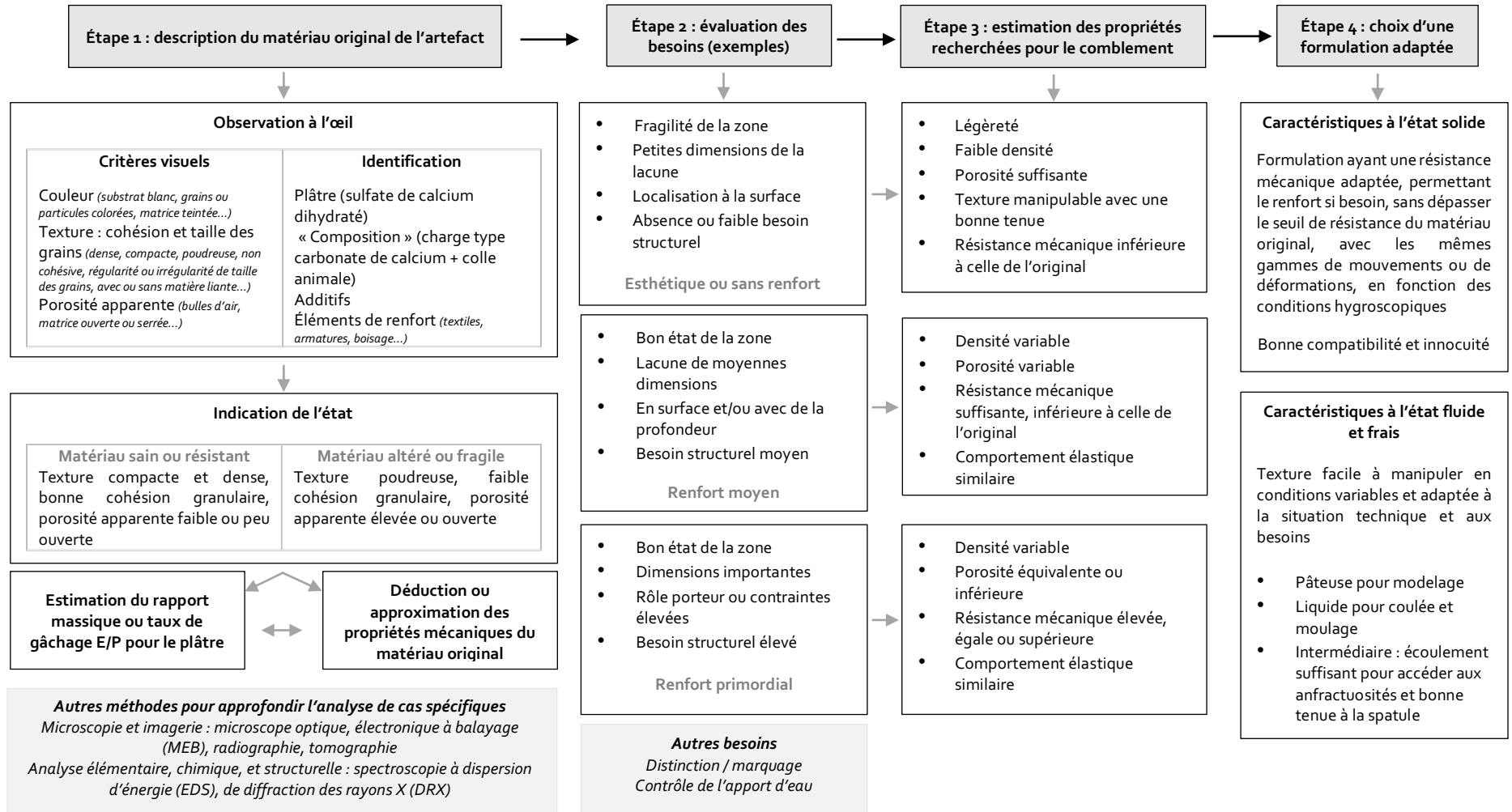
État solide

Formulation <i>En pâte</i>	Masse volumique en kg.m ⁻³	Modules <i>E</i> et <i>E</i> dynamique en GPa	Résistance maximale à la compression en MPa	Résistance maximale à la flexion 4 points en MPa
Craie et colle	1621	/	8,39	/
Craie, colle, et TiO ₂	1592	/	5,98	/

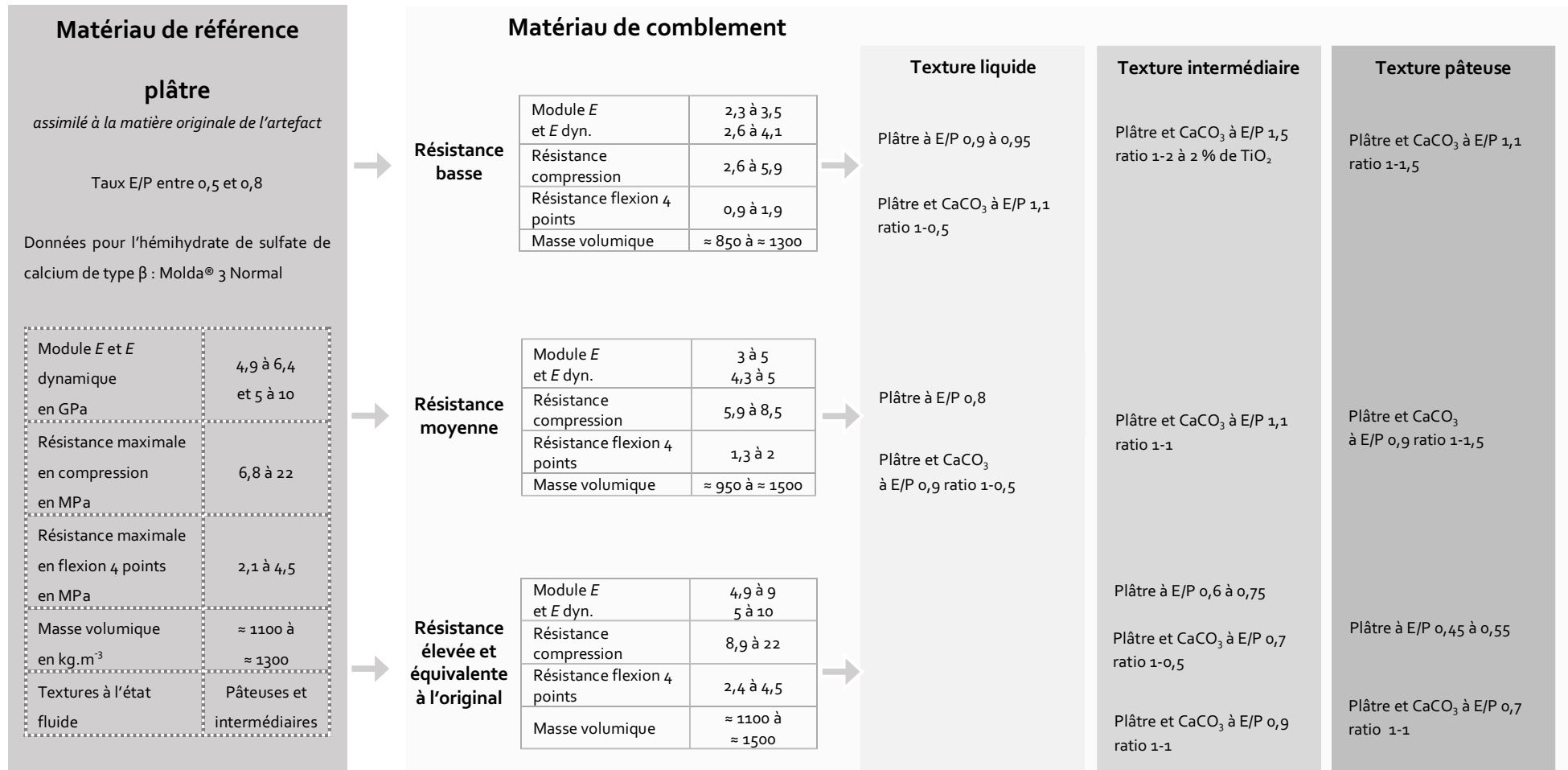
Le mélange constitué d'une charge et d'un liant de type adhésif induit des résistances mécaniques élevées. La pâte à l'état solide a été testée en compression, révélant un matériau d'une grande dureté et résistance à la compression après séchage. L'apprêt liquide a été mesuré lors des essais rhéologiques afin de qualifier la texture, qui est dépendante de la température de chauffe et à la viscosité élevée. La résistance mécanique du mélange en pâte est estimée similaire à celle du mélange simple de carbonate de calcium et de colle animale.

Cette formulation peut également servir au comblement d'artefact en plâtre, lorsque les besoins structurels sont importants ou qu'il est nécessaire de limiter l'apport d'eau liquide dans le substrat, dans le cas où les conditions de conservation permettent l'emploi d'une colle organique qui peut être sensible aux variations hygroscopiques et aux développements de micro-organismes.

Guide de réflexion pour le choix d'une formulation



Arborescence des formulations évaluées



Classification des formulations selon le renfort et la texture

Les éléments techniques sont ici résumés de façon à présenter les formulations en fonction de deux critères : le type de renfort et la texture à l'état frais, pour faciliter le choix lorsqu'une formulation de comblement est considérée. Les données techniques sont renseignées en amont.

	Renfort structurel	Renfort moyen	Faible ou sans renfort
Pâte	Plâtre E/P 0,45 à 0,55	Plâtre CaCO ₃ 0,9 ratio 1-1,5	Plâtre CaCO ₃ 1,1 ratio 1-1,5
	Plâtre CaCO ₃ 0,7 ratio 1-1	Craie de Bologne, colle animale, à 2 % de TiO ₂	
Texture intermédiaire	Plâtre E/P 0,6 à 0,75	Plâtre CaCO ₃ 1,1 ratio 1-1	Plâtre CaCO ₃ 1,5 ratio 1-2 à 2 % de TiO ₂
	Plâtre CaCO ₃ 0,7 ratio 1-0,5		
	Plâtre CaCO ₃ 0,9 ratio 1-1		
Liquide	-	Plâtre E/P 0,8 à 0,95	Plâtre CaCO ₃ 1,1 ratio 1-0,5
		Plâtre CaCO ₃ 0,9 ratio 1-0,5	

Tableau présentant les formulations adaptées selon les besoins en renfort structurel et la texture à la l'état frais.

Synthèse

Ce livret technique a pour objectif de présenter une sélection de formulations composées de sulfate de calcium, représentant à la fois le matériau constitutif ou de mise en œuvre de l'artefact avec des préparations de plâtre à taux de gâchage entre $E/P = 0,5$ à $0,8$ ainsi que différentes formulations utilisables en comblement de lacune ou de perte de matière originale, introduisant des additifs. Les données physico-chimiques caractérisées dans les travaux de recherche doctorale peuvent être résumées et proposées aux professionnel·les, pour assister leur pratique lors des interventions de comblement. Les matériaux choisis pour combler et consolider les artefacts peuvent être divers et variés, selon les besoins techniques et les conditions de travail, avec autant de solutions matérielles que de contextes de conservation-restauration. Pour définir la formulation de comblement la plus adaptée, différents paramètres et critères sont à considérer, selon un processus de réflexion tel que celui proposé à la page 453. L'axe d'approche envisagé ici est celui de la résistance mécanique nécessaire, à laquelle sont associées les notions d'aspect esthétique et de microstructure. Ceci permet d'estimer les propriétés du matériau original, constitutif de l'artefact à restaurer, dans un premier temps, puis de choisir le matériau de comblement adapté, selon les critères de renfort structurel et d'aspects visuels, pour garantir une bonne compatibilité des matériaux, une innocuité de l'intervention, et un bon vieillissement. Une approche transversale permet ici de considérer les matériaux de comblement en fonction de la texture à l'état fluide ou frais, intégrant alors un aspect pratique qui influence le bon déroulé de l'intervention de conservation-restauration. Toutefois, en fonction des éléments composant chaque situation, d'autres besoins non étudiés ou approfondis dans les présents travaux peuvent être identifiés, comme la mesure quantifiée des aspects esthétiques, les traitements de surface de type retouche ou mise au ton, l'empoussièrement ou encore l'apport d'eau ou d'humidité au moment de la mise en œuvre *in situ*. Les formulations étudiées étant très similaires aux matériaux originaux, selon les aspects physico-chimiques, certains de ces paramètres peuvent être considérés comme semblables au comportement de l'original.

Par évaluation visuelle, les aspects esthétiques tels que la couleur ou les textures des formulations de comblement évaluées sont similaires à ceux des matériaux originaux. Il faut noter que l'introduction ou le remplacement d'un additif, utilisé comme charge ou comme marqueur, peut entraîner une modification des aspects esthétiques et visuels d'une part, ainsi que des aspects mécaniques à l'état frais et fluide et à l'état solide après la prise et le séchage, d'autre part.

Les opérations de retouches ou d'intégration de la zone restaurée par une mise au ton, ou un travail de type pictural, sont applicables selon les méthodes habituelles. Celles-ci, ainsi que les matériaux, sont variés, avec par exemple les poudres de pigments, les matières liées, la fixation, les multicouches et les superpositions de techniques, et donc adaptés aux besoins spécifiques comme l'état et la texture de la surface, ainsi que l'effet visuel recherché.

La captation de poussière sur les formulations étudiées est estimée équivalente à celle des matériaux originaux, les formulations n'étant pas plus électrostatiques que le plâtre « original ». L'entretien et le dépoussiérage ne seraient donc pas alourdis par la présence des matériaux de conservation-restauration tels que ceux étudiés. Il faut noter que des dépôts peuvent se former aux jonctions de matière originale et de comblement, ou encore dans les pièces en retrait si le comblement n'est pas fait à fleur.

L'apport d'eau, mentionné comme élément à considérer dans l'évaluation des besoins, n'a pas été quantifié par un protocole analytique. C'est toutefois un paramètre important dans la pratique qui conditionne des éléments successifs intervenant dans une temporalité large, au moment même de l'intervention, puis pendant le séchage, et en post-intervention sur le long terme. Par exemple, une mauvaise gestion de l'apport d'eau peut entraîner une modification de la couleur du comblement et de la matière originale environnante, la dissolution et la recristallisation de sels solubles, la migration de produits originaux ou non originaux, provoquant des altérations esthétiques au séchage telles que des taches, des auréoles, ou encore des précipitations de salissures. En mesurant la quantité d'eau utilisée pour formuler le comblement, il est possible d'estimer l'apport d'eau et d'avoir une meilleure maîtrise lors de l'intervention, en considérant qu'une formulation très diluée a tendance à laisser pénétrer beaucoup d'eau d'hydratation dans la matrice de l'original. Il est courant pour les professionnel·les d'appliquer un matériau filmogène, tel qu'un adhésif acrylique, qui limite alors la pénétration de l'eau. Une mise en œuvre *in situ* en isolant les plans de contact avec un film étirable placé à l'interface le temps de l'intervention, permet alors d'obtenir une pièce de comblement aux profils très adaptés, sans toutefois risquer un apport d'eau ou d'humidité. Après séchage, le film étirable est retiré et la pièce peut être collée, en sélectionnant un adhésif dans un solvant non aqueux.

Dans ces travaux, les données établies pour les formulations évaluées sont précises, afin de mieux identifier les comportements, d'améliorer la connaissance des matériaux, et d'affiner les pratiques. Toutefois il est constaté que le plâtre possède une bonne tolérance et une adaptabilité permettant d'employer des matériaux de comblement formulé avec une légère approximation ou une imprécision, et ce malgré la nature fragile du matériau. Il est difficile de connaître les conditions de préparation de l'original, et donc ses propriétés mécaniques exactes, pour déterminer le choix de matériau de comblement le plus ajusté aux besoins. Ainsi, après la présentation de données affinées pour une sélection de formulations, il semble juste de proposer des gammes d'usages, en fonction des deux axes techniques évalués : la résistance mécanique, et les aspects de texture à l'état frais et fluide, desquels découlent les propriétés micro-structurelles. Les propriétés estimées seront similaires en utilisant des matériaux de même nature, par exemple deux hémihydrate de sulfate de calcium de type β ou du carbonate de calcium de provenances variées. Il faut cependant considérer que les matériaux issus du commerce peuvent connaître des changements de formulation et de mise en œuvre impactant leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. Le vieillissement naturel des matériaux, originaux et de conservation-restauration, peut aussi engendrer des modifications inattendues. Des essais préliminaires sont donc conseillés, d'une part pour s'appropriier les différentes formulations, les temps de travail et les conditions de préparation, et d'autre part pour envisager les meilleures adaptations dans la pratique professionnelle. Les décisions relatives aux matériaux de conservation-restauration sont donc laissées au bon sens des professionnel·les qui maîtrisent les aspects techniques, scientifiques, sensoriels et pratiques, et qui sont expert·es de leurs sujets d'études et d'interventions. Les travaux présentés ici, inspirés des méthodes usuelles, fournissent un socle de données et d'informations qui peuvent être développées et enrichies par de nouvelles recherches.



Conclusion et perspectives

Conclusion

La conservation-restauration des artefacts muséaux en plâtre s'est développée ces dernières années. Les collections sont valorisées et de plus en plus étudiées, selon des aspects historiques et techniques qui enrichissent les connaissances. En parallèle, des projets de conservation sont mis en place pour garantir la préservation des artefacts et des collections, bien souvent aux états très altérés. En considérant un plâtre β gâché à un rapport E/P moyen adapté au moulage, le matériau est prompt à la rupture lorsqu'il n'est pas conservé avec attention, par exemple dans un contexte humide ou soumis à des chocs, principalement en raison de sa structure cristalline et poreuse et de son caractère mécanique de type fragile. Les artefacts non restaurés présentent généralement des altérations structurelles considérables, qui compromettent et perturbent la stabilité matérielle et visuelle, avec notamment des cassures résultant en des pertes de matière et des lacunes. Afin de pallier ces instabilités, des interventions de comblement de la zone manquante sont effectuées pour substituer la partie originale, en y apportant un matériau de restauration. Selon les conditions, cette intervention assure différentes fonctions comme de retrouver et de garantir une stabilité structurelle, ainsi que de restituer une lisibilité à l'ensemble et une meilleure unité visuelle et esthétique. Deux méthodes sont employées pour combler les lacunes des artefacts en plâtre : le modelage ou le moulage, en applications directes ou en rapportant une pièce façonnée à travers une interface permettant un séchage à part et une fixation par adhésif. Les formulations et les deux méthodes constituent donc des moyens modulables maîtrisés par les professionnels de la conservation-restauration, et adaptables aux différents contextes. Le choix du matériau doit convenir aux variables liées à l'artefact, aux spécificités de chaque intervention telles que le contexte de travail et la durée du chantier, les dimensions de l'artefact et des altérations, ou encore les demandes des responsables des collections. Des critères déontologiques tels que la durabilité, la lisibilité, la réversibilité ou la possibilité de retraiter l'intervention, la compatibilité et l'innocuité, établis pour l'ensemble de la profession, doivent également être respectés. En considérant les aspects historiques, les valeurs et les statuts des artefacts, ces critères guident les interventions de conservation-restauration afin de préserver la matérialité et l'essence, ou l'unité potentielle des œuvres d'art décrite par Brandi¹. Ces considérations sont le résultat d'années de recherches et de réflexions, théoriques et pratiques, appliquées aux artefacts muséaux et patrimoniaux. La discipline a bénéficié de recherches sur des problématiques variées, telles que les méthodes de nettoyage ou de collage et des questionnements parallèles sur la provenance des matériaux et des artefacts, sur les traitements de surface comme les patines, les badigeons ou encore les couches de salissures. Les interventions de comblement et le choix des matériaux n'ont été que très peu abordés, malgré la fréquence de l'intervention et les besoins divers constatés.

Pourtant, les comblements, qui nécessitent l'apport d'un matériau de restauration, doivent suivre ce même protocole réflexif pour garantir la cohésion structurelle et visuelle sans dénaturer l'artefact, et en évitant la confusion des interventions avec l'original. Les méthodes et les matériaux ont évolué et connu différentes phases pour l'ensemble des typologies d'œuvres et d'objets d'art, avec une volonté commune d'amélioration. Les artefacts moulés en plâtre ont d'abord été réparés avec ce même matériau, ne permettant pas la distinction des interventions avec le matériau constitutif ou original.

¹ BRANDI Cesare, BASILE Giuseppe et CORDARO Michele (éd.), *La restauration : méthode et études de cas*, Paris, Institut national du patrimoine, Éditions Stratis, 2007, p. 45.

À partir des années 1980 pour la statuaire et à partir des années 2000 pour les cadres, des matériaux de comblement ont été formulés avec d'autres composés garantissant une distinction avec l'original.

Les propriétés et les caractéristiques du plâtre sont bien étudiées dans des domaines comme la cristallographie et le génie civil, ce qui fournit de nombreux éléments de connaissances. Cependant ces aspects liés aux notions de conservation-restauration sont bien plus rares, de la même façon que les études rhéologiques des matériaux patrimoniales. Pourtant, l'évolution des méthodes et des matériaux de la conservation-restauration, et par conséquent l'amélioration de la pratique, ne peuvent pas être envisagées sans une meilleure connaissance des matériaux originaux et des formulations ou des produits employés dans les interventions.

- *L'étude des matériaux de comblement des artefacts patrimoniaux et muséaux en plâtre vise à faire un état des connaissances, à constater les pratiques actuelles et plus anciennes, et à caractériser les formulations employées.*
- *Par la mise en place d'une méthodologie pluridisciplinaire, ces travaux cherchent à approfondir les savoirs sur le matériau, sur ses caractéristiques propres, ainsi que sur l'effet des additifs couramment utilisés.*
- *Enfin, en proposant des gammes de formulations adaptées aux besoins identifiés en conservation-restauration, les méthodes de comblement des artefacts en plâtre et la pratique peuvent être affinées et optimisées.*

Représentatif des différents axes de la conservation-restauration en général, ce sujet pluridisciplinaire de doctorat par le projet a pris en considération des aspects théoriques et pratiques, en intégrant notamment des éléments de contextes historiques et techniques présentés dans le chapitre I, puis des caractérisations de la matière par des techniques analytiques multi-échelles dans le chapitre II. La connaissance du plâtre constitutif des artefacts muséaux est ainsi approfondie et constitue une référence, à partir de laquelle les formulations additionnées peuvent être décrites, à l'état fluide dans le chapitre III, et à l'état solide, aux échelles micro et macroscopiques, dans le chapitre IV. Enfin, l'évolution de traitements de comblement dans le temps a été examinée dans le chapitre V. Les différentes étapes d'un traitement de comblement en conservation-restauration sont ainsi caractérisées, en incluant des protocoles analytiques et expérimentaux tirés d'autres disciplines. Pour développer et soutenir la recherche, deux typologies d'artefacts des collections du musée du Louvre ont été étudiées et comparées : la statuaire de la gypsothèque et les cadres du XIX^e siècle du département des Peintures. Issus d'un même procédé technique de moulage et constitués du même matériau, les artefacts ont des historiques complexes qui enrichissent l'analyse. Il faut noter que de nombreux cadres du XIX^e siècle ne sont pas moulés en plâtre mais avec des formulations de matériaux aux recettes variables, comme le mélange de carbonate de calcium et de colle animale, appelé composition.

Dans le chapitre I, le contexte de la recherche est présenté à travers l'étude des deux typologies d'artefacts, de leur technique de mise en œuvre, des altérations, des problématiques de conservation-restauration et des méthodes de comblement. Les artefacts des deux corpus sont similaires par les évolutions historiques de leur statut comportant des phases de valorisation, de dévalorisation et de revalorisation, ayant conditionné les approches conservatoires au fil des années. Le désintérêt envers les artefacts en plâtre, survenu au cours du XX^e siècle, a retardé le processus de réflexion sur le traitement des œuvres patrimoniales.

La valorisation des artefacts conditionne véritablement les traitements de conservation-restauration. La statuaire en plâtre a été restaurée en considérant ses valeurs artistiques et historiques avant la typologie des cadres, dont le statut est encore ambigu et pour laquelle les protocoles de traitement tendent désormais vers une approche conservatoire, en abandonnant une pratique de réparation d'objet fonctionnel sans valeur patrimoniale. Ainsi, les publications, bien que limitées, semblent plus fréquentes et plus précises dans le premier cas. L'étude bibliographique, associée à une enquête destinée aux professionnel·les de la conservation-restauration, a permis de déterminer les méthodes et les matériaux couramment employés pour traiter les lacunes des artefacts en plâtre. En parallèle de ce travail documentaire, des campagnes d'observations ont été menées dans les deux collections, sous forme de prospection pour identifier et décrire les tendances générales, avec plus de difficulté pour les cadres dont les surfaces sont recouvertes de traitements tels que de la dorure ou de la retouche imitant l'or.

La mise en parallèle des collections et des typologies d'artefacts a permis d'enrichir la réflexion, en comparant les méthodes et les matériaux de comblement, les tendances et les approches, pour lesquels les discussions avec les professionnel·les ont été précieuses durant ces travaux. Les savoirs et les retours d'expériences, partagés par les spécialistes de la conservation-restauration des deux typologies d'artefacts ont été d'un grand intérêt, avec des indications sur les méthodes actuelles, mais aussi plus anciennes, pour lesquelles la documentation est très lacunaire voire inexistante. Toutes ces informations ont permis de réaliser une synthèse et d'estimer les méthodes et les matériaux, qui sont appliqués à une démarche respectueuse des critères déontologiques, en considérant des formulations similaires aux matériaux originaux, comme celles composées de plâtre et additionnées de charges dans le but de modifier les propriétés physico-chimiques et mécaniques et de rendre l'intervention distinguable.

Ces formulations, conformes aux notions de compatibilité et d'innocuité avec l'original, sont parfaitement maîtrisées par les professionnel·les. Les matériaux présentent également l'avantage d'être connus et plus respectueux de la santé des spécialistes et de l'environnement, à l'inverse de produits commerciaux et synthétiques, de moins en moins utilisés. Le marquage de la restauration et de la restitution des lacunes signifie la datation et la reconnaissance de l'intervention par rapport à la matière originale. Les matériaux de comblement sont donc un parfait exemple des évolutions liées aux valorisations et aux applications de la déontologie. Dans ces conditions, l'artefact semble suffisamment considéré et important en bénéficiant d'une restauration, mais surtout en distinguant les interventions, ce qui confirme le respect de l'original et son élévation au rang des artefacts et des œuvres d'art du patrimoine.

Suite à ces constats, l'étude est poursuivie en sélectionnant des formulations couramment utilisées, présentées et caractérisées selon leurs aspects structurels au [chapitre II](#). Ainsi, le plâtre est évalué comme matériau de référence, assimilé au matériau constitutif original, à partir duquel des éprouvettes représentatives, calibrées et destructibles sont mises en œuvre. Le plâtre est testé seul et en présence de deux additifs retenus : le carbonate de calcium, CaCO_3 , et le dioxyde de titane, TiO_2 . Chacun de ces additifs est utilisé dans les deux spécialités qui traitent les artefacts. Le carbonate de calcium est employé en conservation-restauration de sculpture et de statuaire, en chargeant le mélange à haute concentration, de façon à baisser la résistance mécanique du matériau de comblement, tout en conservant une nature chimique et des aspects visuels similaires au plâtre. Le dioxyde de titane est utilisé en conservation-restauration de dorure et d'artefact mobilier, pour marquer les « blancs » et autres matériaux de complements appliqués en formulations

liquides ou pâteuses. Ce pigment est utilisé à faible concentration pour éviter la modification du comportement du matériau de comblement, tout en étant détectable et identifiable par analyse en spectrométrie de fluorescence X. Pour comparer le mélange traditionnel de carbonate de calcium et de colle animale utilisé pour la mise en œuvre et la restauration des cadres, une formulation supplémentaire constituée de craie de Bologne et de colle animale a été étudiée. Cette craie est une charge inerte composée principalement de sulfate de calcium hydraté et de carbonate de calcium.

Après la présentation des matériaux, les formulations ont été observées au microscope optique et au microscope électronique à balayage, et des analyses élémentaires ont été menées par spectroscopie à dispersion d'énergie (sonde EDS couplée au MEB), pour observer les structures, les formations cristallines, identifier les éléments présents et les éventuelles impuretés, mais aussi voir l'effet des additifs dans les matrices. La microstructure du plâtre, composée de cristaux aciculaires et tabulaires enchevêtrés, est liée à la préparation et au rapport massique E/P. Une formulation diluée a une structure ouverte, avec des cristaux bien définis. Au contraire, un plâtre très concentré a une structure très dense et compacte, avec des enchevêtrements très serrés de cristaux aux dimensions réduites et aux terminaisons cristallines parfois inachevées. Observées au microscope optique, les formulations additionnées de CaCO_3 et de TiO_2 semblent plus blanches, avec un aspect plus chargé et poudreux lorsque la proportion de carbonate est élevée. Au MEB, l'ajout des additifs est distinguable par un effet de remplissage de la porosité du plâtre, car les cristaux d'additifs, plus réguliers et plus petits, occupent les espaces interstitiels. La différence de contraste chimique en observation avec le mode BED-C du MEB rend la détection visuelle plus aisée. Le dioxyde de titane, ayant une plus forte densité que le plâtre, est particulièrement identifiable par les amas de très fines particules qui semblent plus brillantes que les cristaux de sulfate de calcium.

En complément de la caractérisation des structures à l'échelle microscopique, les formulations et les matériaux ont été analysés selon les états fluides et solides, qui constituent le moment de la mise en œuvre de la formulation de comblement et son état permanent après les traitements de conservation-restauration.

Dans le [chapitre III](#) dédié à la caractérisation à l'état fluide, trois plâtres différents ont été testés, de façon à comparer les comportements et les textures d'un plâtre à l'autre (deux hémihydrates β et un hémihydrate α). Les additions de carbonate de calcium et de dioxyde de titane ont été faites selon les mêmes formulations que celles présentées précédemment. Le mélange de craie de Bologne et de colle animale a été testé en texture liquide comme un apprêt. Enfin, un produit commercial sous forme de pâte prête-à-l'emploi, le Modostuc®, souvent utilisé par les professionnel·les en application couche à couche, a été évalué pour la comparaison des gammes de textures. Les protocoles rhéologiques caractérisant les matériaux du patrimoine étant peu fréquents, les méthodes ont été adaptées de celles du génie civil. Le plâtre est un matériau relativement complexe, en raison de sa cinétique de prise. Une caractérisation sous cisaillement simple, et deux types d'essais complémentaires ont été retenus pour identifier les comportements : un essai quasi-statique par géométrie Vane, pour identifier les seuils de cisaillement, et un essai dynamique, réalisé en restructuration avec une géométrie plan-plan pour confirmer les seuils et déduire d'autres caractéristiques telles que la viscosité. La courte durée des essais a été établie de façon à limiter les effets et les débuts de mécanisme de prise qui risquaient de perturber les mesures et de fausser les interprétations.

Après l'évaluation des courbes d'écoulement mesurant la contrainte en fonction du taux de cisaillement, un comportement non-newtonien ou viscoplastique a été identifié, avec un écoulement au-delà d'une contrainte imposée. La viscosité baisse lorsque le taux de cisaillement augmente, indiquant une structuration sous vitesse de cisaillement. Ces premiers éléments décrivent le comportement des fluides à seuil de type rhéofluidifiant, qui caractérisent généralement les suspensions minérales telles que le plâtre. Les paramètres ont donc été évalués selon un modèle adapté, dans ce cas le modèle d'Herschel-Bulkley, en considérant l'indice de structuration n , les seuils limites de cisaillement ou contraintes seuil τ_0 , et la consistance K reliée à la notion de viscosité. Les valeurs ont été comparées aux seuils obtenus selon le modèle Yodel et aux seuils mesurés en protocole statique, ainsi qu'à la consistance selon le modèle de Krieger-Dougherty.

Un lien très clair a été identifié entre les rapports massiques et les fractions volumiques solides, et les seuils limites de cisaillement ainsi que les consistances. Plus le plâtre est concentré, plus la texture est épaisse, la viscosité et les seuils de cisaillement sont élevés. À l'inverse, une formulation peu concentrée en plâtre a une texture liquide et une consistance qui est apparentée à celle du fluide porteur, dans ce cas-là l'eau au comportement newtonien. Concernant le seuil limite de cisaillement, les travaux réalisés mettent en évidence une transition liquide-solide séparant un comportement purement visqueux d'un comportement viscoplastique via une fraction volumique solide de percolation. L'effet des additifs, constaté par modélisation et isolé du comportement du plâtre par adimensionnement, est assimilé à celui d'un agent viscosant, qui densifie la texture, avec une élévation des seuils et de la consistance, sans modifier les propriétés du plâtre ni le phénomène d'hydratation du plâtre. Le carbonate de calcium modifie la texture de la formulation qui est plus épaisse et plus pâteuse en augmentant les quantités de charge. Le dioxyde de titane, même en faible addition ou substitution, semble élever la viscosité. Les apprêts de craie de Bologne et de colle présentent le même type de comportement rhéofluidifiant, en préparation liquide. La colle est suffisamment diluée pour avoir un comportement proche du fluide porteur et donc de l'eau. Applicable au pinceau, cette formulation avec ou sans dioxyde de titane, a des caractéristiques équivalentes à un plâtre moyennement concentré en plâtre par exemple $E/P = 0,8$. Enfin, le produit commercial Modostuc®, très dense et pâteux, a été difficile à évaluer et à mesurer. Néanmoins, les valeurs de seuil et de consistance estimées sont très élevées, supérieures à celles d'un plâtre β très concentré. Cet aspect est très certainement lié à la nature synthétique du liant, de type adhésif, qui confère un caractère presque élasto-plastique à la pâte. Les essais ont donc permis de caractériser les différentes formulations, de classer les plâtres seuls selon les rapports massiques, puis de constater l'effet des additifs sur les propriétés. Ainsi trois gammes de texture ont été établies : les formulations pâteuses, les liquides, et les intermédiaires. Dans ce dernier cas, la texture peut être décrite comme assez pâteuse pour être appliquée à la spatule, mais aussi suffisamment liquide pour s'écouler facilement, et, par exemple, épouser les anfractuosités d'une cavité à combler.

Dans le [chapitre IV](#), les propriétés mécaniques des formulations ont été évaluées selon les paramètres de résistances ultimes avant la rupture et les modules élastiques en statique et en dynamique. Pour cela, des essais de compression et de flexion 4 points ont été menés sur des séries d'éprouvettes calibrées telles que des cylindres et des prismes. Le module élastique statique, ou module de Young, a été mesuré avec des jauges de déformations biaxiales placées sur les éprouvettes cylindriques. Les modules élastiques dynamiques ont été obtenus par mesure de la fréquence de résonance. Ces deux méthodes ont permis également de déterminer les coefficients de Poisson.

Les deux plâtres β , le Molda® 3 Normal et le EXTHA® Ibérica, ont été testés, ainsi que les formulations additionnées de CaCO_3 et de TiO_2 . Les formulations additionnelles de craie de Bologne et de colle et le Modostuc® n'ont pas été évaluées en suivant le protocole complet, en raison de la difficulté à mettre en forme les éprouvettes calibrées. Ces formulations demandent en effet des mises en œuvre couche à couche ou par petits volumes. Toutefois, malgré quelques défauts, il a été possible de tester les éprouvettes cylindriques de craie de Bologne et de colle animale en compression, et donc d'obtenir des tendances de comportement.

À l'état solide, les formulations de plâtre seul ont montré un lien fonctionnel entre les valeurs de masses volumiques et les propriétés mécaniques solides. Ainsi, plus le plâtre est concentré, plus la masse volumique augmente, et plus les propriétés sont élevées. Des gammes de résistances ont ainsi pu être établies : une résistance élevée pour les E/P les plus bas (E/P = 0,45 à 0,55), similaire aux valeurs de matériaux de construction comme le ciment ; une gamme de résistance faible, pour les E/P les plus élevés (E/P = 0,9 à 1) ; et une gamme de résistance moyenne, qui comprend notamment les E/P = 0,6 à 0,8 caractéristiques des plâtres de moulage ou des plâtre originaux. Les résistances en compression et en flexion 4 points ont montré un lien fonctionnel, avec des valeurs plus élevées en compression en raison de la nature cristalline et poreuse du matériau. Les essais en compression permettant un meilleur aperçu du moment de la rupture, les interprétations des résultats ont été privilégiées pour ce test. Plusieurs profils de rupture peuvent être observés en compression, avec une rupture nette de type fragile, une rupture de type plastique écouissable avec un effondrement de la matière, et une combinaison des deux comportements, selon les trois gammes énoncées. Les modules élastiques statiques et dynamiques sont cohérents, et traduisent bien le caractère rigide du plâtre. La comparaison des techniques de mesure des modules élastiques en statique et en dynamique indique qu'il est tout à fait possible d'obtenir des valeurs significatives et représentatives des matériaux composés de plâtre, selon les méthodes. Les mesures de la fréquence de résonance présentent l'avantage d'être non destructives. L'équipement est simple d'utilisation, portable et léger, et le traitement des données est rapide. Néanmoins, l'échantillon doit être calibré, impliquant soit un prélèvement invasif d'un matériau original, soit la mise en œuvre d'éprouvettes en matériau formulé et assimilé. En statique, les jauges de déformation sont coûteuses, leur mise en place est délicate et la procédure de test requiert un équipement important de type presse ou machine d'essais universelle. Toutefois, ces jauges offrent la possibilité d'obtenir des modules élastiques statiques d'une grande précision.

Les additifs ont des effets particuliers et le lien avec la masse volumique, qui représente la composition et la structure, est plus complexe à analyser. Dans les deux cas, les masses volumiques sont augmentées en présence d'additifs. Le carbonate de calcium tend à renforcer le plâtre, avec une élévation des résistances mécaniques et des modules élastiques, jusqu'à un certain seuil d'ajout de charge. Au-delà de ce seuil, les valeurs sont inférieures à celles des plâtres seuls, et donc un effet d'effondrement des propriétés mécaniques est constaté. Cet effet corrobore les estimations expérimentales des professionnels de la conservation-restauration qui utilisent des mélanges de plâtre et de carbonate pour obtenir un comblement à la résistance inférieure que celle du plâtre original, permettant ainsi une rupture préférentielle dans le matériau de restauration et non pas dans l'original. Le dioxyde de titane à faible concentration semble abaisser les propriétés mécaniques solides. Selon la bibliographie, des concentrations différentes pourraient avoir un effet inverse, et rendre les formulations plus résistantes.

Le mélange de craie de Bologne et de colle animale, formulé en pâte, malgré les défauts d'éprouvettes, a montré une résistance moyenne à la compression, équivalente à un plâtre seul à $E/P = 0,8$. Les ruptures de type plastique écrouissable sont similaires à celles des plâtres moyens à peu concentrés ($E/P = 0,7$ à 1). Les faciès de rupture des éprouvettes cylindriques s'accordent avec les altérations des ornements moulés avec des préparations de type charge et liant de colle animale, qui résistent mal aux contraintes induites par les supports assemblés en bois qui constituent la structure du cadre. Enfin, le coefficient de Poisson semble plutôt homogène pour l'ensemble des formulations, avec des valeurs de $\nu \approx 0,3$ cohérentes avec les données de la littérature. Les propriétés mécaniques solides caractérisées et chiffrées ont donc été compilées et comparées, permettant d'établir des gammes de résistances adaptées à des usages de renfort structurel, de comblement esthétique sans renfort, ou de formulation intermédiaire, avec la correspondance des formulations chargées ou marquées. Les formulations de plâtre assimilées au matériau original constituent donc une référence de résistance mécanique, permettant de choisir les formulations de comblement selon les besoins en conservation-restauration. Les typologies d'artefacts étudiées montrent une certaine tolérance aux contraintes, avec une résistance supérieure en compression par rapport à la flexion, et une rupture de type fragile, qui engendre les altérations couramment constatées telles que les fissures, les ruptures, et par conséquent, les pertes de matière et les lacunes.

Après avoir caractérisé les propriétés des formulations à différentes échelles et selon différentes « chronologies » de préparation, l'évaluation d'artefacts restaurés par comblement a permis de constater la compatibilité et l'innocuité des traitements, et d'estimer le vieillissement des matériaux (deux à six années après leur mise en œuvre), présentés au [chapitre V](#). Dans cette dernière phase des travaux de recherche, trois artefacts ont été sélectionnés et monitorés, en considérant les contextes de conservation tels que leur présentation et le climat. Le premier artefact est un cadre du XIX^e siècle aux ornements moulés en plâtre, conservé dans les réserves du musée du Louvre, et ayant été restauré en 2016. Avant les interventions, il présentait de nombreuses altérations structurelles conditionnant son instabilité, telles des fissures, des cassures et des lacunes, liées à la différence de comportement avec la structure en bois sur laquelle sont fixés les ornements. Il a été comblé avec des matériaux non traditionnels et distinguables. Des reprises d'altérations ont été soupçonnées en 2018 lors d'un constat général de la collection, et ont encouragé un protocole de suivi. Le deuxième artefact est une ronde-bosse figurant un *Molosse* (Gy 0236) de la gypsothèque du musée du Louvre. L'artefact est conservé dans les galeries des Petites Écuries à Versailles depuis les années 2000. La technique de mise en œuvre, par coulée de fines couches de plâtre armées de toile, induit une grande fragilité de l'artefact. Il a été restauré en 2015 et a bénéficié de nombreux complements faits avec une formulation de plâtre et de carbonate de calcium. Son état est considéré comme stable depuis les interventions. Le troisième artefact est un relief du musée Rodin, considéré comme un plâtre original ayant servi de modèle pour une des parties de *la Porte de l'Enfer*. Conservé dans l'atelier de Rodin puis dans les réserves à Meudon, cet artefact est d'une grande fragilité en raison de la présence de sels solubles ayant rendu la matrice de plâtre pulvérulente et ayant provoqué des soulèvements, des déplaquages et des boursouffures. De nombreuses altérations plus communes, telles que des fissures, des cassures, et des lacunes rendaient le relief extrêmement instable. Il a été restauré en 2017 en limitant, pour chaque type d'intervention, l'apport d'eau dans le substrat pour éviter une solubilisation des sels et une recristallisation risquant d'empirer son état. Depuis 2021, le relief est exposé au musée des Beaux-Arts de Calais et son état de conservation semble stable.

Ces trois artefacts, restaurés entre 2015 et 2017, présentent donc des altérations communes et des traitements de comblement avec une variété de formulations. De plus, ils sont conservés dans des conditions variables, permettant d'évaluer différents types de contexte de stockage ou d'exposition, à relier aux comportements. Ils ont été monitorés avec une méthode commune, de numérisation par scanner 3D à haute définition, puis par corrélation d'images numérisées. Plusieurs campagnes de relevés ont été organisées pour chaque artefact, permettant au moins deux comparaisons au cours d'une année. Cette méthode enregistre et documente l'état de l'artefact de façon ponctuelle, et permet de distinguer des déformations irréversibles d'un relevé à l'autre. Toutefois, la haute précision de l'équipement ne permet pas de distinguer les déplacements dans différents champs, mais uniquement selon un axe de profondeur. Les images corrélées révèlent des champs d'iso-valeurs de déplacements via une échelle de représentation adaptée, plus précisément une échelle colorimétrique (en vert : de 0,5 à -0,5 mm ; en jaune à rouge : de 0,5 à 1 mm ; en cyan à bleu foncé : de -0,5 à -1 mm). Les corrélations des trois artefacts ne montrent pas de tendance de déplacement significatif, ni alarmant. Il est possible que les artefacts subissent des contraintes occasionnant des mouvements ou des déformations, mais cela se produirait de façon limitée, assimilable à un domaine « élastique », sans provoquer d'altération permanente. Ces conclusions corroborent les observations visuelles faites lors des séances de travail, et les contrôles des responsables des collections dans les différentes institutions. Au-delà de la capacité de corrélation dans un seul axe limitant les analyses, la méthode de numérisation au scanner 3D permet de relever et donc de documenter l'artefact très précisément et en trois dimensions. En plus de la possibilité de mettre en évidence des phénomènes d'altérations, la technologie peut servir à observer des détails techniques ou des caractéristiques en lien avec l'histoire de l'artefact. Les inconvénients majeurs de cette technologie sont le coût des équipements, la logistique demandée, avec un espace de travail adapté et le placement des cibles sur l'artefact pour affiner les relevés, mais surtout le temps de traitement des données et le stockage numérique nécessaire. Cette méthode n'est donc pas préconisée pour une documentation générale de collection, mais elle semble très adaptée pour des artefacts nécessitant un degré élevé de surveillance ou une documentation spéciale avec un minimum d'interaction.

Une seconde méthode a été mise en place pour approfondir l'évaluation du cadre, qui présentait des signes d'instabilité. L'artefact a été équipé de trois capteurs LVDT qui enregistrent, avec une grande précision, le déplacement au contact des deux montants et de la traverse basse. Ce monitoring permanent mené de novembre 2021 à août 2022 a permis de suivre les mouvements les plus subtils de l'ensemble du cadre, accroché à une grille par deux pitons placés au revers de la partie haute. Pour compléter l'évaluation, des essais ponctuels avec un chargement statique ont permis de distinguer les tendances de déplacement et les possibilités de supporter une situation d'encadrement d'un tableau. Ce protocole a révélé que le cadre a un domaine de déformation suffisamment grand pour permettre un chargement d'au moins 6 kg, et que la faible mobilité observée est loin du seuil de rupture ou de déformation irréversible. Le comportement général suggère une importante influence du support en bois sur lequel sont fixés les ornements en plâtre. La différence de comportement entre les deux matériaux pourrait être à l'origine des instabilités et des altérations présentes. En mesurant la température à proximité du cadre, et en comparant les courbes de valeurs et celles des déplacements des trois capteurs, il est possible de relier les fluctuations climatiques (de ≈ 3 °C en moins de 24 h dans les cas les plus extrêmes) aux faibles déplacements relevés ($\approx 0,15$ mm au maximum). Néanmoins, malgré ces conclusions, l'état du cadre ne semble pas s'être aggravé depuis le constat de 2018. Une adaptation à son environnement est peut-être liée à cette relative stabilité.

D'autre part, les tensions générées par la structure, provoquant les reprises d'altération en 2018, n'imposent plus de contraintes depuis l'atteinte du seuil. L'artefact et les matériaux constitutifs auraient donc retrouvé une forme d'équilibre et de compatibilité.

Le suivi par capteurs de déplacement est un moyen simple pour surveiller un artefact dans son contexte de conservation afin de prévenir les altérations. La haute précision des capteurs et la polyvalence de la mise en place sont en effet de véritables atouts quand il s'agit de suivre en permanence l'évolution d'un artefact. L'équipement représente un coût et n'est donc pas adapté à l'évaluation d'une collection entière. En revanche, cette technologie est conseillée pour monitorer des artefacts précieux, pouvant supporter un contact non invasif ni destructif, et dont le suivi par observations et constats d'état n'est pas suffisant.

Les restaurations évaluées ici sont relativement récentes, mais cette étude permet de montrer que les interventions de comblement sont efficaces, compatibles, et suffisamment « flexible » pour ne pas altérer ou rendre instable l'artefact et le matériau constitutif original, malgré les climats plus ou moins contrôlés ou monitorés. En cas de tensions ou de rupture, comme pour le cadre ICMO 190, les interventions de conservation-restauration s'altèrent avant l'original. Plus généralement, il semblerait que le matériau plâtre, à travers ces trois exemples variés, montre une certaine résilience dans des contextes variables de présentation, de sollicitation, avec par exemple les vibrations provoquées par les mouvements de l'artefact ou autour de l'artefact, et selon les climats de conservation. Dans un état d'équilibre avec des restaurations structurelles compatibles, le plâtre a une bonne adaptabilité aux conditions muséales normales, tant que les seuils de résistance ne sont pas atteints. Il est néanmoins nécessaire d'assurer le suivi des états et l'évolution des artefacts restaurés par comblement, puisque des sollicitations au-delà des seuils de résistance peuvent être extrêmement dommageables et compromettre l'intégrité de l'artefact.

Enfin, toutes les caractéristiques mesurées et évaluées dans ces travaux ont été assemblées et compilées sous la forme d'un livret technique, de façon à présenter le comportement des matériaux assimilés aux originaux et des formulations de comblement. Les données synthétisées et mises en parallèle dans ce document doivent aider à l'identification des propriétés du matériau original, puis assister la sélection des formulations de comblement, selon les besoins identifiés, en suivant par exemple le modèle de réflexion suggéré. Ces données caractérisent les formulations que les professionnel·les de la conservation-restauration peuvent utiliser, modifier, et adapter. Les observations retranscrites et illustrées dans ces travaux peuvent également servir aux étapes de constats d'état et de diagnostic, en identifiant par exemple des aspects caractéristiques des structures normales du plâtre de moulage ou, au contraire, des particularités, comme la présence d'impuretés, d'additifs, une surreprésentation de bulles d'air ou une texture anormalement dense. Des recherches menées à la gypsothèque ont, par exemple, permis l'identification et la datation d'artefacts, grâce à l'observation des détails techniques, et notamment des aspects de matière par les plans de cassure².

² LE BRETON Élisabeth, « Gypsothèque du musée du Louvre. Les apports de la restauration à la datation des tirages en plâtre anciens », *In Situ*, 28 (2016).

Pour enrichir ces données de référence, d'autres plâtres et d'autres formulations pourraient être testées et évaluées. En parallèle, l'étude et la caractérisation d'échantillons de matières originales et de comblements anciens permettraient d'approfondir les connaissances et les liens avec les matériaux contemporains, par des protocoles analytiques variés (du prélèvement à l'étude *in situ* par suivi en numérisation 3D).

Le monitoring des trois artefacts pourrait être poursuivi sur le long terme, afin de perfectionner le protocole et d'enrichir la collecte des données de leur état de conservation.

L'étude des matériaux à l'échelle micro-structurale a permis de constater la finesse et les subtilités du matériau plâtre. La variabilité structurelle, modifiée par un simple paramètre comme celui de la proportion d'eau, reflète la grande polyvalence des propriétés du matériau final.

Nous espérons que les travaux menés dans le cadre de ce doctorat par le projet permettront d'assister la pratique des professionnel·les, dans les décisions techniques et pratiques, en fournissant des outils précisés et comparés, qui confirment les ressentis et les constats établis tels que l'abaissement de la résistance mécanique par addition de carbonate de calcium, son effet texturant et viscosant ou encore la modification des formulations selon les variations de résistance souhaitées. Enfin, ces travaux ont confirmé le constat qu'il n'existe pas de méthode unique ou idéale, mais que la richesse de la profession et la clé de sa progression résident dans la diversité et la précision des méthodes et des formulations, dans les échanges interprofessionnels et inter-spécialités, ainsi que dans la curiosité, l'expérimentation, la découverte et l'accès à la recherche.

Perspectives

Au cours de ces travaux aux considérations techniques et pratiques, l'observation des corpus a aussi été source de questionnements plus théoriques sur les lacunes et sur l'intervention de comblement. Cette thématique mériterait un travail poussé de réflexion adaptée aux typologies des artefacts en plâtre, faisant état des différentes approches à travers le temps et selon l'évolution des pratiques, des critères et des conditions. Au-delà des besoins structurels et de renfort, différents degrés de comblement peuvent être atteints à travers des démarches respectueuses de l'unité de l'artefact. Dans certains contextes, les artefacts ne sont pas comblés, l'état lacunaire étant accepté ; dans d'autres, la restitution est minimale et en retrait, ou illusionniste et très poussée. L'étude de corpus d'artefacts en plâtre en France, en Europe ou à une échelle internationale, permettrait de constater les tendances théoriques, d'y associer les aspects déontologiques et culturels, et très certainement d'enrichir les connaissances sur le sujet et d'améliorer la pratique.

Dans une démarche d'ouverture, il serait intéressant de prolonger l'enquête transmise aux professionnel·les par une transmission plus internationale, permettant de représenter plus de tendances et de méthodes, de mettre les pratiques en parallèle, de découvrir de nouvelles formulations et d'obtenir d'autres retours d'expérience. Le questionnaire pourrait alors être reformulé, précisé, de façon à obtenir des réponses plus homogènes et facilement comparables. En procédant également à des entretiens oraux, il serait possible d'aiguiller plus distinctement la discussion. D'une façon générale, les problématiques de la conservation-restauration sont de plus en plus ouvertes aux approches extra-européennes qui enrichissent la réflexion autour des notions muséales et patrimoniales au profit d'une meilleure conservation des artefacts.

Après avoir établi une méthodologie et constitué des références pour l'étude et la caractérisation des matériaux de comblement des artefacts en plâtre, la voie est ouverte à la poursuite des analyses d'autres formulations et matériaux. Par exemple, les produits commerciaux tels que les enduits en poudre ou en pâte, ainsi que les résines époxy modelables, devraient être étudiés et caractérisés en lien avec un contexte de conservation-restauration. Des mises en œuvre qui diffèrent d'un modelage ou d'une coulée en une seule fois, comme la superposition de couches, pourraient alors être évaluées. Avec ces nouvelles données chiffrées et parlantes, certaines pratiques pourraient être modifiées par mise en évidence d'un manquement aux critères déontologiques tels que la réversibilité et la possibilité de retraiter l'intervention. Les méthodes pourraient encore être affinées et améliorées en exploitant au mieux les propriétés de chaque matériau selon des contextes bien spécifiques. Enfin, de nouvelles correspondances entre les formulations seraient établies afin de dresser des listes plus complètes et de proposer des alternatives plus respectueuses de la santé des professionnel·les et à l'impact environnemental réduit.

À ces fins, l'évaluation des formulations pourrait aussi être approfondie, par transposition des éprouvettes calibrées vers des supports plus représentatifs des artefacts ou des altérations. Envisagée dans ces travaux comme une étape finale après la caractérisation des formulations mais n'ayant pu aboutir, différents mélanges adaptés seraient sélectionnés pour des essais de comblement sur des fragments d'artefacts tels que des montants de cadres, ou des fragments de statuaire moulée, non patrimoniaux. Après la mise en œuvre et la cure des interventions, des tests tels que des essais de flexion seraient à concevoir pour identifier des profils de ruptures et des résistances maximales. Ainsi, la représentativité des mesures serait vérifiée et l'approche pratique développée par comparaison avec les caractérisations faites sur éprouvettes classiques. Des techniques non destructives, comme la mesure des fréquences de résonance, semblent très intéressantes à développer. Dans ce cas, l'intérêt principal est la possibilité d'évaluer des caractéristiques mécaniques fiables, sans avoir à détruire le matériau analysé. À notre connaissance, la technique ne peut être pratiquée qu'à partir d'éprouvettes calibrées. Les mesures sur des matériaux originaux nécessitent donc un prélèvement. Pour améliorer les techniques d'analyses, développées spécifiquement pour les domaines patrimoniaux et muséaux, une recherche avec le même équipement semble intéressante à développer par mesure *in situ* et sans prélèvement, adaptée au terrain et aux multitudes d'artefacts et de configuration.

Enfin, un dernier axe également envisagé aux débuts de ces travaux mais n'ayant pu être concrétisé est celui du vieillissement accéléré des matériaux et des éprouvettes. Soumis à des cycles de variations thermiques et hygriques, les matériaux de comblement seraient ainsi étudiés sous tous les aspects. Les retours d'expérience des professionnel·les ainsi que les constats faits à partir des collections étudiées et du suivi des trois artefacts sont encourageants et laissent penser que le plâtre est un matériau résilient et solide lorsqu'il est bien conservé. Néanmoins, la précision des aspects de vieillissement permettrait de proposer des formulations-types aux professionnel·les, avec une certaine garantie de durabilité optimale des interventions dans des conditions normales de conservation.

Annexe I

Réponses à l'enquête	p. 470
Synthèse des résultats de l'enquête	p. 491
Tableaux de synthèse des prospections de corpus	p. 492
Collection de cadres du musée du Louvre	p. 492
Gypsothèque du musée du Louvre	p. 500

ENQUÊTES		Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019		Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les objets en plâtre (complément "restaurations formelles" ou complément d'une forme) ?		Pour quelle(s) raison(s) ?		De que(s) fournisseur(s) ?		Formulations personnelles, quelles proportions ?		Procédez-vous à des joints d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?	
Titre, profession, qualité: Spécialités, typologies		Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019		Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les objets en plâtre (complément "restaurations formelles" ou complément d'une forme) ?		Pour quelle(s) raison(s) ?		De que(s) fournisseur(s) ?		Formulations personnelles, quelles proportions ?		Procédez-vous à des joints d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?	
Conservatrice-restauratrice	sculpture, archéologie	2000	Av cours de ma pratique j'ai utilisé plusieurs produits: le Modostuc, le Poupéret et le Polyfilla.	Le Modostuc car c'est un produit courant en restauration. Cependant parfois les volumes sont trop lacunaires et la taille de comblements est trop importante pour ces conditionnements en tout petit pots. J'imagine que pour régérer le Poupéret, on peut aussi utiliser le Modostuc, mais je n'ai pas largement le Polyfilla, que je prépare avec la texture qui me convient, et avec lequel je peux tout faire: reconstructions progressives, comblements classiques...	Comblements importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact? oui ou non					
Cela dépend, le plus souvent la texture du plâtre, qui est plus ou moins lisse, mais pour monter un volume qui dépasse de la forme, il faut qu'il soit presque pris sinon il flue.	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	fréquent :	Quelles sont vos méthodes de mise en oeuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits comblements: choix des méthodes et raison(s)	Comblements importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact? oui ou non					
Non, je nettoie tout de suite lorsque c'est frais.	Paraloid B72 à 5% dans acétone	Non, je nettoie tout de suite lorsque c'est frais.	Paraloid B 500, Paraloid B72.	Polyfilla	Polyfilla	Je privilégie la restitution formelle, qui permet de redonner le volume et donc la lecture de la sculpture, sans qu'il y ait vraiment nécessité à l'usage de produits comme le Paraloid B72, surtout lorsqu'il n'y a pas de documentation. Les restitutions dans la forme d'origine sont discutées avec ces pairs, et je dois comprendre et adhérer à la démarche pour le faire, et avoir la documentation.	Les renforts de plâtre fins et alimés sont faits avec une doublure mat de verre-plexiglas B500 pour renforcer la surface. La structure est ensuite renforcée soit avec des planches et des appuis en balais si la structure est petite (exemple de plans-maquette assez réduits, avec mis en place d'un carroyage de soutien en balais pour soulager le plâtre mais ne pas rajouter de poids). Sinon renforts avec des armatures métalliques inertes ou des fibres de carbone (armatures de cerfs-volants) prenant appui sur un doublage mat de verre-plexiglas B500. J'utilise le Plexiglas car il ramollit mieux le mat de verre que le Paraloid, et permet donc de mieux adhérer aux aspérités de la surface (souvent interne) des plâtres.	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en oeuvre ?					
Protégez-vous les zones à l'entour des joints ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (recoffrement et zone originales) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (recoffrement et zone originales) ?	Références de méthodes utilisées: Méthodes apprises en formations professionnelles, échanges entre professionnels, autres	Pouvez-vous préciser ?	Observez-vous des différences esthétiques souhaitées-vous obtenir ?						
Non, je nettoie tout de suite lorsque c'est frais.	Paraloid B72 à 5% dans acétone	Non, je nettoie tout de suite lorsque c'est frais.	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Polyfilla	Méthodes apprises en formations professionnelles, autres	Je me suis adaptée aux problématiques que j'avais et j'ai mis en place des solutions qui y répondaient tout en respectant le mieux possible notre dentologie.	Observez-vous des différences esthétiques souhaitées-vous obtenir ?						
Quel(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adaptez-vous ?	Quel(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adaptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De que(s) type(s) ?						
Je me préoccupe beaucoup de l'immoibilité sur l'œuvre et pour le restaurateur. Le respect de l'environnement en utilisant des produits dominants peu de déchets est toujours mon premier choix. Lorsque je peux tout combiner, c'est gagné !	Pastel sec et aqueux	Je n'aime pas l'uryle que car elle change de couleur dans le temps.	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Changement de couleur des retouches et / ou des adhésifs anciens (souvent néoprène).	Changement de couleur des retouches et / ou des adhésifs anciens (souvent néoprène).	oui	Relevés d'appels photos où je peux écrier et entourer les zones concernées.						

ENQUETE 2									
Quelle matériau(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (reconstituer les zones d'intervention) ?									
Titre, profession, qualité :	Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (reconstituer les zones d'intervention) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Conservatrice-restauratrice	Sculpture	2013	Polyfilla, Modostuc, plâtre, carbonate de calcium + adhésif	Produits testés et étudiés dans le cadre de mémoires de diplômes, appris lors d'une formation Plâtre en fonction de la demande et du commanditaire (par ex. création d'architecture, pratique courante)	CTS Migajon bricolage classique		Ajout d'adhésif type Plexol ou P/VAC pour renforcer comblements par exemple		
Quelles(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits comblements: choix des méthodes et raison(s)	Comblements importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
Depend de l'intervention	Par habitude	Directement en place, modelage	Application à la spatule en fonction de la demande, en surface ou en faible profondeur, souvent du Modostuc quand pas de nécessité structurelle	Montage de la forme, possibilité d'utiliser des calages/coffrage pour obtenir une forme spécifique, / plutôt Polyfilla ou plâtre		Doublage par imité, papier japon, tissu fibre de verre Goujonnage			
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (reconstituer les zones d'intervention) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation professionnelle(s), lors de stages, échanges entre professionnels, autre(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Depend du cas de figure, si isolation alors avec Paraloid dans acétate d'éthyle barres	/	/	Méthodes apprises en formation professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels			En fonction de la demande, critères structuraux ou esthétiques, réversibilité, couleur...	Polyfilla = produit de comblement adapté au renfort structurel mais couleur pas adaptée Modostuc = utilisé que pour des petits comblements à visée esthétique		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquate ou inadéquates ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De que(s) type(s) ?		Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Comblement de structure ou de surface	Aquarelle, pastels, gamblins, gouache ?	Questionnement sur l'acrylique qui vire avec le temps (idem pour la gouache ?)	Vus une fois une sculpture en plâtre avec des retouches réalisées à l'acrylique (sapporé), qui avaient viré de teinte	oui et non	Par documentation photographique				

ENQUÊTE 3		Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme)?		Pour quelle(s) raison(s)?		De quel(s) fournisseur(s)?		Formulations personnelles, quelles proportions? Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux? Pour quelle(s) raison(s)?	
Restaurateur conservateur	Restauration conservation de bois doré et peint	Oct 1992	Gros blanc, mélange de colle de peau animale et de blanc de Meudon	Matériau que l'on peut facilement doser au niveau de la force de la colle et de la quantité de charge, donc peut s'adapter à la qualité du plâtre ou stuc.	Colle animale de chez Kremer, Blanc de Meudon de chez HMB BDA	Colle de base à 10% dans de l'eau. Puis + d'eau selon que l'on veut un enduit dur ou plus souple. Blanc de Meudon à saturation, jusqu'à l'obtention d'une pâte souple.	Non	Procédez-vous à une isolation des plans de contact? oui ou non	
Quelle(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures? des volumes précis, ou par habitude?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre? De la plus à la moins fréquente:	Petits compléments: choix des méthodes et raisons)	Compléments importants: choix des méthodes et raisons)	Restitutions formelles ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons)	Renforts: choix des méthodes et raisons)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact? oui ou non		
L'aspect de ce genre de matériaux est-il particulièrement différent, qu'on emploie du blanc de Meudon, du carbonate de calcium microsilicé, du gy, ps, du plâtre ou autres... Et selon les concentrations de colle.	Fabrication de gros blanc: même chose que pour une pâte à tarte: dans un récipient rempli de blanc de Meudon, on met de la colle de bœuf dans un puit et jusqu'à ce que le liquide se sature de blanc. On obtient une boule encore un peu molle que l'on sort alors du récipient en prenant soin de s'enduire les mains de blanc. On termine le mélange de la pâte dans ses mains, en appuyant bien pour que le mélange se tasse, et en ayant soin de rajouter du blanc. Le mélange est trop poisseux, mais on peut le laisser se garder 24 heures dans un récipient petit et bien fermé, hors du froid.	Après avoir purgé la lacune à combler, on encolle la surface qui va recevoir le gros blanc afin d'assurer une bonne adhérence. On peut choisir d'isoler les contours proches de la lacune, à l'aide d'un matériau de décor existant. On peut déposer des fibres végétales dans la colle qui servira à réaliser son gros blanc (papier de soie par exemple) afin d'éviter le craquellement du comblement. Il ne faut pas que ce comblement sèche trop vite. Le gros blanc doit avoir été posé bien tassé, bien appuyé dans la lacune et bien mouillé sur l'encollage afin qu'il se maintienne bien lors du séchage.	Après avoir purgé la lacune à combler, on encolle la surface qui va recevoir le gros blanc afin d'assurer une bonne adhérence. On peut choisir d'isoler les contours proches de la lacune, à l'aide d'un matériau de décor existant et on pourra imaginer de restituer dans un matériau stable, à priori du gros blanc. Si on veut "marquer" le comblement, on peut choisir de déposer un pigment léger dans le gros blanc. On peut aussi choisir de plâtrer à l'aide d'une spatule qui permettra de ne pas trop laisser de pâte, en s'appuyant sur les bords du séchage.	Une fois sec, le comblement pourra être poncé à l'aide de fers à réparer, d'une éponge micro poreuse, d'un linge humide ou/et de papier abrasif.	La formule en fonction de la surface à décorer, certains produits mais il est absolument nécessaire de se appuyer en testant, en les rapprochant des techniques plus traditionnelles que nous connaissons. Et l'échange entre professionnels est essentiel! Et autre: je donne des formations en dur et cela m'apporte d'approfondir les grands thèmes de la restauration en conservant des bois dorés qui ne sont que rarement abordés par les enseignements existants...	La formule en fonction de la surface à décorer, certains produits mais il est absolument nécessaire de se appuyer en testant, en les rapprochant des techniques plus traditionnelles que nous connaissons. Et l'échange entre professionnels est essentiel! Et autre: je donne des formations en dur et cela m'apporte d'approfondir les grands thèmes de la restauration en conservant des bois dorés qui ne sont que rarement abordés par les enseignements existants...	Environnement de différences entre les différents fournisseurs, et pour une même marque, entre les différents lots, le surcoupe sur des produits: colle de Meudon, colle de Meudon, colle de Meudon PVA, produits acryliques... Le seul matériau à peu près stable est le Blanc de Meudon...		
Si oui, avec quel(s) produit(s) et quelle(s) raison(s)?	Protégez-vous les zones alentours? De quelle(s) façon(s)?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces?	Quels produits utilisez-vous pour combler les plans de séchage (c'est-à-dire comblement et zone originale)?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres)	Pouvez-vous préciser?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre?		
Si le support présente des caractéristiques particulières (Xylophages, pulvérisances, soulèvements...), il faudra réaliser une consolidation à l'aide de matériaux adaptés au type de décor existant, comme de la colle de peau animale, des laits ou émulsions acryliques, des vernis...	Nous pouvons isoler la dorure à la détrempe à l'aide de vernis gomme laque (Astra ou blanche décolorée) ou d'une résine ou émulsion de type acrylique car ils sont souples et extensibles sur le support.	A priori de la colle de poisson ou de la colle de peau animale, très réversibles, qui pourront être chargées en microbalais, principalement si le collage n'est pas très chargé ou pas avec par exemple du blanc de Meudon, pour les collages joints.	Je ne sais pas si je comprends bien cette question... Quels sont des plans d'assemblage?... A priori, de la colle chargée avec de la soie, de la pâte de bois tendre (Balsa), de la poudre de bois encollés (Wood Mastic...).	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres)	La formule en fonction de la surface à décorer, certains produits mais il est absolument nécessaire de se appuyer en testant, en les rapprochant des techniques plus traditionnelles que nous connaissons. Et l'échange entre professionnels est essentiel! Et autre: je donne des formations en dur et cela m'apporte d'approfondir les grands thèmes de la restauration en conservant des bois dorés qui ne sont que rarement abordés par les enseignements existants...	La réversibilité et la stabilité liés à l'esthétique qui est le principal enjeu des objets sur lesquels nous travaillons...	Observez-vous des différences entre les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre?		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adaptez-vous?	Y'a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des niveaux précis des zones d'interventions?	De quel(s) type(s)?	Si non, pour quelle(s) raison(s)?		
Inocuité pour l'environnement et pour notre santé, stabilité du produit, facilité de mise en œuvre, réversibilité, prix...	Sur un support aqueux: couleurs dans du vernis. Sur un support huileux ou d'œuf: aqueux, gouache, terres ou pigments dans de la gomme arabique, de la colle de peau ou de liège aqueux	Je pense que le problème de la retouche en art décoratif est souvent lié à la considération que nous avons de ces décors... Si nous arrivons à mieux considérer les décors peints ou dorés comme des supports qui prennent du temps à peindre ou sculpter et à préserver existant, puis à retoucher de manière minimale, stable et réversible, les compléments le plus importants.	Non... Sur la retouche à l'huile sur un support retouché à la même huile, les vieillissements qui sont redoublés à la même vitesse très mal. La surface dorée de fin par se craquelier, l'aspect apparaît sur une surface de peau décollant, assez inesthétique, alors que la dorure à l'eau sous jacent reste beaucoup plus intéressante...	Une retouche inadéquate serait une retouche trop invasive qui recouvre des éléments essentiels à la lecture de ce décor. Pour exemple, les dorures qui sont des éléments fondamentaux pour pratiquer le For et ternis...	Est-ce que vous réalisez systématiquement des niveaux précis des zones d'interventions?	Pas systématiquement, mais oui pour les objets de musée qui ont un intérêt patrimonial. Je prends de bonnes photos, je dessine dessus (logigramme photocopie, pain, tablette...) les différents types d'altérations empruntant des photos de détail.	Si non, pour quelle(s) raison(s)?		

ENQUÊTE 4									
Titre, profession, qualité: Spécialités, typologies									
Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : <i>enquêter communiquées en 2019</i>									
Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restaurations formelles" ou complément d'une forme) ?									
Pour quelle(s) raison(s) ?									
De quelle(s) fournisseur(s) ?									
Formulations personnelles, quelles proportions ?									
Précédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?									
restauration de sculptures	sculptures pierre plâtre bois	2004	petits compléments et restaurations: Polyfill®*, Modostuc® en plâtre, Modostuc® réversible et amovibles; Ren Paste résine époxydique bi-composante (2 restaurations de ce type).	Polyfill et Modostuc: facilité de mise en œuvre, grande ouverture de travail et matériau fidèle à l'original de la matière originale (contrairement au plâtre). Pour les grosses restaurations STRUCTURELLES réversibles avec de la Ren Paste; poids léger (surtout Sy 36) et se travaille facilement (en isolant de la matière originale) pour être collé dans un deuxième temps au Paravid B7z®.	CTS essentiellement			Ajout parfois de résine acrylique type Pielcol 1590 (CTS) en complément des Modostuc® pour la résistance en cas de boudage structural ayant besoin de résistance à la compression ou traction par exemple.	
Quelle(s) texture(s) de glçchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits compléments: choix des méthodes et raison(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Précédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
texture onctueuse	par habitude	pour les petits compléments ajoutés de matière et seule fois pour le Polyfill® pour les compléments plus importants ajoutés de matière après la prise de la première application, puis retravaillé au riffilet, petite lime ou papier de verre fin.	petits compléments: Modostuc® souvent en deux fois à cause d'un retrait au séchage.	les volumes sont montés au Polyfill® ou plâtre plus rarement pour les terrasses (par exemple) en plusieurs fois et peuvent être renforcés avec des goujons de fibres de verre ou bambou selon les cas et les contraintes.	idem	fibres de verre d'ivers diamètres ou bambou	non		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Précédez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (raccord comblement et zone originale) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), échanges entre professionnels, autres?	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
non	non	selon les contraintes, PB7z à 45% dans acetate d'éthyle ou si besoin résine époxydique bi-composante Aralabite 2011 (application préalable de 2 sous-couches isolantes PB7z à 15%) pour petits collages: PVA	Polyfill® ou Modostuc	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels		impuccité pour la matière originale, proche sur le plan optique: problème avec le Polyfill® qui peut avoir un P-Felt: non satisfaisant. Non toxique et facile à mettre en œuvre.	J'ai testé des mortiers de boudage marque Tout P-Felt: non satisfaisant.		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
impuccité pour la matière originale, proche sur le plan optique, non toxique, facilité de mise en œuvre	Petit sac, aqueux, liant arylique 5% - pigments: retouches réversibles appliqué au pinceau utilisation d'un aérographe possible.	inadéquates: brillance et réversibilité difficile.	oui	non	oui	pour les compléments les plus importants.			

ENQUÊTE 5															
Titre, profession, qualité :															
Spécialités, typologies		Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019		Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?		De quel(s) fournisseur(s) ?		Formulations personnelles, quelles proportions ?							
conservateur-restaurateur de sculptures		sculpture		2005		mélange de plâtre et de blanc de Meudon (50/50)		matériau visuellement très proche du plâtre, plus tendre et donc plus évanescent. Permet également d'être retravaillé à tout plus facilement		plâtre à modeler, et blanc de Meudon fournisseur variable		moulié blanc de Meudon, mais plâtre non pas d'autre que le carbonate de calcium		Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?	
Le(s) mélange(s) effectués par passées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?		Quels sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :		Prêts comblements: choix des méthodes et raison(s)		Comblements importants: choix des méthodes et raison(s)		Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)		Reinforts: choix des méthodes et raison(s)		Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? Oui ou non			
		humidification de la zone de contact, emploi du mélange plâtre/blanc de Meudon pour combler en place, puis application de grande dimensions et/ou en excroissance emploi de renforts (fibre de carbone/fil de laiton) et de plâtre pour un matériau plus résistant.		Prêts comblements: choix des méthodes et raison(s)		mélange plâtre/blanc de Meudon pour plus de réversibilité et facilité de mise en œuvre (en contact proche avec l'original, évite d'abîmer la surface autour du comblement car le comblement est tendre)		plâtre seul et renfort, pour des raisons de tenue mécanique		composites fibre de verre et fibre de carbone: scellés dans le plan de cassure avec une résine (acrylique ou époxy selon le poids de la restitution), ou fil de laiton (permet d'être déformé et d'être suivi de formes précises (pour un drapé par exemple). Matériaux stables dans le temps		Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? Oui ou non			
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?		Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?		Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?		Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord comblement et zone originale) ?		Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)		Pouvez-vous préciser ?		Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?		Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?	
		non, isoler les plans de contact par un produit à base de silicone, à l'aide d'un pinceau, à l'acrylique entre la restitution et l'original		acrylique PB25 ou PB44 pour des fragments plus gros, voir epoxy pour du très lourd		plâtre/blanc de Meudon		Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), échanges entre professionnels		aspect très proche du plâtre, couleur possible si le bouchage n'est pas trop exposé, porosité proche		pour le plâtre ou temps de prise variable. Pour la dureté de surface il y a certainement des différences d'une marque à l'autre mais j'en ai pas pu le vérifier			
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?		Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?		Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?		Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?		Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?		Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?		De quel(s) type(s) ?		Si non, pour quelle(s) raison(s) ?	
manipulabilité, facilité de reprise de la surface de la restitution		variable selon l'aspect de surface de plâtre et en particulier sapinane: aqueux, puis avec emploi de produits plus épais avec un étirer de cellulose, gouaches		la surface est très poreuse donc on peut retoucher facilement des plâtres avec patine vraie polychrome ou patine huileuse. Je peux recevoir la restitution avec une couche plus étanche comme du Modestuc		oui		je n'ai pas noté de problème de conservation des ces bouchages ou restitutions		oui		prise de vue ou schéma de localisation			

ENQUÊTE									
Titre, profession, qualité:									
Spécialités, typologies									
Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : <i>enquêter communiqué en 2019</i>									
Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, restaurations formelles" ou complément d'une forme) ?									
Pour quelle(s) raison(s) ?									
De quel(s) fournisseur(s) ?									
Formulations personnelles, quelles proportions ?									
Précédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?									
gérante en conservation-restauration du patrimoine	sculpture et collection d'histoire naturelle	2012, mais une quinzaine d'année d'expérience	Sort du polyfills fin, ou bien enduit synthétique (plâtre fin et finition), Mada3 ou encore Carbonate de calcium et colle de peau	Le choix peut dépendre de plusieurs raisons mais surtout en fonction de la blancheur du plâtre car les différents produits ont des teintes pouvant aller du gris blanc au blanc jaune. De plus certains se retravaillent mieux que d'autres et certains non aucun retrait.	CTS, Esprit Composite, magasin de bricolage, Safer	Pour les plâtres, je prépare de petite quantité: un fond d'eau et je saupoudre de plâtre jusqu'à quasi intéséfin ou bien goujon en carbone. Je n'ajoute jamais de pigments ou autre. Sauf dans le cas des simili pierre ou parfois il y a un mélange de plâtre et de craieau - petits agrégats(recette trouvée chez les compagnons)			Uniquement dans le cas d'un comblement structurel, éventuellement fibre de verre (type intéséfin ou bien goujon en carbone).
Quel(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquentes :	Petits compléments: choix des méthodes et raisons(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raisons(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons(s)	Renforts: choix des méthodes et raisons(s)	Précédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
J'aime bien dire yaourt grec ou à la limite du fromage blanc (genre perle de lait pour ne pas citer de marque)		Je glâche dans un petit bol en plastique et puis j'applique à l'aide d'une spatule et essayant de ne pas trop déborder de la lacune		Pen fais peu	cela va dépendre de l'état de l'objet, goujon carbone, fibres de verre découpé ou encore doublage à l'intéséfin ou fin ou moyen				
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Précédez-vous les zones alentours ? De quel(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (raccord comblement et zone originale) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et statistiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Paraloid B72 ou polydorm BM 18, ou une résine en solution dans un solvant		résine acrylique (le plus fréquent) ou vinylique	Plâtre synthétique polyfills ou Safer (finition)	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels		Le but pour moi et de me rapprocher de la couleur d'origine du plâtre (si non polychrome) et également au niveau de la granulométrie.	oui de couleurs et de grains		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y'a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
mise en œuvre, condition de travail et l'immobilité pour la santé	Pastels, aquarelles, gamblin	J'en sais pas c'est un peu ou ça par cas, on sait ce qui va marcher ou non	oui	ces particulier d'un objet, qui est tombé une semaine après son retour au Musée, donc pas vraiment eu le temps de vieillir et je suis en passe de le restaurer ce mois-ci	oui	Constat d'état détaillé par écrit et la photographie toujours avant bouchage et avant intervention les quatre faces de l'objet, et si l'objet est complexe, une cartographie sera nécessaire	Je pense que cela dépend du type d'œuvre en plâtre, peint ou non, b72, perle.... En espérant que cela pourra vous apporter quelques choses.		

ENQUÊTE 7									
Titre, profession, qualité:									
Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (complément, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Précédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?			
conservatrice restauratrice libérale	2005	Modostuc, Polyfilla, plâtre parfois	petit complément: modostuc car très réversible et coule ur/aspect souvent proche du plâtre réversible et un peu trop gris mais le retrait est plus faible plâtre si il a une contrainte mécanique importante ou si ton passe par un moulage pour le complément d'une forme	Modostuc, Polyfilla de chez CTS Plâtre Molés 3					
Les mélanges sont-ils effectués par passes ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits compléments: choix des méthodes et raisons)	Compléments importants: choix des méthodes et raisons)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons)	Renforts: choix des méthodes et raisons)	Précédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non			
non	à directement en place par modelage à la spatule puis reprise de la forme à la rpe à prise d'empreinte (si possible), coulage dans le moule puis collage	directement en place par modelage à la spatule puis reprise de la forme à la rpe	directement en place par modelage à la spatule puis reprise de la forme à la rpe	directement en place par modelage à la spatule puis reprise de la forme à la rpe à prise d'empreinte (si possible), coulage dans le moule puis collage par exemple si il y a un autre modèle ou un moule ancien)	tissu de fibres verre, tige de fibres de verre, tige de fibres de carbone, tige d'acier inox, plâs d'époxy non				
Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (re-cord complétement et zone originales) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, ac changes entre professionnels, autre(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?			
non	PVA, PVB, adhésifs acrylique (Plexol), Epoxys Epoxy après une isolation avec Paraloid si besoin d'une grande résistance mécanique	même produits que pour les compléments/restitutions (Modostuc, Polyfilla, plâtre) avec parfois un ajout d'adhésif (PVA ou Plexol)	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), échanges entre professionnels		Modostuc, Polyfilla : résistance mécanique plus faible, matériaux plus tendres que le original / qui peut être cassé et se fissurer Plière : résistance mécanique égale au plâtre, aspect identique	l'absence en milieu de retrait avec le polyfilla qui avec le modostuc mais se couler est plus grise			
Quel(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones resautées adoptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?			
pinceau ou aérographe lorsque les zones à retoucher sont larges avec des aquarelles Winsor&Newton ou OOR, parfois avec des couleurs Gambin très diluées + couche de Paraloid	?	non	non	non		manque de temps pour des relevés précis et non demandé généralement, mais j'ai un descriptif dans le texte du rapport d'intervention			

ENQUÊTE 8									
Titre, profession, qualité :	Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (complément, "restitutions formales" ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Conservateur-Restaurateur des sculptures, sculpteur et historien des techniques.	Pierre, marbre, plâtre, terre cuite, autres matériaux.	Janvier 1973	Plâtre très fin, parfois additionné de résines en très faible dosage. Blanc de Meudon, chaux en pâte, additifs de type "Alun de potassium".	Parce que c'est compatible avec le substrat, et cela fonctionne.	N'importe.	Variables selon le problème à résoudre, selon le complément à faire...	Autres liants que l'eau, s'il y a des polychromies, des peintures sensibles à l'eau.		
Quelle(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits compléments: choix des méthodes et raisons(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raisons(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons(s)	Renforts: choix des méthodes et raisons(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
Variable.	Pas de pesées, sauf gros travaux, pour obtenir une régularité dans le résultat à obtenir.	Variables.	de matériaux adaptés au cas d'espèce.	En général plâtre sur plan de collage imprégné de résine acrylique très diluée (acry 33), par exemple	Parfois par moulages sur original ou autre riglique, parfois par moulage et recollé à sec.	Filasse le plus souvent.	oui		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quelle(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les plaques ?	Quelle(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord complément et zone originales) ?	Références: des méthodes utilisées: Méthodes apprises (formations) professionnelles(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Résine acrylique diluée.	Si nécessaire.	Résine acrylique diluée, parfois colle à carreaux de plâtre, si œuvre monumentale...	Voir ci dessus	Méthodes apprises en formations) professionnelles(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)	Toujours souplesse dans les choix, en fonction des problèmes à résoudre...	Résistance dans le temps, résistance mécanique un peu plus faible que le substrat, pour la réversibilité.	Parfois.		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ? restaurées adoptez-vous ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Chaque cas est particulier...	Diverses, selon le contexte...	Selon les cas.	oui	Peu, sur mes interventions.	oui	Photos et dessins.			

ENQUÊTE 9									
Titre, profession, qualité :									
Spécialités, typologies									
Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019									
Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (combinaison, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?									
Pour quelle(s) raison(s) ?									
De quel(s) fournisseur(s) ?									
Formulations personnelles, quelles proportions ?									
Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?									
Restaurateur du patrimoine	Sculpture	Février 2016	Modotuc	Utilisé à l'hipp, habitude.	CTS				
Quelles textures de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits comblements: choix des méthodes et raisons)	Complements importants: choix des méthodes et raisons(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons(s)	Renforts: choix des méthodes et raisons(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
		Modélage, directement sur le plâtre, en plusieurs couches si nécessaire.	Comblement au Modotuc en surface Facile à mettre en œuvre, séchage rapide	Jamais réalisé	Jamais réalisé	Pilâtre et fibres sur le revers de moulages architecturaux. Mise en œuvre rapide et séchage rapide dans un contexte de chantier.	non		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les trous et leamage (accord comblement et zone originale) ?	Quelles méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Protection avec film plastique	Jamais réalisé	Jamais réalisé	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), échanges entre professionnels		Surface lisse et mate	Non	Modotuc: facile d'utilisation, réversible, immoaté pour la santé.		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelles méthodes de retouche des zones restaurées adaptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de près sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Pastels secs fixés à l'acétone Pigments naturels fixés à la Kludr G	Cela dépend du type de surface et de l'effet recherché. Il faut éviter un produit qui pénètre trop loin dans le matériau	non	oui	Localisation sur photographique (pas de schéma)					

ENQUÊTE 10										
Titre, profession, qualité:										
Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?			Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?		Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?	
Conservatrice restauratrice	4 ans 2015	Modotuc / plâtre de moulage Prestia Tradition / Polyfilla	Compatibilité, dureté moins importante que le matériau à traiter	Artech (Avignon)					Eventuellement Flexcol B500 en faible proportion pour augmenter la dureté de la matière	
Quelles(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente:	Petits compléments: choix des méthodes et raison(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non			
Pesée	Comblement directement en place, pièces amovibles rapportées	Modotuc pour sa facilité de mise en œuvre	Pièce amovible collée puis masquée	Modélage de la pièce en plâtrine, réalisation d'un moule, puis tirage en plâtre de moulage	Renforts internes à la fibre de verre ou tulle de coton, non imprégnés de résine				non	
Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord comblement et zone originale) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)							Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?
Protection de la sculpture (film alimentaire) lors du modelage en plâtrine	Paraboli B72		Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels							
Quelles(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y'a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?		Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?		De quel(s) type(s) ?			
Si nécessaire, retouche à la peinture acrylique Liquitex pro (heavy body)	non	non	non	oui	Rapport d'intervention détaillé, photographies			Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		

ENQUÊTE 11									
Titre, profession, qualité :									
Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?			Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?		Précédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?
restauration	fin 2012	sculptures et objets ethnographiques	comblement fin modostuc restitution: mélange plâtre et carbonate de calcium	modostuc: car se travaille bien, aspect fin, mais uniquement en fine épaisseur sinon se craquelle. Pour volumes plus importants, mélange plâtre CaCO3 car se fissure pas (ou moins) et reste plus tendre que le plâtre.	fabricant du modostuc (je ne me rappelle plus le nom) plâtre fin: marques du commerce sans distinction CaCO3: je me fournis chez Artech ou Krinner en vrac	modostuc pur plâtre + CaCO3: soit 2/3 mais très faible, soit 2/3 plus résistant			pas d'ajouts
Quel(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits comblements: choix des méthodes et raisons(s)	Comblements importants: choix des méthodes et raisons(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons(s)	Renforts: choix des méthodes et raisons(s)		Précédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non	
ça dépend s'il faut modeler (texture crême épaisse ou couler dans un moule (texture plus liquide)		- comblements avec modostuc - restitution avec plâtre + CaCO3 moins fréquentes: en général, moulage d'après modèle en plâstiline, puis collage.	voir plus haut	voir plus haut	voir plus haut	je n'en ai jamais mis mais j'imagine qu'il y a du plâtre, du modostuc (sauf et d'après dépend de chaque so) mais encore jamais fait de goulonnage pour restitution formelle, sinon, chargés fins: fibre de verre, microbilles de verre, etc. mais les renforts doivent être réservés aux sculptures plus monumentales que celles que j'ai traitées			
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord comblement et zone originale) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?		Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?	
Paraloid B72 à 20%, je laisse sécher et ensuite collage de la pièce avec même adhésif (à 40%), non chargé ou pas en fonction du plan de collage (jointif ou pas)		idem	paraloid chargé (microbilles de verre ou microballons phénoliques)			toujours les mêmes objectifs: collage ou comblement doit tenir, mais si possible être réversible, sans altérer l'original. Quant à la couleur, je retouche après.		oui, voir plus haut	
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quel(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquate ou inadéquate ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous consulté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?		Si non, pour quelle(s) raison(s) ?	
tout cela	souvent couleurs Gamblin, sinon paraloidchargés, sinon paraloid sec	cela dépend de la nature des manipulations et de son exposition	non		oui	photos ou schémas			

ENQUÊTE 4									
Titre, profession, qualité :	Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (complément, restaurations formées ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Restauration du patrimoine	meublier	2016	Pour les toutes petites reconstitutions : mélange charge / lait acrylique. Charge variable (carbonate de calcium, microbilles ou fines perles). Pour les reconstitutions plus grandes : principalement du plâtre à modeler ou à couler (selon s'il s'agit d'un décor en place ou d'une partie qu'il est possible de mouler à part), parfois chargé de pigments ou d'une charge radio-opaque. Des bandes de plâtre et du plâtre à modeler pour des décors en carton pierre. Rarement mais parfois : de la baliste, pour des interventions sur du monumental (décors de plafonds) pour avoir une plus grande facilité d'application.	Plâtre car résultat esthétique satisfaisant, compatibilité des matériaux avec l'original. Pas de risque de confusion si on a une charge colorée dans le mélange.	Variable				
Quelle(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits compléments: choix des méthodes et raison(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact? oui ou non		
Variable suivant le résultat souhaité	Par habitude, et variable suivant le résultat souhaité (parfois je veux modeler sur place à la spatule, parfois je sculpte après, etc)	Suivant les situations couvées au modelage	Cf précédemment	Cf précédemment		Bandes de plâtre pour le carton pierre: permet un maintien d'une reconstitution sur une zone "en creux". Parfois je rajoute de l'acrylique (Flexcol Bgso) pour améliorer l'adhésivité entre la bande de plâtre et le plâtre original (car le carton pierre est très sale au revers et il est impossible d'accéder).			
Si oui, avec quel(s) produit(s) ? De quelle(s) façon(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assèchement (recond completement et zone originales) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Non.	Non.	Adhésif acrylique, surtout en émulsion.	Plâtre	Méthodes apprises en formation(s), professionnelle(s), échanges entre professionnels		Généralement j'ai besoin d'un résultat proche de l'original (décors muraux) qui peut être obéré à la feuille (mélange ou colle de peau).	Baliste: résultat qui ne satisfait pas pleinement. Déjà car résine époxy, donc stabilité moyenne. Mais utilisé en adhésif les sections (trous) de chantier les court. C'est une solution qui permet d'obtenir un résultat correct. Je trouve par ailleurs que l'état de surface est très poreux et que la mise en œuvre n'est pas toujours très agréable (côté fragile, difficile à modeler avec précision).		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Principalement contexte de travail.	Généralement des ornements dorés dans l'œuvre. Sinon peinture acrylique.	Sans avis	non	non	oui	Schéma			

SURVEY 1									
Titre, profession, qualité:	Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, résistitions formelles ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Précisez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Associate Conservator	Picture frames, furniture, gilded wooden objects, reliefs	45 years 1974	Hydrocal (plâtre), PVOH gesso / this survey is in response to plaster work only, not gesso work which has some different parameters.	infill	Sculpture House	by working properties	no		
Quelle(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits comblements: choix des méthodes et raison(s)	Comblements importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Précisez-vous à une isolation des plans de contact ? ou ou non		
matching original, smooth	by working properties	wet the original for adhesion or seal the original for separation	putty consistency	Integration with original	Cast from original	Amature or synthetic textile reinforcement	ou et non		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ou de quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (recond comblement et zone originales) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes appliquées en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
PVA adhesive	wax	PVA adhesive	Hydrocal	Autre(s)	Professional experience	Retreatability and adhesion	no		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche adoptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
All the above...low toxicity, low tech	water colors, Gambin colors, Golden colors, traditional gilding on traditional gesso, non-traditional gilding on non-traditional gesso	I choose to introduce materials that can be removed without damaging the original material, that are chemically exclusive	ou	non	ou	photos and reports			

DOCUMENT 1									
Titre, profession, qualité :	Spécialités, typologies	Date de début d'expertise, ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, restitutions formalisées ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Précédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Conservateur-restaurateur de sculptures indépendantes	pière-plâtre terre cuite et leurs polychromes; sculpture en plâtre et en terre cuite; terre cuite et pierre-plâtre	1990, 29 ans d'expérience	carbonate de calcium pigments et plâtre, ou talc et plâtre, ou poudre de pierre et plâtre, ces mélanges avec charges fines (carbonate de calcium ou talc ou poudre de pierre) peuvent être chargé de vermiculite pour les gros volumes ; ou plâtre mort et pigment lié par une résine acrylique	le mélange doit être décomposé de l'original et plus rendre	plâtre Modél 3 (fin ou lustré rouge selon la finesse nécessaire, je fabrique mon plâtre mort moi-même à partir de ces plâtres, acrylique Acryl 33 de CTS (je ne l'utilise pas avec le plâtre, seulement avec le plâtre mort)	adaptés, en général : 3 volumes de charge pour 1 volume de plâtre, parfois moins de charge pour les mortiers, et parfois plus de charge pour les terres cuites par des sols solubles (reliefs de la chapelle troglodytique du château de la Roche-Cuyon).			
Quelles (s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits compléments: choix des méthodes et raison(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raisons)	Restitutions formelles ou restaurations de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Précédez-vous à une isolation des plans de contact ? ou ou non		
celle de la texture environnante du matériau d'origine (ce qui n'est pas toujours la texture d'origine, elle peut avoir évolué)	volumes précis en dosette (mais ce volume précis correspond à des quantités de matière un peu variables d'un lot à l'autre, ce qui permet tout de fois de rester dans des limites convenables)	A la spatule en place. A la seringue en pistolet. Petites pour déposer dans un interstice sans déborder sur l'épaulement.	Mélange 3 volumes charge (carbonate de calcium ou talc ou poudre de pierre) et 1 volume plâtre. Ce mélange peut être additionné de vermiculite pour les très gros volumes.	Mélange 3 volumes charge (carbonate de calcium ou talc ou poudre de pierre) et 1 volume plâtre. Ce mélange peut être additionné de vermiculite pour les très gros volumes.	Mélange environ 3 volumes charge et 1 volume plâtre, variables selon la fragilité de la forme.	Structures fibre de verre ou carbone et époxyde collées sur couche de réversibilité de résine acrylique	ou et non		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ? De quelle(s) raison(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quelle(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord comblement et zone originale) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Emulsion Acryl/AC33 pure au pinceau acrylique	Protection provisoire très fréquente du contour par papier japon eau et pinceau (tient très peu de temps, suffisant pour l'application, elle aussi très rapide). Protection des armatures d'origine avec une résine époxyde (Ovaron Rustal et parfois résine époxyde).	Petites plâtres: émulsion vinyle/colle blanche Soder ou Sader rapide) Grosses plâtres : époxydes et structures composites sur couche de réversibilité.	Variable selon les cas, souvent mélange 3 volumes de charge et 1 volume de plâtre; la fonction structurale peut être assurée derrière par un support composite époxyde	Méthodes apprises en formations) professionnelles(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres(s)	Sources bibliographiques trop rares, échanges professionnels surtout au groupe pierre-plâtre-terre de la SRLF, réflexion et essais personnels	Le mélange doit absorber une goutte d'eau comme l'original sauf cas particulier	Oui, bien sûr, elles sont recherchées		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelles (s) méthodes(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adaptez-vous ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche inadéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Tous les facteurs sont pris en compte!	Retouche: Fellow's par pigments et 3% de formol; Acryl 33 dans l'eau ou dans l'éthanol avec le plâtre mort, ou plus d'émulsion ou peintures pour restaurateur Malmier pour les plâtres peints	Je ne parlerai que des méthodes inadéquates me concernant: dans les années 1990, après des échanges avec le LRMH, j'avais tenté de faire des retouches avec des plâtres de la Diane au Cerf, après de nouveaux échanges avec le LRMH en 1997, j'ai déposé ces cornes pour les protéger par une régulation sous vide (réalisé dans des coques de plâtre entaillées de manière à laisser le poly sacre (projecté par le bas des coques de plâtre).	Seulement sur les cornes du cerf (ci-dessus. Suite du fronton de la Diane au Cerf, après de nouveaux échanges avec le LRMH en 1997, j'ai déposé ces cornes pour les protéger par une régulation sous vide (réalisé dans des coques de plâtre entaillées de manière à laisser le poly sacre (projecté par le bas des coques de plâtre).	Rapport avec photo avant pendant après, description des produits et techniques, localisation par photo ou dessin sur photo					

DOCUMENT 2		Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : <i>empêché communiqué en 2009</i>		Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?		Pour quelle(s) raison(s) ?		De quel(s) fournisseur(s) ?		Formulations personnelles, quelles proportions ?		Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?	
Titre, profession, qualité : Spécialités, typologies		Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :		Petits compléments : choix des méthodes et raisons(s)		Compléments importants : choix des méthodes et raisons(s)		Restitutions formelles ou restauration de la forme d'origine : choix des méthodes et raisons(s)		Renforts : choix des méthodes et raisons(s)		Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non	
conservatrice restauratrice de sculptures		Sculpture, collections de plâtre du Panthéon, œuvres d'Alicia Penalba, maquettes de l'école des Ponts et Chaussées, bustes de école Polytechnique, collections du Petit Palais, sculptures en plâtre du réajustement à l'Arc de Triomphe... Nombreuses et variées.		modestes ajouts à l'emploi pour des petites figures car c'est un matériau très fin (CTS) rendit d'intérieur en poudre pour tous les compléments types cavités car il est moins dur que le plâtre (Polyfilla ou Axton) - plâtre, en poudre, pour les angles de comblement par exemple car c'est le seul matériau de comblement suffisamment résistant pour les parties qui ont une fonction structurelle (Axton, plâtre à modèle)		Pose directe éventuel		Moulage sur un autre exemplaire ou une restitution en plâtrine et collage dans le moule		au Jugé, un mélange plutôt sec.		Non car cela modifie les propriétés que je connais du matériau pour l'avoir souvent utilisé. Le seul ajout peut être du PVA pour augmenter la résistance, mais c'est rare.	
Un mélange plutôt sec		Par habitude		Pose directe		Pose directe avec matériau de renfort éventuel (mat de verre, plâtrine de France) en un peu plus liquide.							
Si oui, avec quel(s) produit(s) ? De quelle(s) type(s) ?		Pâte à modeler pour les zones déformées ? De quelle(s) type(s) ?		Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?		Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (recofond comblement et zone originale) ?		Références des méthodes utilisées : Méthodes apprises (formation professionnelle), des ateliers, échanges entre professionnels, autogé		Quelles propriétés physiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?		Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?	
PVA dilué entre 30 et 50% ou Paraloid B72 à 10%		Non, j'essaie de ne jamais débouder.		PVA. Le plus souvent couplé à un goussinage dans le cas de grande pièce		Modostuc car il est très fin et peu dur au cas où il est nécessaire d'enlever la restauration dans le futur		Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autogé		Le comblement doit être moins dur que le plâtre, il doit pouvoir se retoucher facilement		J'utilise ces différences suivant l'endroit que j'ai à combler... Par contre, suivant les conditions où ont été conservées les œuvres, elles ne résistent pas toujours pareil aux compléments.	
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?		Y'a-t-il selon vous des méthodes de retouche inadéquates ou inadaptées ? restaurées subissez-vous ?		Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?		Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?		Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?		De quel(s) type(s) ?		Si non, pour quelle(s) raison(s) ?	
Tout ce que vous citez, sauf peut être miniature car ils sont très fragiles, selon moi dans ces matériaux		Le plâtre est à la fois un matériau très dur et très fragile. Il est hygroscopique et chaque méthode doit être adaptée à chaque cas Gamblin...		non		non		oui		Photographie de tous les détails avant et après comblement. Parfois relevés des manques qui peut être comparé une fois la sculpture finie		Intervention très ponctuelle, de moins d'une journée ou pour les particuliers qui ne souhaitent pas conserver une trace de l'œuvre altérée.	

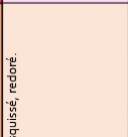
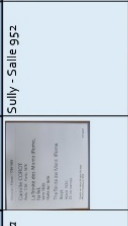
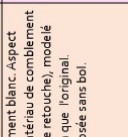
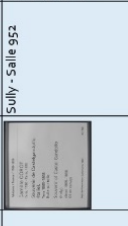

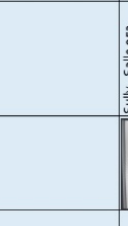

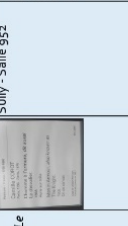

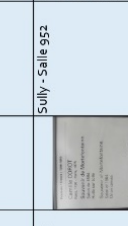

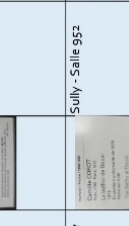
DOCUMENT 3									
Titre, profession, qualité :									
Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : <i>siquête communiquée en 2019</i>									
Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?									
Pour quelle(s) raison(s) ?									
De quel(s) fournisseur(s) ?									
Formulations personnelles, quelles proportions ?									
Précisez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?									
Spécialités, typologies									
Mobilier, bois doré, maquettes, tabletterie, cadres – maquettes (plus rarement)									
Restauration du Patrimoine									
diplômée en 2002									
Za après à travailler avec le mastic traditionnel (ou « gros blanc ») mais cette méthode de travail est particulièrement adaptée à la fabrication en série et beaucoup moins pour la restauration, surtout à on intervention ponctuellement. Pour des facilités d'usage j'ai donc tendance à travailler plus souvent avec des produits du commerce (meilleure conservation, pas de temps de fabrication). L'association de résine époxy à Wood mastic est une solution intéressante pour des restaurations plus facilement des moulures dorées à la main.									
Le résine époxy provient de CTS ou Lavendure ; Le Wood mastic provient de la dorure à Versailles » (Slovert)									
De façon exceptionnelle – plus pour tester le comblement que pour des applications									
Quelles(s) technique(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?									
Compléments importants: choix des méthodes et raisons(s)									
Restitutions formelles ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raisons(s)									
Renforts: choix des méthodes et raisons(s)									
Précisez-vous à une isolation des plans de contact ? ou ou non									
Adaptés à la mise en œuvre. Texture soignée pour couler dans un moule à plâtre si modelage.									
Par presse									
Wood mastic appliqué à la spatule – simple et efficace									
Moins courant - Wood mastic Ebon si besoin car peut être appliqué en grosses épaisseurs									
Rarement - Bois (placage), mastic de polyester									
oui									
Si oui, avec quel(s) produit(s) ? De quelle(s) façon(s) ?									
Protégez-vous les zones alentours ?									
Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?									
Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord comblement et zone originale) ?									
Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)									
Paraleld B72 à faible pourcentage dans un solvant. Colle protégée. Polymère acrylique en suspension dans l'eau (medium for consolidation).									
Colle protégée. Résine époxy SVHV 427.									
Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), échanges entre professionnels (autres)									
De la colle chargée (poudre de bois, microballoons plénoiques ou éthers de cellulose)									
Travail de recherche personnel									
Plus c'est stable mieux c'est. Si c'est facile à retoucher c'est encore mieux.									
La texture de la résine SVHV 427 n'est pas tout à fait la même chez Lavendure (plus liquide) et chez CTS.									
Quelles(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?									
Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?									
Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?									
Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?									
Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?									
De quelle(s) façon(s) ?									
Si non, pour quelle(s) raison(s) ?									
Je dis généralement procéder à une retouche pour l'aspect de la dorure (caquelles, tentes à l'extérieur en atelier, commodité des produits et de leur accès (finition)									
La question est trop délicate à se poser juste avant que ça dépend...dispo pour réparer ou orientement !									
non									
non									
Ex: non demandé par les commanditaires, délais trop courts... exactement ça									

DOCUMENT 4									
Titre, profession, qualité :	Spécialités, typologies :	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plus des situations formelles, ou complément (d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Restauratrice de sculptures	Sculptures. Multiples (typologies)	22 ans 1997	mélange plâtre carbonaté de calcium, Modostuc, Stucco pour intérieur (marque polyfilla)	choix de produits en fonction de la configuration du complément, de la recherche l'un aspect, d'une texture	CTS et autres	variables	non		
Quelles textures ont été effectuées par petites ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Les mélanges sont-ils effectués par petites ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits compléments: choix des méthodes et raison(s)	Compléments importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
Une texture applicable qui permet un ponçage ou une reprise facile	Variable par applications successives	Modestuc le plus souvent parfois changée si je recherche une texture moins lisse	Couches successives avec séchage entre chaque application produits variables selon les couches	Rare. Parfois par moulage sur une autre éprouve. Par application de couches successives en faisant varier les produits	Variable, fibre de verre, tissu de verre, support plus rigide maillage	oui			
Si oui, avec quel(s) produit(s) ? De quelle(s) façon(s) ?	Protégez-vous les zones silencieuses ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord complément et zone originales) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?			
généralement Paraloid	Je les protège indirectement par isolation et application en plusieurs couches au pinceau ou maximum la diffusion de l'eau	Je ne comprends pas bien la question	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres	expérience	Impossible de répondre à une question si générale	Oui bien sur			
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?			
Mise en œuvre, aspect, aspect d'eau, temps de séchage, temps	variables, pastels secs, aquarelle, gambin, aquarelle pigments parfois dans la masse	oui	non	pas systématiquement	souvent mais pas systématiquement photographie annotée, schéma si la localisation est mentionnée sous forme de texte	variable			















DOCUMENT 5													
Titre, profession, qualité :		Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019		Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, restaurations formelles ou complément d'une forme) ?		Pour quelle(s) raison(s) ?		De quel(s) fournisseur(s) ?		Formulations personnelles, quelles proportions ?		Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?	
restauratrice de sculptures		1989		Modotuc, Modotuc chargé, Parabid chargé si comblement, plâtre tiré à part si restitution		Modotuc : rapidité d'emploi, chargé pour en changer la texture et le travail de finition, Parabid pour comblements « structurés », Nanorestore (gel)						Charges variables. Pour s'adapter aux caractéristiques du plâtre original. Pour faciliter l'aspect final ou le travail de prise, ou pour alléger ou amoindrir la dureté des comblements : CaCO ₃ , micro sphères, pulvé de cellulose etc...	
Quelles(s) habileté(s) de gâche souhaitez-vous obtenir ?		Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :		Petits comblements: choix des méthodes et raison(s)		Comblements importants : choix des méthodes et raison(s)		Restitutions formelles ou restauration de la forme (dossier: choix des méthodes et raison(s))		Renforts: choix des méthodes et raison(s)		Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? ou ou non	
Ça dépend de l'œuvre		Directement en place pour les bouchages. Pièces amouillées rapportées : moulage, moulage, adaptation et collage								Infilés pour renfort interne		oui	
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?		Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?		Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (recoff comblement et zone originales) ?		Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, avertis		Pouvez-vous préciser ?		Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?		Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?	
adhésif en solution Paraloid B72 en général		Parabid (s) en général				Méthode apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels						Je n'ai pas trop le Modotuc, qui donne une texture très lisse et assez dure, pas toujours adaptée, et rend la retouche parfois aléatoire (C'est bien pour ça que je le charge généralement)	
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?		Y a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?		Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?		Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?		Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'intervention ?		De quel(s) type(s) ?		Si non, pour quelle(s) raison(s) ?	
Ex. maniabilité de l'œuvre, support horizontal ou vertical, chantier en restauration atelier, commodité des produits et de leur accès, innocuité pour la santé et l'environnement ... Tout ça...		Je me méfie de la pénétration de l'aquarelle, je privilégie les évaporations rapides ou les interventions à sec		non				non		Si je ne fais pas de relevés, j'inclus dans le rapport des photos avant en cours et après pour des bouchages représentatifs, ou pour les éléments fortement restitués		Un relevé systématique peut être très long (et peu envisageable vu les délais et les coûts) et pas forcément pertinent: une fois encore, cela dépend de la nature d'intervention (taille et nombre des bouchages, importance des parties comblées ou rétablis).	




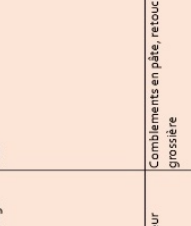





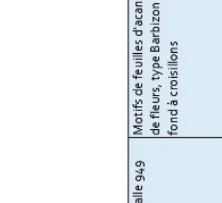


DOCUMENT 6									
Titre, profession, qualité :	Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : <i>approximative</i> communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (combimé, restitutions formelles ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
Conservation-restauration de sculptures, libéral	sculptures, tout type	2006	Soit un mélange de plâtre et blanc de Meudon (en proportion respectives 2/1) pour les restitutions ou combimés afin d'assurer une meilleure résistibilité ; soit du plâtre pur (Modis) dans le cas de combimés dont le but est plus structurel. Les produits au commerce prêts à l'emploi (type polyfills ou medistich)	Combimés importants : choix des méthodes et raisons	Peu importe du moment qu'il s'agit de plâtre pur, 2/1	Plâtre et blanc de Meudon (en proportion respectives 2/1)	Voir réponses ci-dessus. Parfois ajout de fibres (renfort) mais très rarement et pour les revers de moulage très fragilisés.		
Quelles textures de plâtre souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués en volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits combimés : choix des méthodes et raisons	Combimés importants : choix des méthodes et raisons	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine : choix des méthodes et raisons	Renforts : choix des méthodes et raisons	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
Cela dépend de l'usage : plus ou moins liquide.	En volume, visuellement.	Toujours directement en place. Par coule, modelage, reprise à l'outil ou à l'éponge humide.	Coulage, reprise à l'outil puis à l'éponge humide.	Coulage, modelage, reprise à l'outil (spatules, autre)	Modelage, reprise à l'outil (spatules, autre ; puis râpe et papier de verre une fois sec).	Jamais de doublage au plâtre	non		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord combimé et zone originale) ?	Références des méthodes utilisées : Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
non	non	non	Méthodes apprises en formation(s) professionnelle(s), sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autre(s)	Bon sens, expérience personnelle.	Cela dépend du type de combimé. S'il est structurel : bonne résistance bien que légèrement plus fragile que le plâtre pur. S'il est plus esthétique : résistance plus faible que forsignal (plâtre utilisé assez liquide, ajout de CaCO ₃ en plus grande proportion jusqu'à 1/2).				
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées subissez-vous ?	Y'a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Maniabilité de l'œuvre : support horizontal ou vertical, durée de travail, conditions de chantier en atelier/ou en atelier, commodité des produits et de leur accès, innocuité pour la santé et l'environnement ...	Aquarelle et pastels secs.	A priori pas : il s'agit du recouvrement d'un combimé.	Changement de bûche d'une touche, combimé altéré (plâtre affaibli).				Plus ou moins précédemment. A minima détaillée dans le rapport final (en français) et éventuellement par des photos rapprochées avant/après et très rarement par des schémas.		








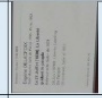

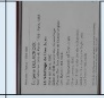

SYMTHÈSE									
Titre, profession, qualité:	Spécialités, typologies	Date de début d'exercice ou nombre d'années d'expérience : enquête communiquée en 2019	Quels matériaux utilisez-vous pour traiter les œuvres ou objets en plâtre (comblement, "restitutions formelles" ou complément d'une forme) ?	Pour quelle(s) raison(s) ?	De quel(s) fournisseur(s) ?	Formulations personnelles, quelles proportions ?	Procédez-vous à des ajouts d'autres matériaux ? Pour quelle(s) raison(s) ?		
n=21	Sculpture, statuaire: 17 Cadre, dorure: 4	Entre 1970 et 2000: 7 Au-delà de 2000-14:	Plâtre: 13 (dont 3 précisant pièces rapportées et 2 mentions besoins structurels) Plâtre + CaCO3: 6 Gros blanc: 3 Résine époxy: 3 (dont 2 précisant pièces rapportées) Adhésif chargé: 7 Médium: 11 Polyfills: 8 Autres produits commerciaux: 2	Produit accessible ou commode à mettre en œuvre: 12 Produits testés et connus: 2 Besoins structurels: 7 Besoins de surface, aspects adaptés: 10 Réversibilité pour traitabilité: 5 Compatibilité: 3 Références professionnelles souhaitées: 6 Différenciation: 3		Mélanges plâtre et CaCO3 en 1:1 ou 2:1	Adhésifs Chargés (CaCO3, microballons de verre...) Filsse		
Quelle(s) texture(s) de gâchage souhaitez-vous obtenir ?	Les mélanges sont-ils effectués par pesées ou mesures des volumes précis, ou par habitude ?	Quelles sont vos méthodes de mise en œuvre ? De la plus à la moins fréquente :	Petits comblements: choix des méthodes et raison(s)	Comblements importants: choix des méthodes et raison(s)	Restitution formelle ou restauration de la forme d'origine: choix des méthodes et raison(s)	Renforts: choix des méthodes et raison(s)	Procédez-vous à une isolation des plans de contact ? oui ou non		
Variables: 11 Épaisse: 6	Mesures par pesée ou volume: 8 Habitude et expérience: 12	Comblement en place: 17 Pièce rapportée: 8	Produits variables, plâtre cité souvent en mélange, montage direct ou pièce rapportée	Produits variables, plâtre cité souvent en mélange, montage direct ou pièce rapportée	Prise d'empreinte sur modèle original, moulage ou tirage de pièce à part.	Renforts par fibres synthétiques ou naturelles (filsse), collés avec des résines ou adhésifs variés	oui: 13 non: 11		
Si oui, avec quel(s) produit(s) ?	Protégez-vous les zones alentours ? De quelle(s) façon(s) ?	Quel(s) adhésif(s) utilisez-vous pour coller les pièces ?	Quel(s) produit(s) utilisez-vous pour combler les plans d'assemblage (accord comblement et zone originales) ?	Références des méthodes utilisées: Méthodes apprises en formation(s) bibliographiques, sources bibliographiques, échanges entre professionnels, autres	Pouvez-vous préciser ?	Quelles propriétés physico-chimiques et esthétiques souhaitez-vous obtenir ?	Observez-vous des différences selon les produits que vous utilisez ou leur mise en œuvre ?		
Paraloid: 9 Adhésif acrylique autre: 2 Adhésif vinylique: 3	oui: 10 non: 11	Paraloid: 8 Adhésif acrylique autre: 8 Adhésif vinylique: 9 Adhésif époxy: 5	Produits du commerce: 6 Plâtre: 3 Formulations personnelles: 6	Méthodes apprises en formation(s) professionnelles: 20 Sources bibliographiques: 11 Échanges entre professionnels: 19 Autres: 9	Expériences professionnelles Journées d'études	Aspects esthétiques similaires à l'original Réversibilité Stabilité structurelle, innocuité, compatibilité Bonne tenue à la mise en œuvre Résistance égale ou inférieure selon les besoins Texture et couleur permettant la retouche	Produits différents, avec des avantages et des inconvénients selon les usages et les professionnels: 5, au niveau des textures, des couleurs, des aspects de surface.		
Quels sont les facteurs qui conditionnent vos choix ?	Quelle(s) méthode(s) de retouche ou de recouvrement des zones restaurées adoptez-vous ?	Y-a-t-il selon vous des méthodes de retouche adéquates ou inadéquates ?	Avez-vous déjà pu observer ou intervenir de nouveau sur des objets restaurés selon ces procédés ?	Avez-vous constaté des vieillissements ou des changements particuliers ?	Est-ce que vous réalisez systématiquement des relevés précis des zones d'interventions ?	De quel(s) type(s) ?	Si non, pour quelle(s) raison(s) ?		
Tous les critères d'exemple: 6 Innocuité ou stabilité pour l'œuvre: 4 Innocuité ou non toxicité pour la santé: 8, l'environnement: 6 Selon les besoins structurels ou surface: 4 Réversibilité: 3 Conditions de chantier et de mise en œuvre: 12 Prix: 2 Aspects esthétiques: 2	Aquarelle: 15 Pastels secs avec ou sans adhésif: 12 Gambin®: 8 Gouache: 3 Acrylique: 7 Dorure: 2 Autres: 13	Mélanges des peintures acryliques et aquarelles, considérés comme difficilement réversibles car pénétration dans la porosité du support et risque de changement de couleur avec vieillissement. Techniques à adapter au cas par cas et pas de fiche si retouche uniquement du comblement.	Changements de couleur des retouches: 5 mentions Changements du matériau: 1 mention, précisant faible modification Problème de matériau: 1 mention, précisant condition expérimentale	oui: 18 non: 5	Documentation photographique: 16 Relevé par séquence: 9 Détail redigé: 6	Demandes et délais Opération longue et coûteuse			

N° inventaire (tableau) ou référence (mesures)	Cartel	Localisation	Eléments descriptifs	Observations techniques	Etat et altérations	Interventions	Descriptions des compléments	Illustrations
R.F. 2042, cadre pour Corot, <i>La Trinité-des-Monts</i>		Sully - Salle 952	Bordures aux feuilles de laurier, frise de palmettes, ruban, sablé, perles.	Cadre en pâte, dorure sur bol rouge.	Fissures et soulèvements sur le montant dextre. Oxydation de la bronzing. tache verte. Retouche à la bronzing ?	Consolidation sur le montant dextre ? Eventuellement petit comblement sur côté dextre, de la frise de palmettes. Retouche à la bronzing ?	Petit comblement esquissé, redoré.	
R.F. 769, cadre pour Corot, <i>Souvenir de Castegandajo</i>		Sully - Salle 952	Bordures aux frises de rubans perlés, lauriers, ovés avec des feuilles d'acanthe aux quatre angles, rubans, plat, rais de cœur, plats.	Cadre en pâte, dorure sur bol rouge.	Nombreuses fissures sur les ornements. Petites lacunes sur la frise de rais de cœur (montant senestre, niveau médian, et montant haut, entre milieu et angle senestre).	Différentes interventions sur la frise de rubans perlés et de laurier. Comblement de la lacune de rais de cœur du montant haut. Retouche dorée de la petite lacune de rais de cœur du montant senestre. Restauration et/ou retouche à la bronzing: frise de laurier sur l'angle haut dextre, sur le côté dextre du montant bas jusqu'à l'angle dextre, au niveau médian du montant senestre, aussi sur la frise de rubans perlés.	Matériau de comblement blanc. Aspect granuleux (dû au matériau de comblement et/ou à la bronzing de retouche), modelé simplifié et moins fin que l'original. Fissures. Bronzing posée sans bol.	
R.F. 339, cadre pour Corot, <i>L'homme à l'armure, dit aussi Le cherrail</i>		Sully - Salle 952	Frise d'ovés, composition d'ornements végétaux et de rinceaux de feuilles d'acanthe, sablé, frise végétale. Carrel doré.	Cadre en pâte, certains éléments dorés sur bol rouge.	Cassure, des parties saillantes (enroulement de feuille) des angles, lacunes, de l'ornement médian en partie haute, portion de feuille sur l'angle bas à senestre, fissure sur l'ornement de l'angle haut dextre.	Feuille d'acanthe au niveau médian refaite. Collage des pointes de feuille d'acanthe cassées à chaque angle ? Redore ou bronzing sur l'ornement haut médian.	Comblement irrégulier et rapide. Matière granuleuse ? Or de la retouche vif, sans bol (?), non bruni.	
M.I. 692 bis, cadre pour Corot, <i>Souvenir de Martefontaine</i>		Sully - Salle 952	Bordures en frises de ruban perlé, de feuilles de laurier, canelures et feuilles d'acanthe aux quatre angles, ruban, plat, rais de cœur, plats.	Cadre en pâte, certains éléments dorés sur bol rouge.	Lacunes ? Déplacages ? Fissures sur les ornements des angles et sur la frise de laurier sur le montant dextre au niveau médian.	Nombreuses restitutions maladroites visibles notamment sur les angles dextre bas et haut, ainsi que sur le montant dextre au niveau médian.	Aspect granuleux, irrégulier. Or de la retouche très brillant et jaune.	
R.F. 1710, cadre pour Corot, <i>Le beffroi de Douai</i>		Sully - Salle 952	Bordures en frises: motifs de feuilles pleines et ciselées, canelures avec feuilles d'acanthe aux quatre angles, perles, plat.	Appréciation de la mise en œuvre: on voit bien que les feuilles d'acanthe des angles sont rapportées, déposées sur les canelures.	Ouvertures des angles, fissures sur les ornements de l'angle haut dextre et bas senestre. Lacune des ornements des angles haut senestre et bas dextre ? Lacune de l'angle bas senestre (frise extérieure).	Restitution des feuilles des angles senestre haut et dextre bas ? Restitution et comblement de l'angle bas senestre.	Matière moulée, découpée, ajustée. Moins jointive que les deux autres feuilles. Matière moins "fine". Redore, légèrement plus vive.	
R.F. 1390, cadre pour Decamps, <i>Tigre et éléphant à la source, dit aussi Le désert indien.</i>		Sully - Salle 951	Cadre à coquilles et volutes, fond motif croisillon incisé, frise de feuilles d'acanthe, plat. Frise d'ovés sur le bord extérieur.	Ornement en coquilles possiblement moulés en plâtre (sur une cassure on voit une matière blanche, poreuse).	Lacunes de petites portions d'ornements saillants, fissures.	Restitutions des portions saillantes cassées. Redoreur ponctuelle et/ou peinture dorée.	Matière qui semble modelée en place. Aspect "mou", ni poncé ni lissé, surface granuleuse.	

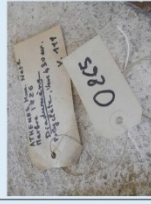

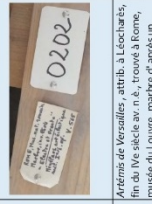





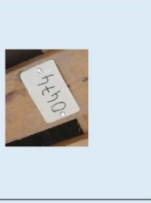

R.F. 3046, cadre pour Rousseau, <i>L'allée des châtaigniers (du château de Soulliers, en Poitou)</i>		Sully - Salle 951	Cadre à coquilles et volutes, ornements d'angles type rocaille avec des fleurs de lys, frise de canelures horizontales en relief et feuilles d'acanthé enroulées.	Cadre en pâte, quelques parties (ornements saillants), dorés sur bol rouge (brun).	Lacunes des pointes d'ornements et éléments saillants. Fissures. Cassures au milieu du montant senestre ?	Ponçage et retouche d'une feuille d'acanthé sur la traverse basse, autre feuille remodelée rapidement.	Matière granuleuse ? Non poncée ni lissée. Or de retouche semble très jaune. Pas d'assiette ?	
R.F. 3447, cadre pour Rousseau, <i>Groupe de chènes, Apremont (en Picardie)</i>		Sully - Salle 951	Cadre à coquilles et volutes, ornements d'angles type rocaille avec des fleurs de lys, frise de canelures fines et feuilles d'acanthé.	Cadre en pâte, quelques parties (ornements saillants), dorés sur bol rouge (brun).	Lacunes (pointes des feuilles d'acanthé par exemple), cassures ? Fissures sur les ornements.	Ornements des angles en haut partiellement retouchés. Quelques petits comblements: angle bas dextre (sur le plat).	Comblements des ornements d'angle avec finitions rapides, aspect "mou", retaille et retouche en doré (peinture). Pâte appliquée et modelée directement en place ? Matériau peut-être déjà teinté dans la masse. Petit comblement de l'angle bas dextre (jointure baguettes/plates) avec le même matériau ?	
R.F. 3667, cadre pour Gérard, <i>Le radeau de la Méduse, seconde esquisse</i>		Sully - Salle 950	Cadre à coquilles et volutes, bordures intérieures en sablé et en frise cannelée avec des feuilles d'acanthé.		Fissures sur les ornements. Cassures (ornements des angles dextres haut et bas, ornement médian bas). Lacunes ?	Coquille en partie haute à dextre: restitution de la pointe ? Collage de la partie cassée. Volutes de l'ornement de l'angle dextre en bas cassées et lacunaires, restituées. Petite portion de la frise de marie-louise restituée (voir niveau médian). Redoune ponctuelle (carrés d'or parfois très vifs).	Comblement d'un plan de cassure (ornement de l'angle haut dextre) avec une matière type adhésif ou cire, aspect gris, légèrement mou et translucide. Comblement de la marie-louise (frise cannelée) semble dur, probablement avec un matériau clair (blanc?), retouché à l'or vif avec un bol rouge-orangé.	
R.F. 3658, cadre pour Delacroix, <i>Odalisque</i>		Sully - Salle 950	Cadre à coquilles et volutes, frises d'oves et de petites feuilles d'acanthé.	Cadre en pâte, éléments saillants dorés sur bol rouge (brun).	Cassures et fissures sur les ornements en coquilles des angles dextre et du senestre en bas.	Coquilles des angles en bas à dextre, et peut-être en haut à dextre, semblent restaurées	Comblements des plans d'assemblage des parties collées, avec un adhésif et/ou de la pâte redorée. Matière adhésive ou cire teintée, translucide. Or vif, non brun.	
R.F. 3659, cadre pour Delacroix, <i>Prise de Constantinople par les Croisés (1204)</i>		Sully - Salle 950	Cadre à coquilles et feuillages d'acanthé, très orné. Frises de sablé sur baguette concave, d'oves et de petites coquilles (?), et sablé plat. Cartouche signé E. Delacroix.	Cadre en pâte, certains éléments dorés sur bol rouge.	Lacunes: portion de l'ornement central du montant bas, volute de feuille d'acanthé sur l'ornement central du montant haut, élément sur l'angle senestre haut, éléments sur l'ornement médian du montant senestre. Ornements très fissurés. Quelques petits éclats (petites lacunes).	Interventions de collage (?), comblements et restitutions, redoune et/ou bronzine.	Comblements moulés et rattachés. Matière blanche qui semble un peu "molle", aspect irrégulier, non lissée, a fissuré sur certains ornements.	
R.F. 3660, cadre pour Delacroix, <i>Prisonnier de Chillon</i>		Sully - Salle 950	Cadre à coquilles et feuillage sur fond plat (ornements aux angles et sur les parties médianes des montants). Frise intérieure au motif d'oves et de feuilles d'acanthé. Cartouche signé E. Delacroix.	Cadre en pâte, certains éléments dorés sur bol rouge.	Lacunes: feuilles d'acanthé de l'angle bas dextre, angle haut senestre de la frise d'oves et de feuilles, éléments de l'angle haut senestre (?), petite feuille de la pointe de l'angle bas senestre. Petits éclats. Fissures sur les ornements des angles.	Différentes interventions, peut-être des résentes (pas de trace de vieillissement du matériau ou de l'or). Restitutions et comblements des lacunes importantes: portions de feuilles sur les ornements des angles. Redoune: or vif, sans bol rouge, ni brun.	Modèle imprécis: ornement de l'angle bas dextre, niveau plus gros et avec des feuillures (différents de l'original, fin et lisse). Feuille sur le bord extérieur ayant un aspect granuleux, non lissé.	




R.F. 1656, cadre pour Delacroix, Turc fumant, assis sur un divan		Sully - Salle 949	Cadre néo-gothique et orientaliste. Frises à la grecque. Cartouches dans les angles extérieurs, croissants de lune dans les angles des bordures intérieures.	Cadre en pâte et dorure sur bol rouge, brunie sur les moulures arrondies.	Bon état général. Quelques fissures aux angles et sur les éléments très en relief (bords du cartelpar exemple).	Probablement quelques retouches et/ou redore	PA.S de comblement ancien a priori.	
R.F. 1609, cadre pour Corot, Un moine lisant		Sully - Salle 949	Frise de coquilles, feuilles d'acanthe et fleurs sur fond entrecroisé, baguette couchée, frise de feuilles d'acanthe sur fond canelé, plat.	Cadre en pâte, dorure à la feuille sur bol rouge (par endroit), éléments de feuilles d'acanthe entrecroisé, sur bol jaune, puis dorure.	Altérations nombreuses: déplaçages et lacunes des ornements rapportés (frise extérieure: motif coquilles nombreuses lacunes au niveau des ornements rapportés (feuilles d'acanthe et fleurs), fissures.	"Anciennes interventions" altérées depuis. Retouche des parties cassées. Comblement et restitution d'une feuille d'acanthe sur le montant droite, niveau médian.	Comblement en pâte ? Aspect "mou", fissures.	
R.F. 1656, cadre pour Corot, Italienne assise, accoudée sur son genou		Sully - Salle 949	Frises de coquilles/écailles superposées, frise incurvée avec canelures et feuilles d'acanthe aux angles, plat, perles, incurvée, plats.	Cadre en pâte, zones planes et canelures brunies (assiette rouge).	Angles partiellement ouverts, fissures, déplaçages et lacunes (perçement par l'arrière), petites lacunes sur les angles et le long des frises	Restitutions dans les frises de la travers haute vers le milieu, et dans l'angle bas à droite. Petits compléments ponctuels. Redore et retouche des lacunes.	Matière type gros blanc ou pâte ? Aspect un peu granuleux. Comblement fait rapidement, finitions rapides.	
R.F. 1638, cadre pour Corot, Trivoli. Les cascades (environ de Rome, Italie)		Sully - Salle 949	Frises de fleurs cercées, végétaux à trois feuilles et petites boules, rubans, sablé, perles, plats.	cadre en pâte, plats brunis (assiette rouge).	Angles partiellement ouverts, fissures, déplaçages et lacunes (perçement par l'arrière), lacune des feuilles trilobes de l'angle bas senestre.	Petits compléments ponctuels sur les angles ? Retouches ou redoures ponctuelles (notamment sur les petites lacunes de matière déplaquée (perçement revers) ?	Zones qui semblent irrégulières, un peu "molles", avec un or différent.	
R.F. 1623, cadre pour Corot, Villeneuve-les-Avignon. Terrasse du jardin de l'hospice		Sully - Salle 949	Frises de rubans, de coquilles/écailles superposées, frise incurvée avec canelures et feuilles d'acanthe aux angles, plat, ruban, plats.	Cadre en pâte, zones planes et saillants dorés sur bol rouge (rouge).	Angles partiellement ouverts avec des petites lacunes (?), quelques fissures, lacunes de parties de feuilles d'angles (angles haut senestre et bas droite).	Portion de feuilles en bas à droite et en haut à senestre sont refaites et redonnées. Petits compléments au niveau des angles de frises.	Aspect mou, granuleux, modelé différent de l'original, petites fissures de séchage, or de redore/retouche vif.	
R.F. 1697, cadre pour Corot, Trouville. Bateau échoué, dit Bateau de pêche à marée basse		Sully - Salle 949	Cadre à rinceaux, fleurs de lys (angles) et formes rocailles, sablé, frise rocaille et feuillages sur fond canelé, plat.	Cadre en pâte, éléments saillants dorés sur bol rouge (brun).	Angles partiellement ouverts, lacunes aux angles bas droite, haut senestre, petite éclats ou petites lacunes sur certains éléments de la frise à feuillage, quelques fissures.	Deux ornements refaits et bronzinés en haut senestre et en bas droite.	Aspect granuleux, modelé "mou", fissures/craquelures de séchage.	
R.F. 1654, cadre pour Corot, Saint-André-en-Morvan (Bourgogne)		Sully - Salle 949	Frise de petites feuilles ou écailles, frise incurvée avec canelures et feuilles d'acanthe aux angles, perles, plat, rates de cœur (?)	Cadre en pâte, zones planes et canelures brunies (assiette rouge)	Nombreuses petites interventions	Ornements refaits, angles comblés avec imitation du motif, erouche et redore	Pâte ou apprêt	

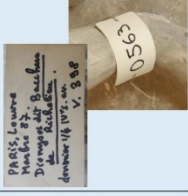

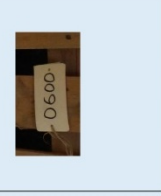





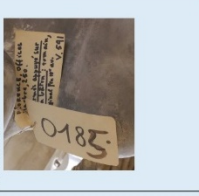

R.F. 3621, cadre pour Corot		Sully - Salle 949	Monifs de feuilles d'acanthe et de fleurs, type Barbizon ? Sur fond à croisillons	Cadre en pâte	Bon état général. Quelques lacunes et fissures.	Comblements et restitution. Collage (angle inférieur droite).	Pâte	
R.F. 3642, cadre pour Corot		Sully - Salle 949	Cadre à canelures, feuilles d'acanthe aux angles, frises de ruban torsadé et rais de cœur	cadre en pâte	nombreuses lacunes de rais de cœur, quelques fissures	Interventions sur les rais de cœur	Comblements en pâte, retouchés. Factice grossière	
R.F. 360, cadre pour Corot		Sully - Salle 948	Cadre à palmettes, frises de perles et rais de cœur.	cadre en pâte	Déplacage de l'apprêt sur les bords extérieurs	Intervention sur l'angle dextre en haut, comblements et reprises de rais de cœur lacunaires, retouchés.	Comblements en pâte ou à l'apprêt	
R.F. 3965, cadre pour Corot		Sully - Salle 948	Cadre à canelures, feuilles d'acanthe aux angles, frises de ruban torsadé	en pâte	Lacunes de petites portions d'ornements et de frises, fissures.	Interventions sur la frise extérieure et sur la frise torse (éléments recollés ou refaits ?). Angle sanestre en bas refait ?	pâte	
INV. 30028, cadre pour Boulanger		Sully - Salle 946	cadre à ornements d'angles (coquilles et feuillage), bordure en ovale, incision et motif griffe mi-brunie, et croisillons, sablés, rais de cœur.	en pâte	lacunes (angles), quelques fissures.	Comblements et restitutions de certains morceaux d'angle, retouche à la bronzière, redoreure ponctuelle ?	Matériau type mortier ou pâte.	
INV. 5343, cadre pour Hesse		Sully - Salle 946	Cadre à ogives, frise de palmettes et frise de perles	pâte	bon état général. Quelques petites lacunes de revêtement de surface ou apprêt.	Peut-être quelques reprises au niveau des rais de cœur, comblements légers et redoreure très ponctuelle	pâte ou apprêt ?	



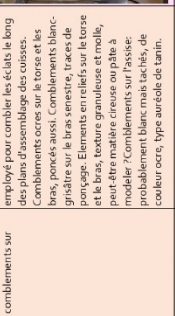
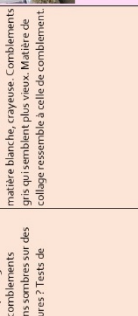



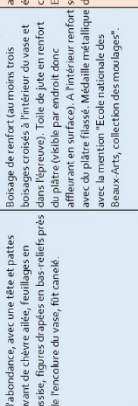

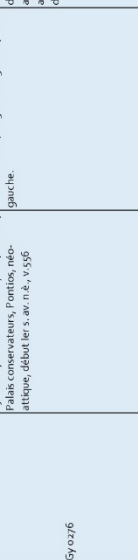
INV. 304, cadre pour Colin, L'Empereur Charles Quint reçu au Louvre par François Ier, 1543		Sully - Salle 946	Cadre avec des cartouches ornés aux angles et au milieu des traverses. Fonds à croisillons, bordure sablée. Rales de cœur.	en pâte	bon état général	aucune ?	
R.F. 1698, cadre pour Couture		Sully - Salle 945	Cadre à ogive et ornements angles et milieu de bordures, rinceaux végétaux et coquilles, éléments ajourés.	pâte	Nombreuses fissures, lacunes, retouche	Pâte, apprêt.	
R.F. 1961-31, cadre pour Boudin, Voiliers, Camaret		Sully - Salle 903 ?	Cadre à coquilles et rinceaux de feuilles d'acanthe et de fleurs, frises concave et feuilles	Cadre en pâte, dorure brunie sur les éléments saillants et plats (assiette rouge)	Cassures sur les pointes d'ornements en bar. Petits éclats, lacunes (déplacages).	Matière moile translucide (adhesif, ciré...).	
Cadre pour Diaz de la Pena Narcisse, Les pyrénées, 180		Réserve Sully 3 - épis 5 gauche	Cadre de petit format, frises de laurier, de feuilles d'acanthe sur fond canelé, perles, sable, baguette plate, rales de cœur, baguette plate.	Cadre en pâte	Cassures et petites lacunes	Comblements et retouches à la dorure ?	
R.F. 139, cadre pour Delacroix, Le 28 Juillet (1830), La Liberté guidant le peuple		Denon - Salle 700	Cadre à coquilles, volutes, feuilles d'acanthe et fleurs, frise de feuilles d'acanthe.	Cadre en pâte, zones planes sont brunies (assiette rouge)	Ouverture des angles, fissures sur les ornements, quelques petites lacunes ?	Comblements ? Redouire de certaines zones ponctuelles ? Bronzine ?	
R.F. 359, cadre pour Delacroix, Le Naufrage de Don Juan		Denon - Salle 700	Cadre à frises avec motifs de coquilles aux angles. Frises d'oves et ovales canelées, entrelacs et feuilles, frise concave avec décors de rinceaux végétaux incisés, plat, feuilles d'acanthe sur fond canelé, baguette incurvée.	Cadre en pâte, zones planes sont brunies (assiette rouge)	Fissures sur les ornements des angles.	Consolidation de certaines fissures ? Redouire ponctuelle ?	







R.F. 359, cadre pour Delacroix, <i>Le Naufrage de Don Juan</i>		Denon - Salle 700	Cadre à frises avec motifs de coquilles aux angles. Frises d'oves et oves canelées, entrelacs et feuilles, frise centrale avec décors de rinceaux végétaux incisés, plat, feuilles d'acanthé sur fond canelé, baguette incurvée.	Cadre en pâte, zones planes sont brunes (assiette rouge)	Fissures sur les ornements des angles.	Consolidation de certaines fissures ? Redoune ponctuelle ?	
R.F. 3943, cadre pour Delacroix, <i>Jeune Tigre jouant avec sa mère</i>		Denon - Salle 700	Cadre à frises de feuilles de chêne et glands, frise incurvée à canelures et feuilles d'acanthé (aux angles), plat, ruban, plat, perles, plats.	Cadre en pâte, zones planes et canelures brunes (assiette rouge)	Ouverture partielle des angles. Fissures des ornements en reliefs (feuilles d'acanthé aux angles et frise de feuilles de chêne), lacunes (feuilles de chêne)	Comblement, restitution de morceaux de feuilles de chêne sur l'angle bas senestre avec une matière qui semble creuse, un peu translucide, encrassée, à l'aspect "mou", fondu.	
INV. 1561, cadre pour Ricci, <i>La France, sous les traits de Minerve, terrassée l'ignorance et protège les Arts</i>		Denon - Salle 723	Ornements à motifs végétaux et floraux aux angles.	Pâte anglaise ?		"Anciennes" interventions ? Badigeon d'homogénéisation	
INV. 375, cadre pour Cantanini, <i>Le Repos pendant la fuite en Egypte</i>		Denon - Salles 727 à 729		Raies de cœur en pâte, ruban peut-être en pâte		Possibles comblements en pâte au niveau des raies de cœur.	
INV. 375, cadre pour Cantanini, <i>Le Repos pendant la fuite en Egypte</i>		Denon - Salles 727 à 729		Raies de cœur en pâte, ruban peut-être en pâte		Possibles comblements en pâte au niveau des raies de cœur.	
INV. 124, cadre pour Il Gobbo dei Carraci, <i>L'azione metamorfosante dei paesani di Lucca in grenouilles</i>		Denon - Salles 727 à 729	grenouilles			Badigeon d'apprêt et redoune ? Sur l'angle bas senestre	
R.F. 417, cadre pour J. de Aiello, <i>Couronne de fleurs, oiseaux et papillons</i>		Denon - Salle 730	Cadre à coquilles et à volutes sur fond croisé, fleurs de lys aux angles, frise à feuilles d'acanthé et canelures.	Cadre en pâte	Angles ouverts, fissures sur les traverses / montants	PAS de comblement ancien a priori.	
M.I. 344, cadre pour Murillo, <i>L'Immaculée Conception</i>		Denon - Salle 730	Cadre espagnol (?). Ornements aux angles avec figure de putti et feuillage sur bordure lisse. Frises d'oves, de feuillages sur fond canelé, et raies de cœur.	Cadre en pâte. Peut-être assemblage de bordures différentes ?	Lacune de la pointe de l'angle droite bas, les pointes des angles senestre ont probablement été altérées (chocs, éclats) mais reprises et/ou retouchées. Encrassement et/ou oxydation de certains feuillages des ornements d'angle.	PAS de comblement ancien a priori.	
ICIMD 390, cadre pour Conot, <i>Le passeur</i>		Réserve Petit Bourbon (depuis printemps 2021)	Style barbaizon	Cadre en pierre sur structure en bois	Lacunes d'ornements sur les frises, ouvertures des quatre angles, déplacements d'ornements, fragments mobiles, encrassement, pertes de polychromie	Restauration INP en 2015-2016, nettoyage, comblements des lacunes principales, comblements in situ des pertes lacunes et consolidations des angles fragiles, retouche	













N° inventaire	Contexte	Localisation	Éléments associés	Observations techniques	État de conservation	Interventions	Remarques et conclusions	Illustrations
Gy 0065	Diamètre, d'après Polyphile, vers 430 av. n.-é., Athènes, musée national, marbre, 526. 	Petites Ecuries, 2e galerie à droite, côté gauche.	Figure maculaire, en pied.	Moule à bon creux (cointures visibles). Au-dessus (à gauche), badigeon grisâtre sensible à l'eau (terre?)	Mais lacunaires, quelques, et lats et petites parties (à gauche), à gauche, à gauche. Encre sur le long du plan d'assemblage du buste.	Remontage (des différentes parties. Au-dessus (à gauche), à gauche, à gauche. Adhésif orange, appliqué dans le réseau de fissures de l'avant-bras droite. Différentes campagnes d'interventions ?	Plusieurs comblements avec des matériaux différents. Matériau orce, Matériau gris, se retire facilement quand humecté. Matériau blanc, aspect lisse, bords noirs. Le matériau orce semble avoir été appliqué en premier car il est par endroit recouvert du matériau gris. Pas tous le même degré de finition et de lissage. Aspect débordant, avec du retrait, irrégularité.	
Gy 0062	Électre et Orèse, Mikrobos, art électrolytique, 1 ^{er} siècle ap. n.-é., Rome, musée national romain, marbre, INV. 8164. 	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté droit.	Deux figures masculines, en pied.	Moule à bon creux (cointures visibles). Probable présence d'armature en bois et/ou de fûtes. Etiquette cartonnée type B.-A.	Cassures, (ap)atures, lacunes, remontées de bords, encrassement.	Remontage, comblements divers, restitution (pied droit, main droite, angle de la terrasse, au niveau de la figure droite). Différent(s) intervention(s) ?	Comblements de remontage blanc gris avec les bords noirs et orce orangé (auréoles), matière de restitution blanche, grise, texture granuleuse, peu lissée.	
Gy 0061	Aténis de Vassilias, attrib. à Deschamps, fin du 1 ^{er} siècle av. n.-é., trouvés à Rome, musée du Louvre, marbre et après un original en bronze. 	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté droit.	Figure féminine, tête.	Moule à bon creux (cointures visibles). En plusieurs parties. Etiquette cartonnée type B.-A.	Quelques cassures, ouvertures des assemblages, fissures, encrassements divers.	Badigeon localisé ? Nettoyage ? Quelques comblements.	Matériau blanche, badigeonnée (cointures orce et gris), fissurée.	
Gy 0057	Centaur Chevauché par Amour, époque hellénistique, 1 ^{er} siècle av. n.-é., Paris, musée du Louvre, marbre, 562. 	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté droit.	Figure de Centaure, renfort au milieu.	Moule à bon creux, fixation et armatures métalliques ferreuses.	Amour lacunaire, quelques (ap)atures et (à lats), oxydation des éléments ferreux, encrassement et coulures grises noires et orces.	Remontage du buste, scellement au plâtre (?), comblements. Restitution des doigts de la main droite, collage (au plâtre?) au niveau des poignets.	Comblement de remontage, matériau blanc, lisse et poncé, bords noirs par endroit. Comblement de cassure, matière blanche, appliquée à l'outil dentelé, peu de finition (débordement).	
Gy 0014	Sabire ? 	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté gauche.	Figure en pied	Moule à bon creux.	Quelques éléments lacunaires. Quelques auréoles orces.	Remontage.	Comblement de remontage et de certains lacunes (pied, socle, cymbale ?), matériau blanc gris, rares bords noirs, mis à niveau mais sans ponçage (à priori).	

Gy 0280	Grande Heroldensie, Lybique (?), élan, Quart de Voss, n° 761, Dresde, Albertinum, marbre, 36,6 cm x 40	Figure féminine en pied, drapée.	Moule à bon creux.	Quelques cassures, fissures et lacunes sur l'assise.	Restauration récente, nettoyage, comblement minimal, léger retrait.	Comblement en retrait, limité aux endroits nécessaires (structure), discrets.	
Gy 0294	Homme assis	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté droit.	Moule à bon creux (coutures visibles).	Cléure très altérée, cassures, fissures, surface érodée, porosité apparente, traces de rouille, saissure très sombre, auréoles de remontée l'anneau.	Anciens comblements	Comblements blancs. Matière dense (gâtre gîte les verres?), lissée et poncée. Certains sont tachés, on voit parfois des fronts noirs, auréoles... La surface est marquée par des traces d'ongles et de doigts quand on a touché. Les comblements différentiels : surface des comblements moins érodée). Certains sont fissurés. L'ensemble est encaissé et empoussiéré.	
Gy 0236	Chien molosse, île s. av. n.è., v. 240, Rome, Vatican, marbre, inv. 872	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté gauche.	Moule à bon creux, renforcé par de la toile de jute (oreille détaillé) ? Etiquette en papier cartonné type ENSBA	Quelques éclats, légère érosion de la surface ? Assise très altérée, saissure encore présente (aspect gris).	Œuvre restaurée récemment ? Nettoyage, consolidation (?), collage, comblements nombreux sur l'assise et au niveau du museau	Comblements très blancs (non retouchés), lissés, mis à niveau avec l'assise irrégulière.	
Gy 0273	Faune Barberini, 1799-1829, vers 220 av. n.è., Munich, Glyptothèque, n° inv. 218	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté gauche.	Moule à bon creux (coulures?), support en bois (planches assemblées pour le socle et collage ?), pâte de remplissage, masse lourde ? Plâtre fin en surface, gouttes de plâtre au revers (original?)	Cassure de l'angle arrière droite, quelques cassures et lacunes sur l'assise. Surface tachée, auréoles, couleur grise et ocre.	Œuvre remontée ? Plans d'assemblages au niveau des jambes, des bras, du tors... Nettoyage ? Consolidation ? Surface hétérogène	Comblements blancs au niveau de la cassure de l'angle arrière, comblement de remontage gris	
Gy 0294	Héro diadémée, Alcandre, 430-400 av. n.è., v. 554, Naples, Musée national archéologique, marbre, 6027	Petites Ecuries, 2e galerie à gauche, côté droit.	Moule à bon creux, plan d'assemblage du bras droite ouvert (détaché?)	Bon état général. Haut du buste lacunaire, cassures et lacunes sur l'assise. Surface légèrement hétérogène avec traces grises	Restauration récente ? Nettoyage. Anciens comblements d'assemblage et de consolidation	Comblements noirs, lissés (voir drapé hanché côté senestre). Par dessus, comblements de remontage et de quelques lacunes, épaulures. Couleur blanche, fronts noirs, aspect très lisse, mis à niveau par ponçage. Comblement très blanc au niveau de l'assise, brut.	

Gy0593	<p>Dionysos dit Bacchus de Rivetier, den. Quart du IVe s. av. n.è., V. 398, Paris, musée du Louvre, marbre, 87</p> 	<p>Petites Ecuries, 1e galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure masculine nue, coffre, bras senestre appuyé sur un élément végétal, raisins</p>	<p>Moule à bon creux, patine ? Bras en abattis ? Plan de montage au niveau du torse ?</p>	<p>Bon état général. Surface hétérogène. Quelques épaufures et petites lacunes</p>	<p>Badigeon gris épais et anciens comblements très écaille et badigeon fin blanc cassé écaille aussi bon le badigeon gris.</p>	<p>Comblements blancs (plâtre) grossiers, rapides, au niveau de "mots de croix", incisés (traces d'outils lissés/écoués ?) remontage après cassure ? Autres comblements plus fins, blancs ocre, avec des fronts noirs.</p>	
Gy0600	<p>Dansouse d'Herculeureum</p> 	<p>Petites Ecuries, 1e galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure féminine debout, drapée, bras droit relevé au-dessus de la tête</p>	<p>Moule à bon creux, résidus d'adhésif d'étiquette sur l'assise ?</p>	<p>Restauration récente de nettoyage, anciens comblements</p>	<p>Comblements de remontage blancs, clair, en forme de vague, bulles d'air, zones marquées, comblements ocre (drapé devant), blanc translucide (récent) drapé bas, côté droite épi semble fragile</p>	<p>Comblements de remontage blancs, clair, en forme de vague, bulles d'air, zones marquées, comblements ocre (drapé devant), blanc translucide (récent) drapé bas, côté droite épi semble fragile</p>	
Gy0601	<p>Dansouse appaissant son peplis, v. 650 av. n.è., Naples, Musée national archéologique, bronze 565, Vers. 1228 (ENSLIA)</p> 	<p>Petites Ecuries, 1e galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure féminine, debout, drapée, mains au niveau de l'épaule droite.</p>	<p>Moule à bon creux, différentes couleurs avec des ajouts de plâtre ? Etiquette en papier cartonné type ENSBA.</p>	<p>Traces d'humidité, auréoles, nuageusement</p>	<p>Restauration récente, nettoyage léger nuageusement</p>	<p>Comblements anciens le long de certaines coutures (ex. tête) ? Ou fissuration des différentes coulées lors du tirage ?</p>	
Gy0611	<p>Zéus, sur sa cuir. (prototype grec), v. 850. Munich, Glyptothèque, marbre, w. 214</p> 	<p>Petites Ecuries, 1e galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure féminine, debout, drapée, coffre, chevelure tressée, carquois ?</p>	<p>Moule à bon creux (coutures visibles)</p>	<p>Mains lacunaires, éclats et épaufures, fissures, forts empoussièrlements et salissures adhérentes. Griffures. Etat de surface hétérogène.</p>	<p>Comblements de remontage (bassin, coulées). Comblements de certaines fissures. Eventuel badigeon ? Nettoyage à la brosse ?</p>	<p>Comblements de remontage sont ocre, très lisses, probablement poncés, griffures bien visibles. Comblements parties de fissures, matière blanche très légèrement ocrée, moins jointif que les comblements d'assemblage. La couleur ocrée des comblements est peut-être due aux remontées taniques.</p>	
Gy0605	<p>Hermès appuyé sur un bâton, Florence, Offices, marbre, 250, roman, original (n. IVe s. av., v. 551)</p> 	<p>Petites Ecuries, 1e galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure masculine nue et casquée, en pied, appuyée sur un bâton/blanche d'épave, pieds croisés.</p>	<p>Moule à bon creux (coutures visibles). Gravure "G.S." sur l'assise.</p>	<p>Fissures du plan d'assemblage du bras senestre, sur le corp de pied (droite, au niveau des deux chevilles. Petites éclats et épaufures. Surface très encrassée, traces de fumées (?) et coulures noires. Griffures, traces d'outil dentelé.</p>	<p>Comblement de remontage des jambes, (des bras, de la tête.</p>	<p>Comblements de remontage blancs, gris, poncés, ou lissés à l'outil dentelé (main droite). Auréoles ocre (tainses). Comblement d'un éclat du casque. Résidus blancs. Autres comblements gris de réparations peut-être au niveau des pieds ? Deux campagnes de comblements ?</p>	

Gy 0281	 <p>Torse d'Apollon, Rome, torse dérivé de V. Sarrin, tête du IVe s. av.</p>	<p>Petites Ecrites, se galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure masculine nue, tête jusqu'aux genoux. Porteur d'un support imitant un torse d'homme sur le côté, rattaché au corps par un point en plâtre.</p>	<p>Moule à bon creux (coulures visibles). Absence au niveau des bras ? Perçage de la tête ? Autre comblement ? Remplissage ? Une et la bouche sont allés, traces de décoloration. Partien du support lacunaire. Eclats importants sur le bras gauche et le cou côté droite (très blanc), autres petits éclats sur le torse et sur la cuisse droite. Très encrassé, traces de fumées ? Remontées ocre de tannin, auréoles. Griffures. Graffiti.</p>	<p>Combléments de remontage au niveau des cuisses. Peut-être remontage des bras ? Autre comblement ? "Buissons" ? Plusieurs combléments à sur-basée.</p>	
Gy 0284	 <p>Victoire de Brescia, Brescia, musée national, bronze, époque de Vespasien, 67-78 apr. v. 1216.</p>	<p>Petites Ecrites, se galerie à gauche, côté droit.</p>	<p>Figure féminine ailée, en pied, drapée, pied gauche appuyé sur un socle, tenant un élément manquant dans ses deux mains (bras en fait).</p>	<p>Surface érodée. Traces de vissellements ou de contact déglacé avec humidité. Eclats, éparfures, fissures... Altérations ayant déjà été traitées, lacune du gros orteil du pied gauche, cassure de plumes sur l'aile gauche.</p>	<p>Nettoyage récent. Combléments et réparations plus anciennes. Badigeon épais appliqué localement (cuisse, genou, sester, drapé). Reprises et combléments d'éclat sur les bords (voir sur le drapé de face). Combléments de fissures et de lacunes au revers sur l'aile droite. Résidus ou dépôts par coulure de matériau blanc granuleux.</p>	
Gy 1419	 <p>Tête colorisée de cheval, Naples, musée national, bronze, INV. 4887, le IIe s. apr. v. 1378.</p>	<p>Petites Ecrites, se galerie à gauche, côté gauche.</p>	<p>Tête de cheval dressée, mors dans la mâchoire.</p>	<p>Altérations de surface et petites altérations de matière. Surface encrassée, différentes saillies, aspect général grisé. Eclats, éparfures, griffures... Quelques zones érodées, porosité du plâtre bien visible, aspect creusé. Bulles d'air. Griffures et/ou traces de brossage vigoureux. Traces d'outils dentelés.</p>	<p>Combléments de collage (feuille entre autre), d'éclats, de fissures... Brossage de la surface ?</p>	
Gy 0959	 <p>Ornament en forme de tête caprine, Rome, Palais conservateurs, Pontus, néo-attique, début Ier s. av. n.è., v. 556.</p>	<p>Petites Ecrites, se galerie à gauche, côté gauche.</p>	<p>Figure masculine drapée, en pied, tenant un objet dans les mains. Support d'entablement cylindrique sur le côté gauche.</p>	<p>Surface très encrassée, probablement de la boue. Les bords très bistréons. Anciennes cassures (cou et arête), traces de réparations. Fissures. Traces de rouille et d'exposition à l'humidité (porosité bien visible, bulles d'air ouvertes...). Eclats et éparfures.</p>	<p>Combléments de réparation et de nettoyage vigoureux (coulure de plâtre ?).</p>	
Gy 0276	 <p>Ornament en forme de tête caprine, Rome, Palais conservateurs, Pontus, néo-attique, début Ier s. av. n.è., v. 556.</p>	<p>Petites Ecrites, se galerie à gauche, côté gauche.</p>	<p>Ornement en forme de vase ou corne d'abondance, avec une tête et pattes avant de chèvre ailée, feuillages en arrière (côté). Toile de jute en rempart au-dessus. Traces de réparation de la face avant du vase, dit cannelé.</p>	<p>Structure fragile. Fissures le long des assemblages au vase, petites lacunes, éclats, éparfures, fissures... Anciennes cassures (arête, terre du vase...). Fissures et éparfures sur la surface. Aspect gris, bistréons. Bulles.</p>	<p>Combléments anciens, collages d'incléures cassées, combléments d'incléures. Badigeons sombres sur des réparations de cassures ? Tests de nettoyage.</p>	

Gy 0273	<i>Le Remèdeur</i> , Florence, Offices, marbre, IIe s. av.n.è., v.98	Petites Ecuries, ze galerie à gauche, côté droit.	Figure masculine accroupie avec un drapé sur le dos.	Peu de coutures visibles (voir pied senestre), tirage plein (voir cassure anglo), avec filasse ou élément de bousage en renfort dans l'assise. Plusieurs couilles de pierre. Incisions transversales sur les plans d'assemblage des abattis (filasse ou bousage). Marque caractéristique normant (un H).	Anciennes cavures et lacunes comblées ou réparées. Ecchys, épaufures, fissures, griffures. Lacune chine portion de drapé. Empoisonnement. Trace d'ablation par peau ou tournillette ? Auréoles et taches brunes dues à des renouillères de tann (filasse ou bousage).	Nettoyage récent. Comblements anciens en une seule intervention et peut-être quelques comblements récents ?	Comblements "de remontage" blanc-gris, parfois tachés ou avec des auréoles ocres, qui servent à combler des lacunes et à réparer des éléments cassés (?) et pour les abattis. Ils ont été poncés. Comblements aussi pour combler des fissures et des trous. Comblements blancs, gris, blancs (?) sur différentes fissures au niveau des assemblages des abattis ?	
Gy 0247	<i>Commode en Hercule</i>	Petites Ecuries, ze galerie à gauche, côté droit.	Figure masculine nue en pied, pesau de lion accolées sur l'épaule droite. Masseuse près de la jambe droite.	Figure masculine nue en pied, pesau de lion accolées sur l'épaule droite. Masseuse près de la jambe droite.			Comblements de remontage, blanc, ocre, gris, finitions rapides et travaillés à la ripe, comblements en retrait blanc re-touché.	
Gy 0206	<i>Prisonnier française dit Tridate</i>	Petites Ecuries, ze galerie à gauche, côté droit.	Figure masculine nue en pied, décapé, coffée d'un bonnet, mains croisées.				Comblements de "remontage" blanc, gris, liés ou repris, à outils, fronts noirs, aspect général dissolu, gouttes et coulures, reprises de volumes, autre type de comblement ou consolidation zones fissurées avec matériau très blanc, appliqué à la spatule, autre matériau ocre, aspect dense, plastifié, appliqué au pinceau ?	
Gy 0254	<i>Gauloise morte dite Arta</i>	Petites Ecuries, ze galerie à gauche, côté droit.	Figure féminine drapée, agenouillée. La tête penchée vers le côté droit.				Comblement de consolidation finitions rapides, couleur blanche, comblements de fissures, finitions soignées, couleur blanche	
Gy 0272	<i>Antinoüs</i> , Rome, Capitole, marbre 74, époque d'Hadrien (137-138), modèle grec, début du IVe s. av. n.è., v.555	Petites Ecuries, ze galerie à gauche, côté droit.	Figure masculine nue en pied, s'appuyant sur la jambe avant droite et un support imitant un tonc d'arbre, tête penchée vers le côté droit.	Coutures non visibles, arachées ? renfort par tiges métalliques dans la main senestre (dégât) et présence de renforts en bois dans le bras senestre, visibles sur les plans de cassures. Plusieurs couilles de plâtre, filasse, et grosses bulles d'air bien visibles sur l'assise (cassure). Fantôme de l'inscripteur (type ENGSA).	Bras senestre cassé et déposé, doigts cassés ou lacunaire. Bras droite maintenu par nouet en Tyvek (fragilité ?). Lacune de l'angle avant-droite de l'assise. Surface griffée, type brossage vigoureux, fortiment entrassée, aspect très gris et taché.	Remontage des jambes, des bras, de la tête. Restes de badigeons localisés au niveau de l'entre-jambe, matière granuleuse, gris, épaisse. Brossage pour retirer le badigeon ? Possible couche de cire car la surface a un aspect lustré et satiné par emploi.	Comblements de remontage, blancs-gris, liés.	
Gy 0275	<i>Cratère</i> , n.èo attique, fin 4er s. av. v.572 Naples, Musée archéologique national, marbre, INV. 676	Grandes Ecuries, trouvée gauche, côté droit.	Vase monumental à figures drapées en bas-relief et canelures.	Lacunes (au moins une lacune), fissures, épaufures et éclats importants, érosion de la surface, valourses et/ou badigeons. Collage ou découpage (retrograde du badigeon).	Restitution de certaines zones lacunaires (haine, col du vase...), badigeons (dont au moins un gris-vert).		Matériau blanc, type plâtre, restituant certains éléments décoratifs, mais appliqués rapidement (finitions négligées au revers).	

Gy 0253		Grandes Ecuries, travée gauche, côté gauche.	Figure masculine nue, allongée en torsion.	Figure masculine nue, drapée, assise circulaire.		Man droite lacunaire, main senestre fragilisée ? (film plastique). Eclats, épaufures. Déjections, graffiti. Saisures et/ou badigeon (patine).	Remontage (tête et bras droite). Comblements de zones lacunaires ou de gros éclats (bras droite, assise, plan d'assemblage du cou). Badigeons (un blanc et un gris ?), résidus surtout visibles sur l'assise.	Matière au de comblement blanc, type plâtre. Pas de front noir. Pas de pontage. Mis à niveau par-dessus la patine/badigeon.	
Gy 1587		Grandes Ecuries, travée gauche, côté droit.	Figure masculine nue, allongée en torsion.	Epreuve plane, remplissage par quatre couches de plâtre (trois à briques coulées différentes?) et par des senestres). Armatures métalliques (jambe senestre). Support en planches de bois. Fixations métalliques type clous, distation possible ? Pas de visibilité des coutures.	Nombres cassures (bras, jambes, pieds...). Lacunes. Épaufures et éclats importants. Éléments cassés et disposés à côté comme le bras senestre ? Badigeon ocre.	badigeon ? Pas d'intervention structurale	PAS de comblement.		
Gy 0070		Grandes Ecuries, travée gauche, côté droit.	Figure de cavalier sur un cheval. Deux animaux en course dont un lièvre ou un lapin. Associé à une représentation imprimée. Ensemble polychrome.		Angle haut droit cassé. Lacune importante sur le côté gauche et plus petite sur le côté droit. Ferre de relief sur le lapin. Nombreux éclats, épaufures, abrasions. Ferre de polychrome sur les parties saillantes.		Comblement à gauche et très poussé, modèle et polychrome réfaits. Comblement à droite est plus petit, en léger retrait, avec matière au granuleux, retouché toute neutre grisâtre.		
Gy 0922		Grandes Ecuries, travée gauche, côté gauche.	Figure masculine nue, en pied (Kourou), pied senestre en avant.	Epreuve plane ?	Bras, orfèlles senestre et portion de l'assise lacunaires. Nombreuses fissures et fragilités au niveau des pieds et des chevilles. Eclats et épaufures. Erosion de la surface. Perte du revêtement type badigeon ou patine. Numéro.		Deux types de comblements. Un comblement type remontage poncé, blanc-gris, au niveau du cou et de l'assise. Des petits comblements blancs, évincés rapidement, pas à niveau et pas isolés. Possiblement plus fins au niveau du cou. Associé à l'adhésif jauné ?		
Gy 1244		Grandes Ecuries, travée gauche, côté gauche.	Figure masculine nue, en pied, support en tronç. d'arbre à motifs de grappes de maison en relief.	Epreuves en plusieurs parties, abattis pour la tête, les bras (couches d'ajustement), cuisses. Quelques coutures visibles.	Tête et bras senestre lacunaires. Badigeon gris. Fragilité du corps maintenue par une x-charge de l'yeux. Eclats et épaufures le long des plans de remontage.		Comblements de remontage blanc, type plâtre, poncés.		
Gy 1484		Grandes Ecuries	Haut relief, deux personnages en pied d'appès, une figure couronnée et nimbée ? art médiéval ?	Moule à bon creux ? Pattes de fixations métalliques, patine ocre (imitation pierre?)	Lacunes aux angles supérieurs, patine alléée. Différentes interventions ayant mal vieilli. Temsures, auto-blois...		Comblement très blanc et comblement ocre (matière aspect plastique, à br cassant). Retouchés rapidement possible sur la tête d'une des figures.		

Annexe II

Fiches techniques des matériaux de l'étude

Molda® 3 Normal	p. 506
EXTHA® Ibérica	p. 507
Knauf® FG100	p. 508
Carbonate de calcium Kremer®	p. 509
Dioxyde de titane Kremer®	p. 510
Craie de Bologne Kremer®	p. 511
Colle de peau de lapin Kremer®	p. 512
Modostuc®	p. 513

MOLDA 3 NORMAL

Staff et Plâtre Décoratif



DESCRIPTION DU PRODUIT

Molda 3 Normal est un plâtre semi-hydraté non gypseux à base de plâtre et de ciment. Il est de couleur blanc cassé. Il est utilisé pour la production d'éléments décoratifs et dans des applications où il est également utilisé comme composant ou additif au sein de formulations.

AVANTAGES DU PRODUIT

- + Temps de prise et caractéristiques idéalement adaptées à la production de Staff
- + Bonne reproduction des détails fins
- + Plâtre non formulé de haute pureté également adapté pour la formulations de produits pour le bâtiment (propre ou exclusives)

AUTRES MARCHÉS

Alimentation, Agriculture et Environnement ,
Céramique, Matériaux pour la Construction

APPLICATION

Staff, Sautière, Arts De La Table, Murs, Sols /
Ciment

INFORMATIONS TECHNIQUES

Rapport plâtre/eau (en masse)	Taux de gâchage	1.55:1
Rapport eau/plâtre (en masse)		65%
Taux de gâchage mesuré en plâtre/eau (en masse)		100/65
Nom chimique	Caractéristiques chimiques	Sulphate de calcium semi-hydraté
Composition chimique		CaSO ₃ · 1/2H ₂ O
Pureté minimale en gypse (%)		91
Couleur		blanc
Fluidité anneau Vicat (cm)	Paramètres de prise	18
Début de prise (mm)		17
Fin de prise (mm)		39
Expansion linéaire (%)		0.19
Résistance à la flexion (MPa)	Comportement mécanique	5
Dureté Briell (MPa)		24
Dureté Shore D		50
Résistance à la compression à sec (Mpa)		14
Analyse granulométrique (refus en %)	Propriétés physiques	0.1% à 200 µm 3% à 100 µm
Densité non tassée (kg/m ³)		600



Molda 3 Normal

06/07/2021 - 18:57
1 / 3

Densité apparente (g/cm³)

0.6

Les caractéristiques techniques ne sont données qu'à titre d'information. Pour plus de détails, veuillez contacter directement Saint-Gobain Formula.

INSTRUCTIONS D'UTILISATION

Ce plâtre devra être utilisé dans le rapport plâtre/eau recommandé avec temps de mélange d'environ 2 à 4 minutes. La consistance exacte à utiliser devra être ajustée en fonction de chaque application. Les modifications du rapport plâtre/eau affecteront les performances du produit, en particulier le temps de prise et les résistances mécaniques.

PACKAGING ET DATE LIMITE D'UTILISATION

Packaging Disponible	Date limite d'utilisation (mois)
Sac 25 kg, 40 kg	10
Sac en vrac	10
Vrac	25 T

Lorsque le produit est stocké dans un local sec, à l'abri de l'humidité et dans son emballage d'origine, sa date limite d'utilisation est de 10 mois à compter de la date de production imprimée sur chaque sac. Cette date limite d'utilisation dépend du type de conditionnement. La mention DLU (Date Limite d'Utilisation), suivie de la date correspondante, sera indiquée sur les produits ayant une date de péremption définie applicable.

CERTIFICATION



DOP n° PEM 702

SANTÉ, SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT

Les fiches de données de sécurité des plâtres et gypses de Saint Gobain- Formula sont disponibles pour tous les produits et peuvent être obtenus directement sur notre site Web dans les sections Products et Documentation. Saint-Gobain Formula décline toute responsabilité en cas de blessure corporelle ou de perte de biens ou de dommages causés à ces biens en cas de mauvaise utilisation du produit.

NOTIFICATION

Les baux de gâchage indiqués sont ceux utilisés dans le cadre des méthodes de test standard de Saint-Gobain Formula et ne sont pas nécessairement ceux utilisés dans la pratique. La consistance exacte à utiliser devra être ajustée en fonction de chaque application. Les modifications du rapport plâtre/eau affecteront les performances du produit, en particulier le temps de prise et les résistances mécaniques. Les fiches de données de sécurité des plâtres et gypses de Saint-Gobain Formula sont disponibles sur notre site Web dans les sections Products et Documentation. Saint-Gobain Formula décline toute responsabilité en cas de blessure corporelle ou de perte de biens ou de dommages causés à ces biens en cas de mauvaise utilisation du produit.

CONTACT



Molda 3 Normal

06/07/2021 - 18:57
2 / 3



Fiche technique Plâtre EXTHA IBERICA

Désignation :	Plâtre EXTHA IBERICA
Composition :	Sulfate de calcium
Destination :	Réalisation de polochon (plâtre + colle + filasse) pour l'étanchéité et le renfort mécanique des conduits de désenfumage EXTHAMAT P
Etat physique :	Poudre
Masse volumique :	2300g.l ⁻¹
Couleur :	Blanc
 <u>Granulométrie :</u>	
Refus à 800 µm :	< 5%
Densité apparente :	0,8 +/- 2%
Diamètre médian :	155 µm
 <u>Mise en œuvre :</u>	
Début de prise au couteau :	10min
Taux de gâchage préconisé :	p/e = 1,4
 Stockage :	 A l'abri de l'humidité
Conditionnement :	Sacs de 25kg



Extha Iberica
Ctra. Estella, km 31
31579 CARCAR (Navarra)
ESPAGNE
Tel : +34 948 69 05 45

06/2013

KNAUF



K-Sentials

IC005.de

Alpha hémihydrate FG 100 11/2017

Alpha hémihydrate FG 100

Hémihydrate Alpha finement broyé

Description du produit

Hémihydrate Alpha finement broyé destiné à être utilisé dans l'industrie chimique de la construction et comme un gypse de base pour l'industrie dentaire.

Conditionnement	N° de matériau
En vrac	9346
Big Bag	147699
Sac de 25Kg	2853

Caractéristiques techniques	Unité	Valeur
Humidité libre	% en poids	≥ 0,5
Eau de cristallisation	% en poids	5,5 – 6,2
Degré de blanc	%	> 60
Quantité à saupoudrer (DIN EN 13279-2)	g	> 280
Début de solidification	min.	≥ 3
Granulation (tamisage LS)		
> 0,200 mm	% en poids	< 0,2
> 0,040 mm		20 – 60
Résistance à la compression à poids constant	N/mm ²	≥ 40
valeur pH	–	7 – 9

Knauf Direkt

Service de renseignements techniques:

- ▶ knauf-direkt@knauf.de
- ▶ www.k-sentials.de

Knauf Gips KG Am Bahnhof 7, 97346 Iphofen, Allemagne

Sous réserve de modifications techniques. Seule la version actuelle respective est valable.
Ces indications coïncident avec nos propres connaissances des règles de l'art à la date de parution de cette fiche. L'utilisateur est tenu de respecter les règles générales de l'art architectural, de même que les normes, directives et règles professionnelles applicables en la matière, en plus des prescriptions spécifiques à l'utilisation. Notre garantie s'applique uniquement à une qualité de mise en oeuvre impeccable de nos produits. Les informations spécifiques au rendement, aux quantités et à l'exécution ont été acquises par expérience et ne sauraient être applicables sans plus à des conditions divergentes.
Sous réserve de tout droit. Les modifications, réimpressions et reproductions photomécaniques ou électroniques, intégrales ou partielles, sont soumises à notre autorisation expresse.

Toutes les données indiquées sont des valeurs indicatives avec tolérance en fonction de l'origine et de la production. La méthode de détermination suit la prescription d'essai Knauf et peut être demandée en cas de besoin.

K | SENTIALS

IC005.de/fra/11.17/0/CO



58490 Calcium Carbonate

Calcium carbonate is a naturally gained product from calcite.

CAS No.: 471-34-1
EINECS: 207-439-9

Calcium carbonate is a white odorless, insoluble powder.

Chemical Analysis:

	Standard	Methode
CaCO ₃	98.5 – 100.5 %	EP, USP, FCC
CaCO ₃	≥ 98.0 %	E 170
Identification	complies	
Acid-insoluble substances	≤ 0.2 %	
Cl	≤ 330 ppm	
SO ₄	≤ 0.25 %	
As	≤ 4 ppm	EP
Sb	≤ 3 ppm	USP, FCC, E 170
Ba	complies	
Heavy metals	≤ 20 ppm	
Fe	≤ 200 ppm	EP
Magnesium and alkali salts	≤ 0.1 %	USP
Magnesium and alkali metals	≤ 1.0 %	USP, E 170, FCC
Loss on drying	≤ 1.5 %	EP
Pb	≤ 2.0	
Cd	≤ 3 ppm	
Sb, Cu, Cr, Zn, Ba	≤ 1 ppm	
F	≤ 100 ppm	
Hg	≤ 50 ppm	
Moisture	≤ 0.5 ppm	
Residual solvents	< 0.35 %	
	complies	

Page 1 of 2

Kremer Pigmente GmbH & Co. KG · Hauptstr. 41-47 · 88317 DE-Achheim, Tel. (049 756) 914480 · info@kremer-pigmente.com · www.kremer-pigmente.com
We do not assume any warranty for the guidance shown above. In any case, we recommend production and evaluation of samples.



Physical Values (typical)

Particle size D ₅₀	< 6.5 µm
Particle size D ₉₀	1.5 – 2.5 µm
Whiteness (L*, a*, b* value)	97.6 – 99.6

Page 2 of 2

Kremer Pigmente GmbH & Co. KG · Hauptstr. 41-47 · 88317 DE-Achheim, Tel. (049 756) 914480 · info@kremer-pigmente.com · www.kremer-pigmente.com
We do not assume any warranty for the guidance shown above. In any case, we recommend production and evaluation of samples.



46200 Titanium White, rutil

Titanium Dioxide

Physical Properties

Ti-Pure TiO₂ for Coatings - Dry Grades

TiO ₂	min.89 wt%
Alumina	3.3 wt.%
Silica	5.5 wt.%
Specific Gravity	3.9
Bulking Value	0.255 l/kg 0.031 gal/lb
Organic treatment	no
Color, CIE L*	99.9
Median particle size	0.50 µm
Oil absorption	18.7
pH-Value	7.2
Resistance at 30°C (86°F)	6 k-ohm
Carbon black undertone	11.6

Further information:

Titanium white is a specially coated product, TiO₂. The coating is both for the stability of the particles and to ease the dispersion in water and oil.



58100 - 58150 Chalk of Bologna

Our product 58100 Chalk of Bologna is a natural mixture of calcium sulfate (gypsum) and calcium carbonate (chalk).

The product 58150 Chalk of Bologna, easily a particularly fine-particle and light variety of set gypsum and consists of calcium sulfate. The term chalk is usually reserved for chalk (calcium carbonate, CaCO_3) in artist paint production.

Gypsum is a naturally occurring sulfate mineral. It is known that there are more than 2,400 million tons of gypsum reserves worldwide. Gypsum is formed in nature by precipitation during evaporation of seawater, which naturally contains 0.13% slurred gypsum. Raw gypsum is mined in the form of gypsum stone in opencast mines and shipped to the respective production sites for industrial processing.

The first stage of production consists of drying and crushing the rock lumps and processing them into powder. The gypsum powder obtained in this way is heated to approx. 165°C, which removes 75% of the chemically bound water from it. The result of this process is the so-called stucco gypsum, which is further refined and formed into plasterboard between two layers of cardboard. In the further processing stage, the great flexibility and malleability of gypsum board enables it to be used in an almost unlimited variety of products.

Today, gypsum is an indispensable part of modern construction almost everywhere in the world. But the special properties of gypsum as a natural product were already discovered in ancient Egypt, about 5000 years ago. Mixed with sand, gypsum served as mortar for building the pyramids.

In 1775, the French chemist Lavoisier found the chemical formula for gypsum: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. When it was discovered that gypsum consists of calcium sulfate and crystalline water, nothing stood in the way of the industrial processing of this material. In 1888 the American Sackett invented a machine for the production of plasterboard, and in 1901 the first plasterboard factory was built in the USA.

The urbanistic history of Bologna shows how closely the city is linked to gypsum. Since the city is particularly close to gypsum outcrops, this stone was used for building. In fact, the first buildings around Bologna were built with blocks of gypsum. Nevertheless, it is since the end of the 19th century and after the Second World War that mining developed and endangered the whole karst area. In 1973 the gypsum quarries were closed for this reason.

The Cova di Filo was the only quarry that used screw wire instead of explosives. For this reason, it was the last to be closed. The quarry unfortunately damaged a karst well that was very interesting from a paleontological point of view. Fossils and animal skeletons were found here. This karst depression has been covered with introduced gypsum. The Palestrina was formed from a quarry that dates back to the Roman period. Its name refers to the fact that for some years it has been used as a climbing wall (palestra). Once you reach the top of the wall, you can enjoy a wonderful view over Bologna, the plain and the gypsum outcrops of the Miserrizzano plateau. The wall of Palestrina is marked by Mairinglas.

The data given below are to be considered as typical values. Variations are possible.

Page 1 of 2

Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41-47 DE-8317 Achstetten Tfd. 0049 7566 914480 info@kremer-pigmente.com www.kremer-pigmente.com
We do not assume any warranty for the guidance shown above. In any case, we recommend production and evaluation of samples.



58100 Chalk of Bologna

Chemical analysis

Calcium carbonate,	CaCO_3	48.37 %
Calcium oxide,	CaO	16.98 %
Sulfur trioxide,	SO_3	23.45 %
Silicon dioxide,	SiO_2	0.86 %
Aluminum oxide,	Al_2O_3	0.34 %
Iron-III-oxide,	Fe_2O_3	0.12 %
Magnesium oxide,	MgO	1.07 %
Bentonite		0.90 %
Water		7.91 %
Grain size 30 - 40 μm		

58150 Chalk of Bologna, light

Grain size: 50 - 60 μm

Page 2 of 2

Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41-47 DE-8317 Achstetten Tfd. 0049 7566 914480 info@kremer-pigmente.com www.kremer-pigmente.com
We do not assume any warranty for the guidance shown above. In any case, we recommend production and evaluation of samples.



63028 Rabbit Skin Glue

Technical Data

Form:	coarse grains
Color:	yellowish - brown
Odor:	slight odor
pH-Value:	5.5 – 6.5
Gelatinous strength (12.5 %):	340 – 360 Bloomgrams
Viscosity:	4.25 – 5.50 Engler at 17.75 % and 60°C
Decomposition:	> 320°C
Fat content:	1.0 – 2.5 %
Storage:	Store product in a dry place, keep away from water and humidity. Do not store above 30°C.
Application:	Soak the gelatine grains in cold water during 2 hours. Then slowly heat up in a double boiler between 50 and 60°C.

Gelatine is usually prepared in solutions of 2 to 60 %, depending on the purpose of application.



PLASVEROI INTERNATIONAL MODOSTUC

DESCRIZIONE

È uno stucco in pasta a rasare per legno e muri, di facile applicazione. È inodore e non impurificante. La particolare composizione del prodotto lo rende atossico, non infiammabile e non nocivo. MODOSTUC è assolutamente esente da metalli pesanti. Disponibile in bianco e nove colori di cartella.

IMPIEGO

MODOSTUC è indicato per la stuccatura di muri, cemento, legno, ecc, oltre che per piccoli lavori di restauro.

MODO D'USO

Il prodotto può dirsi pronto all'uso, tuttavia si consiglia un premiscolamento prima dell'utilizzo.

È applicabile mediante spatole di acciaio flessibile su muro, cemento, legno, ecc. Non sono richieste precauzioni durante la fase di lavorazione.

CONFEZIONE

Bianco: 0,250-0,500-1,5-25 kg

Colorato: 0,500-1,5-25 Kg

Tinte legno: tubo da 250 g

STOCCAGGIO

Conservare in luogo fresco e ventilato, lontano da sorgenti di calore ed al riparo dai raggi solari.

Temperatura minima 5°C.

Le informazioni per l'utilizzatore sono contenute nella relativa scheda di sicurezza.

CARATTERISTICHE TECNICHE

PESO SPECIFICO 1,920-1,960 g/ml

RESIDUO SECCO (% in peso) 78

VISCOSITÀ: Tixotropico

PUNTO DI FIAMMA (°C) N.D.

VITA DI STOCCAGGIO (mesi) 12

SOVRAPERNICIABILITÀ (h) 6

INFORMAZIONI PER L'APPLICAZIONE

DILUIZIONE

Pronto all'uso

Pronto all'uso

SPATOLA

FRATTAZZO

ESSICAZIONE

FUORI POLVERE

SECCO AL TATTO

SECCO IN PROFONDITÀ

N.D.

max 1h

10h

Annexe III

Fraction volumique solide Φ par type de matériaux et formulations.	p. 516
Indice de structuration n libre	p. 517
Coefficients de détermination linéaire R^2 pour les formulations, en fonction de la valeur de l'indice n.	p. 518
Contrainte seuil τ_0	p. 519
Courbes d'écoulement en consistance en fonction du taux de cisaillement	p. 520
Valeurs de consistances	p. 523
Estimations des fractions volumiques solides maximales et de percolation	p. 524

Fraction volumique solide Φ par type de matériaux et formulations.

Formulation	Mélange (E/P, ratio, %)	Rapport massique	Fraction volumique solide Φ
Molda® 3 Normal	0,45		0,458
	0,5		0,432
	0,55		0,409
	0,6		0,388
	0,65		0,369
	0,7		0,352
	0,75		0,336
	0,8		0,322
	0,85		0,309
	0,9		0,297
EXTHA®	0,95		0,286
	0,5		0,465
	0,55		0,442
	0,6		0,420
	0,65		0,401
	0,7		0,383
	0,75		0,367
	0,8		0,352
	0,85		0,338
	0,9		0,326
Knauf®	0,95		0,314
	1		0,303
	1,05		0,293
	0,3		0,551
	0,35		0,512
Molda® 3 Normal + carbonate de calcium	0,4		0,479
	0,45		0,450
	0,5		0,424
	0,7 1-0,5	0,47	0,446
	0,7 1-1	0,35	0,515
	0,9 1-0,5	0,6	0,384
	0,9 1-1	0,45	0,452
0,9 1-1,5	0,36	0,507	
1,1 1-0,5	0,73	0,338	
1,1 1-1	0,55	0,404	
1,1 1-1,5	0,44	0,457	
Molda® 3 Normal + carbonate de calcium + dioxyde de titane	1,5 1-2 +2 %	0,5	0,428
Craie de Bologne + colle de peau de lapin	Apprêt liquide	1,16	0,476
Craie de Bologne + colle de peau de lapin + dioxyde de titane	Apprêt liquide à 2 % de TiO ₂	1,16	0,476
Modostuc®	Pâte		-

Indice de structuration n libre

Formulation	Rapport massique E/P ou E/Ms	Fraction volumique solide Φ	Indice n
Molda® 3 Normal	0,45	0,458	0,928
	0,5	0,432	0,906
	0,55	0,409	0,859
	0,6	0,388	0,657
	0,65	0,369	0,550
	0,7	0,352	0,505
	0,75	0,336	0,478
	0,8	0,322	0,527
	0,85	0,309	0,421
	0,9	0,297	0,574
	0,95	0,286	0,636
EXTHA®	0,5	0,465	1,650
	0,55	0,442	0,554
	0,6	0,420	0,199
	0,65	0,401	0,139
	0,7	0,383	0,177
	0,75	0,367	0,143
	0,8	0,352	0,328
	0,85	0,338	0,425
	0,9	0,326	0,463
	0,95	0,314	0,548
	1	0,303	0,571
Knauf®	1,05	0,293	0,515
	0,3	0,551	0
	0,35	0,512	0,741
	0,4	0,479	1,018
	0,45	0,450	1,155
	0,5	0,424	1,106
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-0,5	0,47	0,446	0,448
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-1	0,35	0,515	3,370
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-0,5	0,60	0,384	0,462
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1	0,45	0,452	0,470
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1,5	0,36	0,507	2,505
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-0,5	0,73	0,338	0,541
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1	0,55	0,404	0,397
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1,5	0,44	0,457	0,602
M ₃ N CaCO ₃ 1,5 1-2 à 2% TiO ₂	0,49	0,428	0,501
Craie + colle (apprêt) à 20 °C	1,16	0,476	1,254
Craie + colle à 2% TiO ₂ (apprêt) à 20 °C	1,16	0,476	1,222
Craie + colle (apprêt) à 40 °C	1,16	0,476	0,841
Craie + colle à 2% TiO ₂ (apprêt) à 40 °C	1,16	0,476	0,877
Modostuc®	-	-	0,781

Coefficients de détermination linéaire R^2 pour les formulations, en fonction de la valeur de l'indice n .

Molda® 3 normal E/P	R^2 n libre	R^2 $n=0,5$	EXTHA® E/P	R^2 n libre	R^2 $n=0,5$
0,45	0,904	0,857	0,5	0,937	0,799
0,5	0,958	0,957	0,55	0,955	0,949
0,55	0,974	0,942	0,6	0,998	0,954
0,6	0,982	0,968	0,65	0,998	0,929
0,65	0,982	0,981	0,7	0,996	0,946
0,7	0,975	0,974	0,75	0,975	0,926
0,75	0,954	0,952	0,8	0,965	0,953
0,8	0,894	0,894	0,85	0,933	0,931
0,85	0,829	0,840	0,9	0,911	0,910
0,9	0,713	0,709	0,95	0,868	0,882
0,95	0,654	0,646	1	0,825	0,822
			1,05	0,769	0,769

Molda® 3 normal + additifs	R^2 n libre	R^2 $n=0,5$
0,7 1-0,5	0,998	0,998
0,7 1-1	0,973	0,659
0,9 1-0,5	0,995	0,994
0,9 1-1	1	0,999
0,9 1-1,5	0,933	0,860
1,1 1-0,5	0,980	0,976
1,1 1-1	1,000	0,995
1,1 1-1,5	0,999	0,995
1,5 1-2 2%	1	1

Knauf®	R^2 n libre	R^2 $n=0,5$	R^2 $n=1$
0,3	0,000	0,000	0,002
0,35	0,995	0,956	0,990
0,4	0,979	0,877	0,979
0,45	0,925	0,743	0,920
0,5	0,510	0,418	0,507

Formulation alternative	R^2 n libre	R^2 $n=0,5$
Modostuc®	0,887	0,858
Craie + colle à 20 °C	0,996	0,879
Craie + colle TiO ₂ 2% à 20 °C	0,996	0,840
Craie + colle à 40 °C	0,982	0,946
Craie + colle TiO ₂ 2% à 40 °C	0,992	0,840

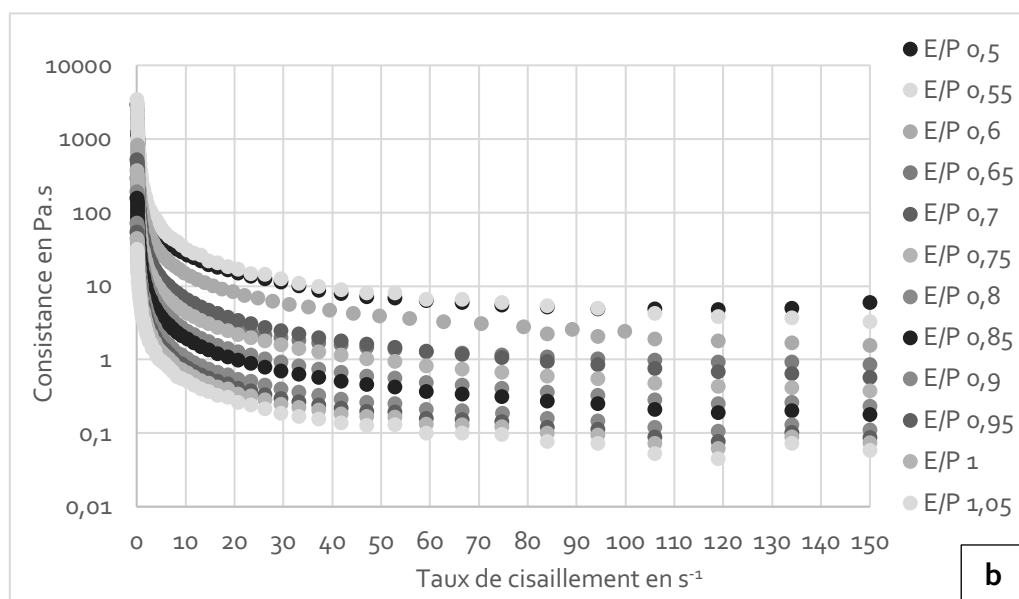
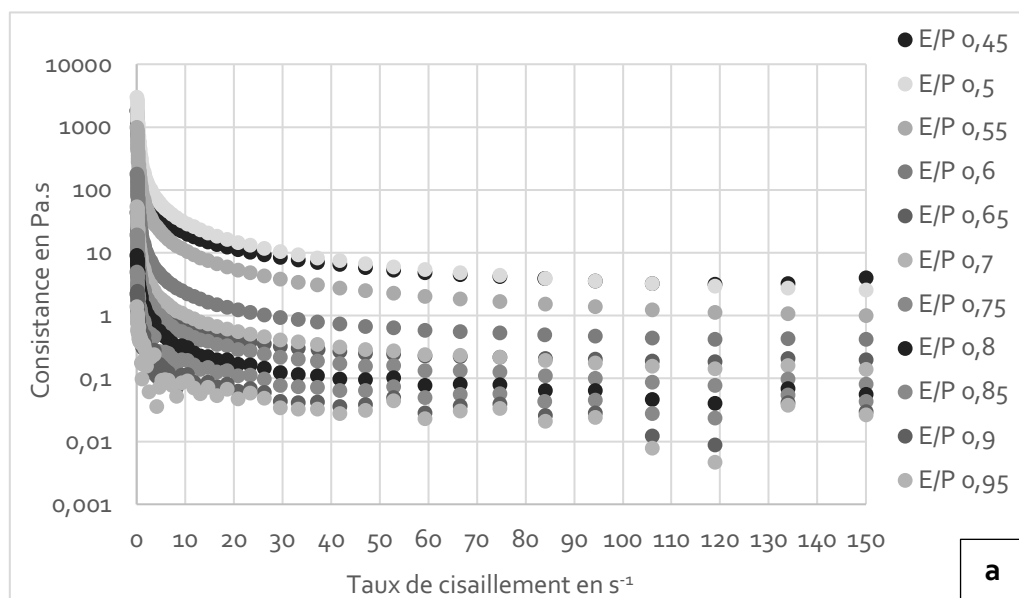
Contrainte seuil τ_0

Identifiées par mesures et modélisation, en quasi-statique (Vane) et en dynamique (plan-plan).

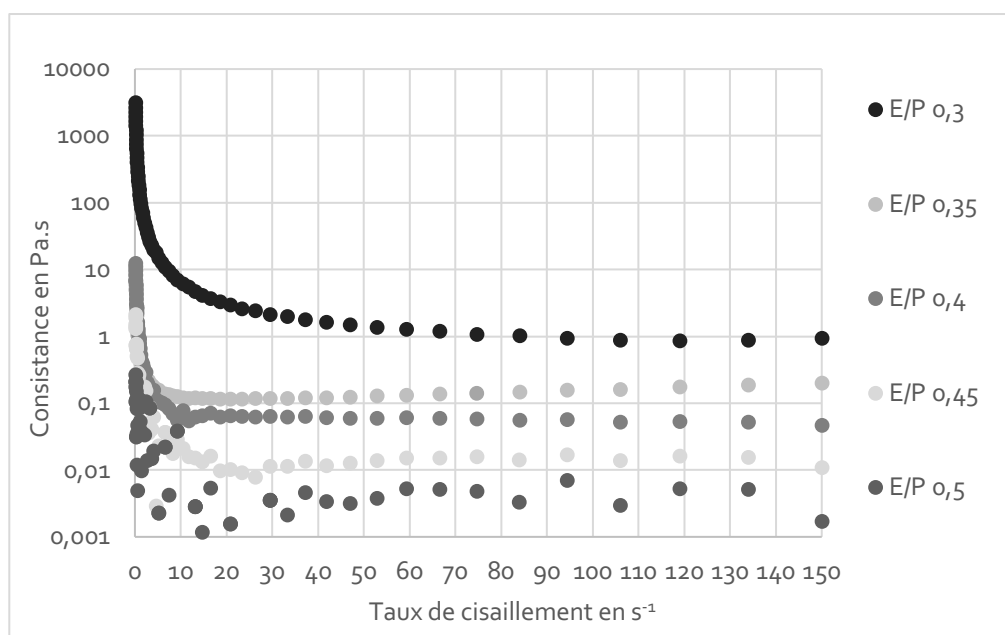
Formulation	E/P ou E/Ms	ϕ	τ_0 Herschel- Bulkley n libre	τ_0 Herschel- Bulkley n=0,5	τ_0 YODEL n=0,5	τ_0 Vane
Molda® 3 Normal	0,45	0,458	182,56	148,05	-2169,70	/
	0,5	0,432	321,78	312,81	312,12	230,45
	0,55	0,409	114,34	109,31	114,05	80,73
	0,6	0,388	45,76	43,64	58,36	39,79
	0,65	0,369	16,50	15,24	33,55	16,46
	0,7	0,352	7,27	7,30	20,22	9,65
	0,75	0,336	2,89	3,10	12,28	5,69
	0,8	0,322	1,56	1,46	7,24	3,66
	0,85	0,309	0,28	0,60	3,91	2,40
	0,9	0,297	0,31	0,18	1,64	1,70
EXTHA®	0,95	0,286	0,22	0,04	0,06	1,29
	0,5	0,465	276,48	324,88	649,45	/
	0,55	0,442	305,57	300,18	300,98	/
	0,6	0,420	100,50	171,46	170,89	209,87
	0,65	0,401	45,66	113,42	105,94	113,82
	0,7	0,383	42,83	63,27	68,58	79,54
	0,75	0,367	22,14	42,85	45,24	42,08
	0,8	0,352	21,95	24,20	29,83	19,67
	0,85	0,338	18,68	19,17	19,26	16,13
	0,9	0,326	9,61	9,79	11,81	10,21
Knauf®	0,95	0,314	7,51	7,64	6,46	7,68
	1	0,303	6,37	6,23	2,56	5,11
	1,05	0,293	4,62	4,59	-0,32	3,78
	0,3	0,551	132,12	250,60	101,96	117,04
	0,35	0,512	2,25	/	69,14	113,82
	0,4	0,479	1,37	/	48,37	/
M3N 0,7 CaCO ₃ 1-1	0,45	0,450	0,32	0,24	34,61	/
M3N 0,9 CaCO ₃ 1-1,5	0,5	0,424	0,07	/	25,16	/
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-1,5	0,35	0,515	213,79	130,89	-23,24	/
M3N 0,9 CaCO ₃ 1-1	0,36	0,507	149,01	93,28	-26,32	/
M3N 0,7 CaCO ₃ 1-0,5	0,44	0,457	223,12	93,28	199,27	/
M3N 1,5 CaCO ₃ 1-2 + 2% TiO ₂	0,45	0,452	63,06	64,27	90,48	/
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-1	0,47	0,446	46,05	47,27	50,49	119,87
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-1	0,49	0,428	81,02	80,91	20,97	97,14
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-1	0,55	0,404	26,79	29,20	10,37	36,71
M3N 0,9 CaCO ₃ 1-0,5	0,6	0,384	7,82	7,83	6,69	17,91
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-0,5	0,73	0,338	3,92	3,73	2,87	5,90
Apprêt Craie de Bologne + colle à 20 °C	1,16	0,476	8,59	1,46	4,53	13,65
Apprêt Craie de Bologne + colle + 2% TiO ₂ à 20 °C	1,16	0,476	9,21	0,60	4,53	13,87
Apprêt Craie de Bologne + colle à 40 °C	1,16	0,476	16,70	15,45	4,53	/
Apprêt Craie de Bologne + colle + 2% TiO ₂ à 40 °C	1,16	0,476	12,44	0,60	4,53	/
Modostuc®	-	-	1052,19	757,49	/	/

Valeurs en Pa

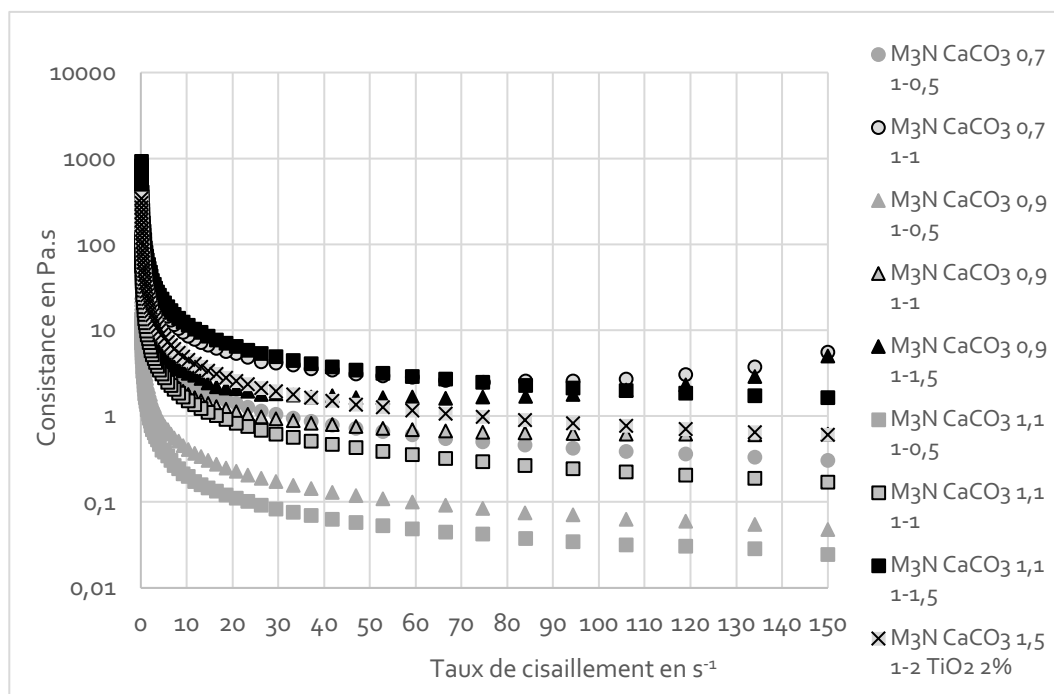
Courbes d'écoulement en consistance en fonction du taux de cisaillement



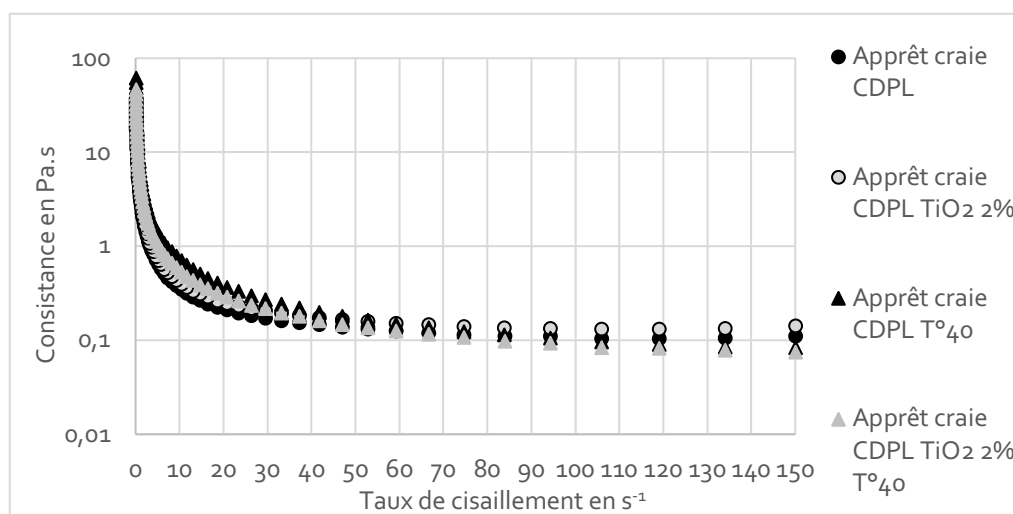
Courbes d'écoulement et de consistance en fonction du taux de cisaillement des pâtres β Molda[®] 3 Normal (a), et EXTHA[®] (b), à différents rapports massiques E/P.



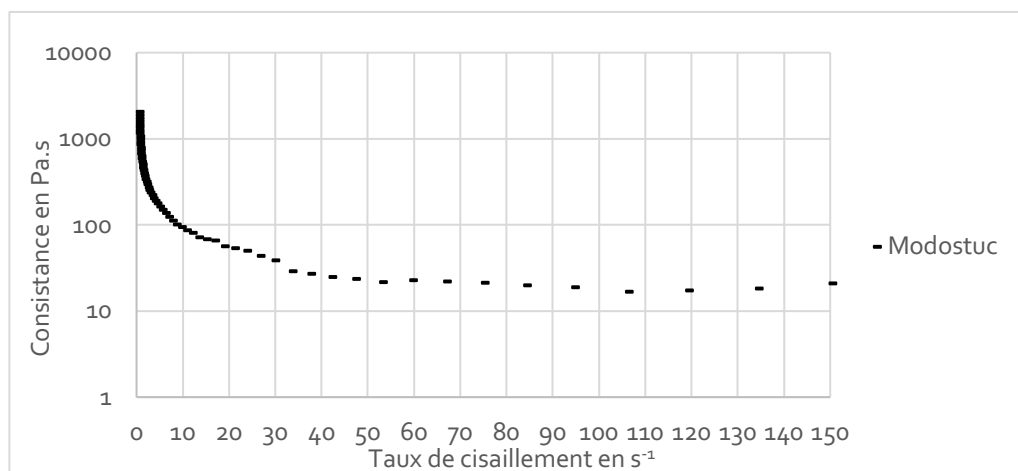
Courbes d'écoulement et de consistance en fonction du taux de cisaillement du plâtre α Knauf®, à différents rapports massiques E/P.



Courbes d'écoulement et de consistance en fonction du taux de cisaillement du Molda® 3 normal additionné de carbonate de calcium et de dioxyde de titane, à différents rapports massiques E/P et ratios sulfate-carbonate.



Courbes d'écoulement et de consistance en fonction du taux de cisaillement des mélanges d'apprêts liquides de craie de Bologne et de colle animale, avec ou sans dioxyde de titane, dans des conditions d'essai à 20°C ou 40°C.



Courbe d'écoulement et de consistance en fonction du taux de cisaillement pour le produit commercial prêt-à-l'emploi Modostuc®.

Valeurs de consistances

Obtenues par calculs et modélisations

Formulation	E/P ou E/Ms	ϕ	K Herschel-Bulkley n libre	K Herschel-Bulkley n=0,5	K Krieger-Dougherty adapté n=0,5
Molda® 3 Normal	0,45	0,458	8,37	26,38	13,85
	0,5	0,432	1,71	6,81	7,26
	0,55	0,409	0,76	3,75	4,19
	0,6	0,388	1,36	2,75	2,61
	0,65	0,369	1,49	2,01	1,73
	0,7	0,352	1,26	1,23	1,21
	0,75	0,336	0,99	0,81	0,88
	0,8	0,322	0,49	0,55	0,67
	0,85	0,309	0,73	0,43	0,51
	0,9	0,297	0,20	0,29	0,40
EXTHA®	0,5	0,465	0,52	38,74	229,56
	0,55	0,442	17,96	20,88	36,89
	0,6	0,420	75,31	12,00	12,29
	0,65	0,401	69,32	6,72	5,70
	0,7	0,383	21,39	2,97	3,19
	0,75	0,367	21,16	1,64	2,02
	0,8	0,352	2,97	1,11	1,39
	0,85	0,338	1,15	0,77	1,01
	0,9	0,326	0,76	0,62	0,78
	0,95	0,314	0,39	0,53	0,62
Knauf®	1	0,303	0,30	0,40	0,50
	1,05	0,293	0,31	0,34	0,42
	0,3	0,551	118,49	0,00	0
	0,35	0,512	1,24	3,75	0,60
	0,4	0,479	0,11	1,24	0,37
	0,45	0,450	0,02	0,27	0,24
M3N 0,7 CaCO ₃ 1-1	0,5	0,424	0,01	0,09	0,17
M3N 0,7 CaCO ₃ 1-1	0,35	0,515	0,91	41,61	/
M3N 0,9 CaCO ₃ 1-1,5	0,36	0,507	0,06	30,28	/
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-1,5	0,44	0,457	19,70	30,28	31,91
M3N 0,9 CaCO ₃ 1-1	0,45	0,452	11,81	10,33	13,60
M3N 0,7 CaCO ₃ 1-0,5	0,47	0,446	7,64	5,97	8,10
M3N 1,5 CaCO ₃ 1-2 TiO ₂ 2%	0,49	0,428	12,51	12,60	4,12
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-1	0,55	0,404	5,45	3,24	2,60
M3N 0,9 CaCO ₃ 1-0,5	0,6	0,384	1,14	0,97	2,03
M3N 1,1 CaCO ₃ 1-0,5	0,73	0,338	0,43	0,50	1,37
Apprêt Craie de Bologne + colle à 20 °C	1,16	0,476	0,06	0,55	0,63
Apprêt Craie de Bologne + colle + 2% TiO ₂ à 20 °C	1,16	0,476	0,09	0,43	0,63
Apprêt Craie de Bologne + colle à 40 °C	1,16	0,476	0,34	1,09	0,63
Apprêt Craie de Bologne + colle + 2% TiO ₂ à 40 °C	1,16	0,476	0,25	0,43	0,63
Modostuc®	-	-	271,53	419,07	0,58

Valeurs en Pa.s

Estimations des fractions volumiques solides maximales et de percolation

Formulation	Fraction volumique solide de percolation ϕ_{per} n libre	Fraction volumique solide maximale ϕ_{max} n libre	Fraction volumique solide de percolation ϕ_{per} $n=0,5$	Fraction volumique solide maximale ϕ_{max} $n=0,5$
Molda® 3 Normal	0,313	0,431	0,285	0,454
	ϕ de 0,322 à 0,409		ϕ de 0,286 à 0,432	
	E/P = 0,8 à 0,55		E/P = 0,95 à 0,5	
EXTHA®	0,000	0,454	0,294	0,500
	ϕ de 0,293 à 0,442		ϕ de 0,293 à 0,465	
	E/P = 1,05 à 0,55		E/P = 1,05 à 0,5	
Knauf®	0,423	1,540	0,522	0,540
	ϕ de 0,424 à 0,551		Φ -	
	E/P = 0,5 à 0,3		E/P entre 0,35 et 0,3	
Molda® 3 Normal + additifs	0,000	0,461	0,000	0,461
	ϕ de 0,338 à 0,457		ϕ de 0,338 à 0,457	
	Rapport massique = 0,73 à 0,44		Rapport massique = 0,73 à 0,44	
Apprêt craie de Bologne et colle animale \pm dioxyde de titane	0,000	0,634	0,000	0,785
	ϕ à 0,476		ϕ à 0,476	
	Rapport massique = 1,16		Rapport massique = 1,16	

Valeurs modélisées des fractions volumiques solides de percolation et maximales par type de formulation, en fonction de l'indice n , et correspondances avec les valeurs calculées (fraction volumique solide et rapport massique E/P ou eau/poudre).

Annexe IV

Masses volumiques des formulations	p. 528
Contraintes maximales en compression	p. 529
Contraintes maximales en flexion 4 points	p. 530
Modules de Young et d'élasticité dynamique	p. 531
Coefficient de Poisson	p. 532
Fiche technique des jauges de déformation	p. 533

Masses volumiques des formulations

Plâtre et formulation	Rapport massique		Masse volumique moyenne en kg.m ⁻³
	E/P	E/Ms	
Molda® 3 Normal	0,45	0,45	1418,88
	0,5	0,5	1324,86
	0,6	0,6	1207,55
	0,7	0,7	1134,78
	0,8	0,8	1039,53
	0,9	0,9	967,52
	0,95	0,95	941,29
EXTHA® Ibérica	0,5	0,5	1288,13
	0,6	0,6	1168,47
	0,7	0,7	1072,51
	0,8	0,8	1001,67
	0,9	0,9	901,27
	1	1	862,09
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-0,5	0,7	0,47	1338,66
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-1	0,7	0,35	1143,11
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-0,5	0,9	0,6	1027,56
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1	0,9	0,45	1494,20
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1,5	0,9	0,36	1314,44
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-0,5	1,1	0,73	1175,46
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1	1,1	0,55	1446,79
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1,5	1,1	0,44	1285,35
M ₃ N CaCO ₃ 1,5 1-2 à 2% TiO ₂	1,5	0,5	1252,47
Craie de Bologne + colle de peau de lapin	0,33	0,33	1620,74
Craie de Bologne + colle de peau de lapin, à 2% TiO ₂	0,33	0,33	1591,96

Contraintes maximales en compression

Plâtre β	Rapport massique E/P	ρ (kg.m ⁻³)	Contrainte en compression (Mpa)	Ecart-type
Molda® 3 Normal	0,5	1324,86	22,00	0,91
	0,6	1207,55	15,30	1,52
	0,7	1134,78	11,72	0,74
	0,8	1039,53	6,75	0,42
	0,9	967,52	5,21	0,49
	0,95	941,29	5,62	0,61
EXTHA® Ibérica	0,5	1288,13	19,18	1,84
	0,6	1179,42	11,62	1,12
	0,7	1094,18	8,86	1,14
	0,8	1001,67	6,27	0,80
	0,9	901,27	4,85	0,30
	1	862,09	3,09	0,27

Formulation	Rapport massique E/Ms	ρ (kg.m ⁻³)	Contrainte en compression (Mpa)	Ecart-type
Molda® 3 Normal + additifs				
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-0,5	0,47	1288,09	14,15	1,45
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-1	0,35	1494,20	11,98	3,62
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-0,5	0,6	1143,11	8,53	0,79
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1	0,45	1314,44	9,62	0,60
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1,5	0,36	1446,79	5,90	0,66
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-0,5	0,73	1027,56	4,47	0,29
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1	0,55	1174,59	5,85	0,55
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1,5	0,44	1285,35	4,92	0,61
M ₃ N CaCO ₃ 1,5 1-2 2% TiO ₂	0,5	1252,47	2,62	0,43
Craie CDPL	0,33	1620,74	8,39	1,55
Craie CDPL 2% TiO₂	0,33	1591,96	5,98	0,85

Contraintes maximales en flexion 4 points

Plâtre β	Rapport massique E/P	ρ (kg.m ⁻³)	Contrainte en flexion (Mpa)	Ecart-type
Molda® 3 Normal	0,5	1316,28	4,45	0,50
	0,6	1183,99	3,70	0,17
	0,7	1090,07	3,12	0,13
	0,8	1014,51	2,11	0,06
	0,9	949,16	1,85	0,17
	0,95	925,94	1,68	0,07
EXTHA® Ibérica	0,5	1247,32	4,60	0,46
	0,6	1126,13	3,30	0,27
	0,7	1028,55	2,60	0,28
	0,8	962,29	2,15	0,18
	0,9	898,39	2,10	0,08
	1	849,10	1,72	0,12

Formulation	Rapport massique E/Ms	ρ (kg.m ⁻³)	Contrainte en flexion (Mpa)	Ecart-type
Molda® 3 Normal + additifs				
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-0,5	0,47	1299,71	3,24	0,41
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-1	0,35	1481,47	2,78	0,44
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-0,5	0,6	1126,48	1,85	0,08
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1	0,45	1290,11	2,38	0,22
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1,5	0,36	1405,16	1,26	0,65
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-0,5	0,73	1011,53	1,36	0,09
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1	0,55	1153,96	1,46	0,07
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1,5	0,44	1299,25	1,63	0,30
M ₃ N CaCO ₃ 1,5 1-2 2% TiO ₂	0,5	1223,89	0,89	0,03
Craie CDPL	0,33	-	-	-
Craie CDPL 2% TiO ₂	0,33	-	-	-

Modules de Young et d'élasticité dynamique

Molda® 3 Normal	E/P	Rapport massique E/P	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module E (GPa)	R ²	Moyenne masse volumique (kg.m ⁻³)	Moyenne module E dynamique (GPa)	Ecart-type
ep6 jauge	0,5	0,5	1331,67	6,44	0,9999	1316,28	10,00	0,17
ep4 jauge	0,6	0,6	1234,36	5,64	0,9986	1183,99	7,46	0,25
ep4 jauge	0,7	0,7	1141,67	5,66	0,9993	1090,05	6,29	0,06
ep4 jauge	0,8	0,8	1035,70	4,89	0,9995	1014,51	4,94	0,04
ep4 jauge	0,9	0,9	944,52	3,23	0,9973	948,85	4,19	0,01
ep4 jauge	0,95	0,95	940,27	3,46	0,9999	925,75	3,96	0,21
EXTHA® Ibérica	E/P	Rapports massiques E/P	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module E (GPa)	R ²	Moyenne masse volumique (kg.m ⁻³)	Moyenne module E dynamique (GPa)	Ecart-type
ep2 jauge	0,5	0,5	1271,12	8,93	0,9998	1247,28	9,13	0,17
ep1 jauge	0,6	0,6	1150,13	4,75	0,9988	1126,07	7,03	0,05
ep4 jauge	0,7	0,7	1128,48	7,17	0,9889	1028,55	5,01	0,12
ep3 jauge	0,8	0,8	1017,47	4,78	0,9985	962,28	4,28	0,10
ep2 jauge	0,9	0,9	899,28	2,69	0,9982	898,41	3,53	0,08
ep3 jauge	1	1	862,27	2,71	0,9876	849,12	3,06	0,05

Molda® 3 Normal + additifs	E/P ratio	Rapport massique E/Ms	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module E (GPa)	R ²	Moyenne masse volumique (kg.m ⁻³)	Moyenne module E dynamique (GPa)	Ecart-type
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-0,5 ep3 jauge	0,7 1-0,5	0,47	1128,48	5,85	0,9997	1298,97	7,48	0,13
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-1 ep4 jauge	0,7 1-1	0,35	1494,12	7,66	0,9992	1480,61	8,70	0,32
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-0,5 ep3 jauge	0,9 1-0,5	0,6	1141,72	3,66	0,9941	1124,73	4,57	0,10
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1 ep3 jauge	0,9 1-1	0,45	1301,50	4,92	0,9985	1295,82	5,52	0,11
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1,5 ep2 jauge	0,9 1-1,5	0,36	1466,25	2,99	0,9960	1404,02	4,74	0,86
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-0,5 ep3 jauge	1,1 1-0,5	0,73	1017,96	2,32	0,9992	1011,26	3,10	0,04
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1 ep4 jauge	1,1 1-1	0,55	1165,70	3,12	0,9971	1152,76	3,61	0,05
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1,5 ep3 jauge	1,1 1-1,5	0,44	1317,68	3,18	0,9985	1298,19	4,15	0,09
M ₃ N CaCO ₃ 1,5 1-2 TiO ₂ ep1 jauge	1,5 1-2 2%	0,5	1262,43	2,79	0,9977	1223,66	2,60	0,02

Coefficient de Poisson

Molda® 3 Normal	E/P	Rapport massique E/P	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Coefficient de Poisson statique	R ²	Moyenne masse volumique (kg.m ⁻³)	Coefficient de Poisson	Ecart-type
ep6 jauge	0,5	0,5	1331,67	0,24	1,000	1316,28	0,27	0,02
ep4 jauge	0,6	0,6	1234,36	0,24	0,998	1183,99	0,24	0,04
ep4 jauge	0,7	0,7	1141,67	0,27	0,999	1090,05	0,29	0,01
ep4 jauge	0,8	0,8	1035,70	0,25	0,999	1014,51	0,25	0,01
ep4 jauge	0,9	0,9	944,52	0,28	0,998	948,85	0,28	0,01
ep4 jauge	0,95	0,95	940,27	0,28	0,999	925,75	0,28	0,04
EXTHA® Ibérica	E/P	Rapport massique E/P	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Coefficient de Poisson statique	R ²	Moyenne masse volumique (kg.m ⁻³)	Coefficient de Poisson	Ecart-type
ep2 jauge	0,5	0,5	1271,12	0,32	0,999	1247,28	0,25	0,01
ep1 jauge	0,6	0,6	1150,13	0,22	0,999	1126,07	0,29	0,02
ep4 jauge	0,7	0,7	1128,48	0,26	0,999	1028,55	0,18	0,02
ep3 jauge	0,8	0,8	1017,47	0,23	1,000	962,28	0,23	0,01
ep2 jauge	0,9	0,9	899,28	0,26	0,999	898,41	0,21	0,04
ep3 jauge	1	1	862,27	0,26	0,997	849,12	0,22	0,01
Molda® 3 Normal + additifs	E/P ratio	Rapport massique E/Ms	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Coefficient de Poisson statique	R ²	Moyenne masse volumique (kg.m ⁻³)	Coefficient de Poisson	Ecart-type
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-0,5 ep3 jauge	0,7 1-0,5	0,47	1128,48	0,29	0,999	1298,97	0,30	0,01
M ₃ N CaCO ₃ 0,7 1-1 ep4 jauge	0,7 1-1	0,35	1494,12	0,17	0,999	1480,61	0,26	0,04
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-0,5 ep3 jauge	0,9 1-0,5	0,6	1141,72	0,28	0,999	1124,73	0,25	0,02
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1 ep3 jauge	0,9 1-1	0,45	1301,50	0,27	1,000	1295,82	0,27	0,01
M ₃ N CaCO ₃ 0,9 1-1,5 ep2 jauge	0,9 1-1,5	0,36	1466,25	0,21	0,999	1404,02	0,22	0,01
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-0,5 ep3 jauge	1,1 1-0,5	0,73	1017,96	0,28	0,999	1011,26	0,27	0,01
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1 ep4 jauge	1,1 1-1	0,55	1165,70	0,25	0,999	1152,76	0,29	0,01
M ₃ N CaCO ₃ 1,1 1-1,5 ep3 jauge	1,1 1-1,5	0,44	1317,68	0,29	0,996	1298,19	0,29	0,02
M ₃ N CaCO ₃ 1,5 1-2 TiO ₂ ep1 jauge	1,5 1-2 2%	0,5	1262,43	0,33	0,999	1223,66	0,30	0,01

Fiche technique des jauges de déformation

IM-G-088 2014.06

Temperature Effect of Leadwire with 2-Wire System

For the 3-wire system, the bridge output is free from any temperature effect on the leadwire.

$$\epsilon l = \frac{R_L}{R_g + R_L} \cdot \frac{\alpha}{K_s}$$

ϵl : Thermally-induced apparent strain ($\mu m/m/C$)
 R_g : Gauge resistance (Ω)
 R_L : Reciprocal resistance of leadwire per 1m (Ω/m)
 α : Reciprocal resistance of leadwire per 1m (Ω/m)
 K_s : Resist temperature coefficient of copper wire (APR/C)
 $\dots 3.9 \times 10^{-7}/C$

Type of Leadwire	Total resistance value per 1m (r)
Polyester wire (PEW) $\phi 0.14mm$	2.24 Ω/m
Parallel vinyl wire 0.08mm ϕ	0.44 Ω/m
Parallel vinyl wire 0.11mm ϕ	0.32 Ω/m

- Check the bonding state of the strain gage. Check resistance value and insulation. Apply 50V DC on test voltage for the checking.
- Connect lead wires. Bond the gage terminal near the strain gage, then solder the strain gage and the leadwire. Do not apply excessive force to gage leads.
- Moisture proof. Select an appropriate moistureproof coating material and apply it to the strain gage.
- Wires and connect. Connect the leadwire to the measuring instrument. Next, it is ready for measurement.

Check, besides the state of the strain gage, the resistance value and insulation. Apply 50V DC on test voltage for the checking.

2-Wire System Compensation Method

3-Wire System Compensation Method is cancelled by cancelling the leadwire.

$$\epsilon l = \frac{R_L}{R_g + R_L} \cdot \frac{\alpha}{K_s}$$

ϵl : リード線の温度による見かけのひずみ ($\mu m/m/C$)
 R_g : ゲージ抵抗 (Ω)
 R_L : リード線1mあたりの抵抗値 (Ω/m)
 L : リード線の長さ (m)
 K_s : ひずみ温度係数 (APR/C) \dots 3.9 $\times 10^{-7}/C$
 α : 銅線の抵抗温度係数 ($\Delta R/R/C$) $\dots 3.9 \times 10^{-7}/C$

リード線の種類	1m 単りの総抵抗値 (r)
ポリエチレン被覆銅線 $\phi 0.14mm$	2.24 Ω/m
平行ビニル線 ($\phi 0.08mm$)	0.44 Ω/m
平行ビニル線 ($\phi 0.11mm$)	0.32 Ω/m

- 温度補償のチェック。ひずみゲージの温度補償係数を確認し、発熱抵抗と熱線電圧を行なう。温度補償係数の確認は、印刷電圧 (DC5.0V/以下) のゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。
- ゲージ抵抗。ゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。
- ゲージ抵抗。ゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。
- 温度補償のチェック。ひずみゲージの温度補償係数を確認し、発熱抵抗と熱線電圧を行なう。温度補償係数の確認は、印刷電圧 (DC5.0V/以下) のゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。

温度補償のチェック。ひずみゲージの温度補償係数を確認し、発熱抵抗と熱線電圧を行なう。温度補償係数の確認は、印刷電圧 (DC5.0V/以下) のゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。

Method of Compensating Leadwire Extension for Compensation

If the leadwire is extended, use the following equation for compensation.

$$K_o = \frac{R}{R + L} + K$$

K_o : The after compensation gage factor
 R : Gage factor written on the package
 L : Reciprocal resistance of leadwire per 1m (Ω/m)
 L : Length of leadwire (m)

For the strain gage with pre-attached leadwire, the compensated gage factor is written on the package.
 For the strain gage with pre-attached leadwire (2-wire system), the total resistance including the leadwires is written on the package.
 For the strain gage with pre-attached leadwire (3-wire system), the resistance excluding the leadwires is written on the package.

Strain Gage Bonding Procedure (to metal)

- Preparation. Clean the surface where the measurement is to be made. Then lightly polish the surface with a sandpaper of #320 #600, and wipe away with solvent such as acetone, etc.
- Mark the gage. To bond the strain gage at a proper place, draw a attachment position, mark-off line to be an indication of the bonding.
- Attach the gage. Use the adhesive written on the front of the package. Bond the strain gage by insertion, cutting, and sanding according to the instruction manual attached to the adhesive.
- Press and cure. Press the strain gage to the surface and cure it according to the instruction manual of the adhesive.

For details of strain gage bonding procedures, see the instruction manual of the adhesive applied. Omit the item (6) for the leadwire attached gage. After taking out the strain gage from the package, store them in a dry environment such as in desiccator when not in use.

リード線延長時の補償係数の算出

リード線延長時の補償係数は、リード線の温度補償係数をキャンセルされます。

$$K_o = \frac{R}{R + L} + K$$

K_o : 補償係数のゲージ係数
 R : ゲージ抵抗 (Ω)
 L : リード線1mあたりの抵抗値 (Ω/m)
 L : リード線の長さ (m)

ゲージ抵抗値の記載事項
 リード線の長さ (m) はパッケージに記載されています。
 リード線の抵抗値 (Ω/m) はパッケージに記載されています。
 リード線の抵抗値 (Ω/m) はパッケージに記載されています。

- 温度補償のチェック。ひずみゲージの温度補償係数を確認し、発熱抵抗と熱線電圧を行なう。温度補償係数の確認は、印刷電圧 (DC5.0V/以下) のゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。
- ゲージ抵抗。ゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。
- ゲージ抵抗。ゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。
- 温度補償のチェック。ひずみゲージの温度補償係数を確認し、発熱抵抗と熱線電圧を行なう。温度補償係数の確認は、印刷電圧 (DC5.0V/以下) のゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。

温度補償のチェック。ひずみゲージの温度補償係数を確認し、発熱抵抗と熱線電圧を行なう。温度補償係数の確認は、印刷電圧 (DC5.0V/以下) のゲージの近所にゲージ端子を接続し、ゲージリード線はほんのりだけ発熱します。結果の値はゲージリード線は無温度力発熱がほとんどないといえます。

MADE IN JAPAN

Model 型式	Lot No. Y3961M Batch No. 147A	Quantity 数量	10
Gage Factor ゲージ係数	Temperature Compensation for 主な適合材料		
Gage Length ゲージ長	Adaptable Thermal Expansion 適合熱膨張係数		
Gage Resistance ゲージ抵抗	Applicable Adhesive 主な適用接着剤		
Transverse Sensitivity Ratio 横感度比	Temperature Coefficient of Gage Factor ゲージ係数の温度係数		
Thermal Output 熱出力	Refer to Graph グラフ参照		

RoHS

KYOWA STAINLESS GAGES

See the back of package for installation of Kyowa strain gages.
 共通ひずみゲージの取組め方は裏面をご覧ください。

KYOWA
 KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.
 株式会社 計測器
 TEL: 81-42-480-2292 FAX: 81-42-480-1122
 www.kyowa-ei.com

外一引線用
 温度補償係数
 温度補償係数

Test Conditions / 試験条件

Model	KFGS-5-120-D16-11
Lot No.	Y3961M
Adhesive	PC-600
Tested on	SS400 (117 \times 10 \times 9°C)
Gage Lead	$\phi 0.10 \times 25mm$ Silver-covered copper wires

Graph Data / グラフデータ
 Temperature / 温度 (°C)
 Thermal Output / 熱出力 (mV/m)

Thermal Output and Temperature Coefficient of Gage Factor
 温度によるゲージの熱出力とゲージ係数の温度係数

Based on Instrument G.F. of 2.000 \pm 0.002%
 2.000 \pm 0.002%

熱出力は発熱抵抗とゲージ抵抗の両方に依存します。
 熱出力は発熱抵抗とゲージ抵抗の両方に依存します。

熱出力は発熱抵抗とゲージ抵抗の両方に依存します。
 熱出力は発熱抵抗とゲージ抵抗の両方に依存します。

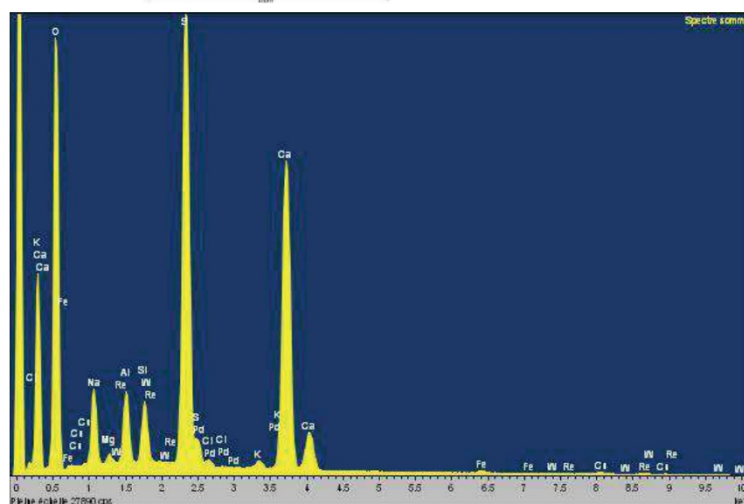
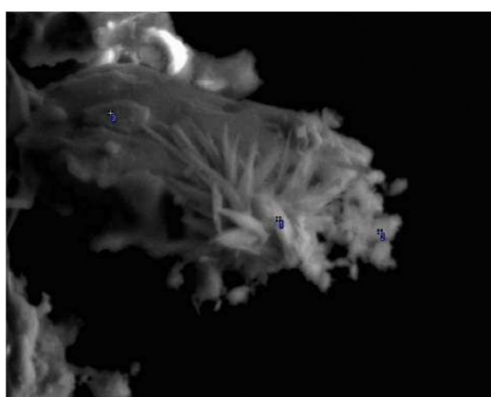
Annexe V

Observation et analyse MEB-EDS des sels dans le plâtre du relief de Rodin, LRMH	p. 536
Rapport d'analyse des sels dans le plâtre du relief de Rodin, laboratoire ERM	p. 537
Fiche technique : scanner 3D CREAFORM	p. 539
Fiche technique : capteur de déplacement LVDT	p. 540
Corrélations 3D du relief de Rodin	p. 544
Corrélations 3D du cadre ICMO 190	p. 548
Corrélations 3D du <i>Molosse</i>	p. 553
Essais de chargement statique du cadre ICMO 190	p. 557

Observation et analyse MEB-EDS des sels dans le plâtre du relief de Rodin, LRMH

Observations du plâtre altéré sous MEB/EDS (grossissement x1500)

De très fins cristaux sont visibles sur les cristaux de gypse. Ils sont localisés et semblent être constitués de potassium, de sodium, associés à du soufre et de l'oxygène. De l'aluminium a aussi été observé de façon très localisée.



ANALYSES QUANTITATIVES DE SELS EXTRACTIBLES À L'EAU

Échantillons : 2 prélèvements de poudre

Provenance : Bas-relief en plâtre XIXe

Date de réception : 25 janvier 2017

Numéro d'enregistrement ERM : 17 019

Référence affaire : MAI17 018

Commanditaire : Madame MIRABAUD

Institut National du Patrimoine

Département des restaurateurs

1 rue de la Harpe

93300 AUBERVILLIERS

Techniques d'analyses utilisées :

Extraction et dosage des anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) solubles dans l'eau par chromatographie ionique et dosage des cations (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) solubles dans l'eau par spectrométrie d'absorption atomique

INTRODUCTION

Ces analyses ont été réalisées à la demande de Madame Juliette ROBIN, étudiante en 5^{ème} année, spécialité sculpture de l'Institut National du Patrimoine, pour déterminer la contamination saline sur les prélèvements issus d'un bas-relief en plâtre daté du XIXe.

ECHANTILLONS

Les échantillons analysés ont été réceptionnés au laboratoire ERM le 25 janvier 2017. Ils ont été enregistrés à réception au laboratoire sous le numéro 17 019 et portent les références mentionnées dans le tableau 1 ci-après. Le courrier d'envoi des échantillons transmis par Madame ROBIN est reporté en annexe 1 à la fin de ce rapport.

LABORATOIRE

Bâtiment B 03, 1^{er} étage

7, rue Albert Turpin

F - 86000 POTTERS

☎ (33) 05 49 46 18 11

www.erm-poitiers.fr

SIÈGE SOCIAL

Centre Régional d'Innovation - B

Boulevard de la République - B

F - 86000 POTTERS

5001, au sud de la 61.254.C

☎ (33) 05 49 46 18 11

RCS POTTERS 349 165 943

N° d'enregistrement	Référence échantillon	Commentaires
17019-1	INP2016-138LE05	Plâtre sain
17019-2	INP2016-138LE06	Plâtre altéré

Tableau 1 : Références des prélèvements transmis

EXTRACTION ET DOSAGE DE SELS SOLUBLES

Protocole d'analyse

L'extraction des sels solubles a été réalisée selon le protocole ERM, adapté de la norme européenne NF EN 16455 : « Conservation du patrimoine culturel - Extraction et détermination de la teneur des sels solubles dans la pierre naturelle et les matériaux associés utilisés dans le patrimoine culturel ». Les échantillons à réception sont broyés dans un mortier en agate puis séchés à l'étuve à 60 °C, de manière à éviter des problèmes de modifications de la structure cristalline de certaines phases. En standard, l'extraction des sels solubles s'effectue à partir d'une prise d'essai de 100 mg du matériau sec mis en contact dans de l'eau distillée. La solubilisation des phases s'effectue avec un rapport solution/solide donné, par agitation mécanique durant 48 heures minimum. Le dosage des anions (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) s'effectue dans le filtrat par chromatographie ionique (DIONEX DX 500) avec une colonne analytique AS 9 HS tandis que le dosage des cations (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) a été effectué par spectrométrie d'absorption atomique (Perkin Elmer AA200).

Résultats

Les résultats des dosages des ions solubles dans l'eau sur les échantillons analysés sont présentés dans le tableau 2, ci-après.

LABORATOIRE

Bâtiment B 03, 1^{er} étage

7, rue Albert Turpin

F - 86000 POTTERS

☎ (33) 05 49 46 18 11

www.erm-poitiers.fr

SIÈGE SOCIAL

Centre Régional d'Innovation - B

4, rue Carol Heitz

F - 86000 POTTERS

5001, au sud de la 61.254.C

☎ (33) 05 49 46 18 11

RCS POTTERS 349 165 943

Rapport d'analyse des sels dans le plâtre du relief de Rodin, laboratoire ERM

Fiche technique : scanner 3D CREAFORM

Spécifications Techniques

Une technologie innovante qui assure la *TRUaccuracy™*, *TRUsimplicity™* et la *TRUportability™*, ainsi qu'une vitesse élevée pour vos applications professionnelles.

Go!SCAN SPARK™	
Exactitude⁽¹⁾	Jusqu'à 0,050 mm
Performance volumétrique⁽²⁾ (basée sur la taille des pièces)	0,050 mm + 0,150 mm/m
Performance volumétrique avec MaxSHOT Next™ Elite⁽³⁾	0,050 mm + 0,015 mm/m
Résolution de mesure	0,100 mm
Résolution du maillage	0,200 mm
Cadence de mesure	1 500 000 mesures/s
Source de lumière	Lumière blanche (99 lignes)
Méthodes de positionnement	Géométrie et/ou couleur et/ou cibles
Zone de numérisation	390 x 390 mm
Distance nominale	400 mm
Profondeur de champ	450 mm
Taille des pièces (recommandée)	0,1 – 4 m
Résolution de la texture	50 à 200 DPI
Couleurs de texture	24 bits
Logiciel	VXelements
Formats de sortie	dae, fbx, ma, obj, ply, stl, xtl, wrl, x3d, x3dz, zpr, 3mf
Logiciels compatibles⁽⁴⁾	3D Systems (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Metrologic Group (Metrolog X4), New River Kinematics (Spatial Analyzer), Verisurf, Dassault Systèmes (CATIA V5, SOLIDWORKS), PTC (Creo), Siemens (NX, Solid Edge), Autodesk (Inventor, PowerINSPECT)
Poids	1,25 kg
Dimensions (L x l x H)	89 x 114 x 346 mm
Norme de branchement	1 X USB 3.0
Plage de température de fonctionnement	5 à 40 °C
Plage d'humidité de fonctionnement (sans condensation)	10-90%
Certifications	Conformité avec les directives de la Commission européenne (compatibilité électromagnétique, basse tension), compatible avec les piles rechargeables (le cas échéant), IP50, DEEE
Brevets	CA 2,600,926, CN 200680014069.3, US 7,912,673, EP (FR, UK, DE) 1,877,726, AU 2006222458, US 8,032,327, JP 4,871,352, EP (FR, UK, DE) 2,278,271, IN 266,573, US 7,487,063, CA 2,529,044, CA 2,810,587, US 8,836,766, JP 5,635,218, CA 2,875,754, EP (FR, UK, DE) 2,751,521, US 9,325,974, CA 2,835,306, CN 201280023545.3, CN 201280049264.5, JP 6,025,830, EP (FR, UK, DE) 2,875,314, CN ZL 201380029999.6, JP 6,267,700, EP (FR, UK, DE) 3,102,908, US 15/114,563, CN 201580007340X

⁽¹⁾ Valeur typique pour la mesure du diamètre d'une sphère calibrée de référence.

⁽²⁾ Performance évaluée avec des artefacts de longueur traçables à l'aide de cibles de positionnement. Les objets avec une géométrie/texture de couleur suffisante peuvent obtenir ce niveau de performance sans cibles de positionnement. Les résultats sont obtenus en utilisant la photogrammétrie intégrée avec l'optimisation de la performance volumétrique.

⁽³⁾ La précision volumétrique du système lors de l'utilisation d'un MaxSHOT 3D ne peut pas être supérieure à la valeur par défaut de l'exactitude.

⁽⁴⁾ Également compatible avec tous les principaux logiciels de métrologie, de CAO et d'infographie par l'importation des maillages et des nuages de points.

Fiche technique : capteur de déplacement LVDT

2. TECHNICAL DATA | SM SERIES

LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) are inductive sensors excellent for use in harsh industrial environments, e.g. high temperature and pressure ranges, as well as high accelerations and measuring cycles. The SM series offers ultimate reliability and precision in a small size, and is designed for industrial and lab use. With a measuring range from 2 up to 200 mm and various configuration options (mechanics, protection class, temperature range, linearity) the SM series ensures to have a suitable measuring system for every application. The IMCA and KAB electronics (expansion see page 51) have a built-in cable breakage monitoring and are entirely galvanically isolated. The signal output is optimized for interference compatibility with very low residual noise. The guarantee for ultimate resolution and measuring accuracy.

TECHNICAL DATA - SENSORS

SENSOR	0...2	0...5	0...10	0...25	0...50	0...100	0...200
Measurement range FS [mm]	0...2	0...5	0...10	0...25	0...50	0...100	0...200
Linearity [% of FS]	0.38 % (0.20 % optional, 0.10 % for selected models)						
Type	Spring loaded (up to range 0...100 mm), / free core, both rod guided/unguided						
Protection class	IP67, optional IP68						
Vibration stability DIN IEC6072-6	10 G						
Shock stability DIN IEC6072-27	200 G/2 ms						
Supply voltage/frequency	3 V _{DC} /3 Hz						
Supply frequency	2...10 kHz						
Temperature range	-40...+120 °C (150 °C optional, option H, 200 °C on request)						
Housing	ø 8 mm H8 clamp diameter or ø 12 mm nickel-plated steel or stainless steel						
Connection	cable output or M12-connector with coupling nut						
Cable PTFE (standard)	ø 4.5 mm, 0.14 mm ² , non-halogen, suitable for drag chains						
PTFE (option H)	ø 4.8 mm, 0.24 mm ² , max. temperature 200 °C, UL5Y4H 2895						
Max. cable length	100 m between sensor and electronics						
Spring loaded version (up to range 100 mm)							
Spring force (middle of range) [N]	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	1.50	-
Max. acceleration of core/push/rod	55	50	50	35	20	15	-
Max. cycles of full 1 mm amplitude [Hz]	> 10 million cycles						
Life cycle							
Free core/ push rod/ push rod guided							
Max. acceleration of core/push/rod	100 G						
Life cycle	infinite						
Weight (approx., without cable) [g]	36	42	47	59	85	136	238

TECHNICAL DATA - ELECTRONICS

ELECTRONICS	IMCA EXTERNAL ELECTRONICS*	KAB CABLE ELECTRONICS
Output signal	4...20 mA (load < 300 Ohm) 0...1 V, ± 10 V (load > 10 kOhm)	
Temperature coefficient	-0.0025...+0.002 %/K	
Resolution	0.04% of FS	
Cross frequency	300 Hz/ 3 dB (6 pole Bessel)	
Isolation ability	> 1000 VDC	
Power supply	9...36 VDC	
Current consumption	75 mA at 24 VDC 150 mA at 12 VDC	65 mA at 24 VDC 140 mA at 12 VDC
Sensor supply	3 V _{DC} , 3 Hz (adjustable, 1...18 Hz)	
Working temperature	-40...+185 °C	
Storage temperature	-40...+185 °C	
Housing	polyamide PA6.6, meets UL94-V0	
Mounting	on DIN-rail	
	bore diameter ø 5.5	
	* 98.5% confidence interval (confidence limit)	



DATASHEET

SM SERIES | LVDT

Inductive Position Transducer: Standard series that fits nearly all industrial and laboratory applications, highly customisable.



- High precision and linearity
- Various configuration options
- Push-rod guided and unguided, spring loaded
- Linearity up to 0.10 %
- Measuring range 2...200 mm

LIMPULSION
Electronics Group

40 rue de la République - BP 45 - 75003 - Paris
15200 rue de la Vallée - BP 100 - 91000 - Evry-Courcouronnes
Tél: 02 31 47 33 88 - Fax: 02 31 47 34 80
com@eddylab.fr
www.limpulsion.fr

© 2014 EddyLab - France - All rights reserved



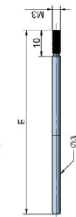
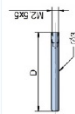
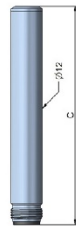
TECHNICAL DIMENSIONS

RANGE (FS) [MPa]	BODY LENGTH B RADIAL CABLE / CONNECTOR [mm]	BODY LENGTH C CONNECTOR M12 [mm]	CORE LENGTH D [mm]	PUSH ROD LENGTH E [mm]
0...2	64	67	22	54
0...5	70	73	25	60
0...10	80	83	30	70
0...25	110	113	45	100
0...50	160	163	70	150
0...100	260	263	120	250
0...200	460	463	220	450

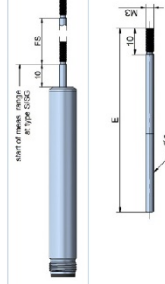
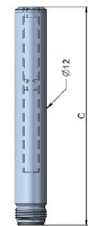
Other measurement ranges are available on request.

■ TYPE: FREE CORE (D), PUSH ROD UNGUIDED (E)

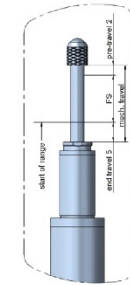
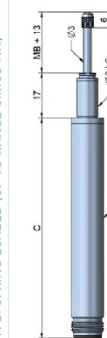
Free Core (D): Delivery: core tube core extension made of non-magnetic material must be added by the customer.
Push rod unguided (E): delivery: core + core extension



■ TYPE: PUSH ROD GUIDED



■ TYPE: SPRING LOADED (UP TO RANGE 0...100 MPa)



Please note that the stated end travel and start travel (see detailed picture) are standard values. When calibrating the sensors we are aiming for best linearity.

SENSOR TYPES

■ CONNECTOR / CABLE OUTPUT AXIAL / RADIAL

Sensors with cable output have a cable fitting and a spring for bend protection of the cable. For installation, the bending radius should not be less than 3 times the cable diameter. The standard cable length is 2 m.
Instruments with option H for temperatures up to 150 °C/300 °C feature a PTFE cable.

For normal application the sensors have a closed rod end body.
Sensors that feature a radial cable output can be supplied with a through hole on the front cap. The hole diameter is 1.5 mm. The hole is used for the measurement of the push rod removals. The hole is located 10 mm from the front. The standard cable length is 2 m.

■ CONNECTOR OUTPUT (CABLE WITH STRAIGHT OR ANGULAR CONNECTOR)

For contact with connector output the cable has to be ordered separately. You can choose from a cable with a straight connector or with an angular connector.
The connector is protected from accidental removal by a threaded fitting (M12). The cable lengths are 2, 5, 10 m.
The connector pair has protection class IP67.
The total length of the sensor with connector is:
■ Body length of the connector M12 (see table) + 26 mm (angular connector)
■ Body length of the connector M12 (see table) + 31 mm (straight connector)

■ GAITER (OPTION FB FOR SM2...SM25)

A gaiter is available for spring loaded sensors to protect the mechanics from fouling.
Note: The gaiter is also available as retrofit kit for measurement ranges from 2 to 25 mm.
■ The measurement range of sensors with 25 mm is reduced to 20 mm!
■ The working temperature is limited to 0...120 °C.

■ ROD SEAL / WIPER

A special design of a fluorocarbon sealing integrated in the sensor front cap combines sealing and wiping and ensures a smooth motion of the mechanics.
Note: The end travel is reduced to 2 mm!

AC-OUTPUT

assignment for TPE cable:
white (5): primary 2
black (6): secondary 2
blue (8): primary 1
red (9): secondary 1

assignment for PTFE cable:
white (5): primary 2
black (6): secondary 2
yellow (8): primary 1
brown (9): secondary 1

assignment M12 connector:
Primary 2
Secondary 2
Primary 1
Secondary 1

CABLE ELECTRONICS KAB

FUNCTION	CABLE TYPE	CABLE TYPE/COLOR
V+	brown	yellow
GND	blue	brown
signal	white	white
signal GND	black	green

If not specified otherwise the cable electronics is placed at 1 m from the end of the cable.

EXTERNAL ELECTRONICS IMCA

Connection

The external electronics IMCA is designed to be installed in switch cabinets (DIN rail mounting). The connection to the sensor is conducted as connector with push-in spring connection.

** Terminals 1 and 7 are internally connected.

ADJUSTMENT OF ZERO POINT AND GAIN

Each sensor, manufactured by eddyLab, is basically adjusted and calibrated. You will receive a traceable calibrated measurement equipment, adjusted and tested in the company's own high-end calibration laboratory, and a calibration certificate. Please note: If the ampere or gain is changed the calibration certificate will lose validity. Cylinders or reduced measurement ranges. In this case, the output signal can be adapted to the mechanical stroke of the measurement object precisely. Please note that the zero point and gain may shift for long cable length between sensor and electronics. Thus, install the sensor with the according cable length to the electronics and then adjust zero point and gain.

- Push rod entirely in - adjust offset.
- Push rod entirely out - adjust gain.
- Move the sensor to the end of the measuring range (push rod forward) and set the gain potentiometer on 4 mA/0 V for the output signal.

The output signal is referring to the electric measuring range. If the sensor is operated outside the measuring range, the output signal will be 0 mA. Please note: The output signal will be 0 mA if the sensor is operated outside the measuring range. Please note: The output signal will be 0 mA if the sensor is operated outside the measuring range. Please note: The output signal will be 0 mA if the sensor is operated outside the measuring range.

CABLE BREAK DETECTION

The electronics by eddyLab features a built-in cable break function. This is achieved by an impedance measurement of the UUT's secondary coil. If the sensor cable is cut, the impedance on the secondary connections of the electronics change regardless of the push rod position, triggering the cable break detection. This feature is based on a broken secondary connection. A partial cable break of the primary connections (cables between primary coil and electronics) will not activate this function. The electronics vary in their functional range. The external electronics IMCA offers the widest range. The cable electronics for only supplies a cable break by a red LED.

IMCA: For the use of the cable break function as alarm signal (signal lamp, acoustic alarm device) or an alarm input of the PLC must be connected to the 7 pole terminal. The circuit board features a analog switch which is a normally open.

■ NORMAL OPERATION IMCA:

- The green „POWERLED“ on the front side is on.
- The signal output is active.
- The alarm output is disabled.

■ CABLE BREAK IMCA:

- In case of a cable break the analog switch closes and the alarm system is activated. The signal output is deactivated. Please note the maximum electrical values: 30 mA or 24 V.
- A front side „ERRORLED“ flashes in case of an error.
- The signal output is deactivated. There is no current or voltage signal.

■ NORMAL OPERATION KAB:

- The green „POWERLED“ on the front side is on.

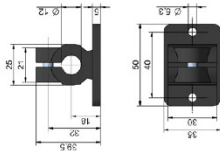
■ CABLE BREAK KAB:

- A front side „ERRORLED“ flashes in case of an error.

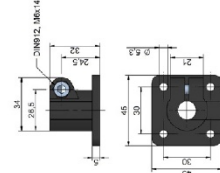
ACCESSORIES

■ MOUNTING PARTS

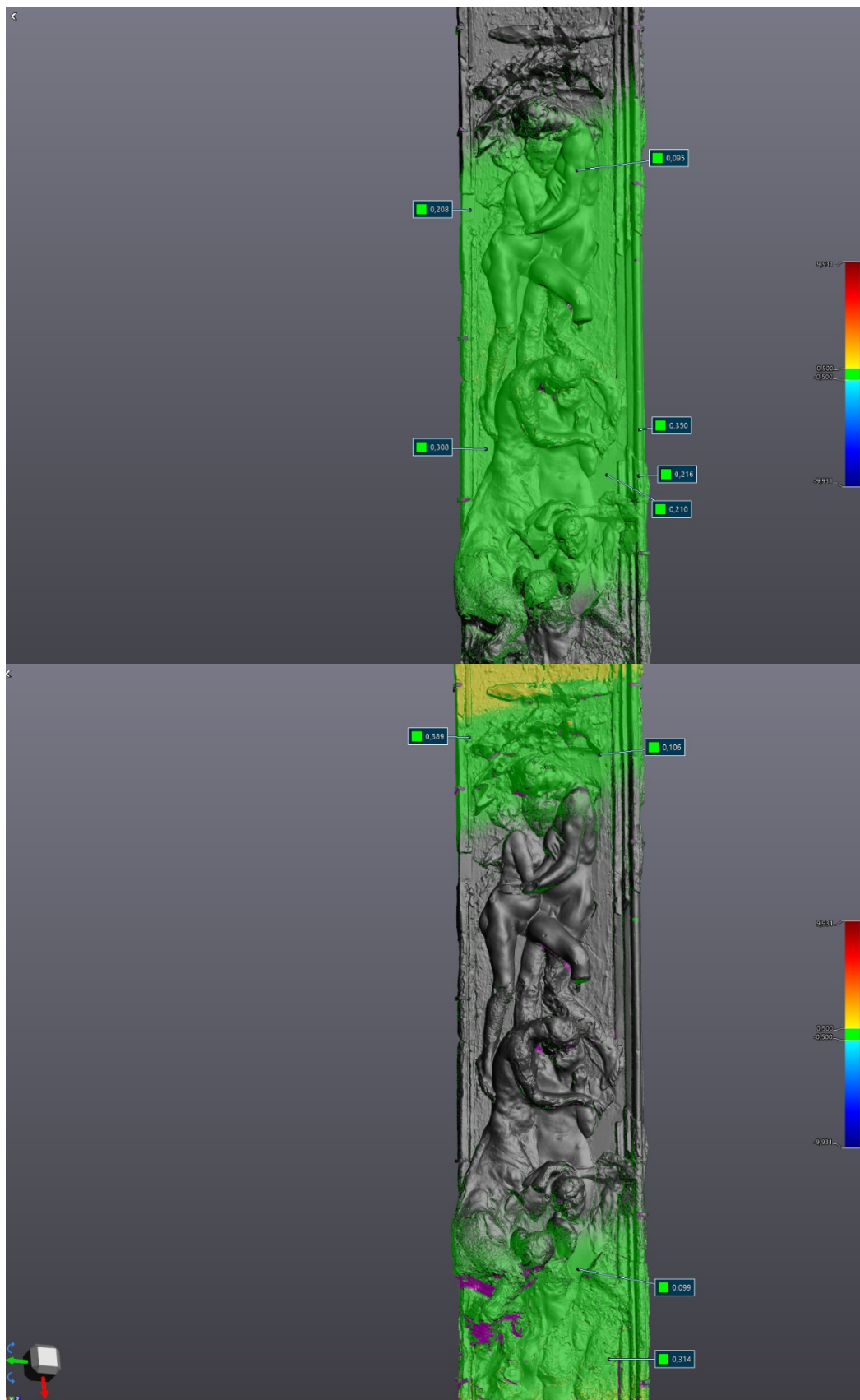
Flangeabnehmerkab 1210: Range clamp ø2 mm for SM-series
material: reinforced polycarbonate
ø18 mm without reducing bush, ø12 mm with reducing bush (included)



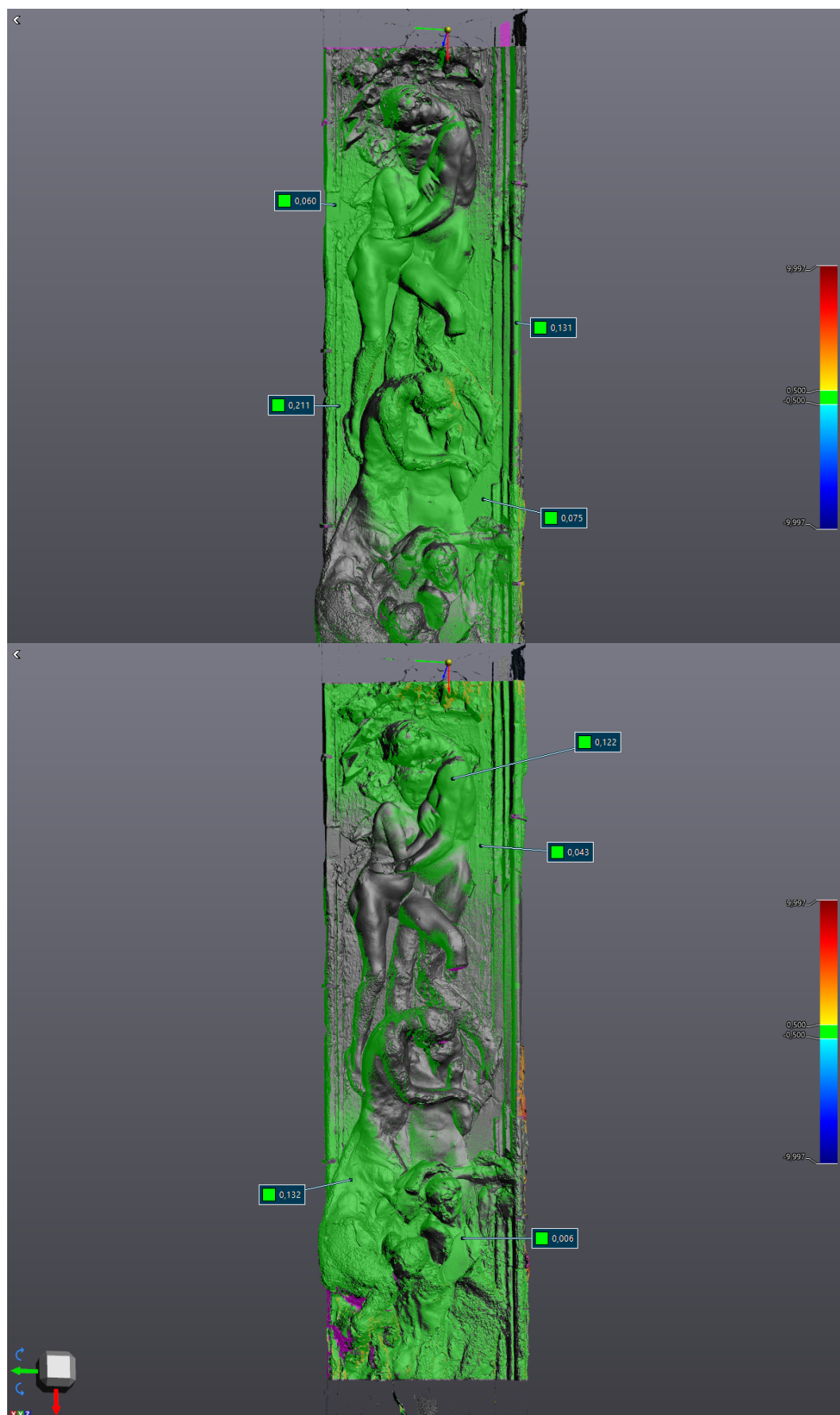
Flangeabnehmerkab 1210: Range clamp ø2 mm for SM-series
material: reinforced polycarbonate
ø18 mm without reducing bush, ø12 mm with reducing bush (included)



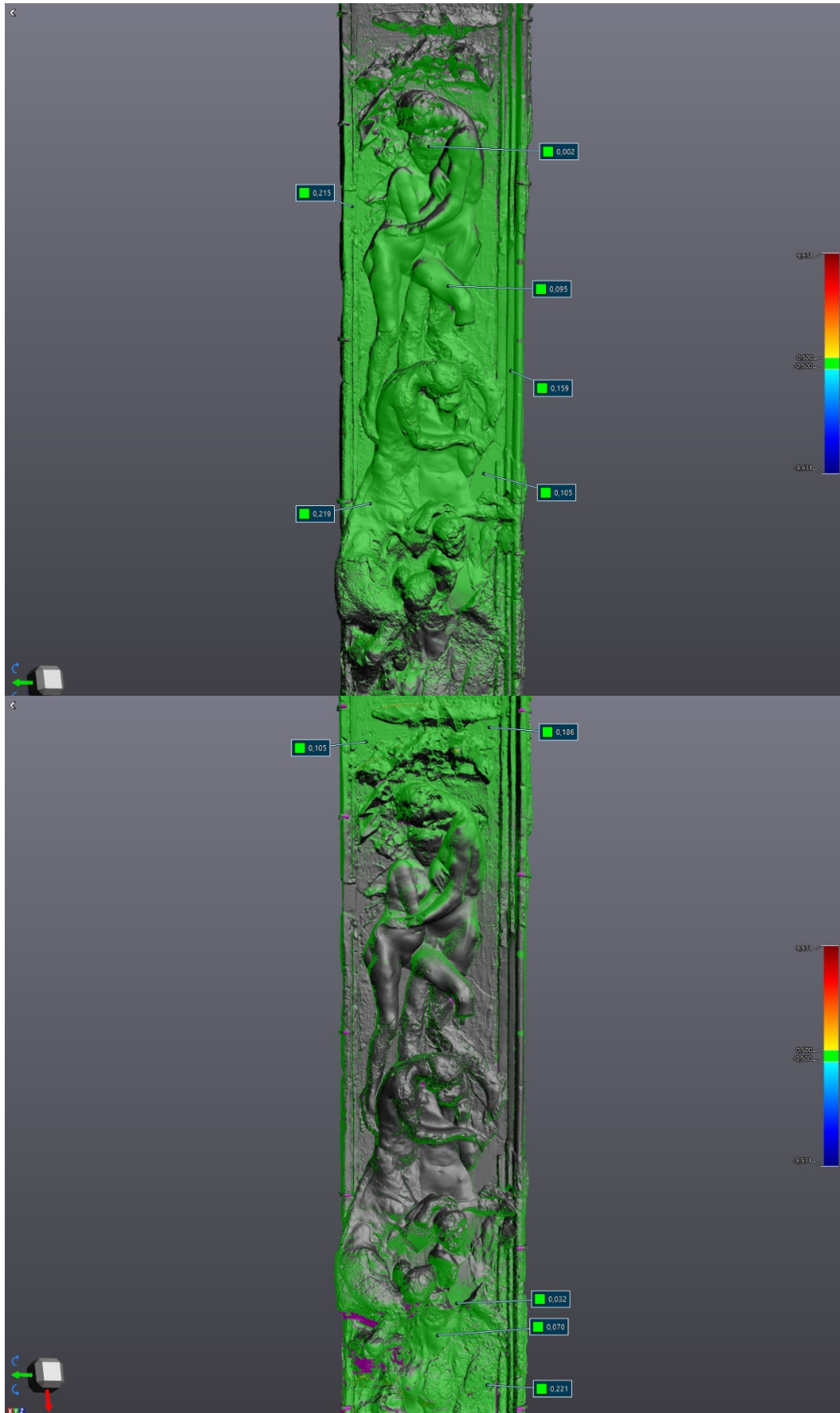
Corrélations 3D du relief de Rodin (s. 03598), musée Rodin



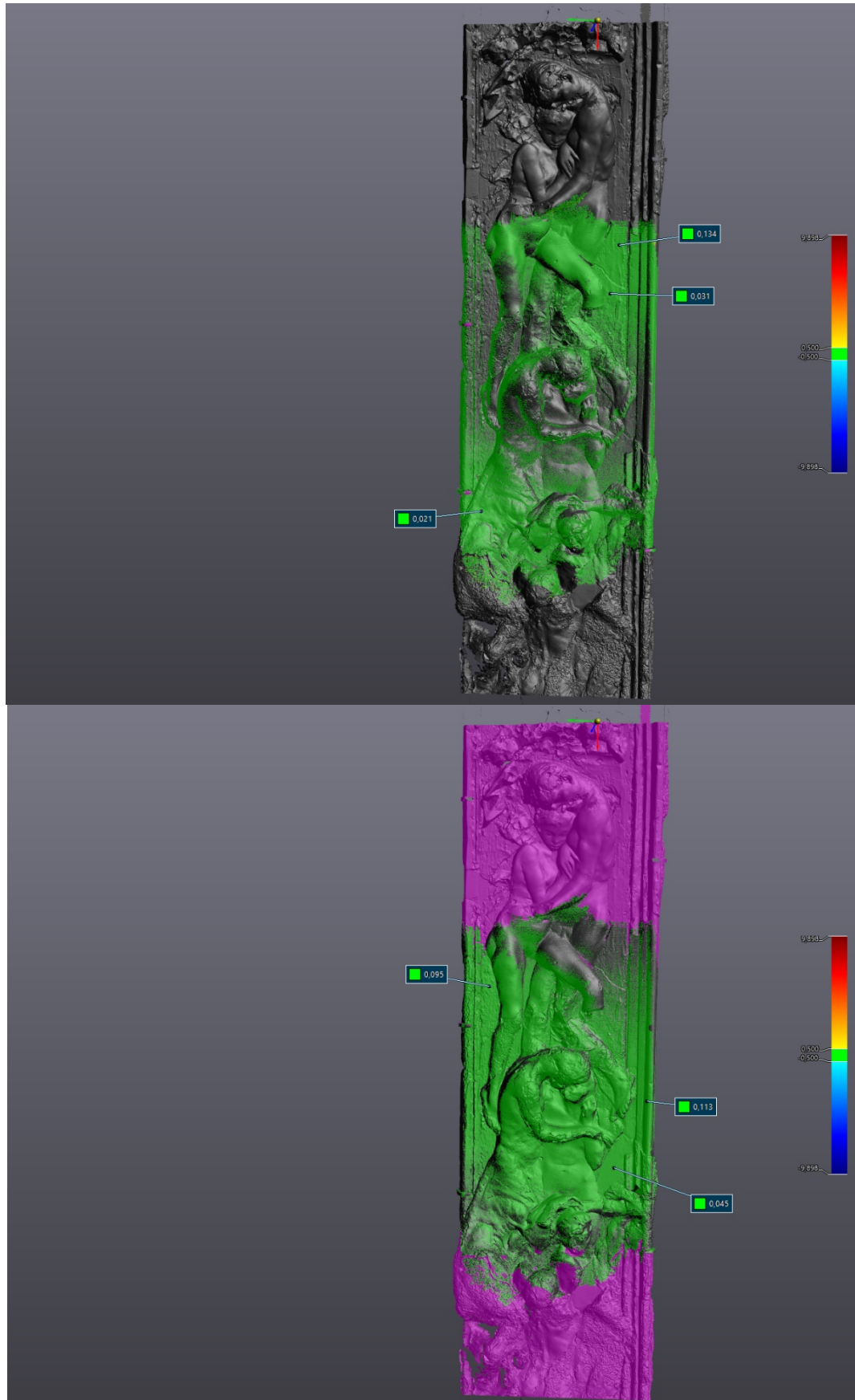
Corrélations 1 et 2 (avril-novembre 2021) – résolution 1 mm



Corrélations 1 et 2 (avril-novembre 2021) – résolution 0,5 mm



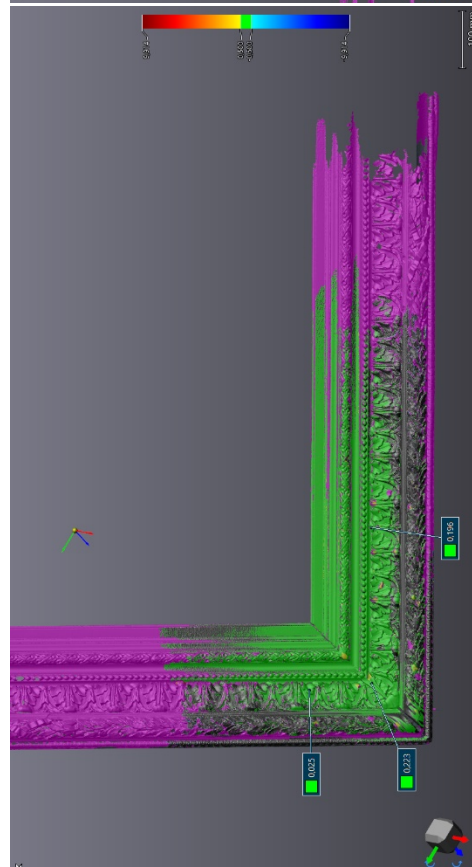
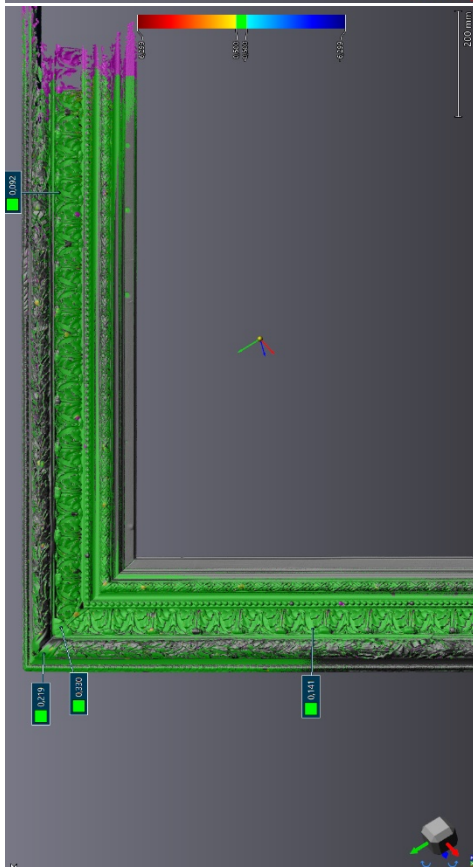
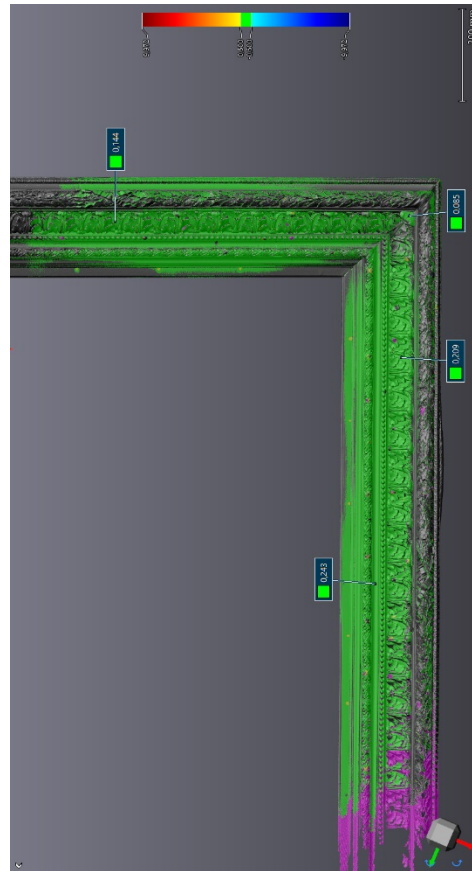
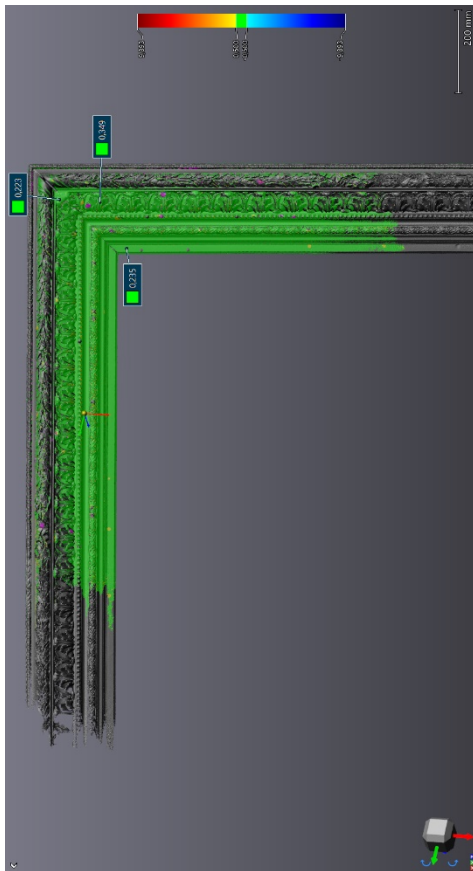
Corrélations 1 et 2 (avril 2021-juin 2022) – résolution 1 mm



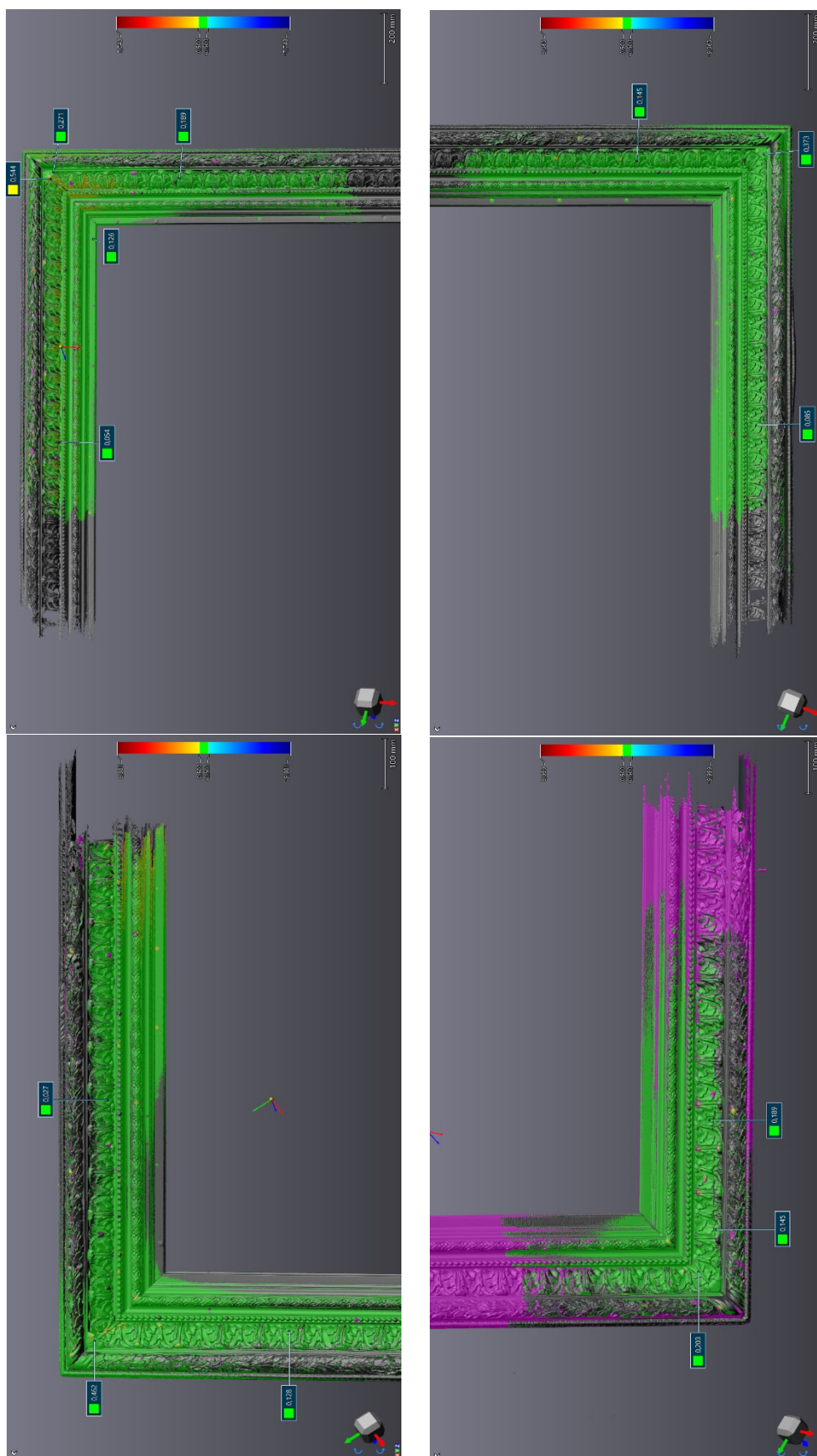
Corrélations 1 et 2 (avril 2021-juin 2022) – résolution 0,5 mm

Corrélations 3D du cadre ICMO 190 musée du Louvre

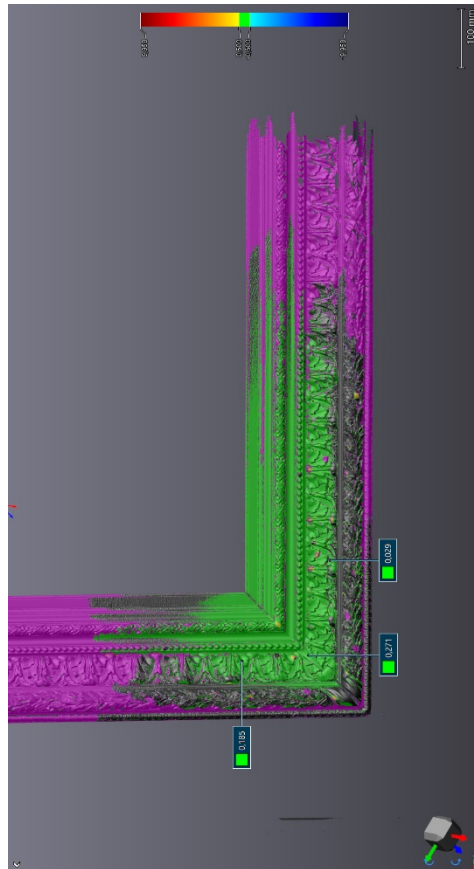
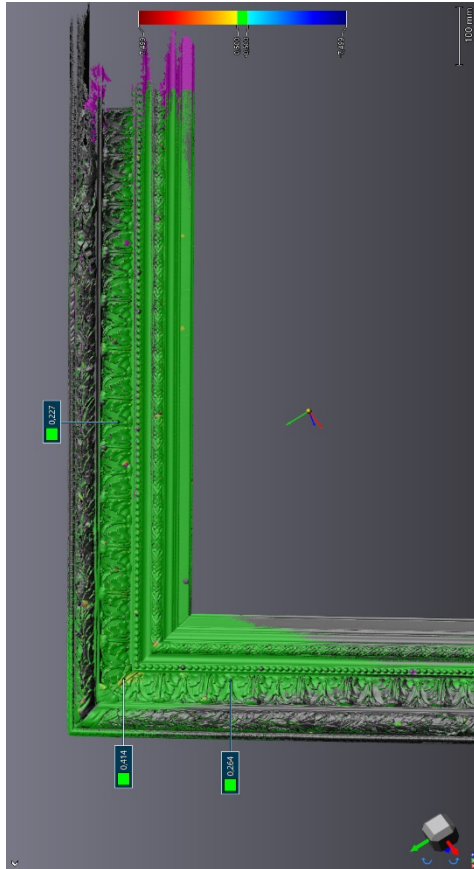
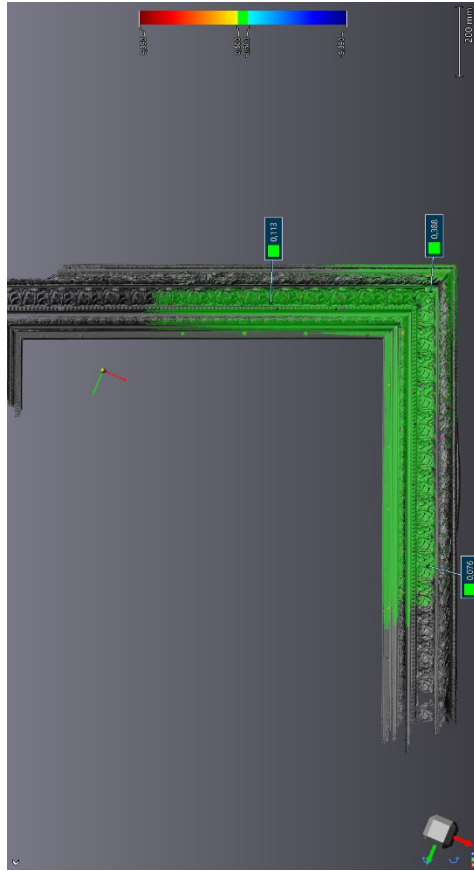
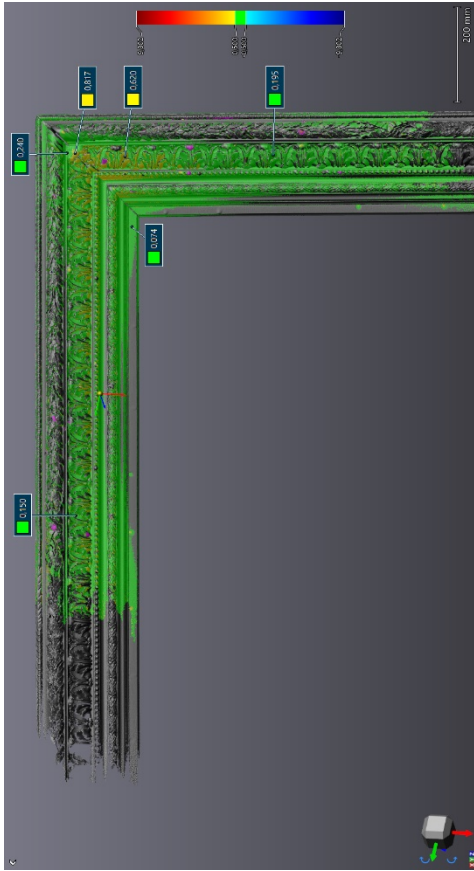
Corrélations 1 ou 2 (juillet-octobre 2021) – résolution 1 mm



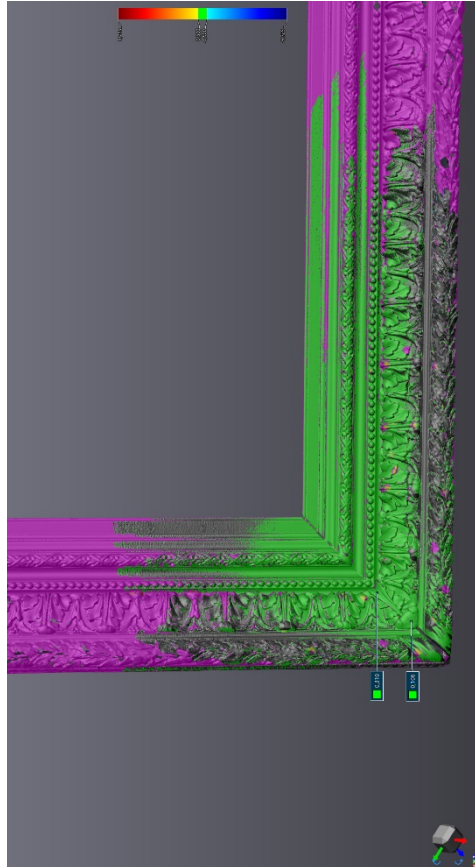
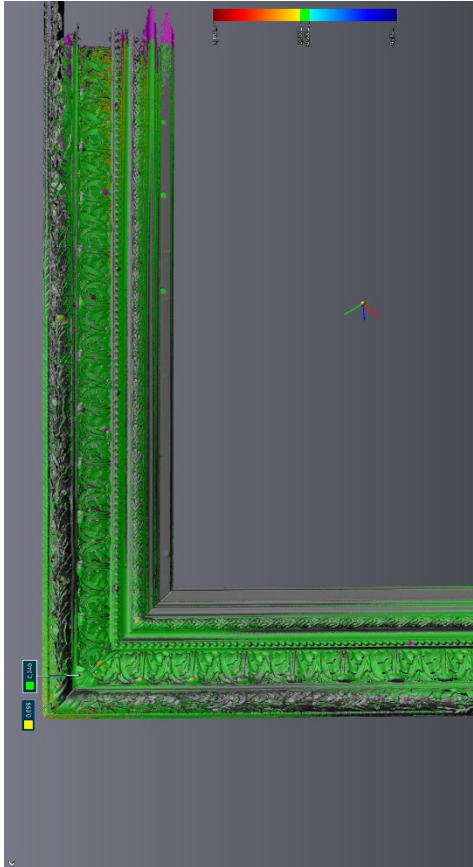
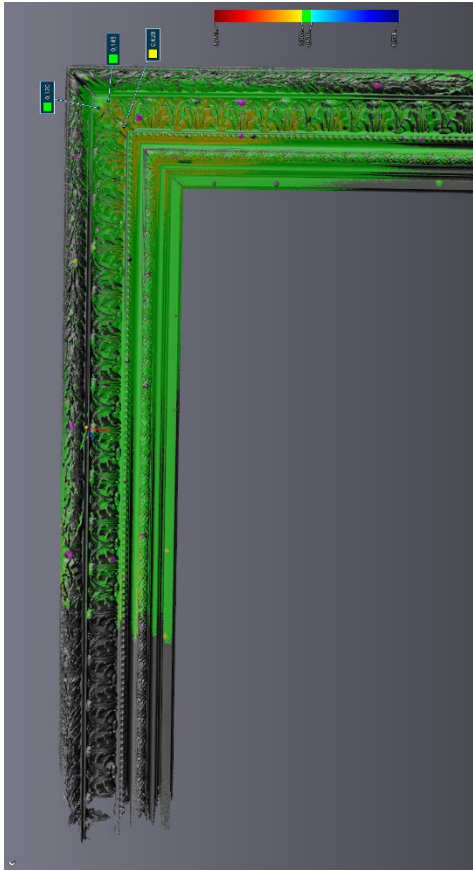
Corrélations 1 ou 2 (juillet 2021-janvier 2022) – résolution 1 mm



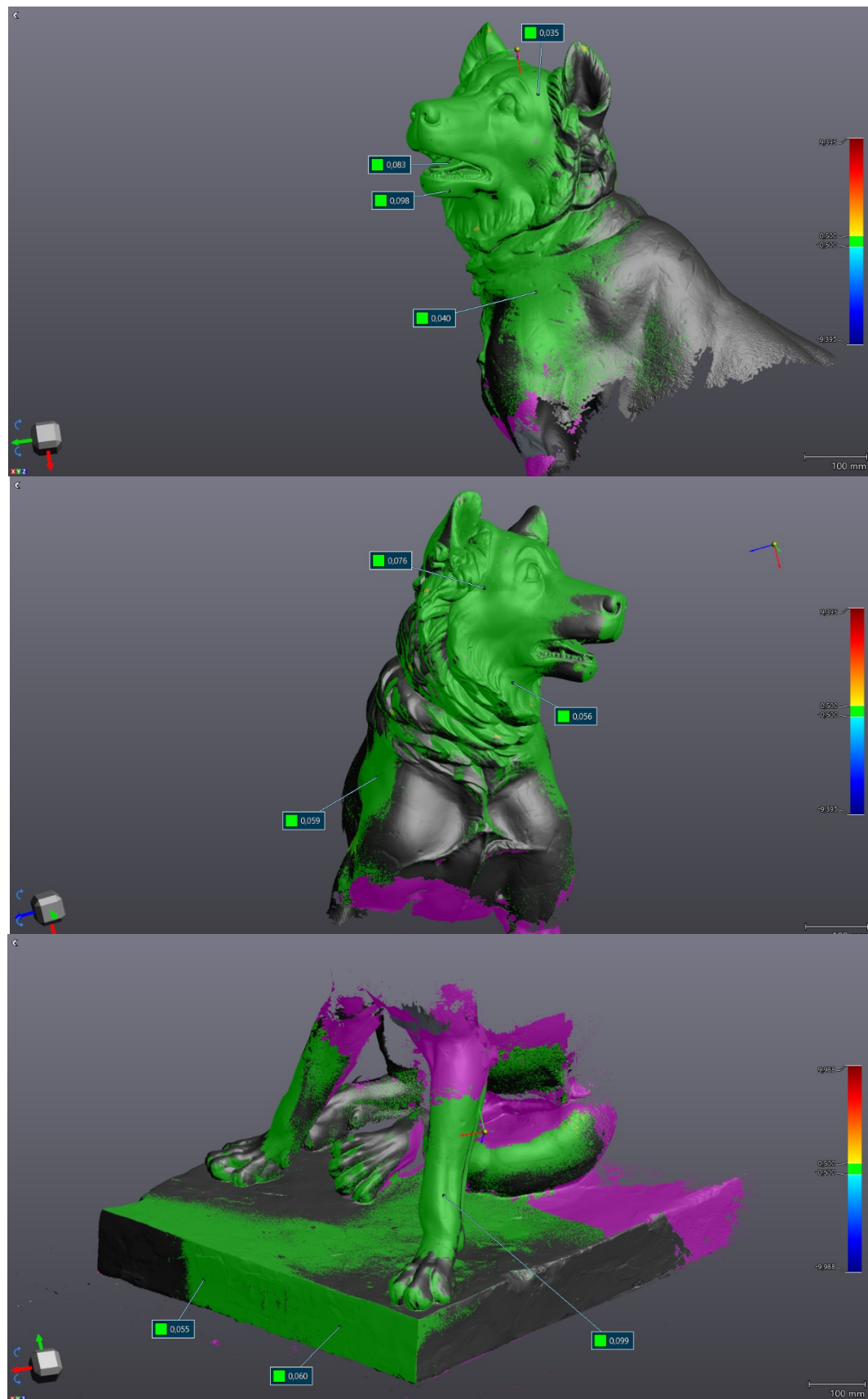
Corrélations 1 ou 2 (juillet 2021-avril 2022) – résolution 1 mm

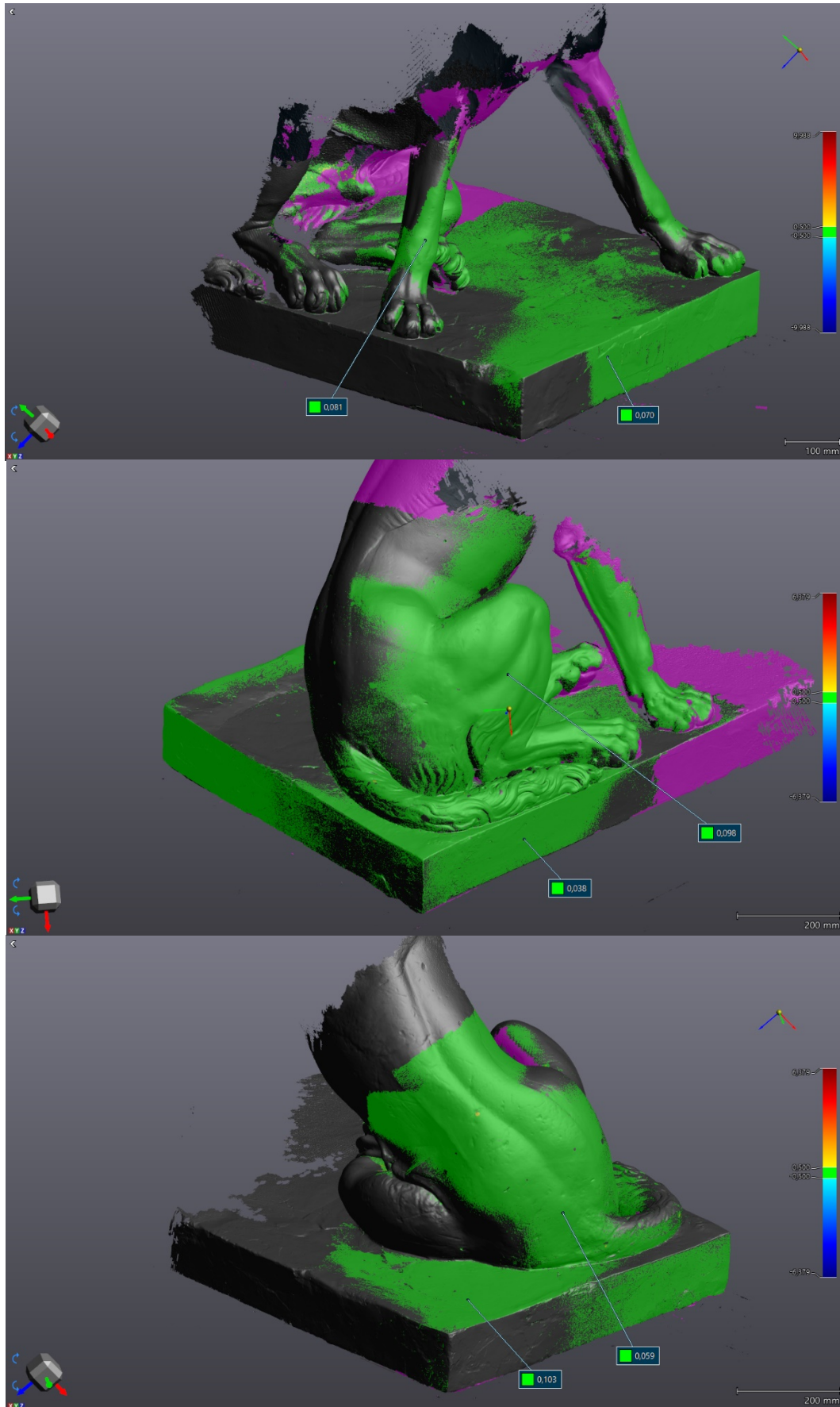


Corrélations 1 ou 2 (juillet 2021-août 2022) – résolution 1 mm

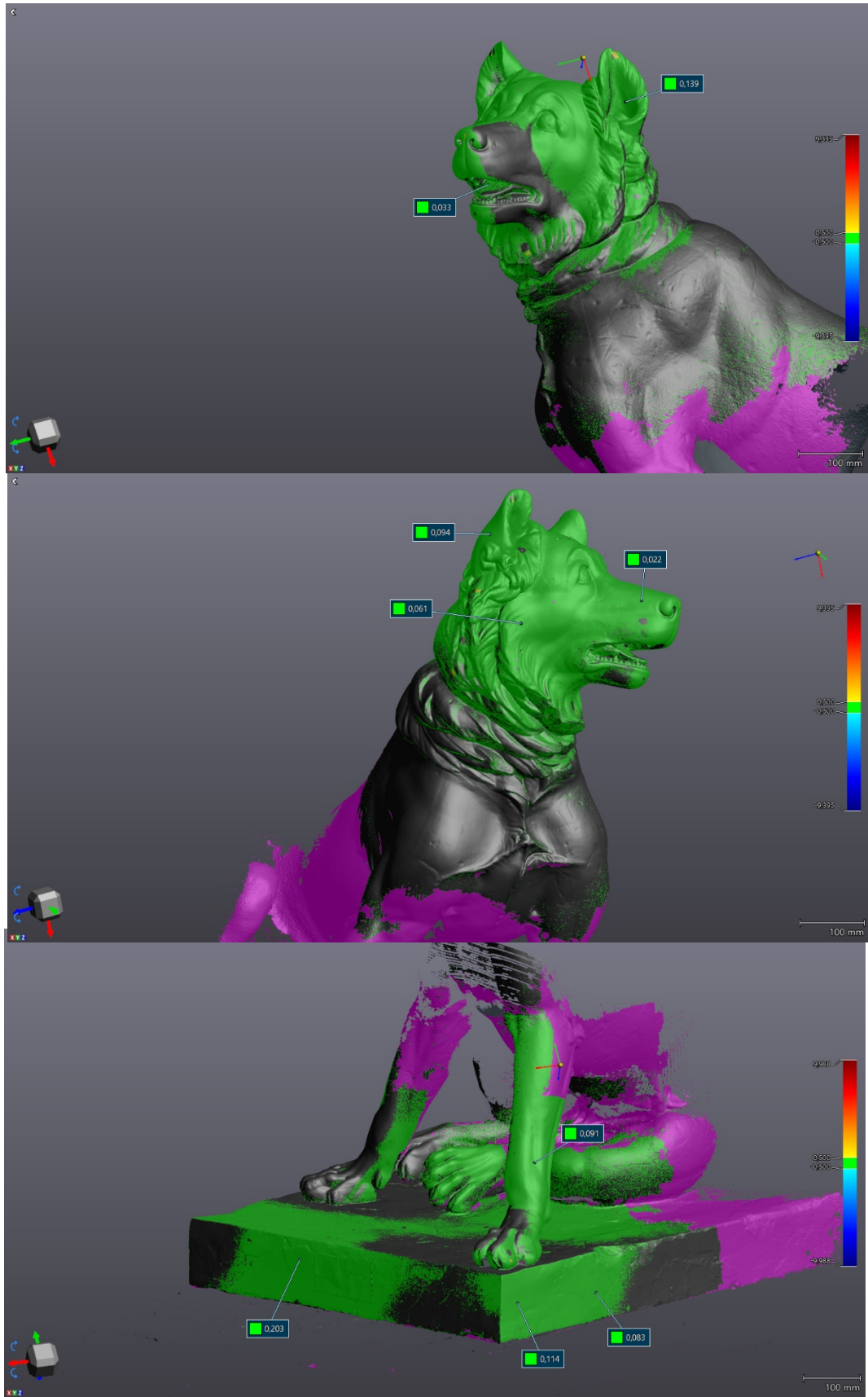


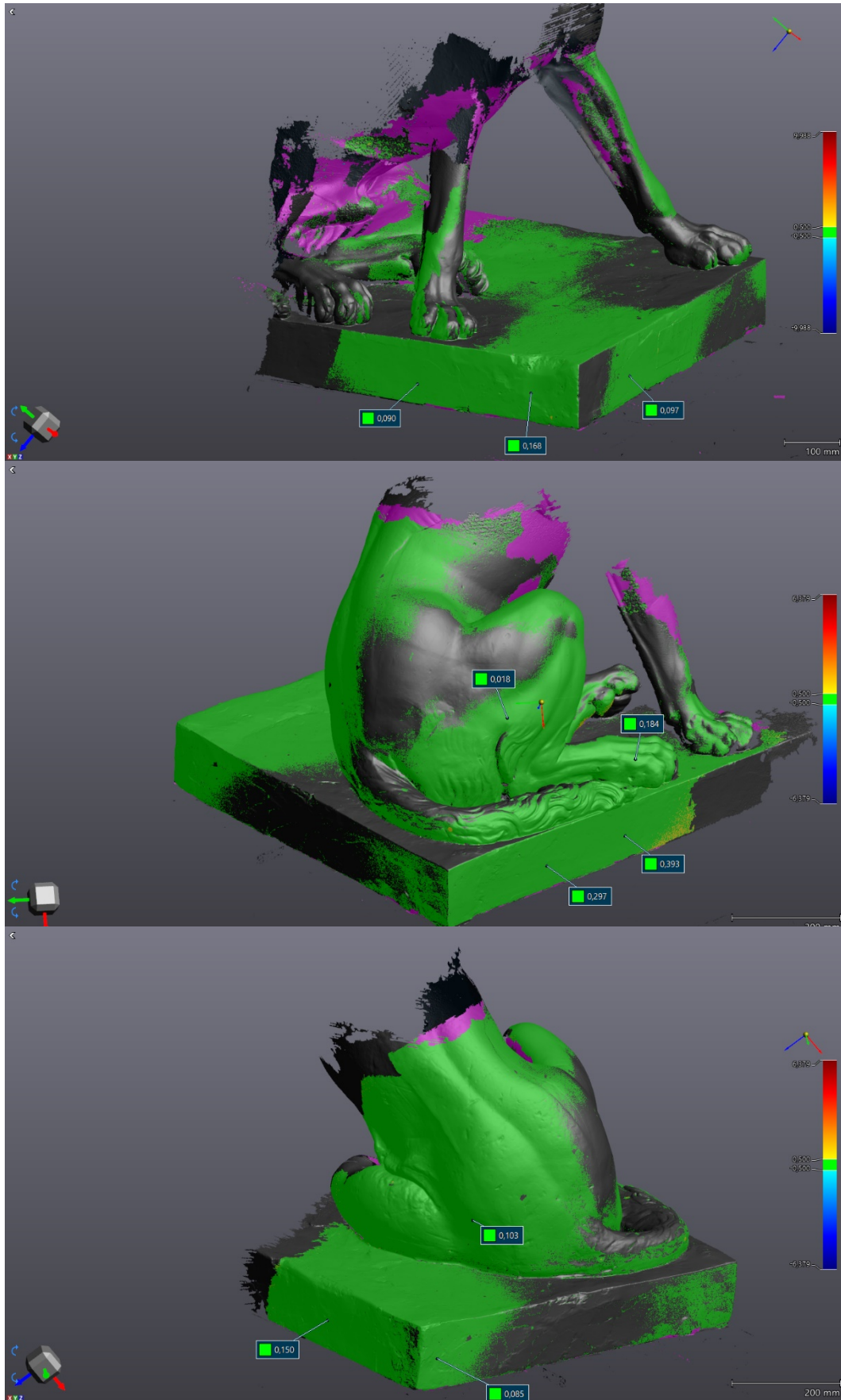
Corrélations 3D du *Molosse* (Gy 0236), gypsothèque du musée du Louvre





Corrélations 1 ou 2 (décembre 2021-mars 2022) – résolution 1 mm





Corrélations 1 ou 2 (décembre 2021-juin 2022) – résolution 1 mm

Essais de chargement statique du cadre ICMO 190

Données pour l'essai 1, du 01.12.2021

Essai 1 01.12.2021		masse	masses marquées en g	n°6 V moyenne	EctY	n°7 V moyenne	EctY	n°8 V moyenne	EctY	Déplacement selon loi de calibration n°6	Déplacement selon loi de calibration n°7	Déplacement selon loi de calibration n°8
		85,00	système (crochets, mousse, sac)	8,110	0,0000	9,169	0,0092	7,848	0,0043	0,000	0,000	0,000
		258,00	m1	8,110	0,0000	9,163	0,0070	7,848	0,0041	0,000	0,007	0,000
		248,00	m2	8,110	0,0000	9,150	0,0000	7,848	0,0043	0,000	0,019	0,000
		271,00	m3	8,110	0,0000	9,140	0,0084	7,847	0,0048	0,000	0,030	0,001
		245,00	m4	8,110	0,0000	9,129	0,0027	7,847	0,0047	0,000	0,040	0,001
		286,00	m5	8,110	0,0000	9,120	0,0000	7,849	0,0036	0,000	0,050	-0,001
		255,00	m6	8,110	0,0000	9,110	0,0000	7,847	0,0063	0,000	0,060	0,001
		252,00	m7	8,110	0,0000	9,100	0,0000	7,849	0,0035	0,000	0,070	-0,001
		269,00	m8	8,110	0,0000	9,090	0,0000	7,847	0,0061	0,000	0,080	0,001
		276,00	m9	8,110	0,0000	9,080	0,0000	7,847	0,0063	0,000	0,090	0,001
		268,00	m10	8,110	0,0000	9,070	0,0000	7,846	0,0063	0,000	0,100	0,001
		264,00	m11	8,110	0,0000	9,080	0,0000	7,845	0,0065	0,000	0,090	0,003
		274,00	m12	8,110	0,0000	9,060	0,0000	7,844	0,0065	0,000	0,110	0,004
		247,00	m13	8,110	0,0000	9,060	0,0000	7,844	0,0061	0,000	0,110	0,004
		4090,00	système + sable	8,10	0,0000	9,03	0,0014	7,87	0,0022	0,008	0,141	-0,018
		258,00	m1	8,11	0,0045	9,03	0,0008	7,86	0,0044	0,000	0,141	-0,009
		248,00	m2	8,12	0,0003	9,02	0,0006	7,85	0,0031	-0,006	0,151	-0,001
		271,00	m3	8,12	0,0000	9,01	0,0004	7,85	0,0021	-0,009	0,161	0,000
		245,00	m4	8,13	0,0000	9,00	0,0009	7,84	0,0035	-0,016	0,171	0,008
		286,00	m5	8,13	0,0000	8,99	0,0008	7,84	0,0021	-0,015	0,181	0,009
		255,00	m6	8,13	0,0000	8,98	0,0006	7,84	0,0026	-0,015	0,191	0,012
		252,00	m7	8,12	0,0005	8,98	0,0010	7,85	0,0018	-0,005	0,191	-0,001
		269,00	m8	8,12	0,0000	8,97	0,0013	7,84	0,0030	-0,009	0,201	0,005
		276,00	m9	8,12	0,0000	8,96	0,0014	7,84	0,0023	-0,010	0,211	0,006
		268,00	m10	8,12	0,0003	8,95	0,0015	7,84	0,0020	-0,007	0,221	0,006

Lot de calibration : Déplacement = A.tension aux bornes du capteur+B		
	106	107
A =	-1,007	-1,009
B =	8,168	9,254
		7,922

Données pour l'essai 2 et les essais complémentaires, du 02.08.2022

Essai 2 02.08.2022	masse	masses marquées en g	n°6 V		n°7 V		n°8 V		Effort en N		Déplacement selon loi de calibration		Déplacement selon loi de calibration	
			mo	EcTy	mo	EcTy	mo	EcTy	mo	EcTy	n°6	n°7	n°6	n°7
	0 sans système		0	0,00016	11,276	0,00050	7,600	0,003	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	85,00 système (crochets, mousse, sac)		85	0,00009	11,305	0,00017	7,729	0,003	0,83385	0,101	-0,030	-0,130	0,000	0,000
	222,00 m1		307,00	0,000	11,282	0,002	7,725	0,002	3,01167	0,103	-0,006	-0,126	0,000	0,000
	216,00 m2		523,00	0,000	11,274	0,001	7,725	0,002	5,13063	0,104	0,001	-0,126	0,000	0,000
	223,00 m3		746,00	0,001	11,263	0,004	7,724	0,002	7,31826	0,105	0,013	-0,126	0,000	0,000
	222,00 m4		968,00	0,001	11,252	0,004	7,724	0,002	9,49608	0,105	0,024	-0,125	0,000	0,000
	223,00 m5		1191,00	0,001	11,248	0,001	7,724	0,002	11,68371	0,104	0,028	-0,125	0,000	0,000
	223,00 m6		1414,00	0,000	11,235	0,003	7,717	0,004	13,87134	0,099	0,041	-0,119	0,000	0,000
	222,00 m7		1636,00	0,000	11,227	0,000	7,721	0,003	16,04916	0,102	0,049	-0,122	0,000	0,000
	222,00 m8		1858,00	0,001	11,213	0,006	7,718	0,003	18,22698	0,101	0,063	-0,119	0,000	0,000
	223,00 m9		2081,00	0,000	11,197	0,004	7,716	0,003	20,41461	0,101	0,080	-0,117	0,000	0,000
	222,00 m10		2303,00	0,000	11,184	0,004	7,715	0,003	22,59243	0,101	0,092	-0,116	0,000	0,000
	221,00 m11		2524,00	0,000	11,173	0,003	7,714	0,003	24,76044	0,103	0,103	-0,115	0,000	0,000
	222,00 m12		2746,00	0,001	11,164	0,002	7,710	0,003	26,93826	0,100	0,112	-0,111	0,000	0,000
	223,00 m13		2969,00	0,001	11,145	0,006	7,714	0,004	29,12589	0,105	0,132	-0,115	0,000	0,000
	223,00 m14		3192,00	0,000	11,138	0,001	7,713	0,003	31,31352	0,105	0,139	-0,114	0,000	0,000
	222,00 m15		3414,00	0,001	11,125	0,003	7,713	0,004	33,49134	0,105	0,152	-0,114	0,000	0,000
	222,00 m16		3636,00	0,000	11,113	0,002	7,710	0,003	35,66916	0,101	0,164	-0,111	0,000	0,000
	221,00 m17		3857,00	0,000	11,096	0,002	7,704	0,004	37,83717	0,098	0,181	-0,105	0,000	0,000
	224,00 m18		4081,00	0,000	11,086	0,002	7,703	0,004	40,03461	0,098	0,191	-0,104	0,000	0,000
	223,00 m19		4304,00	0,002	11,073	0,004	7,703	0,003	42,22224	0,097	0,204	-0,104	0,000	0,000
	221,00 m20		4525,00	0,008	11,089	0,022	7,703	0,005	44,39025	0,090	0,189	-0,104	0,000	0,000
	m21 (système+ sable + pots)		6221,00	0,013	11,174	0,047	7,769	0,041	61,02801	0,134	0,103	-0,170	0,000	0,000
	4000,00 sable													
	2136,00 4 x 534 g													
Essai du côté senestre	masse	masses marquées en g	n°6 V	EcTy	n°7 V	EcTy	n°8 V	EcTy						
	6221,00 m21 (système+ sable + pots)		8,008	0,009	11,195	0,077	7,662	0,005						
	4000,00 sable													
	2136,00 4 x 534g													
Comparaison côté dextre		m21 (système+ sable + pots)	7,90	0,013	11,174	0,047	7,769	0,041						

Loi de calibration : Déplacement = A.tension aux bornes du capteur+B			
	n°6	n°7	n°8
A =	-1,007	-1,009	-1,009
B =	8,090	11,380	7,672

Sources et bibliographie

Sources

BAIJA Hubert, *Picture Frames in Europe - 15th-21st century*, Continuing Professional Development Programme, Département de Conservation-restauration, Université d'Amsterdam, séminaire en ligne, suivi du 31 mars au 30 avril 2021.

Base de données des collections du musée du Louvre [URL : <https://collections.louvre.fr/>]

« La Charte d'Athènes pour la Restauration des Monuments Historiques - 1931 - International Council on Monuments and Sites » [En ligne : 20 octobre 2019 ; URL : <https://www.icomos.org/fr/chartes-et-normes/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/425-la-charte-dathenes-pour-la-restauration-des-monuments-historiques-1931>].

E.C.C.O [En ligne ; URL : <https://www.ecco-eu.org/home/ecco-documents/>]

Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, ICOM-ISCS [En ligne ; URL : [http://openarchive.icomos.org/id/eprint/434/1/Monuments and Sites 15 ISCS Glossary Stone.pdf](http://openarchive.icomos.org/id/eprint/434/1/Monuments%20and%20Sites%2015%20ISCS%20Glossary%20Stone.pdf)]

ICOM, [En ligne ; URL : <https://www.icom-musees.fr/index.php/toutes-les-ressources>].

Loi n° 2002-5 du 4 janvier 2002 relative aux musées de France [En ligne ; URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000769536>]

The Frame Blog, [En ligne ; URL : <https://theframeblog.com/>]

The Met, MetPublications [En ligne : https://www.metmuseum.org/art/metpublications/Italian_Renaissance_Frames]

Rapport d'intervention pour le *Molosse du Belvédère*, Genovefa Le Bris du Rest, adressé au Département des arts grecs, étrusques et romaines, Musée du Louvre, 2015.

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Knowledge for collections [En ligne : <http://www.kennisvoorcollecties.nl/en/projects/objects-in-context/conservation-of-plaster-collections/>]

Vade-mecum de la conservation préventive, C2RMF, rédigé par Étienne Féau et Nathalie le Dantec, Département de la conservation préventive, document élaboré en 2005, actualisé en 2013 [URL : https://c2rmf.fr/sites/c2rmf/files/vademecum_cc.pdf]

Victoria and Albert Museum, Online Museum, [En ligne : <http://www.vam.ac.uk/content/articles/>].

Bibliographie

- ABBONA Francesco et AQUILANO Dino, « Morphology of Crystals Grown from Solutions », dans Dhanaraj Govindhan, *et al.* (éd.), *Springer Handbook of Crystal Growth*, Berlin, Heidelberg, Springer, (« Springer Handbooks »), 2010, p. 53-92, [En ligne : 17 janvier 2023 ; URL : https://doi.org/10.1007/978-3-540-74761-1_3].
- ADRIEN Jérôme, *et al.*, « In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting », *Cement and Concrete Research*, 82 (2016), p. 107-116.
- AKKERMANS Peter M.M.G., *et al.* (dir.), *Excavations at late neolithic Tell Sabi Abyad, Syria: the 1994-1999 field seasons*, Turnhout, Brepols, (Papers on archaeology of the Leiden Museum of Antiquities), 2014.
- ALESSANDRINI Aldo, *et al.*, « Phenomenological description of the thixotropic behaviour of gypsum plaster pastes », *Rheologica Acta*, 24 / 6, (1985), p. 617-622.
- AMATHIEU Loris et BOISTELLE Roland, « Crystallization kinetics of gypsum from dense suspension of hemihydrate in water », *Journal of Crystal Growth*, 88 / 2 (1988), p. 183-192.
- ANDERSON Christy, *et al.* (éd.), *The matter of art: materials, practices, cultural logics, c.1250-1750*, Manchester, Manchester University Press (« Studies in design »), 2015.
- ANDRÉ Jean-Michel, *Restauration des sculptures*, Fribourg Paris, Office du livre (« Découvrir, restaurer, conserver »), 1977.
- ANTOINE-BORDEREAU Irène, « Entre accessoire et objet d'art : ambivalence du statut du cadre de peinture, problématique de sa conservation-restauration », Mémoire de master, Paris, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2007.
- ANZANI Marilena, *Gel rigidi di agar per il trattamento di pulitura di manufatti in gesso Use of rigid agar gels for cleaning plaster objects*, Padoue, Il prato, 2008.
- AQUILANO Dino, « Basic Mechanisms of Crystal Growth », dans Arend H., Hulliger J., (éd.). *Crystal Growth in Science and Technology*, Boston, Springer (« NATO ASI Series »), 1989, p. 49-67, [En ligne : 16 janvier 2023 ; URL : https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0549-1_3].
- ARNAUD Laurent, *et al.*, « Rhéologie des matériaux en cours de prise : Approche théorique », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics*, vol. 328 / 12 (2000), p. 855-862.
- ASAMATDINOV Marat, *et al.*, « Composition and rheological characteristics of plaster mixtures », *E3S Web of Conferences*, 97, (2019), p. 1-6.
- ASPEREN DE BOER J. R. J. Van, « A technical examination of the frame of Engebrechtsz's "Crucifixion" and some other 16th-century frames », *Netherlands Yearbook for History of Art / Nederlands Kunsthistorisch Jaarboek*, vol. 26 / 1 (1975), p. 73-87.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, (1963), *Plâtres. Techniques des essais*, NF B 12-401.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, (1987) *Gypses et plâtres. Plâtres. Techniques des essais*, NF B 12-401.

- Association de valorisation du gypse et du plâtre dans les Alpes du Sud et Groupe de recherche sur le plâtre dans l'art (éd.), *Gypseries : gipiers des villes, gipiers des champs*, Grâne, Créaphis, 2005.
- ASTM INTERNATIONAL, (2007) *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM D 7264/D 7264M.
- BADDE Aurelia, *Dusts on busts: dust on plaster surfaces: focussing on the portrait busts in the Rococo Hall of the Duchess Anna Amalia Library in Weimar*, Diplôme de Master, Newcastle, Northumbria University, 2009.
- BADDE Aurelia et ILLERHAUS Bernhard, « Three Dimensional Computerized Microtomography in the Analysis of Sculpture », *Scanning*, 30 / 1 (2008), p. 16-26.
- BAIJA Hubert, « Modern Materials & Techniques in Gilding Conservation », *AIC Postprints (American Institute for Conservation)*, San Francisco, 2015, p. 31-49.
- BALDINO Noemi, *et al.*, « Rheological Modelling of Plaster Deposition for Painting Restoration », *Applied Rheology*, 20 / 2, (2010), p. 1-9.
- BARTHE Georges-Louis (dir.), *Le plâtre : l'art et la matière*, Paris, Créaphis, 2001.
- BAUDRY Marie-Thérèse et BOZO Dominique (éd.), *Sculpture : méthode et vocabulaire*, Paris, Édition du Patrimoine, 2011 [1978].
- BAUMER Lorenz E., « Une nouvelle copie du Laocoon du XVIII^e siècle », *Revue germanique internationale*, 19 (2003), p. 119-129.
- BAZIN Germain, « Principes d'encadrement des peintures anciennes. », *Mouseion*, 55 (1946), p. 279-306.
- BEALE Arthur, *et al.*, « The Conservation of Plaster Casts », dans *Preprints of papers presented at the Fifth Annual Meeting of the AIC, Boston, Massachusetts, 30 mai – 2 juin 1977*, Washington, American Institute for Conservation, 1977, p. 18 26.
- BEAUZAC Julie, « L'histoire matérielle des moulages du musée de Sculpture comparée (1897-1927) », *In Situ*, 28 (2016) [En ligne : 25 novembre 2019 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/12670>].
- BEEMEN Roosmarijn van, *et al.*, « Suitable Bonding Methods for the Conservation of Large Broken Plaster Casts of Ancient Sculptures », dans Lookeren Campagne Kate van et Roemich Hannelore (éd.), *Recent advances in glass, stained-glass, and ceramics conservation*, Zwolle, SPA Uitgevers, 2013, p. 77-85 [En ligne : 19 juillet 2019 ; URL : https://www.researchgate.net/publication/333432666_Suitable_Bonding_Methods_for_the_Conservation_of_Large_Broken_Plaster_Casts_of_Ancient_Sculptures].
- BELDJILALI Said, *et al.*, « Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick », *Construction and Building Materials*, 259 (2020), p. 1-9.
- BENHAMOU Guy, *Le Plâtre*, Paris, J.B. Baillièrre, 1981.
- BENNING Liane G., *et al.* (éd.), *New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth: From Solution Precursors to Solid Materials*, Cham, Springer, 2017.
- BERGEON Ségolène et BRUNEL Georges, *La restauration des œuvres d'art : vademecum en quelques mots*, Paris, Hermann, 2014.

- BERGEON Ségolène et CURIE Pierre, *Peinture & dessin : vocabulaire typologique et technique*, Paris, Édition du patrimoine-Centre des monuments nationaux (« Principes d'analyse scientifique »), 2009.
- BETENE EBANDA Fabien, *Étude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand 2, 2012, [En ligne : <https://www.theses.fr/2012CLF22298>].
- BIESSEL Dominique et CASCIO Agnès, *Restitution de deux sculptures en plâtre de Rembrandt Bugatti*, Mémoire de master, Paris, IFROA, 1984.
- BIGELOW Deborah (éd.), *Gilded wood: conservation and history*, American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Madison, Sound View Press, 1991.
- BISTON Valentin, *Manuel théorique et pratique du chauxfournier : contenant l'art de calciner la pierre à chaux et à plâtre, de composer toutes sortes de mortiers ordinaires et hydrauliques, cimens...*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1836, [En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6276552x>].
- BLANCHETIÈRE François, *et al.* (éd.), *L'enfer selon Rodin*, Paris, Norma éditions : Musée Rodin, 2016.
- BONNARD Bénédicte, *La dorure sur bois dans le mobilier français des XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles*, Mémoire de master, Paris, École du Louvre, 2010.
- BOSC Ernest, *Dictionnaire raisonné d'architecture et des sciences et arts qui s'y rattachent*, Paris, Firmin-Didot, 1877, volume 1.
- BOURDON Michel, « Le moulage aujourd'hui », dans *La Sculpture du XIX^e siècle, une mémoire retrouvée*, Paris, La Documentation française, 1986, p. 60-67.
- BOUSVAROU Marina, *et al.*, « Un cas d'exposition au musée Fabre. « Dans le Secret des œuvres d'art » », *Patrimoines du Sud*, 12 (2020), [En ligne : 16 décembre 2020 ; URL : <http://journals.openedition.org/pds/4881>].
- BRANDI Cesare, BASILE Giuseppe et CORDARO Michele (éd.), *La restauration : méthode et études de cas*, Paris, Institut national du patrimoine, Éditions Stratis, 2007.
- BRETTELL Richard Robson, *et al.*, *The art of the edge, European frames, 1300-1900*, Chicago, Art Institute of Chicago, 1986.
- BRICE John C. et RUDOLPH Peter, « Crystal Growth », *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, (2007), [En ligne : 16 janvier 2023 ; URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a08_099.pub2].
- BRIDAROLLI Alexandra, *et al.*, « Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity », *Journal of Cultural Heritage*, 53 (2022), p. 226-235.
- BROOKS R., *et al.*, « Calcium carbonate and its hydrates », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243 / 861 (1950), p. 145-167.
- BRUNO Fabio, *et al.*, « Documentation and monitoring of underwater archaeological sites using D imaging techniques: the case study of the "Nymphaeum of Punta Epitaffio" (Baiae, Naples) », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W10 (2019), p. 53-59.

- BURRAFATO Giuseppe, *et al.*, « ColoRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments », *Journal of Raman Spectroscopy*, 35 / 10 (2004), p. 879-886.
- BUYLE Marjan (Éd.), *La problématique des lacunes en conservation-restauration, Bruxelles*, Vlaams instituut voor het onroerend erfgoed, (Postprints des journées d'étude internationales APROA-BRK) 2007.
- CAHN, Isabelle, « Les cadres impressionnistes », *Revue de l'Art*, vol. 76 / 1 (1987), p. 57-59.
- CAHN Isabelle, *Cadres de peintres*, Paris, Réunion des musées nationaux Flammarion, 1989.
- CAHN Isabelle et GAUTIER Jean Jacques, *Le cadre et le bois doré à travers les siècles*, Levallois-Perret, HM Editions, 1991.
- CAUFIN Biagio et PAPO Adriano, « Rheological testing methods for gypsum plaster pastes », *Matériaux et Construction*, 16 / 5 (1983), p. 315 321.
- CAUFIN Biagio, *et al.*, « Rheological behavior of gypsum plaster pastes », *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 24 / 1 (1985), p. 49 53.
- CENNINI Cennino, *Il Libro dell'arte*, Florence, Felice Le Monnier, 1859.
- CENNINI Cennino, *Traité de la peinture*, Paris, Renouard, 1858.
- CHASTEL, André, « Le problème des cadres », *Revue de l'Art*, vol. 76 / 1 (1987), p. 5-6.
- CHASTEL-ROUSSEAU Charlotte et LOPEZ Elise, « S'unir « très doucement avec les couleurs sans les offenser » : redécouverte et restauration d'un cadre des collections du musée du Louvre », *Patrimoines*, 13 (2017), p. 140-145.
- CHASTEL-ROUSSEAU Charlotte, « Les yeux emplis de l'or des cadres », *Grande Galerie, Le Journal du Louvre*, (La recherche au Louvre), 2018, p. 48-59.
- CHEN Z., *et al.*, « A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum », *Journal of Materials Science*, 45 / 16 (2010), p. 4444-4453.
- CHEVALIER Christophe, *Dynamique et instabilités des interfaces grains/fluide dans les suspensions non-Browniennes*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2006.
- CHIAVARI Giuseppe, *et al.*, « Analysis of proteinaceous binders by in-situ pyrolysis and silylation », *Chromatographia*, 57 / 9-10 (2003), p. 645-648.
- CIATTI Marco, « Problemi di conservazione e di presentazione dei dipinti : le cornici », dans *OPD Restauro, Rivista dell'Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di restauro di Firenze*, 6 (1994), p.114-127.
- CIPRIANI Mara, *et al.*, « A Messinian Gypsum Deposit in the Ionian Forearc Basin (Benestare, Calabria, Southern Italy): Origin and Paleoenvironmental Indications », *Minerals*, vol. 11 / 12 (2021), p. 1-16.
- COLUSSI Iginio, *et al.*, « Shear-dependent behavior of gypsum plasters », *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 21 / 3 (1982), p. 514-516.
- Compagnons du devoir et du tour de France (éd.), *La plâtrerie, le staff et le stuc*, Paris, Librairie du Compagnonnage (Encyclopédie des métiers), 1994, 2 vol.

- COQUARD Philippe, *Résistance mécanique des plâtres secs et humides*, Thèse de doctorat, Université Paul Cézanne, 1992.
- COQUARD Philippe, *et al.*, « Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster », *Journal of Materials Science*, vol. 29 / 17 (1994), p. 4611-4617.
- COSTES Jean, *Le plâtre traditionnel et moderne*, Paris, Eyrolles, 1990.
- COUSSOT Philippe et ANCEY Christophe, « Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes », *Physical Review E*, vol. 59 / 4 (1999), p. 4445-4457.
- CREMER Leo et EIKEMEIER Peter, *Italienische Bilderrahmen des 14. - 18. Jahrhunderts: München 6. Mai - 31. Okt. 1976 [Sonderausstellung Alte Pinakothek]*, Munich, Bayerische Staatsgemäldesammlungen, 1976.
- CROCQUEVIEILLE Guillaume, *Les Moulages d'après l'antique de la Cour Vitrée de l'Ecole des Beaux-Arts de Paris, Histoire de leur présentation dans la cour centrale du Palais des Études (1876-1970) et leur identification au sein des collections des Écuries du Roy à Versailles*, Mémoire de master, Paris, École du Louvre, 2008.
- CURDY Mélanie, *Derniers témoignages de déportés. Étude préalable et conservation-restauration de graffitis du camp de Drancy : application de l'imagerie térahertz à la lecture d'inscriptions recouvertes*, Mémoire de master, Saint-Denis, Institut national du patrimoine, 2011.
- D'ALESSANDRO Lorenza et PERSEGATI Francesca, *Scultura e calchi in gesso : storia, tecnica e conservazione*, Roma, "L'Erma" di Bretschneider (Studia archaeologica), 1987.
- DALY, Claire, « Restoring the joints of picture frames –maintaining function at the expense of aesthetics? », dans Vasques Dias Miko (éd.), *Restoring joints, conserving structures: 10th International Symposium on Wood and Furniture Conservation [Stichting Ebenist, Amsterdam, 8 - 9 October 2010]*, De Rode Hoed, Keizersgracht 102, Amsterdam, Stichting Ebenist, 2010, p. 38-52.
- DARQUE-CERETTI Evelyne, *et al.*, « New Leaf Gilding Alloys: Physico-Chemistry, Colour, Mechanical Behavior », *International Journal of Conservation Science*, 6 / Special Issue (2015), p. 531-540.
- DE KORTE Arie Cornelis Johannis, *Hydration and Thermal Decomposition of Cement/calcium-sulphate Based Materials*, Thèse de doctorat, Technische Universiteit Eindhoven, 2015.
- DHONT Michèle, *Encadrement : nouveaux regards*, Paris, l'Inédite, 1998.
- DIEZ REYES Carmen, *et al.*, « Rhéologie des pâtes de plâtre », dans Murat Michel et Foucault Michel (éd.), *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions]*, Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977, RILEM Publications, 1977, p. 343-348.
- DOOIJES Renske et NIEUWENHUYSE Olivier, « Ancient repairs: techniques and social meaning », dans Benz M. et Kästner U. (éd.), *Konservieren oder Restauriere, Die Restaurierung griechischer Vasen von der Antike bis heute*, Munich, C. H. Beck, 2007, p. 15-22.

- DOOIJES Renske et NIEUWENHUYSE Olivier, « Ancient repairs in archaeological research: a near eastern perspective », dans Ambers J. *et al.* (éd.), *Holding it All Together: Ancient and Modern Approaches in Joining Repairs, and Consolidation*, Londres, Archetype Books, 2009, p. 8-12.
- DUCASSE-LAPEYRUSSE Jean et VERGÈS-BELMIN Véronique, « Traditional gypsum renders in the Paris area : focus on a particular typology », *Materials and Structures*, 54 / 2 (2021), p. 1-15.
- EGERTON Judy (éd.), *Wright of Derby [exposition] Tate Gallery, Londres : 7 Février - 22 Avril 1990 ; Grand Palais, Paris : 17 Mai - 23 Juillet 1990 ; Metropolitan Museum of Art, New York : 6 Septembre - 2 Décembre 1990*, Londres, Tate Publishing Ltd, 1990.
- ELERT Kerstin, *et al.*, « Effect of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of calcium sulfate-based composite materials », *Cement and Concrete Composites*, 96 (2019), p. 274-283.
- ELERT Kerstin, *et al.*, « Influence of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of lime plasters », *Construction and Building Materials*, 226 (2019), p. 625-635.
- Escuela taller de restauración-Centro histórico de León, *La chaux et le stuc : guide pratique*, Paris, Eyrolles, 2001.
- EYSTURSKARÐ Jonhard, *Mechanical Properties of Gelatin Gels; Effect of Molecular Weight and Molecular Weight Distribution*, Thèse de doctorat, NTNU Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- FAYOLLE Patrick, « Du gypse au plâtre : la géologie, les gisements en France et les techniques d'extraction », dans BARTHE Georges-Louis (dir.), *Le plâtre, l'art et la matière*, Paris, Creaphis, 2001, p. 15-21.
- FESTA Jean, *Techniques et pratique du plâtre : applications traditionnelles et modernes*, Paris, Eyrolles, 1998 [1995].
- FISCHER H.-B et VTOROV B., « Characterization of historical gypsum mortars », 55 (2002), p. 92-99.
- FLATT Robert J. et BOWEN Paul, « Yodel: A Yield Stress Model for Suspensions », *Journal of the American Ceramic Society*, 89 / 4 (2006), p. 1244-1256.
- FLATT Robert J. et BOWEN Paul, « Yield Stress of Multimodal Powder Suspensions: An Extension of the YODEL (Yield Stress mODEL) », *Journal of the American Ceramic Society*, 90 / 4 (2007), p. 1038-1044.
- FORLEO Danilo, *et al.* (dir.), *EPICO - European Protocol In Preventive Conservation, phase 1. Méthodes d'évaluation de conservation des collections dans les demeures historiques*, Gênes, Sagep Editori, 2017.
- FOUCART Jacques, « Bibliographie du cadre », *Revue de l'Art*, vol. 76 / 1 (1987), p. 60-62.
- FOUCART Jacques, « Étude critique de l'encadrement », *Revue de l'Art*, 76 / 1 (1987), p. 7-14.
- FRANCESCHI Enrico et LOCARDI Federico, « Strontium, a new marker of the origin of gypsum in cultural heritage? », *Journal of Cultural Heritage*, 15 (2013), p. 522-527.

- FREDERIKSEN Rune et MARCHAND Eckart (dir.), *Plaster casts: making, collecting and displaying from classical antiquity to the present*, Berlin, Walter de Gruyter, (Transformationen der Antike »), 2010.
- FREIRE Maria Teresa, *et al.*, « Studies in ancient gypsum-based plasters towards their repair: Mineralogy and microstructure », *Construction and Building Materials*, 196 (2019), p. 512-529.
- FREIRE Maria Teresa, *et al.*, « Studies in ancient gypsum-based plasters towards their repair: Physical and mechanical properties », *Construction and Building Materials*, 202 (2019), p. 319-331.
- FU Jinwei, *et al.*, « The shear behaviors of concrete-gypsum specimens containing double edge cracks under four-point loading conditions », *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 119 (2022), p. 1-15.
- FUHRI SNETHLAGE Henriëtte et NOORTWIJK Liesbeth van, *Van de kunst en de rand : de lijst centraal*, [exposition « Van de kunst en de rand : de lijst centraal », Dordrechts Museum, 24 mai 2015-15 février 2016], Dordrechts, Dordrechts Museum, 2015.
- GABORIT Jean-René, *et al.*, *D'après l'antique*, [Exposition, Paris, Musée du Louvre, 16 octobre 2000-15 janvier 2001], Paris, Réunion des musées nationaux, 2000.
- Galerie Georges Bac, *Le cadre et le bois doré à travers les siècles*, Levallois, H.M. éditions, 1991.
- GARIANI Gianluca, *et al.*, « First insights on the mineral composition of “stucco” devotional reliefs from Italian Renaissance Masters: investigating technological practices and raw material sourcing », *Journal of Cultural Heritage*, 34 (2018), p. 23-32.
- GASPARD Danièle, « Les Brachiopodes de la craie blanche de Meudon (Campanien supérieur) de la collection d'Orbigny (MNHN, Paris) », *Comptes Rendus Palevol*, 1 / 7 (2002), p. 573-585.
- GENESTAR Catalina, « Characterization of grounds used in canvas and sculpture », *Materials Letters*, 54 / 5 (2002), p. 382-388.
- GICQUEL Claudette et Pierre, SALMON Xavier, « La restauration de la bordure », dans *Le Repas chez Simon, Véronèse, Histoire et restauration d'un chef-d'œuvre*, Paris, Alain de Gourcuff, 1997, p.135-137.
- The gilder's manual : a complete practical guide to gilding in all its branches : designed for all trades in which gilding is used, including silvering, together with picture framing, picture repairing, and much other useful information, valuable receipts, &c*, New York, Excelsior Pub. House, 1876, [En ligne : 24 février 2023 ; URL : <http://archive.org/details/gildersmanualcomounse>].
- GLOVER Hugh, « A Description of 19th-century American Gilded Picture Frames and an Outline of Their Modern Use and Conservation », *WAG Postprints (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation)*, Washington D.C., AIC, 2006, p. 72-92.
- GLOVER Hugh, « Care and use of 19th-century American gilded picture frames », *Art Conservator*, 1 / 1 (2006), p. 19-22.

- GOURDEN Jean-Michel, *Le peuple des ateliers : les artisans du XIXe siècle*, Paris, Créaphis (Pierres de mémoire), 1992.
- GOVEN François (éd.), *Monumental. La charte de Venise*, 2 (2021).
- GRANDSART Hervé, « La restauration d'un cadre monumental », *Connaissance des Arts*, 650 (2007), p. 112-115.
- GRECO Valentine, « Regard sur une restauration de cadre », *Blog du Musée d'Art et d'Histoire de Genève*, (2012) [En ligne : 16 juin 2019 ; URL : <https://core.ac.uk/download/pdf/43667933.pdf>].
- GRIMBERGEN R. F. P., *et al.*, « On the Prediction of Crystal Morphology. I. The Hartman-Perdok Theory Revisited », *Acta Crystallographica Section A Foundations of Crystallography*, 54 / 4 (1998), p. 491-500.
- GRIMM Claus, « Histoire du cadre : un panorama », *Revue de l'Art*, 76 / 1 (1987), p. 15-20.
- GRIMM Claus, *Alte Bilderrahmen. Epochen, Typen, Material*, Munich, Callwey, 1978.
- GUILLAUMIN Gilbert-Urbain (dir.), *Dictionnaire du commerce et des marchandises, contenant tout ce qui concerne le commerce de terre et de mer*, Paris, Guillaumin & Cie., 1837, 2 vol.
- HACKNEY Stephen, « Framing for conservation at the Tate gallery », *The Conservator*, 14 / 1, (1990), p. 44-52.
- HASKELL Francis et PENNY Nicholas (dir.), *Pour l'amour de l'Antique : la statuaire gréco-romaine et le goût européen, 1500-1900*, Paris, Hachette, 1999 [1981].
- HASLUCK Paul Nooncree, *Clay Modelling and Plaster Casting: With Numerous Engravings and Diagrams*, Philadelphia, David McKay, 1905.
- HENNEN RODRIGUEZ Sofia, « Les propriétés, actions et principales problématiques des gels de Pemulen®TR-2 : Le choix de la base dans la formulation des gels », *CeROArt*, 6 (2017), p. 1-25.
- HEYDENRYK Henry, *The art and history of frames: an inquiry into the enhancement of paintings*, London, Nicholas Vane, 1964.
- HENRIQUES Frederico, *et al.*, *RECH3 : Postprints III International meeting on Retouching of Cultural Heritage, [Museu Nacional Soares dos Reis, Porto October 23rd-24th, 2015]* Porto, Escola Artística e Profissional Árvore, 2016, [En ligne : 24 septembre 2022 ; URL : https://www.academia.edu/28094274/III_INTERNATIONAL_MEETING_ON_RETOUCHING_OF_CULTURAL_HERITAGE_Postprints_2015].
- HOTTIN Christian, *La Sorbonne : un musée, ses chefs-d'œuvre*, Paris, RMN, 2007.
- ICOM, *Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments: international colloquium, Rome, 19-21 June 1995; preprints*, Rome, ICCROM, 1995.
- ICON, « Care and conservation of frames and gilding », *ICON the Institute of Conservation*, 2011, [En ligne : 10 janvier 2022 ; URL : <https://www.icon.org.uk/resource/care-and-conservation-of-frames-and-gilding.html>].
- JAFFEL Hamouda, *Multi-scales characterization of porous materials in evolution : case of plaster*, Thèse de doctorat, École Polytechnique X, 2006, [En ligne : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00122888>].

- JAQUES Victory Armida Janine, *et al.* « Novel nanofossils extraction methodology from paintings coupled with GC-MS for provenance determination and binder analysis », preprint, 2022, [En ligne : 15 mars 2023 ; URL : <https://www.researchsquare.com/article/rs-1441826/v1>].
- JIANG Jun, *et al.*, « Preparation and hardened properties of lightweight gypsum plaster based on pre-swelled bentonite », *Construction and Building Materials*, 215 (2019), p. 360-370.
- JOHNSON Alastair, « Restoring pressed-composition ornament to the frame around Arthur Melville's 'Audrey and her Goats' », *Picture restorer*, 51, (2017), p. 20-25.
- JROUNDI Fadwa, *et al.*, « Consolidation of archaeological gypsum plaster by bacterial biomineralization of calcium carbonate », *Acta Biomaterialia*, 10 / 9 (2014), p. 3844-3854.
- KAIRIS Pierre-Yves, *et al.*, *La restauration des peintures et des sculptures : connaissance et reconnaissance de l'œuvre*, Paris, A. Colin, 2012.
- KARRAKER D. Gene, *Looking at European Frames, A guide to terms, styles, and techniques*, Los Angeles, Getty Museum, 2014 [2009].
- KARMAZSIN Etienne et MURAT Michel, « Study of a "solid + liquid → solid" reaction (hydration of calcium sulfate hemihydrate) by simultaneous isothermal calorimetry and electrical resistivity measurement », *Cement and Concrete Research*, 8 / 5 (1978), p. 553-557.
- KHALIL A.A., *et al.*, « Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites », *Construction and Building Materials*, 68 (2014), p. 580-586.
- KHENFER Mohamed-Mouldi et MORLIER Pierre, « Plâtres renforcés de fibres cellulosiques », *Materials and Structures*, 32 / 1 (1999), p. 52-58.
- KINGERY W. David, *et al.*, « The Beginnings of Pyrotechnology, Part II: Production and Use of Lime and Gypsum Plaster in the Pre-Pottery Neolithic near East », *Journal of Field Archaeology*, 15 / 2 (1988), p. 219-244.
- KISHIDA Ryo, *et al.*, « Fabrication of highly interconnected porous carbonate apatite blocks based on the setting reaction of calcium sulfate hemihydrate granules », *Ceramics International*, 47 / 14 (2021), p. 19856-19863.
- KLARER Céline, *Au passage du mur de Sonia Garelli : Les stylos Choses d'Arman : Etude du vieillissement d'une inclusion d'Arman*, Mémoire de Master, Saint-Denis, ENP-IFROA, 1997.
- KLIN Stanisław, « Rheological Properties of Building Gypsum Fresh Pastes », *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics*, 52 / 3 (2005), p. 265-282.
- KLOSOWSKA Anna et OBARZANOWSKI Michal, « Plaster casts in the collection of the National Museum in Krakow. Conservation issues », *The National Museum in Krakow Studies and research Materials [Conference in The National Museum in Krakow, may 25, 2010]*, Cracovie, Muzeum Narodowe, 2010, p. 103-115.
- KONDRATIEVA Nataliia, *et al.*, « Study of modified gypsum binder », *Construction and Building Materials*, 149 (2017), p. 535-542.

- KURIKAWA Naoko, « The Influence of Understandability on the Combination Effect of Painting and Frame », *Transactions of Japan Society of Kansei Engineering*, 13 / 2 (2014), p. 411-417.
- LAUWICK Béatrice et FÉVRIER Roland, « La restauration des cadres du musée de l'Orangerie », *Technè*, 29 (2009), p. 94-100.
- LAVOISIER Antoine-Laurent, « Analyse du gypse », dans *Mémoire de mathématique et de physique*, vol. 5, Paris, Imprimerie Royale, 1768, p. 341-357.
- LE BRETON Élisabeth, « Gypsothèque du musée du Louvre. Les apports de la restauration à la datation des tirages en plâtre anciens », *In Situ*, 28 (2016) [En ligne : 25 novembre 2019 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/12581>].
- LE BRETON Élisabeth et MARTINEZ Jean-Luc, *Une antiquité moderne : [exposition, Rome, Académie de France, Villa Médicis, 7 novembre 2019 - 1er mars 2020]*, Milan, Officina Libraria, 2019.
- LE BRETON Élisabeth, « Un conservatoire des plâtres antiques, 1 », *In Situ*, 43 (2021) [En ligne : 28 février 2022 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/28626>].
- LE BRETON Élisabeth, « Un conservatoire des plâtres antiques, 2 », *In Situ*, 43 (2021) [En ligne : 28 février 2022 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/28947>].
- LE CHATELIER Henry, *Sur la cuisson du plâtre*, Paris, Gauthier-Villars, 1883.
- LE CLÉAC'H Jean-Michel, « Quelques réflexions sur les macles du gypse », *Saga information*, 2017, p. 6-11.
- LE DANTEC Tiffanie, *Les façades enduites au plâtre d'Île-de-France. Le déclin du plâtre extérieur, du XVII^e au XX^e siècle*, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2019, [En ligne : 1er avril 2019 ; URL : <https://www.theses.fr/2019SACLVO01>].
- Le moulage, Colloque international, Musée des Monuments français, 10-11 avril 1987*, Paris, la Documentation française, 1988.
- LEVEAU Pierre, « Les dilemmes philosophiques de la conservation-restauration », *E conservation*, 12 (2009), p. 47-58.
- LOPEZ Elise, *Redécouverte de l'ancien cadre du Passeur de Corot. Etude et conservation - restauration d'un cadre de la fin du XIX^e siècle en bois et plâtre doré (Paris, Musée du Louvre) : Évaluation de différents matériaux radio-opaques pour la restitution des lacunes*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2016.
- LORS Christine, *et al.*, « Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars », *Construction and Building Materials*, 141 (2017), p. 461-469.
- Louis Style : French Frames, 1610-1792*, [Exposition "Louis Style : French Frames, 1610-1792" 15 septembre 2015-3 janvier 2016, Getty Center], Los Angeles, The J. Paul Getty Museum, 2015 [En ligne : 16 juillet 2021 ; URL : http://www.getty.edu/art/exhibitions/french_frames].
- LOUIS-TISSERAND Bernard, *Rhéologie des suspensions de sulfate de calcium (gypse, plâtre et anhydrite) : analyse de l'influence de la forme et des caractéristiques morphostructurales des particules*, Thèse de doctorat, Dijon, 1995, [En ligne : 22 juin 2021 ; URL : <http://www.theses.fr/1995DIJOS039>].

- LUCAS Günter, « La consistance des plâtres retardés. La détermination du taux de gâchage », dans MURAT Michel et FOUCAULT Michel (éd.), *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions], Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977*, RILEM Publications, 1977, p. 341-342.
- LUCAS Sandra S., *et al.*, « Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars – Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity », *Cement and Concrete Research*, 43 (2013), p. 112-120.
- MAGNIER M.- Désiré et LEBRUN, *Nouveau manuel complet du mouleur... par M. Lebrun. Nouvelle édition, revue par M.-D. Magnier*, Paris, Roret, 1850.
- MARCHAND Eckart, « Material distinctions: plaster, terracotta and wax in the Renaissance artist's workshop » dans ANDERSON Christy, DUNLOP Anne, SMITH Pamela H. (dir.), *The matter of art: materials, practices, cultural logics, c.1250-1750*, Manchester, Manchester University Press, (Studies in design), 2015, p. 160-179.
- MARTIAS Céline, *Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie*, Thèse de doctorat, Université de Toulon, 2011 [En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00769952/document>].
- MARTIN Elisabeth, *et al.*, « Contribution à l'étude des préparations blanches des tableaux italiens sur bois », *Studies in Conservation*, 37 / 2 (1992), p. 82-92.
- MARTÍNEZ GABARRÓN Antonio, *et al.* « Increase of the flexural strength of construction elements made with plaster (calcium sulfate dihydrate) and common reed (*Arundo donax* L.) », *Construction and Building Materials*, 66 (2014), p. 436-441.
- MARTINEZ Jean-Luc, « La gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *Comptes-rendus des séances de l'année - Académie des inscriptions et belles-lettres*, vol. 153 / 3 (2009), p. 1127-1152.
- MARTINEZ Jean-Luc, « Exposer des moulages d'antiques : à propos de la gypsothèque du musée du Louvre à Versailles », *In Situ*, 28 (2016) [En ligne : 19 novembre 2018 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/12537>].
- MASSARO Francesco Roberto, *et al.*, « Theoretical Equilibrium Morphology of Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). 1. A Syncretic Strategy to Calculate the Morphology of Crystals », *Crystal Growth & Design*, 10 / 7 (2010), p. 2870-2878.
- MASSARO Francesco Roberto, *et al.*, « Theoretical Equilibrium Morphology of Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). 2. The Stepped Faces of the Main [001] Zone », *Crystal Growth & Design*, 11 / 5 (2011), p. 1607-1614.
- MATSCHEI Thomas, *et al.*, « The role of calcium carbonate in cement hydration », *Cement and Concrete Research*, 37 / 4 (2007), p. 551-558.
- MAZUREK Joy, « Antibody assay to characterize binding media in paint », [ICOM Committee for Conservation 15th Triennial Meeting New Delhi India 22-26 September 2008], 2008, p. 849-856 [En ligne : 06 février 2023 ; URL : <https://www.icom-cc-publications-online.org/1949/Antibody-assay-to-characterize-binding-media-in-paint>].
- MCDONALD Lewis J., *et al.*, « The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material », *Journal of Cleaner Production*, 338 (2022), p. 1-12.

- MECKLENBURG Marion F., « Some Mechanical and Physical Properties of Gilding Gesso », dans BIGELOW Deborah (éd.), *Gilded Wood, Conservation and History*, Madison, Sound View Press, 1991, p. 163-170.
- MEGENS Luc, *et al.*, « The composition of plaster casts », dans *ICOM-CC Glass and Ceramics working group, 16th Triennial ICOM-CC Conference (19-23 September 2011, Lisbon, Portugal): preprints*, Almada, Critério, 2011, p. 1-9.
- MEILLE Sylvain, *Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2001 [En ligne : <http://www.theses.fr/2001ISAL0012>].
- MELIÀ-ANGULO Ana, *et al.*, « Study of the mechanical properties of selected animal glues and their implication when designing conservation strategies », *CeROArt*, 2017 [En ligne : 12 janvier 2023 ; URL : <http://journals.openedition.org/ceroart/5152>].
- MELO Helena Pinheiro de, *et al.*, « Problems of Analysis by FTIR of Calcium Sulphate-Based Preparatory Layers: The Case of a Group of 16th-Century Portuguese Paintings: FTIR of calcium sulphate-based preparatory layers », *Archaeometry*, 56 / 3, (2014), p. 513-526.
- MENDGEN Eva, *In perfect harmony: picture & frame, 1850-1920*, Vienne, Van Gogh Museum/Kunstforum, 1995.
- MIDDENDORF Bernhard, « Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum: current knowledge and perspective », *Geological Society*, 205 / 1 (2002), p. 165-176.
- MIKABERIDZE Alexander, *Les Guerres napoléoniennes*, Paris, Flammarion, 2020.
- MILLIMAN John D., *et al.*, *Recent Sedimentary Carbonates*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1974, 2 vol.
- MILLER Stephen G. (éd.), *Plaster Casts at Berkeley*, Berkeley, Department of Classics, University of California, 2005 [En ligne : 19 février 2022 ; URL : <https://escholarship.org/uc/item/2ch893d5>].
- MILLIMAN John D., *et al.*, *Recent Sedimentary Carbonates*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1974, 2 vol.
- MIRBEAU Octave, « Auguste Rodin », *La France*, 1885, p. 116-119.
- MITCHELL Paul et ROBERTS Lynn, *A history of European picture frames*, London, Merrell Holberton, 1996.
- MITCHELL Paul et ROBERTS Lynn, *Frameworks : form, function and ornament in European portrait frames*, London, Merrel Holberton, 1996.
- MORGADO Gabriel, *et al.*, « Kinetics of plaster hydration and structure of gypsum: Experiments and kinetic Monte Carlo simulations with added gypsum seeds », *Journal of Crystal Growth*, 507 (2019), p. 124-133.
- MONTAGNINO D., *et al.*, « Growth morphology of gypsum in the presence of copolymers », *Crystal Research and Technology*, 46 / 10 (2011), p. 1010-1018.
- MORINIÈRE Soline, « Enseigner l'archéologie dans les facultés des lettres françaises (1876-1900): la question de l'instrumentum pédagogique », dans Demeulenaere-Douyère Christiane et Le Goff Armelle (Éd.), *Enseignants et enseignements au cœur de*

- la transmission des savoirs*, Paris, Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2021.
- MOROPOULOU Antonia *et al.*, « Composite materials in ancient structures », *Cement and Concrete Composites*, 27 / 2 (2005), p. 295-300.
- MORTADA Nourhan, *Mousses minérales : développement, structure porale et propriétés d'usages*, Thèse de doctorat, Rennes 1, 2021 [En ligne : 25 août 2022 ; URL : <https://www.theses.fr/2021REN1S096>].
- MURAT Michel et FOUCAULT Michel (éd.), *Sulfates de calcium et matériaux dérivés. Colloque international de la RILEM [Réunion internationale des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions], Saint-Rémy-lès-Chevreuse... 25-27 mai 1977*, RILEM Publications, 1977.
- Musée du plâtre, *La Lettre blanche*, Cormeilles-en-Parisis, Association des amis de l'écomusée du plâtre, 1994.
- NEUVILLE Mathieu, *Les fluidifiants du plâtre*, Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, 2007 [En ligne : 10 mars 2021 ; URL : <https://theses.hal.science/tel-00913652>].
- NEWBERY Timothy J., BISACCA George et KANTER Laurence B., *Italian Renaissance frames*, New York, Metropolitan Museum of Art: H.N. Abrams, 1990.
- NEWSOM Stephen et WHITFIELD Elizabeth, *Care and conservation of 17th century plasterwork in Scotland*, Edinburgh, Historic Scotland (Historic Scotland technical advice notes), 2004.
- NICOLAS Marine, *L'Ébauche Bacchante d'Émile-Antoine Bourdelle (Paris, musée Bourdelle). Étude et conservation-restauration d'une sculpture en plâtre brûlée. Recherche sur la consolidation du plâtre*, Mémoire de Master, Saint-Denis, INP, 2001.
- OCHOA Rafael E., *et al.*, « Effect of Water/Plaster Ratio on Preparing Molds for Slip Casting of Sanitaryware; Rheology of the Initial Plaster Slurry, Microstructure and Mold Properties », *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 77 / 2 (2018), p. 84-89.
- ORTEGA Y GASSET Jose et BELL Andrea L., « Meditations on the Frame », *Perspecta*, 26 (1990), p. 185-190.
- OSSORIO Mercedes, *et al.*, « The growth morphology of gypsum crystals: an experimental study », *Acta Crystallographica Section A Foundations of Crystallography*, vol. 67 C462 (2011).
- OVARLEZ Guillaume, « Caractérisation rhéologique des fluides à seuil », *Rhéologie*, 20, 2011, p. 28-43.
- OVARLEZ Guillaume, *et al.*, « Flows of suspensions of particles in yield stress fluids », *Journal of Rheology*, 59 / 6 (2015), p. 1449-1486.
- PACHON-RODRIGUEZ Edgar-Alejandro, *Étude de l'influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides : fluage du plâtre*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 2011 [En ligne : 19 septembre 2022 ; URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00697835>].
- PALHA F., *et al.*, « Effect of Water on the Degradation of Gypsum Plaster Coatings: Inspection, Diagnosis, and Repair », *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26 (2012), p. 424-432.

- PAPO Adriano, « Rheological models for gypsum plaster pastes », *Rheologica Acta*, 27 / 3 (1988), p. 320-325.
- PARK Soo-Jin et SEO Min-Kang, « Chapter 8 - Composite Characterization », dans Park Soo-Jin et Seo Min-Kang (éd.), *Interface Science and Technology*, 18 (2011), , p. 631-738 [En ligne : 23 mai 2022 ; URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123750495000086>].
- PASTERO Linda, *et al.*, « Calcite passivation by gypsum: the role of the cooperative effect », *CrystEngComm*, 19 / 26 (2017), p. 1-21.
- PAYNE Emma M., « The Conservation of Plaster Casts in the Nineteenth Century », *Studies in Conservation*, 65 / 1 (2020), p. 37-58.
- PAYNE John W., *Framing the nineteenth century : picture frames, 1837-1935*, Mulgrave, Images publishing, 2007.
- PAYRAULT Héloïse, *et al.*, *Conservation et restauration des objets en plâtre des collections de musées français. Problématiques rencontrées*, Mémoire de master, École du Louvre, 2012.
- PENG Jiahui, *et al.*, « Adsorption characteristics of water-reducing agents on gypsum surface and its effect on the rheology of gypsum plaster », *Cement and Concrete Research*, 35 / 3 (2005), p. 527-531.
- PENNY Nicholas, *Frames*, Londres, National Gallery Company, 2010.
- PENNY Nicholas, *The materials of sculpture*, New Haven, Yale university press, 1993.
- PENNY Nicholas, *et al.* (éd.), *The Sansovino frame, [Exposition "Frames in Focus: Sansovino Frames", Londres, National Gallery, 1^{er} avril- 13 septembre 2015]*, London, National Gallery Company, 2015.
- PERCIER Charles, et FONTAINE Pierre Léonard, *Recueil de décorations intérieures comprenant tout ce qui a rapport à l'ameublement*, Paris, Egon Hessling, 1812 [En ligne : 23 février 2022 ; URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k857253>].
- PEREGO François, *Dictionnaire des matériaux du peintre*, Paris, Belin, 2005.
- PEROGLIO MARTYNOVITCH Marianna, *Composites organiques-inorganiques poreux pour la substitution osseuse*, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2008.
- PERONNET François, *Caractérisation du comportement mécanique des plâtres*, Rapport de stage Génie physique des matériaux, INSA Lyon, 1994.
- PERONNET François, *Étude du comportement à la rupture et des mécanismes de propagation des fissures dans les plâtres secs*, Rapport de DEA, Génie physique des matériaux, INSA Lyon, 1996.
- PETROU Athinoula L. et TERZIDAKI Athina, « Calcium carbonate and calcium sulfate precipitation, crystallization and dissolution: Evidence for the activated steps and the mechanisms from the enthalpy and entropy of activation values », *Chemical Geology*, 381 (2014), p. 144-153.
- PIERRE Alexandre, *Rhéologie de suspensions concentrées de sulfate de calcium*, Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2013, [En ligne : 10 mars 2021 ; URL : <https://theses.hal.science/tel-00910334>].

- PIERRE Alexandre, *et al.*, « Mesure de viscosité: les limites d'un rhéomètre à géométrie vane », *Academic Journal of Civil Engineering*, 34/1 (2016), p. 975- 982.
- PIERRE Alexandre, *et al.*, « Rheological properties of calcium sulfate suspensions », *Cement and concrete research*, 76 (2015), p. 70-81.
- PINATEL Christiane, « La formation de la collection de moulages d'après l'antique à Versailles. », *Bulletin de la Société Nationale des Antiquaires de France*, 1996 / 1 (1996), p. 318-327.
- PINATEL Christiane, « La " Restauration " en plâtre de deux colonnes du temple de Castor et Pollux dans la Petite Écurie royale de Versailles : histoire et archéologie », *Revue archéologique*, 35 / 1 (2003), p. 67-114.
- PINGEOT Anne (dir.), *La sculpture française au XIX^e siècle [exposition]; Galeries nationales du Grand Palais, Paris, 10 avril-28 juillet 1986*, Paris, Réunion des musées nationaux, 1986.
- PLACHÝ Tomáš, *et al.*, « Monitoring of Mechanical Properties Evolution of the Cast Gypsum », *Procedia Engineering*, 48 (2012), p. 562-567.
- PONCELET François, « Regards actuels sur la muséographie d'entre-deux-guerres », *CeROArt*, 2 (2008) [En ligne : 16 juin 2019 ; URL : <http://journals.openedition.org/ceroart/565>].
- PONS Bruno, « Les cadres français du XVIII^e siècle et leurs ornements », *Revue de l'Art*, 76 / 1 (1987), p. 41-50.
- POWELL Christine, *et al.*, « Overview of the gilded objects treated for the British Galleries », *Conservation Journal*, 39 (2001), p. 10-11.
- POWELL Christine, ALLEN Zoë, « Picture and mirror frames: Reflections on treatment past, present and future », *Conservation Journal*, 50 (2005), p. 43-45.
- PRAKAYPUN Wichit et JINAWATH Supatra, « Comparative effect of additives on the mechanical properties of plasters made from flue-gas desulfurized and natural gypsums », *Materials and Structures*, 36 / 1 (2003), p. 51-58.
- PRESSOUYRE Sylvia, « Les fontes de Primatice à Fontainebleau », *Bulletin Monumental*, 127 / 3 (1969), p. 223-239.
- RAMAKRISHNAN N. et ARUNACHALAM V. S., « Effective elastic moduli of porous solids », *Journal of Materials Science*, 25 / 9 (1990), p. 3930-3937.
- RANACHOWSKI Zbigniew, *et al.*, « Mechanical and Non-Destructive Testing of Plasterboards Subjected to a Hydration Process », *Materials*, 13 / 10 (2020), p. 1-18.
- RAWLINSON-MAZERI Emily, « Bertelot et Kulikowski au Luxembourg. Conservation d'un exceptionnel ensemble de moulages », *In Situ*, 28 (2016) [En ligne : 19 novembre 2022 ; URL : <http://journals.openedition.org/insitu/12594>].
- REHHOFF Lea, *et al.* (dir.), « Plasters: Gypsum or Calcite? A Preliminary Case Study of Syrian Plasters. », *Paléorient*, 16 / 2 (1990), p. 79-87.
- REICHEL Alexander, *et al.*, *Plaster, render, paint and coatings : details, products, case studies*, Bâle, Birkhäuser, 2004.
- RICHTER Gisela M. A., « An Aristogeiton from Baiæ », *American Journal of Archaeology*, 74 / 3 (1970), p. 296-297.

- RICO MARTINEZ Lourdes et MARTINEZ CABETAS Celia (éd.), *Diccionario técnico Akal de conservación y restauración de bienes culturales*, Madrid, Ediciones Akal (Akal/diccionario técnico, 2), 2003.
- RIONNET Florence, *L'atelier de moulage du musée du Louvre : 1794-1928*, Paris, Réunion des musées nationaux (Notes et documents des musées de France), 1996.
- RISDONNE Valentina, *et al.*, « Materials and Techniques for the Coating of Nineteenth-century Plaster Casts: A Review of Historical Sources », *Studies in Conservation*, 67 / 4 (2022), p. 186-208.
- RISDONNE Valentina, *et al.*, « The Victoria and Albert Museum Plaster Casts by the Nineteenth-Century Workshops of the Notre-Dame Cathedral: Scientific Analysis and Conservation », *Heritage*, 5 / 4 (2022), p. 3427-3445.
- ROBCIS Dominique, *et al.*, « Gold Leaf Alloys Specifically Designed for Conservation », dans MENON Raghu, *et al.* (éd.), *Proceedings of the interim meeting of the ICOM-CC Metals working group*, 26-30 septembre 2016, New Delhi, Inde, Paris, ICOM-CC, 2016, p. 16.
- ROBIN Juliette, *Conservation-restauration d'un relief en plâtre d'Auguste Rodin, pour un des pilastres de la Porte de l'Enfer (vers 1885, Meudon, musée Rodin). Étude de l'influence de l'état hydrique sur la déformabilité du plâtre*, Mémoire de Master, Paris, Institut national du patrimoine, 2017.
- ROBIN DUPIRE Juliette, « Étude et restauration d'un relief en plâtre pour un des pilastres de la Porte de l'Enfer d'Auguste Rodin, musée Rodin. Recherche de traitements adaptés à la restauration d'une œuvre contenant des sels. », *CeROArt*, EGG 6 (2017) [En ligne : 29 mai 2018 ; URL : <http://journals.openedition.org/ceroart/5322>]
- ROBIN DUPIRE Juliette, *et al.*, « Histoire des pratiques de comblement de lacunes d'objets en plâtre : le cas de la collection de cadres du XIXe siècle et la collection de statuaire moulée de la gypsothèque du musée du Louvre », *Technè*, 2020, p. 104-113 [En ligne : 08 décembre 2021 ; URL : <http://journals.openedition.org/technè/8218>]
- ROBIN DUPIRE Juliette, *et al.*, « Treating gypsum plaster cast artifacts by fillers: chemical and mechanical evaluation », *The European Physical Journal Plus*, 138 / 6 (2023), p. 1-11 [En ligne : 08 juin 2023 ; URL: <https://link.springer.com/10.1140/epjp/s13360-023-04069-z>]
- ROELOFS Isabelle et PETILLION Fabien, *La couleur expliquée aux artistes*, Paris, Éditions Eyrolles, 2012.
- ROJO Amandine, *Étude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie*, Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2013, [En ligne : <https://www.theses.fr/2013ISAR0024>].
- ROJO Amandine, *et al.*, « Kinetics of internal structure evolution in gypsum board exposed to standard fire », *Journal of Fire Sciences*, 31 / 5 (2013), p. 395-409.
- RÖMICH Hannelore (éd.), *Recent advances in glass, stained glass, and ceramics conservation 2013*, International Council of Museums et Corpus Vitrearum Medii Aevi, Zwolle, SPA Uitgevers, 2013.
- ROSATO Luisa, *et al.*, « Study and evaluation of nano-structured cellulose fibers as additive for restoration of historical mortars and plasters », *Materials Today: Proceedings*, 4 / 7 (2017), p. 6954-6965.

- ROUSSEL Nicolas et LANOS Christophe, « Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test », *Applied Rheology*, 13 / 3 (2003), p. 132-141.
- RUBBO Marco, *et al.*, « The Five Twin Laws of Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): A Theoretical Comparison of the Interfaces of the Penetration Twins », *Crystal Growth & Design*, 12 / 6 (2012), p. 3018-3024.
- RUBBO Marco, *et al.*, « Morphology of gypsum: a case study », *Crystal Research and Technology*, 46 / 8 (2011), p. 779-783.
- SÁEZ-PÉREZ M. Paz, *et al.*, « Characterization and chromatic evaluation of gypsum-based pastes for construction and heritage restoration », *Construction and Building Materials*, 307 (2021), p. 1-10.
- SALAVESSA Eunice, *et al.*, « Historical plasterwork techniques inspire new formulations », *Construction and Building Materials*, 48 (2013), p. 858-867.
- SALIMNEJAD Behrooz, « Formulating gesso fills for discrimination by X-radiography », *WAG Postprints (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation)*, Miami, AIC, 2002, p. 81-84.
- SALIMNEJAD Behrooz, « Formulating gesso fills with bismuth oxide for discrimination by X-radiography », *WAG Postprints (Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation)*, Minneapolis, AIC, 2005, p. 71-76.
- SANAHUJA Julien, *Impact de la morphologie structurale sur les performances mécaniques des matériaux de construction : application au plâtre et à la pâte de ciment*, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, France, 2008.
- SANTOS Tânia, *et al.*, « Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters », *Construction and Building Materials*, 254 (2020), p. 1-11.
- SANZ Joaquim, *et al.*, « Gypsum », *Elements and Mineral Resources*, Cham, Springer International Publishing, 2022, p. 355-357 [En ligne : 11 décembre 2022 ; URL : https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-85889-6_89].
- SAWICKI Malgorzata, *Research into non-traditional gilding techniques as a substitute for traditional matte water-gilding*, Thèse de doctorat, University of Western Sydney, 2008, [En ligne : 15 janvier 2023 ; URL : <https://researchdirect.westernsydney.edu.au/islandora/object/uws%3A7067/>].
- SHELLMANN Nanke C., « The effect of consolidants on the mechanical fracture behaviour of gesso-type foundations in multilayered decorative coatings », [*Online Proceedings of the CCI Symposium 2011 - Adhesives & Consolidants for Conservation: Research & Applications, Ottawa, 17-21 Oct 2011*], CCI, Ottawa, 2011, [En ligne : 06 décembre 2022 ; URL : https://www.academia.edu/4219598/The_effect_of_consolidants_on_the_mechanical_fracture_behaviour_of_gesso_type_foundations_in_multilayered_decorative_coatings].
- SAYRE Edward V., « Deterioration and restoration of plaster, concrete and mortar. », dans *Preservation and conservation: principles and practices. Proceedings of the North American International Regional Conference, Williamsburg, September 10-16 1972*, Washington, The Preservation Press, 1976, p. 191-201.
- SCHULZ Annette, *Gipsplastiken: Geschichte - Materialkunde - Reinigung von ungerasteten Gipsoberflächen : Diplomarbeit am Institut für Technologie der Malerei*

- der Staatlichen Akademie der bildenen [bildenden] Künste Stuttgart*, Stuttgart, Institut für Technologie der Malerei, 1992.
- SEARLE Mark, « A 19th century British compo frame: a flexibly traditional approach to conservation », *The Frame Blog*, (2016) [En ligne : 08 décembre 2021 ; URL : <https://theframeblog.com/2016/10/29/a-19th-british-century-compo-frame-a-flexibly-traditional-approach-to-conservation/>].
- SECK Mamadou Diaga, *Compréhension des mécanismes de séchage dans les matériaux de construction : cas du plâtre*, Thèse de doctorat, Paris Est, 2015, [En ligne : <http://www.theses.fr/2015PESC1154>].
- SENF Luciano, *et al.*, « Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars », *Materials Science and Engineering: A*, 532 (2012), p. 354-361.
- SENF Luciano, *et al.*, « Development of multifunctional plaster using nano-TiO₂ and distinct particle size cellulose fibers », *Energy and Buildings*, 158 (2018), p. 721-735.
- SHORER P. H. T., « The Conservation and Restoration of Romano-British Wall-Plaster », *The British Museum Quarterly*, 35 / ¼ (1971), p. 200-205.
- SIMON Jacob, *The art of the picture frame: artists, patrons and the framing of portraits in Britain*, Londres, National portrait gallery, 1996.
- SINGH N.B. et MIDDENDORF Bernhard, « Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization », *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 53 / 1 (2007), p. 57-77.
- SINHA-RAY Suman, *et al.*, « Shear and elongational rheology of gypsum slurries », *Applied Rheology*, 21 / 6 (2011), p. 1-8.
- SPINI Hugo, *Formulation et évaluation de comblements pour la conservation-restauration de biens culturels en plâtre*, Rapport de stage de Master, Paris Centre, 2017.
- STAHL E.-E., DE SAINT-VICTOR, SAULO J., *Nouveau manuel complet du fabricant de cadres, passe-partout, châssis, encadrements, etc. : suivi de la restauration des tableaux et du nettoyage des gravures, estampes, etc.*, Paris, L. Mulo (Encyclopédie Roret), 1896.
- STORDEUR Danielle, « Des crânes surmodelés à Tell Aswad de Damascène (PPNB - Syrie) », *Paléorient*, (Paleorient and CNRS Editions, CNRS Editions), 29 / 2 (2003), p. 109-115.
- SUDMALIS Michael et SHEIKHOESLAMI Roya, « Coprecipitation of CaCO₃ and CaSO₄ », *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78 / 1 (2000), p. 21-31.
- Syndicat national des industries du plâtre, *L'Exploitation du gypse en France*, Paris, SNIP, 1983.
- Syndicat national des industries du plâtre, *Le Plâtre : physico-chimie, fabrication et emplois*, Paris, Eyrolles, 1982.
- THERRIEN Lyne, *L'histoire de l'art en France : genèse d'une discipline universitaire*, Paris, Editions du C.T.H.S., 1998.
- THIEL P. J. J. van et BRUYN KOPS C. J. de, *Prijst de lijst: de Hollandse schilderijlijst in de zeventiende eeuw*, Amsterdam : Den Haag, Rijksmuseum ; Staatsuitgeverij, 1984.

- THIRUMALINI Selvaraj, *et al.*, « Experimental investigation on physical and mechanical properties of lime mortar: Effect of organic addition », *Journal of Cultural Heritage*, 31 (2018), p. 97-104.
- THORNTON Jonathan, « A Brief History and Review of the Early Practice and Materials of Gap-Filling In the West », *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 37 / 1 (1998), p. 3-22.
- THORNTON Jonathan, « Minding the gap: filling losses in gilded and decorated surfaces », dans BUDDEN Sophie (dir.), *Gilding and surface decoration: papers given at a conference held by the UKIC Restoration 91, 16 October 1991*, Londres, United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works of Art, 1991, p. 12-17.
- THORNTON Jonathan, « The use of nontraditional gilding methods and materials in conservation », dans BIGELOW Deborah (dir.), *Gilded wood: conservation and history*, Madison, Sound View Press, 1991, p. 217-228.
- TONIOLO Lucia, *et al.*, « Mechanical behaviour of lime-based mortars after surface consolidation », *Construction and Building Materials*, 25 / 4 (2011), p. 1553-1559.
- TORRACA Giorgio, *Porous Building Materials: Materials Science for Architectural Conservators*, Rome, ICCROM, 1988 [1981].
- TOUIL Mohamed, *et al.*, « Influence of the mixing water rate on the plaster thermo physical properties: Experimental and dynamic study », *E3S Web of Conferences*, 336 (2022), p. 1-6.
- Union professionnelle des entrepreneurs et artisans plâtriers de France, *Plâtrerie française*, 1952.
- VAN DRIESSCHE Alexander E. S., *et al.*, (éd.), « Calcium Sulfate Precipitation Throughout Its Phase Diagram », dans *New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth*, Cham, Springer, 2017, p. 227-256.
- VAN DRIESSCHE Alexander E. S., *et al.*, « Calcium sulfate precipitation pathways in natural and engineered environments », *Chemical Geology*, 530, (2019), p. 1-22.
- VASQUES DIAS Miko (éd.), *Restoring joints, conserving structures: 10th International Symposium on Wood and Furniture Conservation [Stichting Ebenist, Amsterdam, 8 - 9 October 2010]*, De Rode Hoed, Keizersgracht 102, Amsterdam, Stichting Ebenist, 2010.
- VASARI Giorgio, dans Brown Gerald Baldwin (éd.), *Vasari on technique: being the introduction to the three arts of design, architecture, sculpture and painting, prefixed to the lives of the most excellent painters, sculptors and architects*, New York, Dover, 1960.
- VASSILIEVA O., « The experience of the conservation of the plaster sculpture from the collection of the State Tretyakov Gallery », dans Riederer J. (éd.), *[8th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone]*, Berlin, Möller Druck und Verlag, 1996, p. 1631-1634.
- VERGÈS-BELMIN Véronique, *ICOMOS-ISCS: illustrated glossary on stone deterioration patterns*, English-French version, Paris, ICOMOS (Monuments and sites, 15 15), 2008.
- VIGUERIE Laurence de, *et al.*, « Re-Interpretation of Old Master practices through optical and rheological investigation: the presence of calcite », *Comptes Rendus. Physique*, (2018) [En ligne : 22 juin 2021 ; URL : <https://hal.science/hal-02401167>]

VITRUVÉ, *L'architecture*, Paris, C.L.F. Panckoucke, 1847, volume 2.

WATTEVILLE Caroline de, *Collection Thyssen-Bornemisza: guide des oeuvres exposées*, Lugano, Fondation Thyssen-Bornemisza, 1989.

WEILER Bernd et GROSSE Christian U., « Elastic constants, their dynamic measurement and calculation », *Otto Graff Journal*, 6 (1995), p. 1-16.

WILSON-YANG K. M. et BURNS George, « The Stability of the Tomb of Nefertari 1904-1987 », *Studies in Conservation*, 34 / 4 (1989), p. 153-170.

XIE An-Jian, *et al.* « Crystal growth of calcium carbonate with various morphologies in different amino acid systems », *Journal of Crystal Growth*, 285 / 3 (2005), p. 436-443.

YANG Hua-Gui, *et al.*, « Rheological Behavior of Titanium Dioxide Suspensions », *Journal of Colloid and Interface Science*, 236 / 1 (2001), p. 96-103.

ZARGA Yosra, *et al.*, « Study of calcium carbonate and sulfate co-precipitation », *Chemical Engineering Science*, 96 (2013), p. 33-41.

ZARGA Yosra, *et al.*, « Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Simple and Mixed Precipitations », *Journal of New Sciences*, 8 (2) (2014), p. 7-16.

Table des matières

Remerciements	p. 1
Résumé - Abstract	p. 4
Sommaire général	p. 7
<u>Introduction</u>	p. 13
<u>Chapitre I</u>	
Conservation-restauration des artefacts en plâtre	p. 23
I. Collections et artefacts en plâtre	p. 27
1. Usages dans un contexte artistique	p. 27
2. Collections muséales étudiées	p. 30
a. Historique de la gypsothèque	p. 30
b. Collection des cadres du Louvre et histoire générale	p. 34
3. Technique et mise en œuvre	p. 37
a. Références techniques	p. 37
b. Techniques de la statuaire	p. 39
c. Techniques des cadres du XIX ^e siècle	p. 43
d. Polychromies et couches superficielles	p. 47
<i>Mise en œuvre des formulations</i>	p. 48
<i>Mise en œuvre des ornements du cadre ICMO 190</i>	p. 50
4. Statuts et fonctions	p. 52
a. Premiers statuts et dévalorisation	p. 52
b. Études et revalorisation	p. 55
c. Patrimonialisation	p. 56
II. Conservation-restauration	p. 58
1. État de la recherche	p. 58
2. Pratiques générales	p. 62
a. Évolution et méthodes actuelles	p. 62
b. Les praticiens des deux spécialités	p. 63
c. Documentation des interventions	p. 64
3. Altérations et problématiques du plâtre	p. 64
a. Structure	p. 65
b. Surface	p. 66
c. Problématiques	p. 67
4. Traiter les pertes de matière	p. 68
a. Pertes de matière : lacune et manque	p. 68
b. Traitement : intervention de comblement	p. 70
c. Méthodes, approche théorique, mise en œuvre des matériaux	p. 71
III. Interventions de comblement	p. 74
1. Étude des sources	p. 74
a. Références bibliographiques	p. 74
b. Enquête	p. 78
<i>Questionnaire destiné aux professionnel·les</i>	p. 83

2. Étude des collections	p. 85
a. Méthodologie type « chantier des collections »	p. 85
b. Corpus de la gypsothèque	p. 85
c. Corpus des cadres du XIX ^e siècle	p. 89
3. Synthèse des pratiques	p. 91
a. Pratiques « anciennes »	p. 91
b. Des années 1980 aux années 2000	p. 92
c. Depuis les années 2000	p. 93
Synthèse	p. 96

Chapitre II

Matériaux et caractérisations physico-chimiques à l'échelle microscopique	p. 99
I. Matériaux de l'étude	p. 103
1. Présentation	p. 103
a. Sélection	p. 103
b. Critères	p. 105
2. État de l'art	p. 106
a. Plâtre	p. 106
b. Autres matériaux	p. 108
II. Caractéristiques et descriptions techniques	p. 114
1. Fabrication et production	p. 114
a. Nature, phases	p. 114
b. Cuisson et battage	p. 118
c. Gâchage et cristallisation	p. 119
2. Descriptions structurelles	p. 122
a. Réseau cristallin	p. 122
b. Liaisons chimiques	p. 126
c. Porosité	p. 127
3. Caractéristiques des additifs et autres matériaux	p. 128
a. Carbonate de calcium	p. 128
b. Dioxyde de titane	p. 130
c. Craie de Bologne	p. 131
d. Colle animale	p. 132
III. Caractérisations physico-chimiques	p. 134
1. Méthode	p. 134
a. Matériaux et formulations	p. 134
b. Microscope optique	p. 135
c. Microscope électronique à balayage	p. 135
d. Analyse élémentaire	p. 136
2. Résultats de l'étude en microscopie	p. 136
a. État brut	p. 136
b. Formulations pures	p. 140
c. Formulations à charges différenciables	p. 144
3. Résultats des analyses EDS	p. 148
<i>Analyse d'un cadre du XVIII^e siècle</i>	p. 153
Synthèse	p. 157

Chapitre III

Étude des matériaux à l'état fluide et propriétés rhéologiques

I. Présentation

- 1. Définitions et principes généraux p. 163
 - a. Notions de comportement p. 167
 - b. Types de fluides p. 168
 - c. Cas des suspensions minérales p. 172
- 2. État de l'art p. 174
 - a. Plâtre p. 174
 - b. Additifs et autres formulations p. 181
- 3. Apports en conservation-restauration p. 187
 - a. Buts de l'étude p. 187
 - b. Description des textures p. 188
 - c. Taux de cisaillement en pratique de comblement p. 189

II. Méthodes

- 1. Moyens et équipements p. 192
 - a. Rhéomètre et traitement des données p. 192
 - b. Préparation et mise en place p. 193
- 2. Essais p. 194
 - a. Caractérisation dynamique p. 194
 - b. Caractérisation quasi-statique p. 196
- 3. Traitement des données p. 198
 - a. Caractéristiques calculées p. 198
 - b. Comportement rhéologique et courbes d'écoulement p. 199
 - c. Modélisation p. 200

III. Résultats et modélisations

- 1. Comportement rhéologique général p. 202
 - a. Fraction volumique solide p. 202
 - b. Description du comportement rhéologique p. 204
 - c. Structuration des mélanges solide-liquide, sous cisaillement simple p. 211
- 2. Plâtre seul p. 214
 - a. Seuil limite de cisaillement p. 214
 - b. Consistance p. 216
 - c. Variation selon le choix de l'hémihydrate β p. 217
- 3. Effet du carbonate de calcium p. 220
 - a. Seuil limite de cisaillement p. 220
 - b. Consistance p. 223
- 4. Effet du dioxyde de titane p. 226
 - a. Seuil limite de cisaillement p. 226
 - b. Consistance p. 227
- 5. Formulations alternatives p. 228
- Synthèse p. 230

Chapitre IV

Études des propriétés mécaniques à l'état solide	p. 237
I. Présentation	p. 241
1. Définitions et caractéristiques	p. 241
a. Masses volumiques	p. 241
b. Contraintes mécaniques et comportements	p. 242
2. État de l'art	p. 245
a. Plâtre	p. 245
b. Effet des additifs	p. 252
c. Effet du fibrage	p. 260
3. Apports en conservation-restauration	p. 266
a. Buts de l'étude	p. 266
b. Estimations des propriétés selon les aspects visuels	p. 268
II. Méthode	p. 269
1. Présentation générale	p. 269
a. Protocole expérimental	p. 269
b. Protocole de préparation des formulations et échantillonnage	p. 270
c. Masse volumique	p. 273
2. Moyens expérimentaux et traitement des données	p. 274
a. Essais de compression et flexion 4 points	p. 274
b. Mesure de fréquence de résonance	p. 281
III. Résultats	p. 283
1. Plâtres Molda® 3 Normal et EXTHA®	p. 283
a. Masses volumiques	p. 283
b. Comportement et résistance à la contrainte	p. 288
c. Module de Young et module E dynamique	p. 291
d. Porosité	p. 294
2. Addition de carbonate de calcium	p. 295
a. Masses volumiques	p. 295
b. Comportement et résistance à la contrainte	p. 298
c. Module de Young et module E dynamique	p. 300
3. Addition de dioxyde de titane	p. 303
a. Masses volumiques	p. 303
b. Comportement et résistance à la contrainte	p. 306
c. Module de Young et module E dynamique	p. 309
4. Coefficient de Poisson	p. 312
5. Autres formulations	p. 314
Synthèse	p. 316

Chapitre V

Évaluation d'artefacts restaurés et suivi dans le temps	p. 323
I. Cas d'étude : suivi de trois artefacts	p. 327
1. Présentation	p. 327
a. Contextes et besoins	p. 327
b. Méthodes d'évaluation	p. 329
2. Artefacts sélectionnés	p. 330
a. Relief pour un des pilastres de <i>la Porte de l'Enfer</i> , musée Rodin	p. 332
b. Cadre ICMO 190, musée du Louvre	p. 339
c. <i>Molosse</i> de la gypsothèque du Louvre – Gy 0236	p. 346
3. Contextes de conservation	p. 351
II. Méthodologies développées pour le suivi de l'état de conservation des artefacts	p. 354
1. Numérisation 3D et corrélation d'images	p. 354
2. Suivi de déplacements localisés par capteurs LVDT	p. 356
III. Résultats	p. 360
1. Présentation par méthode	p. 360
a. Numérisation 3D et corrélation d'images	p. 360
b. Évaluation du cadre et des déplacements par capteurs	p. 376
c. Analyse des contextes de conservation	p. 381
2. Aspects mécaniques et altérations	p. 384
a. Évaluation des mouvements du bois	p. 384
b. Résistance mécanique du plâtre	p. 388
3. Apports en conservation-restauration	p. 389
a. Suivi par numérisation 3D	p. 389
b. Suivi par capteurs de déplacement	p. 390
Synthèse	p. 391
 <u>Livret technique</u>	 p. 397
 <u>Conclusion et perspectives</u>	 p. 453

Annexe I	p. 468
Réponses à l'enquête	p. 470
Synthèse des résultats de l'enquête	p. 491
Tableaux de synthèse des prospections de corpus	p. 492
Collection de cadres du musée du Louvre	p. 492
Gypsothèque du musée du Louvre	p. 500
Annexe II	p. 504
Fiches techniques des matériaux de l'étude	p. 506
Annexe III	p. 514
Fraction volumique solide Φ par type de matériaux et formulations.	p. 516
Indice de structuration n libre	p. 517
Coefficients de détermination linéaire R^2 pour les formulations en fonction de la valeur de l'indice n .	p. 518
Contrainte seuil τ_0	p. 519
Courbes d'écoulement en consistance en fonction du taux de cisaillement	p. 520
Valeurs de consistances	p. 523
Estimations des fractions volumiques solides maximales et de percolation	p. 524
Annexe IV	p. 526
Masses volumiques des formulations	p. 528
Contraintes maximales en compression	p. 529
Contraintes maximales en flexion 4 points	p. 530
Modules de Young et d'élasticité dynamique	p. 531
Coefficient de Poisson	p. 532
Fiche technique des jauges de déformation	p. 533
Annexe V	p. 534
Observation et analyse MEB-EDS des sels dans le plâtre du relief de Rodin, LRMH	p. 536
Rapport d'analyse des sels dans le plâtre du relief de Rodin, laboratoire ERM	p. 537
Fiche technique : scanner 3D CREAFORM	p. 539
Fiche technique : capteur de déplacement LVDT	p. 540
Corrélations 3D du relief de Rodin	p. 544
Corrélations 3D du cadre ICMO 190	p. 548
Corrélations 3D du <i>Molosse</i>	p. 553
Essais de chargement statique du cadre ICMO 190	p. 557
<u>Sources et bibliographie</u>	p. 560
<u>Table des matières</u>	p. 582