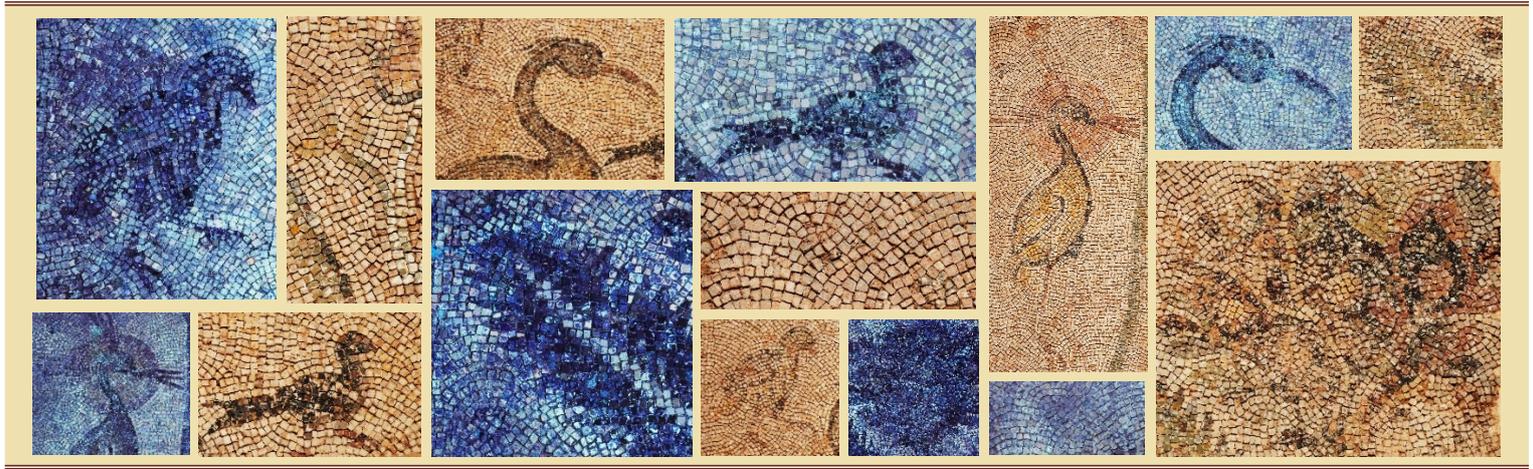




# Traitement curatif et protocole de conservation-restauration d'une mosaïque paléochrétienne déposée originaire du nord de la Syrie

- Collection archéologique de l'Archäologisches Institut –



Mémoire présenté par :

Regnault Audrey

Pour l'obtention du :

Master of Arts HES-SO in Conservation-restoration  
Orientation objets archéologiques et ethnographiques

Année académique 2020-2021

Remise du travail : 19.07.2021 (*version corrigée* : 29.09.2021)

Jury : 25.08.2021

Nombre de pages : 109 (*175 avec les annexes*)



## **Engagement**

*« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »*

À Neuchâtel, le 19/07/2021

Audrey Regnault

## Remerciements

Je tiens à exprimer ici mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de diplôme.

Tout d'abord, je souhaite remercier l'Institut d'Archéologie de Zurich pour m'avoir confié ce projet particulièrement enrichissant en tout point. Plus précisément, je souhaite remercier Prof. Dr. Christoph Reusser, directeur de la collection archéologique, M. Martin Bürge, conservateur de la collection et mon maître de stage, M. Urs Lang, conservateur-restaurateur, pour leur confiance, leur disponibilité et leur engouement pour ce mémoire. Je remercie M. Frank Tomio, photographe du musée pour m'avoir aidé à immortaliser les étapes de mon travail. Je remercie le personnel de l'atelier de menuiserie de l'Université d'archéologie pour sa participation à la découpe des supports. Je tiens à remercier le personnel de l'Institut d'Archéologie pour leur aide lors de la manipulation de la mosaïque.

Je remercie ma mentor, Mme Célia Casado, conservatrice-restauratrice indépendante, pour son suivi tout au long du travail, ses conseils et sa relecture.

J'exprime ma reconnaissance envers le collège de diplôme, Dr. Régis Bertholon, directeur de filière, M. Valentin Boissonnas, Mme Hortense de Corneillan, Dr. Christian Degryny et M. Tobias Schenkel, pour leur accompagnement tout au long du projet.

J'adresse un grand merci au laboratoire de conservation-restauration du Sites et musées romains d'Avenches (SMRA) pour m'avoir accueillie dans ses locaux, pour m'avoir fourni les outils et le matériel sans lesquels je n'aurais pas pu réaliser mon étude sur les mortiers allégés.

Je tiens à remercier particulièrement M. Noé Terrapon, conservateur-restaurateur, responsable des monuments pour avoir partagé son expérience, pour sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont grandement enrichi mon travail. Je souhaite remercier tout le personnel du SMRA pour m'avoir accueillie chaleureusement dans leurs locaux et plus précisément M. Francesco Valenti, auxiliaire en conservation-restauration pour le secteur de restauration des monuments pour m'avoir aidée à plusieurs reprises et pour sa bonne humeur.

Je tiens à remercier Dr. Stefan Zumbuhl, professeur à la Haute École spécialisée bernoise (HKB) pour le temps qu'il a consacré à la réalisation des analyses IRTF et aux interprétations des résultats. Je remercie Dr. Nadim Scherrer, chef du laboratoire d'analyse de HKB, pour m'avoir guidée dans le choix des analyses à réaliser.

Je souhaite remercier M. Florian Fazio, collaborateur scientifique à la Haute École de polytechnique du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, pour ses conseils sur les tests de résistance mécanique.

Je remercie Dr. Aurelio Borzì, chercheur post-doctoral au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (EMPA) et Prof. Antonia Neels, directrice du centre d'analyse des rayons X de l'EMPA pour le temps consacré aux analyses XRD et à leurs interprétations.

Je remercie tous les professionnels de la conservation-restauration pour leurs conseils durant ce travail, M. Olivier Guyot, conservateur-restaurateur et intervenant à la HE-Arc et Mme Évelyne Chantriaux, conservatrice-restauratrice et intervenante à la HE-Arc pour leurs hypothèses concernant l'identification des tesselles. M. Patrick Blanc, responsable du laboratoire de conservation de mosaïque du Musée d'Arles Antique et Mme Kusi Colonna-Petri pour leur intérêt pour ce sujet, pour m'avoir conseillée et confortée dans mes choix.

Je tiens remercier à nouveau mon maître de stage, Urs, pour sa bienveillance et son soutien tout au long du projet.

Merci à mes amis, à mes camarades de promo qui ont rendu cette aventure plus belle. Je remercie particulièrement mes chères amies Capucine et Laura pour leur relecture et leur soutien moral sans faille.

Un grand merci à mes parents, à mon frère, à Joane et à tous mes proches sur qui j'ai toujours pu compter.

## **Notes aux lecteurs**

- Sauf mention contraire, tous les droits sont réservés à ©Audrey Regnault HE-Arc CR.
- Les mots suivis d'un astérisque (\*) sont définis dans le glossaire en p.106.
- La bibliographie est divisée selon les chapitres principaux du mémoire, les références mentionnées dans les annexes sont réparties dans les chapitres auxquelles elles sont associées.

## Résumé

Ce mémoire est dédié à l'étude et au traitement d'une mosaïque paléochrétienne déposée, supposée être originaire du nord de la Syrie. Sa provenance incertaine est liée au contexte de dépose illégale probablement réalisée à des fins lucratives. La mosaïque, découverte en 2012 dans un dépôt, présente un état de conservation précaire. Les tesselles composant le *tessellatum* sont uniquement maintenues par un textile encollé sur leur surface, le mortier d'origine a totalement disparu. L'adhésif, désormais défailant, entraîne la dissociation des tesselles. Actuellement conservée dans l'Institut d'archéologie de l'Université de Zurich, il a été estimé qu'une restauration était nécessaire pour sauvegarder la mosaïque de la destruction, pour permettre son exposition et éventuellement sa restitution.

Ce mémoire présente, dans un premier temps, une étude historique réalisée dans l'optique de mieux comprendre les enjeux liés à la présence d'objets issus du trafic illégal dans des collections étatiques. En plus d'obtenir une vision plus concrète sur le statut juridique de la mosaïque et sur la tangibilité d'une restitution, cette étape permet l'authentification de la mosaïque à travers l'étude de la composition des décors.

Dans un second temps, l'histoire matérielle de la mosaïque est abordée à travers une étude technologique et un constat d'état de la mosaïque. L'absence de mortier allant dans le sens de l'hypothèse d'une dépose illégale engendre des contraintes atypiques pour la proposition de traitement. En effet, cet état de conservation particulier a mené à la réalisation d'une étude approfondie pour la création d'un nouveau support. Une première étude présente les différentes pratiques existantes actuellement. Puis à partir du modèle sélectionné – système composé d'une couche d'intervention et d'un panneau en nid d'abeilles encollé avec une résine époxy - une seconde étude plus pointue est présentée : elle aborde la question de l'utilisation d'un mortier allégé à base de chaux ou de résine synthétique pour réaliser la couche d'intervention. L'objectif de la recherche était de proposer un mortier adapté aux contraintes spécifiques de cette mosaïque, c'est-à-dire stable, léger, ayant une résistance suffisante à la flexion et au cisaillement puisque le musée souhaite l'exposer à la verticale. Cette étude présentée dans le chapitre 3 aboutit à la conclusion qu'un mortier allégé à base de chaux, de perlite et de sable est adapté pour la restauration de cette mosaïque. De plus, l'élasticité et la résistance mécanique du mortier sélectionné répondent aux contraintes imposées par la configuration de cet objet.

Les dimensions importantes de la mosaïque ainsi que les temps d'immobilisation non négligeables lors du traitement ont limité la quantité d'interventions réalisées durant ce travail. De plus, la seconde particularité de cet objet est la composition de l'adhésif utilisé pour l'entoilage, sa base en caoutchouc le rend par nature insoluble, donc irréversible. Des tests de désentoilage ont dû être réalisés afin de trouver la méthode la moins invasive : l'emploi de solvants tels que les cétones et les esters a été probant grâce à la présence d'un second adhésif entre l'adhésif à base de caoutchouc et les tesselles. Le dernier chapitre de ce mémoire est donc divisé en deux parties : la présentation des tests et des interventions réalisés pour la stabilisation de la mosaïque, c'est-à-dire les interventions de conservation-curative, et la présentation des tests réalisés dans l'objectif de définir un protocole de conservation-restauration.

## **Abstract**

This thesis is dedicated to the study and treatment of an unearthed early Christian mosaic assumed to come from northern Syria. Its uncertain origin is related to its illegal excavation, which was probably carried out for lucrative purposes. This mosaic, discovered in 2012 in a depository, is in a dangerous state of conservation. The tesserae forming the tessellatum are only held together by a glued textile. The original mortar has completely disappeared. The adhesive is no longer effective, which leads to the detachment of the tesserae. Currently conserved in the Institute of Archaeology of the University of Zurich, it has been estimated that a restoration was necessary to save the mosaic from destruction, to allow its exhibition and eventually its restitution.

This thesis introduces, first, an historical study, which has been carried out in order to improve our comprehension regarding the issues of the presence of illegally exported objects in state collection. In addition to obtaining a more concrete vision of the legal status of the mosaic and the tangibility of its restitution, this study allows the authentication of the mosaic through the analysis of the composition of the motifs.

In a second phase, the material history of the mosaic is explored through a technological study and an assessment of the mosaic's condition. The absence of mortar, which confirms the hypothesis of an illegal removal, generates unusual requirements for the treatment proposal. Indeed, this state of conservation led to an in-depth study for the creation of a new support. The first study presents the different current and past practices. Then, based on the selected model - a system composed of an intervention layer and a honeycomb panel glued with an epoxy resin - a second, more detailed study is presented: it questions the use of a lightweight mortar based on lime or synthetic resin to realize the intervention layer. The aim of the research was to propose a mortar adapted to the specific constraints of this mosaic, i.e. stable, lightweight, with sufficient resistance to bending and shearing as the museum wishes to exhibit it vertically. The study presented in the third chapter concludes that the lime, perlite and sand based mortar is suitable for the mosaic's restoration. In addition, the selected mortar meets the requirement imposed by the mosaic's configuration in terms of elasticity and mechanical strength.

The large size of the mosaic and the considerable downtime required for the treatment have limited the number of interventions realized during this work. Moreover, the second feature of this object is the composition of the adhesive used for the facing; made of rubber, it is by nature insoluble and therefore irreversible. Tests of removal had to be carried out in order to find the least invasive method. The use of solvents such as ketones and esters were successful due to the presence of a second adhesive layer between the rubber-based adhesive and the tesserae. The last chapter of this thesis is therefore divided into two parts: the presentation of the tests and interventions carried out for the stabilisation of the mosaic, i.e. the curative conservation, and the presentation of the tests carried out in order to define a restoration protocol.

## **Zusammenfassung**

Diese Masterarbeit ist der Untersuchung und Behandlung eines deponierten frühchristlichen Mosaiks gewidmet, welches höchstwahrscheinlich aus Nordsyrien stammt. Die ungewisse Herkunft hängt mit der illegalen Ausgrabung zusammen, die sicherlich aus Profitgründen durchgeführt wurde. Das Mosaik, das 2012 in einem Lagerhaus entdeckt wurde, befindet sich in einem schlechten Zustand. Die Tessellen die das Tessellatum bilden, halten nur noch durch geklebtes Gewebe zusammen. Der ursprüngliche Mörtel fehlt komplett. Der inzwischen fehlerhafte Kleber des zugefügten Gewebes führt zu einer Ablösung der Tessellen. Zurzeit ist das Objekt im archäologischen Institut der Universität Zürich aufbewahrt. Es wurde festgestellt, dass eine Restaurierung notwendig ist, um das Mosaik vor dem vollständigen Zerfall zu schützen, aber auch für eine spätere Ausstellung oder sogar eine potenzielle Rückgabe ermöglichen.

Zuerst befasst sich diese Masterarbeit mit einer geschichtlichen Untersuchung, um den Umgang mit illegal exportierten Objekten in staatlichen Sammlungen besser zu verstehen. Neben einem besseren Einblick in den Rechtsstatus des Mosaiks sowie die Betrachtung einer konkreten Rückgabe, erlaubte diese Studie die Authentisierung des Mosaiks anhand einer Analysierung der Zusammensetzung der Motive.

Im zweiten Schritt wurde die Kulturgeschichte des Mosaiks mit Hilfe einer Technologiestudie und einer Einschätzung des Zustands untersucht. Das Fehlen von Mörtel, welches die Vermutung einer illegalen Ausgrabung bestätigt, verursacht untypische Vorgehensweisen für die Behandlung. Tatsächlich führt dieser prekäre Erhaltungszustand zu einer tiefergehenden Untersuchung für die Erfindung eines neuen tragenden Grundlages. Diese Studie weist im ersten Schritt die verschiedenen aktuell vorhandenen Methoden auf. Danach am ausgewählten Beispiel - ein Verfahren zusammengesetzt aus einer Interventionsschicht und einer Platte in Wabenstruktur mit Epoxidharz verklebt – eine 2. konkretere Studie wird vorgestellt: diese greift die Benutzung von verdünntem Mörtel auf Basis von Kreide oder Kunstharz auf, um eine Interventionsschicht herzustellen. Das Ziel war einen geeigneten Mörtel für diese besonderen Probleme des Mosaiks anzubieten, der stabil, leicht, Zug- und Scherfestig ist, damit das Objekt im Museum hochkant ausgestellt werden kann. Diese vorgestellte Studie im Kapitel 3 gelangt zu der Schlussfolgerung, dass ein leichter Mörtel auf der Basis von Kalk, Perlite und Sand für die Restauration dieses Mosaiks geeignet ist.

Die großen Abmessungen des Mosaiks sowie die beträchtliche Zeit der Immobilisierung, die für die Behandlung benötigt wird, haben die Anzahl der Maßnahmen während dieser Arbeit begrenzt. Darüber hinaus ist die zweite Besonderheit dieses Themas die Zusammensetzung des Klebstoffs des eingeklebten Gewebes; die Basis auf Gummi macht ihn von Natur aus unlösbar, daher irreversibel. Tests für die Entfernung wurden durchgeführt, um eine weniger invasive Methode zu finden: die Nutzung von Lösungsmitteln wie Ketonen und Estern waren erfolgreich da ein zweiter Kleber zwischen dem Kleber auf Gummibasis und der Tessellen vorhanden ist. Das letzte Kapitel der Studie ist deshalb in 2 Bereiche gegliedert: die Präsentation der Tests und die Maßnahmen für die Stabilisierung des Mosaiks, heißt die Eingriffe für eine kurative Konservierung, und die Präsentation von Untersuchungen um ein Konservierungs- - Restaurierungsprotokoll festzulegen.

## Sommaire

<b>ENGAGEMENT</b>	<b>1</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>2</b>
<b>NOTES AUX LECTEURS</b>	<b>3</b>
<b>RESUME</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>6</b>
<b>SOMMAIRE</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>10</b>
<b>1 ÉTUDE HISTORIQUE</b>	<b>11</b>
1.1 FICHE D'IDENTIFICATION	11
1.2 BIOGRAPHIE DE LA MOSAÏQUE	12
1.2.1 L'ART DE LA MOSAÏQUE AU PROCHE-ORIENT	12
1.2.2 RECONTEXTUALISATION DE LA MOSAÏQUE L1357	15
1.2.3 LE TRAFIC ILLICITE DE BIENS ARCHEOLOGIQUES EN SYRIE	16
1.2.4 LA REDECOUVERTE DE LA MOSAÏQUE L1357 AU XXI <sup>E</sup> SIECLE.	17
1.3 LE STATUT DE LA MOSAÏQUE L1357 DANS LA COLLECTION DE L'UNIVERSITE DE ZURICH	18
1.3.1 HISTOIRE DE LA COLLECTION DU MUSEE	18
1.3.2 PLACE DE L'OBJET DANS LA COLLECTION ET VALEURS CULTURELLES	20
1.3.3 LA RESTITUTION DES ŒUVRES EN SUISSE	21
<b>2 ÉTUDE TECHNOLOGIQUE ET EXAMEN DIAGNOSTIQUE</b>	<b>22</b>
2.1 TECHNOLOGIE	22
2.1.1 RAPPEL SUR LA TECHNIQUE DE FABRICATION DES MOSAÏQUES	22
2.1.2 TECHNOLOGIE DE LA MOSAÏQUE L1357	24
2.2 CONSTAT D'ETAT DE LA FACE ARRIERE	28
2.2.1 ALTERATIONS DES MATERIAUX CONSTITUTIFS : <i>TESSELLATUM</i> ET MORTIERS	28
2.2.2 ALTERATION DES MATERIAUX MIS EN ŒUVRE POUR LA DEPOSE	33
2.2.3 CARTOGRAPHIE DES ALTERATIONS	35
2.3 DIAGNOSTIC/PRONOSTIC	36
2.4 IMPACT DES ALTERATIONS SUR LES VALEURS CULTURELLES	37
<b>3 ÉTUDE TECHNIQUE POUR UN NOUVEAU SUPPORT</b>	<b>37</b>
3.1 PROBLEMATIQUE	37
3.1.1 OBJECTIFS	37

3.1.2	PRATIQUES ANCIENNES ET ACTUELLES	38
3.1.3	SUPPORTS ENVISAGES	40
<b>3.2</b>	<b>CHOIX DES MATERIAUX</b>	<b>41</b>
3.2.1	ÉTAT DE LA RECHERCHE	42
3.2.2	CONTRAINTES SPECIFIQUES A LA MOSAÏQUE	44
3.2.3	MATERIAUX SELECTIONNES	45
3.2.4	COMPOSITION DES MORTIERS	51
<b>3.3</b>	<b>PROTOCOLE DES TESTS</b>	<b>53</b>
3.3.1	FLEXION EN 3 POINTS	53
3.3.2	APPLICATION AU CAS DE LA MOSAÏQUE : ESSAIS DE FLEXION	55
3.3.3	CISAILLEMENT	55
<b>3.4</b>	<b>RESULTATS</b>	<b>57</b>
3.4.1	TEST DE FLEXION EN 3 POINTS	58
3.4.2	TESTS DE FLEXION APPLIQUES AU CAS DE LA MOSAÏQUE	61
3.4.3	TESTS DE CISAILLEMENT	62
3.4.4	CROISEMENT DES RESULTATS	64
<b>3.5</b>	<b>DISCUSSION DES RESULTATS ET SELECTION DU MORTIER</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>CONSERVATION-RESTAURATION</b>	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>PROJET DE CONSERVATION CURATIVE</b>	<b>68</b>
4.1.1	OBJECTIFS	68
4.1.2	PROPOSITION DE TRAITEMENT	68
4.1.3	IMPACT DES INTERVENTIONS SUR LES VALEURS CULTURELLES	71
4.1.4	BILAN DU PROJET D'INTERVENTION	72
<b>4.2</b>	<b>TRAITEMENT CURATIF</b>	<b>73</b>
4.2.1	NETTOYAGE	73
4.2.2	CONSOLIDATION ET REMISE EN FORME	74
4.2.3	MISE EN PLACE DU NOUVEAU SUPPORT	75
4.2.4	MANUTENTION EN VUE DU RETOURNEMENT	81
4.2.5	BILAN DES INTERVENTIONS REALISEES	81
<b>4.3</b>	<b>PROJET DE CONSERVATION-RESTAURATION DE LA FACE AVANT</b>	<b>82</b>
4.3.1	CONSTAT D'ETAT APRES LE RETOURNEMENT DE LA MOSAÏQUE	82
4.3.2	PROPOSITION D'INTERVENTION	84
4.3.3	BILAN DES INTERVENTIONS DE CONSERVATION-RESTAURATION A REALISER	91

4.3.4 RECOMMANDATION DE CONSERVATION	93
<b>CONCLUSION</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>95</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>100</b>
<b>LISTES DES TABLEAUX</b>	<b>105</b>
<b>LISTES DES GRAPHIQUES</b>	<b>106</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>106</b>
<b>GLOSSAIRE</b>	<b>107</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>111</b>
I. ILLUSTRATIONS	111
II. PROCESSUS DE FABRICATION ET DE PRISE DE LA CHAUX	116
III. RESULTATS D'ANALYSE DES LIANTS DES MORTIERS	117
IV. IDENTIFICATION DES TESSELLES	123
V. RAPPORTS D'ANALYSES DES ADHESIFS	124
VI. BILAN DE L'ETUDE DE MME CASADO CELIA	127
VII. ÉTUDE THEORIQUE DES CONTRAINTES DE FLEXION APPLIQUEE A L'OBJET	128
VIII. ÉTUDE SUR LA REPARTITION GRANULOMETRIQUE DES MORTIERS	129
IX. RESULTATS DE L'ETUDE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE DES MORTIERS ALLEGES	133
X. TESTS DE DESENTOILAGE	143
XI. PROTOCOLE DE CONSERVATION-RESTAURATION	145
XII. FICHES TECHNIQUES	148
XIII. FOURNISSEURS	174

## Introduction

Le 09 février 2012, M. Bürge, conservateur de la collection archéologique de l'Université de Zurich, découvre une mosaïque\* abandonnée dans un dépôt proche de Zurich. L'état de conservation précaire et les conditions de stockage ne laissent aucun doute : il s'agit d'une œuvre issue du trafic illicite de biens culturels. M. Bürge estime sa datation entre le Ve et le VIe siècle de notre ère et une origine syrienne. Son expertise permet de révéler la nécessité de sauvegarder cette œuvre en perdition et ainsi de permettre son entrée dans les collections de l'Institut d'Archéologie (IA) de Zurich jusqu'à une restitution à qui de droit.

Dans l'attente d'une restitution, le musée souhaite exposer la mosaïque au côté du reste de sa collection. Du fait de ses dimensions importantes : 230 cm sur 87 cm et de la taille limitée des salles d'exposition, le musée souhaite exposer la mosaïque à la verticale. L'état de conservation actuelle ne permet pas une telle scénographie ; en effet, les tesselles\* constituant la mosaïque ne sont aujourd'hui maintenues ensemble que par la présence d'une toile encollée sur la surface avant des tesselles. Le mortier, permettant normalement l'accroche mécanique des tesselles, a totalement disparu. En plus de l'absence de l'assise\*, l'adhésif utilisé pour l'entoilage est désormais défaillant. La perte de son pouvoir adhésif entraîne la dissociation des tesselles. Un traitement est alors nécessaire pour stabiliser la mosaïque et permettre son exposition. L'IA a ainsi vu une opportunité intéressante pour un projet de diplôme de master ; en effet, le caractère atypique de cette mosaïque présente des enjeux de tailles, proportionnels à sa dimension.

Ce travail de master a pour objectif principal la stabilisation et la mise en valeur de la mosaïque mais aspire aussi à la découverte de son histoire à travers l'étude matérielle et immatérielle de l'objet. Le temps à disposition pour la réalisation de ce projet étant insuffisant pour terminer un travail de cette ampleur, il a été convenu qu'un traitement partiel visant à stabiliser la mosaïque serait réalisé pendant ce travail - c'est-à-dire les interventions de conservation curative - et qu'un protocole de traitement devrait être proposé à l'institution pour les interventions conservation-restauration visant à la mise en valeur de l'objet.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres : le premier retrace l'histoire de l'objet, allant de sa période d'utilisation supposée à sa situation actuelle, en passant par sa période de découverte particulière. La seconde partie présente l'étude technologique et l'état de conservation de l'objet dans l'objectif d'améliorer la compréhension des contraintes liées à l'état de conservation de l'objet et des problématiques qui en découlent. Le troisième chapitre développe les tests, les études et les recherches ayant permis de sélectionner les matériaux et les interventions à réaliser pour la stabilisation de l'objet. Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en place un nouveau support à l'arrière des tesselles. Un état de l'art sur les pratiques anciennes et actuelles a notamment été réalisé afin de définir le type de support à utiliser. Cette recherche a abouti à de nouveaux questionnements : quel mortier\* (synthétique ou à base de chaux\*) est le plus adapté pour la restauration de cette mosaïque ? Pour répondre à cette

question, une étude technique a été réalisée afin d'évaluer plusieurs mortiers allégés - au moyen de tests de résistance mécanique.

Finalement le dernier chapitre de ce mémoire présente à la fois les interventions de conservation curative réalisées sur la mosaïque et les contraintes rencontrées mais aussi les tests réalisés dans le but de définir le protocole de conservation-restauration le plus adapté pour permettre l'exposition de l'objet.

## 1 Étude historique

### 1.1 Fiche d'identification

Typologie	Mosaïque
N° d'inventaire	L 1357
Matériaux	<i>Opus tessellatum*</i> , mortiers de chaux* et de ciment* Textile (fibres végétales), adhésifs synthétiques
Dimensions [cm]	Hauteur : env. 1 Longueur : 230 Largeur max : 87 Largeur min : 78
Datation	Ve ou VIe siècle de N.E.
Provenance	Syrie du Nord
Conservation	Archäologisches Institut

#### État de conservation actuelle - description succincte

Fragment de *tessellatum\** de forme trapézoïdale dont l'assise\* et les joints ont presque totalement disparu. La face visible correspond à l'arrière du *tessellatum*, le décor est donc inversé. Ce dernier, composé de quatre oiseaux, de deux arbres, d'une fleur et d'un fond en écaille est, en l'état, difficilement lisible. Les tesselles formant le *tessellatum* sont uniquement maintenues sur un textile à l'aide d'un adhésif. Ce dernier, aujourd'hui défaillant, entraîne la dissociation des tesselles.



Fig. 1 : Face arrière de la mosaïque L1257 avant traitement

## 1.2 Biographie de la mosaïque

L'objectif de cette biographie est de retracer l'histoire de cet objet dont le contexte archéologique est inconnu. Actuellement, en condition légale lorsqu'une dépose\* de mosaïque est effectuée, une documentation exhaustive du milieu et des objets adjacents est réalisée afin de ne perdre aucune information nécessaire à l'étude du site, de l'édifice ou de la mosaïque elle-même. Actuellement, au moins une partie de l'assise est conservée puisqu'elle contient des informations sur la technologie de la mosaïque. En revanche, lorsque les mosaïques sont prélevées illégalement l'assise n'est pas conservée afin de pouvoir rouler la mosaïque sur elle-même. Ce conditionnement permet aux pilleurs de transporter discrètement la mosaïque jusqu'au lieu de revente.

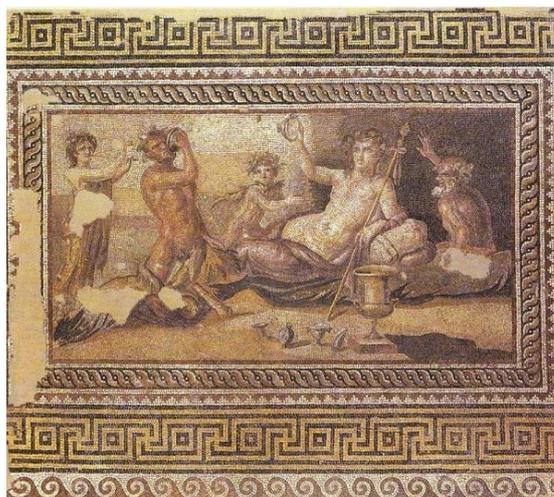
Malgré l'absence d'informations archéologiques concernant le site d'origine de la mosaïque L1357, la provenance a pu être retrouvée en étudiant les motifs du *tessellatum*. Une première étude stylistique a été réalisée par M. Bürge Martin, conservateur du Musée d'archéologie de Zurich, dans son rapport d'expertise, identifiant la mosaïque comme provenant probablement du nord de la Syrie ou le sud de l'actuelle Turquie et datant du Ve -VIe siècles.

### 1.2.1 L'art de la mosaïque au Proche-Orient

L'art de la mosaïque antique en Syrie se développe essentiellement sous l'Empire romain et perdure jusqu'à la conquête arabe au VIIe siècle. L'abondance des mosaïques antiques mises au jour depuis la Seconde Guerre mondiale a permis de retracer l'évolution des répertoires au cours des siècles. La découverte des sites d'Antioche et d'Apamée a notamment permis l'élaboration des premières chronologies grâce à la richesse du matériel révélé<sup>1</sup>. L'évolution stylistique n'étant pas linéaire, la datation des mosaïques ne peut être estimée que sur une large échelle.

Du Ier au IIIe siècle de N.E., un art dit traditionnel prédomine avec un répertoire inspiré de la mythologie grecque. La scène est toujours cernée de motifs géométriques complexes<sup>2</sup> (cf. Fig.2).

*Fig. 2 : Mosaïque découverte à Antioche datant du IIe siècle dans une maison à atrium — concours de boisson entre Héraclès et Dyonisos (Campbell, 1988)  
© Marcus Agrippa*



<sup>1</sup> Balty, 1981, p.348.

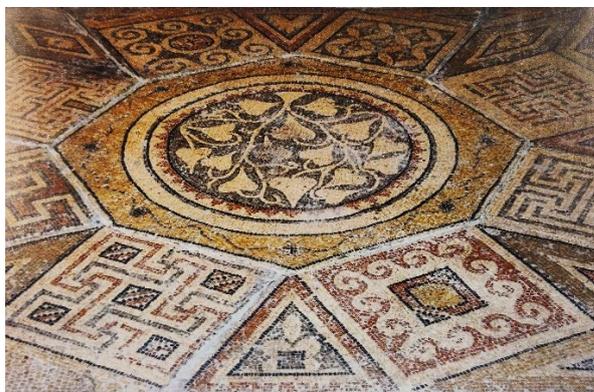
<sup>2</sup> Balty, 1995, p.30.

Au cours du III<sup>e</sup> siècle, les décors changent de registre et marquent peu à peu la fin de l'art traditionnel avec des volumes moins marqués, des visages aux expressions plus neutres, une composition fractionnée en thématiques variées indépendantes les unes des autres<sup>3</sup> (cf. Fig.3).

*Fig. 3 : Mosaïque de la maison de Cassiopé — Fin du II<sup>e</sup> siècle : Centauremachie – simplification des formes, absence de dégradé © Balty*



À partir du début IV<sup>e</sup> siècle, une période transitoire s'installe avec des retours aux répertoires traditionnels dont la différence fondamentale est la dimension des scènes figurées. À l'origine, les scènes étaient représentées dans de petites zones restreintes appelées *emblema*\* délimitées par de riches décors géométriques. Elles forment désormais des pavements de grandes dimensions cernés de simples liserés noirs<sup>4</sup>. Rapidement, les décors classiques sont de nouveau remplacés et marquent une rupture définitive avec la tradition classique à la fin du IV<sup>e</sup> siècle. Les décors géométriques évincent les sujets mythologiques dans les édifices païens et sont exclusivement utilisés dans les églises en construction<sup>5</sup> (cf. Fig. 4 et Fig. 5).



*Fig. 4 : Mosaïque provenant de l'église Heir esh Sheikh datant de la fin IV<sup>e</sup> © Balty*



*Fig. 5 : Mosaïque découverte dans un édifice païen sous la cathédrale d'Apamée — fin du IV<sup>e</sup> siècle © Balty*

Parallèlement aux décors géométriques, un nouveau répertoire se développe. Il s'inspire des anciens décors mais n'en conserve que les motifs végétaux et animaliers. L'un des changements

<sup>3</sup> Balty, 1977, p.6.

<sup>4</sup> Balty, 1977, p.7.

<sup>5</sup> Balty, 1995, p.73.

fondamentaux de ce nouveau répertoire est le passage d'un art narratif à un art purement décoratif. On parle de « mosaïque -tapis »<sup>6</sup>, dont l'objectif est uniquement décoratif.

Au milieu du Ve siècle, les décors végétaux et animaliers prennent le dessus sur les décors géométriques. Les motifs animaliers sont représentés sans ombre portée et sont juxtaposés sur des fonds uniformes avec parfois un quadrillage en écaille marqué par un semi de fleurettes<sup>7</sup>. Ces motifs de fleurettes, introduits au Ve siècle<sup>8</sup> garderont un grand succès jusqu'à la fin de l'histoire de la mosaïque antique (env. VIIe siècle). Durant cette dernière phase, la représentation de scènes de chasse prolifère aux côtés de répertoires animaliers ou de scènes de vie quotidienne<sup>9</sup> (cf. Fig. 6).



*Fig. 6 : Mosaïque provenant de Huarté datant du Vème siècle — Poursuite d'animaux avec fond en écaille à semi de fleurette © Balty*

La fin de l'art de la mosaïque antique en Syrie est marquée par une dernière mutation influencée par la culture musulmane lors de l'invasion des terres syriennes suite à la conquête arabe. Il s'agit en réalité d'une appropriation du même répertoire insufflant un regain de vie aux décors avant la fin de l'art de la mosaïque antique<sup>10</sup>.

---

<sup>6</sup> Balty, 1977, p.10.

<sup>7</sup> Balty, 1977, p.10.

<sup>8</sup> Lassus, 1938, p.102.

<sup>9</sup> Balty, 1995, p.456.

<sup>10</sup> Balty, 1977, p.10.

### 1.2.2 Recontextualisation de la mosaïque L1357

L'art de la mosaïque antique au Proche-Orient étant marqué par des périodes stylistiques relativement distinctes permet de dater les mosaïques par tranches de demi-siècle ou de quart de siècle. J'ai ainsi pu proposer une datation et une provenance plus précises pour la mosaïque L1357. Elle semble s'inscrire dans le courant stylistique de la seconde moitié du Vème siècle du fait de sa composition et du type de motifs utilisés.

On retrouve dans la mosaïque L1357 un répertoire animalier et végétal ainsi qu'un fond en écaille décoré d'un semi de fleurette rouge et noir (cf. Fig.7) typique des mosaïques de la seconde moitié du Ve siècle. Les animaux représentés sans ombre portée semblent être utilisés comme motifs décoratifs et non comme figures narratives. Cette composition est aussi un marqueur caractéristique du Vème siècle. De plus, l'absence de liseré noir sur la partie basse et la partie gauche du fragment laisse penser que le décor s'étalait sur un plus vaste panneau, les pavements de grandes dimensions s'étant développés à partir du IVe siècle. M. Bürge, conservateur de la collection d'archéologie de l'Institut d'archéologie de Zurich, a émis l'hypothèse suivante : il s'agirait d'une représentation d'un paysage paradisiaque ; ainsi la mosaïque proviendrait probablement d'une église<sup>11</sup>. Les motifs présents sur cette mosaïque ont, en effet, couramment été observés sur les mosaïques d'églises. On peut ainsi admirer en bas à gauche de la composition un oiseau aquatique, suivi d'une grue — à demi visible — et d'une pintade. Au centre de la composition se trouve un phénix, figure emblématique de plusieurs nefs centrales d'églises syriennes, dont les édifices de Huarté et d'Antioche (cf. Fig. 116 et Fig. 117, Annexe I, p.111). À gauche du phénix, un palmier précède un arbre fruitier au pied duquel se trouve une tulipe à moitié conservée.



*Fig. 7: Représentation de la mosaïque vue par l'avant avec saturation et simplification des couleurs pour faciliter la lecture des motifs*

<sup>11</sup> Informations transmises par e-mail par M. Urs Lang, conservateur-restaurateur du musée d'archéologie le 11/11/2019.

L'arbre fruitier est abondamment représenté dans les mosaïques antiques du nord de la Syrie (cf. Fig. 120 et 121, Annexe I, p.111). À l'inverse, le palmier tel qu'il est représenté sur cette mosaïque ne trouve de pendant qu'avec un seul fragment de mosaïque présenté dans l'inventaire des mosaïques antiques de Syrie du Nord réalisé par Dr Komait Abdallah, spécialiste des mosaïques antiques syrienne. Ce fragment découvert dans l'église d'Oum Nir al-Qoublé est le seul vestige du pavement de la nef principale<sup>12</sup> (cf. Fig. 8). Les bordures de la nef étant toujours intactes indiquent que le reste du pavement central aurait été déposé. L'absence de rapport officiel pourrait laisser penser que le pavement aurait été prélevé illégalement.

L'état de conservation combiné à la ressemblance des décors entre la mosaïque L1357 et le fragment de la nef, porte à croire que le fragment de mosaïque L1357 soit l'un des fragments disparus de la nef centrale de l'église d'Oum Nir al-Qoublé. En effet, non seulement les palmiers sont représentés de la même manière, mais l'on retrouve aussi des motifs floraux semblables. Si l'on s'intéresse aux mosaïques adjacentes à celle de la nef centrale, notamment celles de l'abside ou du bas-côté sud, on retrouve les mêmes motifs de semi de fleurette (cf. Fig. 120 et Fig. 121, Annexe I, p.111). Malheureusement, la mosaïque de la nef centrale de l'église d'Oum Nir al-Qoublé étant très lacunaire, il n'est pas possible de confirmer avec certitude cette hypothèse. En revanche, cette étude m'a permis de préciser la provenance de la mosaïque avec l'aide du Dr Abdallah Komait authentifiant la mosaïque L1357 en tant que mosaïque antique syrienne datant de la seconde moitié de Ve siècle et provenant vraisemblablement de la région d'Apamée<sup>13</sup>.

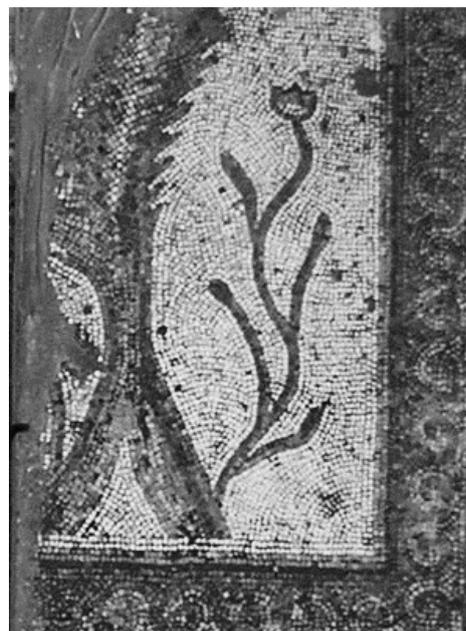


Fig. 8 : Fragment de la nef centrale de l'église d'Oum al-Qoublé © K. Abdallah

### 1.2.3 Le trafic illicite de biens archéologiques en Syrie

Les découvertes de mosaïque au Proche-Orient résultent tant de fouilles officielles que de prospections clandestines. Ces dernières ont abondamment alimenté le marché noir des antiquités occidentales aux côtés de nombreux autres objets de prestige<sup>14</sup>. C'est probablement le sort qu'a subi la mosaïque L1357, qui n'ayant pas pu être revendue, a été abandonnée dans un dépôt près de Zurich.

<sup>12</sup> Abdallah, 2018, p.164.

<sup>13</sup> Communication orale avec Dr. Komait Abdallah, le 21/05/2021.

<sup>14</sup> Information tirée de la présentation orale de M. Pierre Leriche. *Quel avenir pour les œuvres orphelines*, Colloque internationale, en visioconférence, Université de Genève, 04/02/2021.

Bien que d'apparence suffisamment protégée par la législation syrienne, le patrimoine archéologique n'est pas épargné par le trafic illicite. En 1963, le marché est réglementé, seules les personnes détentrices d'une licence sont autorisées à exporter les antiquités. En 1999, le commerce des antiquités est totalement interdit<sup>15</sup>. Toute œuvre découverte sur le territoire syrien appartient à l'état et ne peut être revendue sur le marché de l'art<sup>16</sup>. Les sorties de territoires sont ainsi théoriquement prohibées à l'exception de celles ayant obtenu une autorisation de la Direction générale des antiquités et des musées (DGAM). Malheureusement, le pillage archéologique n'a cessé d'exister et a même pris une ampleur presque industrielle sous la direction de l'État islamique avec la mise en place de systèmes de prospections organisés<sup>17</sup>. Le trafic de mosaïque implique forcément l'action d'une organisation petite ou grande ayant prémédité le pillage. En effet, la dépose d'une mosaïque nécessite le travail de plusieurs personnes avec un outillage adapté.

Dans le cas de la mosaïque L1357, on peut supposer qu'il s'agisse d'un vol réalisé par des personnes expérimentées au vu de la régularité du panneau trapézoïdale et de la section choisie. Il est probable que la mosaïque ait été prélevée en plusieurs sections et qu'un réassemblage ait été prévu puisqu'une mosaïque ayant un décor fermé (scène complète cernée de bandeaux) a plus de valeur marchande<sup>18</sup>. Cependant, pour des raisons qui nous sont aujourd'hui inconnues, cette section n'a pas été réassemblée ou même conservée avec les autres sections. La date de pillage est également inconnue. En revanche, la date de son arrivée en Suisse est supposée être au cours des années 90. En effet, durant cette période, une quantité importante de mosaïques antiques syriennes a été mise en vente sur le marché de l'art<sup>19</sup>. L'abandon de la mosaïque dans un dépôt peut être lié au durcissement des réglementations du commerce de l'art rendant sa vente plus complexe ou à sa faible valeur marchande causée par le motif incomplet du panneau.

#### 1.2.4 La redécouverte de la mosaïque L1357 au XXI<sup>e</sup> siècle.

En 2012, une société spécialisée dans le développement immobilier contacte l'Office fédéral de la culture dans le cadre d'une réaffectation de dépôts localisés dans les environs de Zurich en zone résidentielle. L'un des dépôts, non fréquenté et non payé depuis plusieurs années contenait plusieurs objets antiques. L'office fédéral de la culture a alors contacté l'institut d'archéologie pour une expertise des objets<sup>20</sup>.

---

<sup>15</sup> Loi sur les antiquités — Décret n° 222 (Macdonald, 2021 [en ligne]).

<sup>16</sup> Art. 52, al. 1, Loi sur les antiquités (Macdonald, 2021 [en ligne]).

<sup>17</sup> Macdonald, 2020 [en ligne].

<sup>18</sup> Bürge, 2012 p.3.

<sup>19</sup> Reisacher, 1994, p.25.

<sup>20</sup> Communication écrite avec M. Martin Bürge, le 10/05/2021.

Le 9 février 2012, M. Bürge, conservateur du musée, s'est rendu sur place pour effectuer l'expertise de 5 groupes d'objets, accompagné de Mme Tania Esposito, responsable adjointe de l'unité de Transfert international des biens culturels de l'OFC, et de représentants de la société propriétaire. Parmi ces groupes d'objets se trouvait la mosaïque L1357. Cette dernière avait été roulée, emballée dans un sac plastique et transporté dans une caisse en bois. Sur le couvercle se trouvait l'inscription « To [REDACTED] ZURICH 2/5 »<sup>21</sup> laissant supposer qu'il s'agissait de la caisse n° 2 sur un convoi de 5 caisses (Cf. Fig.9). La conclusion de l'expertise mit en évidence la précarité de l'état de conservation de la mosaïque et le risque de perte totale de l'œuvre. La société propriétaire des dépôts ne souhaitant pas conserver l'œuvre et les conditions de conservation future étant incertaines, il a été décidé que la mosaïque intégrerait la collection archéologique de Zurich en tant que prêt permanent avec l'accord de l'office fédéral de la culture<sup>22</sup>.

Fig. 9 : Couvercle de la caisse de transport – Inscription « 2/5 » © Archäologisches Institut



### 1.3 Le statut de la mosaïque L1357 dans la collection de l'Université de Zurich



Fig. 10 : Institut d'archéologie de Zurich © Archäologisches Institut

#### 1.3.1 Histoire de la collection du musée

La collection du musée de l'institut d'archéologie de Zurich est consacrée à l'archéologie de la méditerranée et du Proche-Orient. Elle constitue la collection publique la plus ancienne de Suisse dédiée à ce sujet<sup>23</sup>. Actuellement située dans le bâtiment principal de l'institut d'Archéologie, la collection comprend plus de 8500 objets antiques originaux et environ 1500 moulages<sup>24</sup>. La collection permanente est régulièrement repensée afin de présenter un corpus d'objets variés, à l'image de la collection<sup>25</sup>.

<sup>21</sup> Pour des raisons de confidentialité une partie des informations ne sont pas retranscrites dans ce mémoire. Bürge, 2012, p.2.

<sup>22</sup> Communication écrite avec M. Martin Bürge, le 10/05/2021.

<sup>23</sup> Reusser, 2021 b [en ligne].

<sup>24</sup> Reusser, 2021 c [en ligne].

<sup>25</sup> Reusser, 2021 a [en ligne].

L'acquisition de 30 moulages en plâtre\* de statues anciennes par un groupe de professeurs de l'Université de Zurich fonda les bases de la collection d'archéologie en 1852 (cf. Fig. 11). Dès sa création la collection fut partagée et utilisée à des fins éducatives. Les œuvres étaient sujets de conférences et accessibles librement au public dans le bâtiment d'exposition de la Kunstgesellschaft à Zurich<sup>26</sup>.



Fig. 11 : Collection de moulage de l'institut d'archéologie de Zurich © Archäologisches Institut

La collection fut ensuite enrichie d'objets provenant de l'antiquité grecque, étrusque et romaine, de l'Égypte ancienne, de la Mésopotamie et de l'ancienne Asie Mineure. Principalement acquise grâce à de généreuses donations ou de prêts permanents, une partie de la collection a, en revanche, été achetée par les différents professeurs ayant occupé le poste de directeur de la collection. On peut notamment citer le premier achat d'originaux en 1875 par Karl Dilthey lors d'un voyage en Grèce et de son passage à Tarente, Capoue et Rome au retour. Ces derniers ne sont en revanche pas les premiers originaux de la collection. Dès 1870, 58 vases de la Grèce antique ont été prêtés à titre permanent par la collection d'art graphique de l'ETH de Zurich (cf. Fig.12). Au cours de son mandat, Hugo Blümner successeur de M. Dilthey acquière une collection d'objets provenant du Proche-Orient et d'Égypte grâce à la donation de la maison des Antiquaires de Zurich<sup>27</sup>.



Fig. 12 : Collection de vases antiques grecque © Archäologisches Institut

L'accroissement permanent de la collection a mené à plusieurs déménagements au cours des décennies pour finalement s'installer en 1956 dans l'ancienne clinique ophtalmique du canton de Zurich. Cette dernière n'est cependant pas adaptée pour recevoir la collection, la plupart des moulages ne sont accessibles que sur demande. Des travaux réalisés de 1979 à 1984 ont permis d'exposer les objets tels qu'ils sont présentés aujourd'hui : les

<sup>26</sup> Reusser, 2021 b [en ligne].

<sup>27</sup> Reusser, 2021 b [en ligne].

œuvres originales au rez-de-chaussée et les moulages au sous-sol sous la forme d'un jardin statuaire<sup>28</sup>. Depuis octobre 2020, l'institut d'archéologie est à nouveau en rénovation. Il réouvrira ses portes au public en 2022.

### 1.3.2 Place de l'objet dans la collection et valeurs culturelles

#### Place de l'objet dans la collection

Actuellement, la politique d'acquisition du musée concentre ses efforts sur le respect des normes juridiques, notamment la loi sur le transfert des biens culturels ainsi que la conformité aux conventions de l'UNESCO. Dès 1988, le musée approuve la Déclaration de Berlin et s'engage à soutenir le commerce légal d'objets archéologiques ainsi qu'à empêcher les fouilles illégales. La Convention sur les mesures d'interdiction et de prévention des importations, exportations et transferts de biens culturels, adoptée par l'UNESCO en 1970, a été ratifiée par la Suisse en 2003. Les musées étaient en avance sur la législation officielle puisqu'ils avaient des lignes directrices éthiques pour le traitement des œuvres basées sur celle créée en 1986 par le conseil international des musées (ICOM)<sup>29</sup>. Ainsi, l'expansion de la collection était aussi limitée en fonction des capacités du musée à stocker, traiter et étudier les œuvres. L'objectif prioritaire est la préservation de la collection et non son expansion. Les dons de sources privés et les achats ne sont effectués qu'après une clarification du contexte judiciaire. Les critères d'admissions pour les dons, les achats et les prêts sont : le respect des dispositions légales applicables en Suisse, l'appartenance au domaine d'intérêt du musée (antiquité provenant de la méditerranée et au Moyen-Orient), la capacité de stockage et les frais (achat/restaurations). Les œuvres dont les sources sont douteuses sont automatiquement exclues<sup>30</sup>.

La mosaïque L1357 a été intégrée dans les collections en tant que prêt permanent. L'acquisition avait pour objectif principal la sauvegarde de l'objet, dont l'état de conservation précaire risquait d'entraîner sa perte. Bien que cet objet soit arrivé sur le territoire suisse à la suite d'un vol, le statut juridique ayant été clarifié avec l'Office fédéral de la culture, l'objet a pu être intégré aux collections.

La mosaïque s'inscrivant dans la période cible du musée : l'antiquité du Proche-Orient permet de compléter l'exposition actuelle dans laquelle se trouvent déjà des fragments de mosaïque. Le second objectif du musée est l'exposition de la mosaïque dans l'institut d'archéologie. À travers la présentation au public et l'étude de l'objet, le musée aspire à la recontextualisation de la mosaïque et, à terme, à la restitution au pays d'origine<sup>31</sup>.

---

<sup>28</sup> Reusser, 2021 b [en ligne].

<sup>29</sup> Reusser, 2021 b [en ligne].

<sup>30</sup> Reusser, 2021 a [en ligne].

<sup>31</sup> Communication écrite par e-mail avec M. Martin Bürge le 21/05/2021.

### Valeurs culturelles

On comprend donc que les valeurs ayant motivé l'intégration de la mosaïque L1357 sont principalement liées à son aspect, sa provenance (époque et lieu) et surtout son histoire (passée et future)<sup>32</sup>. Si l'on se réfère aux grilles d'analyses définies par Mme Appelbaum, on peut lui attribuer les valeurs : esthétique, historique, scientifique et sentimentale<sup>33</sup>.

Dès sa période d'utilisation, la mosaïque était dotée d'une valeur utilitaire et surtout d'une valeur esthétique. En effet, les mosaïques étaient à la fois mises en œuvre pour imperméabiliser les sols et pour décorer les édifices. Aujourd'hui, la valeur utilitaire n'existe plus puisqu'elle n'est plus utilisée en tant que pavement. En revanche, elle est toujours appréciée pour son aspect esthétique. Avec le temps, elle acquit une valeur historique puisqu'elle est désormais un témoin des coutumes, d'une technique ou encore des préférences stylistiques d'une civilisation passée. L'identification de sa provenance - ayant pu être précisée grâce à l'étude stylistique des motifs - redonne une valeur scientifique à la mosaïque. Bien que son contexte archéologique soit inconnu et qu'elle ne puisse donc pas être utilisée comme marqueur stratigraphique dans l'étude d'un site, elle peut en revanche servir à l'étude archéologique dans le sens classique du terme. En effet, l'archéologie classique se concentrant principalement sur l'étude des vestiges matériels combinés à l'étude des sources immatérielles de l'antiquité gréco-romaine et des cultures avoisinantes, se réfère au contexte géologique, mais n'en dépend pas obligatoirement. Finalement, en supposant qu'en identifiant le pays propriétaire et que ce dernier souhaiterait récupérer la mosaïque, on attribue aussi une valeur sentimentale à l'objet. En effet on suppose que le pays d'origine pourrait y être attaché et souhaiterait donc une restitution.

#### 1.3.3 La restitution des œuvres en Suisse

Depuis 2005, date d'adoption de l'ordonnance sur le transfert international des biens culturels (OTBC) par le Conseil Fédéral, la Suisse a participé à la restitution de plusieurs œuvres au niveau international. L'Italie et l'Égypte en sont les principaux bénéficiaires avec la restitution de divers biens archéologiques, dont des reliefs funéraires<sup>34</sup>. En revanche, actuellement aucune restitution n'a été effectuée en faveur de la Syrie bien qu'il s'agisse de l'un des pays les plus spoliés du XXI<sup>e</sup> siècle. En effet, depuis l'implantation du groupe État islamique en Syrie, le pillage des sites s'est généralisé et a été utilisé pour financer leur organisation. Aujourd'hui, bien que l'État islamique soit sur le déclin, la restitution d'œuvre reste un sujet à débat aux enjeux politiques complexes. En 2016, le musée d'Art et d'histoire de Genève s'est vu confié neuf biens archéologiques spoliés originaires de Lybie, du Yémen et de Syrie par le ministère public de Genève pour les conserver temporairement en attendant que le

---

<sup>32</sup> Communication écrite par e-mail avec M. Martin Bürge le 21/05/2021.

<sup>33</sup> Appelbaum, 2007.

<sup>34</sup> À partir de OFC, 2019 [en ligne].

contexte soit propice à la restitution. Ces derniers n'étant à ce jour pas encore été restitués, cette démarche bien qu'honorable soulève de nouvelles questions : qui définit lorsque les conditions sont adéquates pour le retour des objets et quelles sont ces conditions. En Suisse, pour qu'une restitution ait lieu, plusieurs critères définis par la loi doivent être respectés : c'est au pays d'origine d'entamer la démarche. Pour ce faire il doit pouvoir prouver que le bien a une importance culturelle significative pour leur patrimoine et qu'il a été importé illégalement, sachant que la restitution peut être différée par le tribunal suisse s'il estime que le bien est en danger<sup>35</sup>. En plus des injonctions juridiques, l'état des relations diplomatiques entre les parties joue un rôle fondamental pour la restitution des œuvres. L'ancien directeur du musée des antiquités et des musées de Syrie, M. Abdulkarim Maamoun, explique notamment que « la restitution des antiquités à la Syrie se heurte à un problème majeur qui est la coupure des relations diplomatiques entre [son] pays et les pays occidentaux »<sup>36</sup>. On note notamment, la fermeture de l'ambassade Suisse à Damas en 2012 pour des raisons de sécurité et en réaction aux violations du droit international commis en Syrie<sup>37</sup> qui témoigne de l'état des échanges détériorés entre les deux pays. Malgré la coupure des échanges, la Suisse a mis en place des mesures afin de protéger le patrimoine syrien en interdisant l'importation, l'exportation, le transit, la vente, la distribution, le courtage et l'acquisition de biens culturels spoliés syriens<sup>38</sup> à travers l'ordonnance du 8 juin 2012 instituant des mesures à l'encontre de la Syrie.

Aujourd'hui, la restitution de la mosaïque L1357 est une possibilité du fait de la politique de l'Institut d'Archéologie de Zurich, mais reste un processus complexe du fait du contexte politique de la Syrie et de l'état des rapports avec la Suisse. L'objectif commun est la préservation de ce patrimoine qui sera à plus ou moins long terme restitué à qui de droit. L'IA ayant déjà participé à deux des restitutions réalisées par la Suisse au niveau international (cf. Fig. 128, Annexe I, p.111) a conscience de la complexité du processus et s'engage à préserver le bien aussi longtemps que nécessaire.

## 2 Étude technologique et examen diagnostique

---

### 2.1 Technologie

#### 2.1.1 Rappel sur la technique de fabrication des mosaïques

Parmi les découvertes archéologiques antiques, on peut distinguer deux catégories de mosaïques : les mosaïques de pavement (dont l'*opus tessellatum*\*) et les mosaïques murales (*opus*

---

<sup>35</sup> LTBC, art.9.

<sup>36</sup> Hugounenq, 2017 [en ligne].

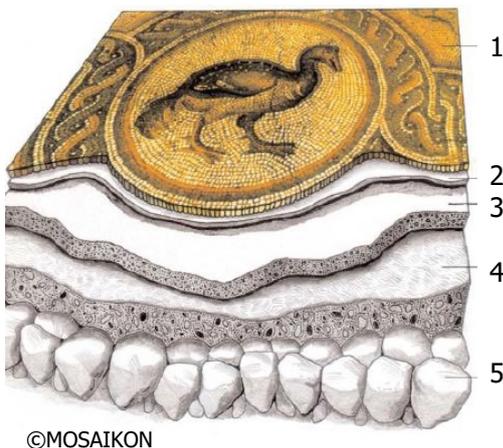
<sup>37</sup> DFAE, 2020 [en ligne].

<sup>38</sup> Ordonnance du 8 juin 2012, art. 9a.

*musivum*\*). L'œuvre de cette étude ayant été définie comme une mosaïque de sols d'église, elle correspond à la première option. Il existe plusieurs types de mosaïque de pavement : celles réalisées à l'aide de galets, de plaques de marbre (*opus sectile*\*), de briques posées en chant (*opus spicatum*\*) et de tesselles<sup>39</sup> (*opus tessellatum* ou *opus vermiculatum*\*). L'*opus vermiculatum* se caractérise par des tesselles plus petites, généralement utilisées pour réaliser des *emblema*.

Depuis leur apparition, les mosaïques ont pour fonction de décorer les surfaces des bâtisses et de montrer la richesse de leur propriétaire. Les mosaïques de pavement permettaient par la même occasion de renforcer la résistance des sols à l'eau et à l'érosion. Le tapis de tesselle (*tessellatum*) ne correspond qu'à une partie de la structure des mosaïques. Elles sont généralement composées de 5 couches. Les strates sous-jacentes jouent un rôle prépondérant dans la stabilité du pavement.

Le système est composé de 5 strates : le *statumen*\*, le *rudus*\*, le *nucléus*\*, le lit de pose\* et le *tessellatum*. Le *statumen* est une strate de support composée uniquement de pierres et autres agrégats de grandes dimensions posés à sec. Le *rudus*, le *nucléus* et le lit de pose sont des mortiers : ils sont composés d'un liant et d'agrégats\*. Ils constituent l'assise de la mosaïque.



©MOSAIKON

- 1 *Tessellatum* - tapis de tesselles
- 2 Lit de pose - mortier de chaux presque pur chargé de sable fin, poudre de tuileau\*
- 3 *Nucleus* - mortier de chaux à granulométrie\* moyenne plus riche en charge\* que le lit de pose – ep : 2-3 cm
- 4 *Rudus* - mortier de chaux grossier chargé de gravier, sables, fragment de tuiles – ep : 5 – 10 cm
- 5 *Statumen* - radier de pierre disposé en hérisson – ep : de 10 à 40 cm<sup>40</sup>

Les tesselles sont généralement composées de pierres calcaires et plus rarement de céramique, de verre et de marbre. Les pierres calcaires sont les plus employées, car leur approvisionnement et leur taille sont plus aisés<sup>41</sup>. Les tesselles sont taillées à l'aide d'une marteline et d'un tranchet<sup>42</sup> pour obtenir des éléments plus ou moins cubiques de quelques millimètres d'épaisseur. Ces dernières sont insérées dans le lit de pose encore frais en pose directe selon le décor souhaité.

<sup>39</sup> Les tesselles sont des éléments cubiques de petites dimensions composées de minéraux naturels ou de matériaux inorganiques transformés (verre/céramique).

<sup>40</sup> Coutelas, 2009, p.97. Illustration extraite de MOSAIKON, 2013, p.2.

<sup>41</sup> Fiori, 2002, p.41.

<sup>42</sup> Lavagne, 1987, p.27.

Le lit de pose, le *nucléus* et le *rudus* sont composés d'un liant — généralement la chaux —, d'agrégats et d'adjuvants\*. La chaux est un composé minéral issu de la calcination du calcaire. Il existe plusieurs types de chaux dont la chaux aérienne, majoritairement utilisée à l'antiquité, et la chaux hydraulique utilisée à notre époque. On les distingue par leur mode de prise. La prise de la chaux aérienne est uniquement liée à une carbonatation par exposition au CO<sub>2</sub> tandis que la prise de la chaux hydraulique est également liée à une réaction avec l'eau. La pureté du calcaire calciné influe directement sur le mode de prise. Un calcaire très pur permettra d'obtenir une chaux aérienne alors qu'un calcaire contenant une part d'argile produira une chaux hydraulique — les oxydes présents dans l'argile lui confèrent son caractère hydraulique<sup>43</sup> (cf. Annexe II, processus de fabrication, p.116).

Les premières traces de fabrication de la chaux remontent à l'épipaléolithique (12 000 av. N.E) au Proche-Orient. La production s'y est établie au VIIe siècle av. N.E, tant pour la création d'objets que pour l'application d'enduit mural. Par la suite la sédentarisation fut un facteur capital dans l'évolution des mortiers de chaux. En effet, l'apparition de l'architecture entraîna la création d'enduits plus résistants<sup>44</sup>. L'ajout de granulats\* permet d'améliorer les propriétés à faible coût et facilement. Les granulats les plus utilisés étaient le sable, la pouzzolane\* et le tuileau. La pouzzolane, découverte au IVe siècle par les Grecs est composée de roches volcaniques naturelles, qui mélangées à la chaux confère de l'hydraulicité au liant, permettant aux mortiers de prendre en milieu humide. Le tuileau obtenu artificiellement par cuisson et concassage de terre argileuse possède également des propriétés pouzzolaniques. L'emploi de pouzzolane dans la chaux se généralise à l'époque romaine et perdura jusqu'à l'époque moderne sans changement significatif<sup>45</sup>. Les mortiers de chaux pouvaient aussi contenir des adjuvants organiques tels que la paille ou autres fibres végétales. Il a été supposé qu'ils soient ajoutés pour créer une armature, mais il est probable que l'apport soit accidentel, comme pour le charbon. En effet ce dernier provient probablement des diverses étapes de fabrication de la chaux, par exemple durant l'extraction de la chaux du four dans lequel se trouvent des combustibles<sup>46</sup>. La présence de tuileau, de roches volcaniques, de charbons ou de fibres végétales peut être un indicateur pour la distinction entre un mortier ancien et un mortier contemporain.

### 2.1.2 Technologie de la mosaïque L1357

La dépose ayant été réalisée illégalement - probablement à des fins lucratives – seul le *tessellatum* a été prélevé. L'état actuel de la mosaïque ne permet plus l'identification de la technique de mise en œuvre du pavement car nous ne pouvons plus observer la stratigraphie d'origine de l'assise.

---

<sup>43</sup> Adam, 2001, p.29.

<sup>44</sup> Coutelas, 2009, p.11.

<sup>45</sup> Coutelas, 2009, p.12.

<sup>46</sup> Coutelas, 2009, p.21.

En revanche, on peut supposer qu'elle soit similaire à celle observée durant l'antiquité dans tout le bassin méditerranéen, c'est-à-dire composé d'un *statumen*, d'un *rudus*, d'un *nucléus*, d'un lit de pose et d'un *tessellatum*. Parmi les 5 strates usuellement mises en œuvre, on ne retrouve ici qu'une partie du *tessellatum*. Seules les tesselles ont été conservées à l'aide d'un textile encollé. Le lit de pose, étant remonté dans les joints au moment de la pose, n'est visible que sous forme de trace à l'arrière ou sur les côtes des tesselles.

La structure actuelle est composée de 6 strates (cf. Fig. 13) :

- le textile utilisé pour l'entoilage de la face de la mosaïque avant la dépose ;
- le film d'adhésif utilisé pour l'encollage du textile sur le *tessellatum* ;
- les tesselles, parfois fragmentées ou lacunaires ;
- au même niveau que les tesselles, des dépôts sédimentaires compacts dans les lacunes ou entre les joints ;
- à l'arrière et sur les côtés des tesselles des résidus de mortier blanc ;
- et pour finir, des résidus de mortier gris globalement sur le mortier blanc, parfois directement sur les tesselles.

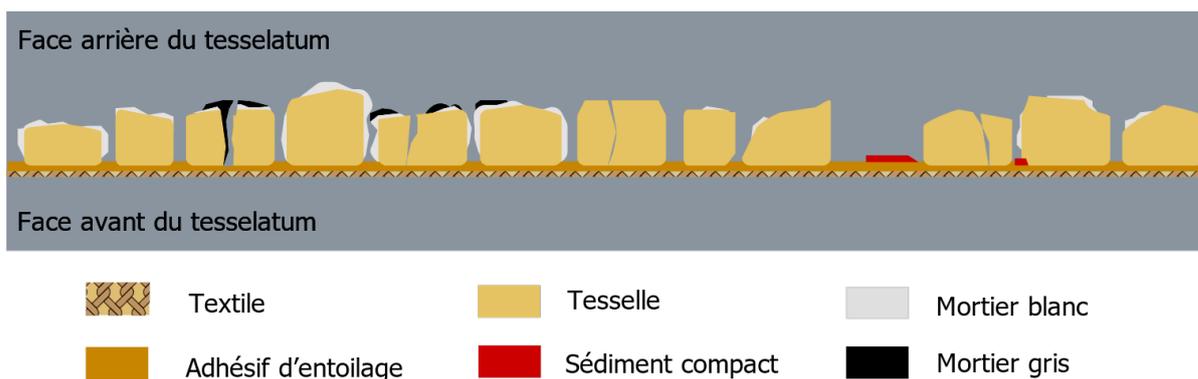


Fig. 13 : Stratigraphie de la mosaïque — la partie supérieure correspond à l'arrière du tessellatum

### Description des mortiers

Une observation macroscopique et microscopique combinée à des analyses élémentaires et structurales ont permis d'identifier la nature des mortiers. Le mortier blanc correspond vraisemblablement à un mortier de chaux antique. L'évaluation visuelle a permis d'observer la présence de granulats rouge clair, de grains gris/jaune/brun et d'un liant blanc (cf. Fig. 14). Si l'on se réfère aux compositions des mortiers antiques, les granulats rouge clair pourraient correspondre à du tuileau broyé, réputés



Fig. 14 : Détail d'un résidu de mortier blanc

pour donner une teinte légèrement rosée au mortier tout en lui conférant une certaine prise hydraulique. Les grains pourraient, quant à eux, simplement correspondre à du sable. L'hypothèse identifiant le liant blanc comme un mortier de chaux a pu être confirmée grâce à une analyse par diffraction des rayons X\* (DRX) n'identifiant qu'une seule phase : la calcite  $\text{CaCO}_3$  (cf. Annexe IV – Rapport d'analyse, p.123). La pureté du liant est un indicateur pour l'identification des mortiers antiques. Les mortiers récents contiennent généralement des silicates/aluminates de calcium hydratés (C-S-H) puisqu'ils sont réalisés avec des chaux hydrauliques contenant une plus ou moins grande part d'argile. Ces composés ne pouvant pas être détectés par une analyse DRX à cause de leur faible cristallinité<sup>47</sup>, une analyse élémentaire par fluorescence des rayons X\* (FRX) a été effectuée afin d'identifier l'éventuelle présence d'aluminium ou de silice. Ces éléments n'ont pas été détectés par FRX, ce qui confirme l'hypothèse qu'il s'agisse d'un mortier antique.

À l'inverse, le mortier gris correspond à un mortier récent : probablement un ciment ou une chaux hydraulique mélangée à une part de ciment (cf. Fig. 15). Des oxydes d'aluminium et de silice ont pu être détectés à l'aide d'une analyse XFR dans le liant, ce qui confirme l'hypothèse d'un mortier récent. L'analyse par DRX a identifié deux phases, la calcite  $\text{CaCO}_3$  en grande quantité (98 %) et la vaterite  $\text{CaCO}_3$  (2 %). La présence de cette dernière est plutôt étonnante puisqu'il s'agit d'une phase instable facilement synthétisable en laboratoire, mais rarement observable dans la nature, car elle se cristallise en une phase plus stable : la calcite ou l'aragonite. L'observation macroscopique apporte



*Fig. 15 : Détail d'un résidu de mortier gris localisé sur un résidu de mortier blanc*

dans ce cas des informations essentielles à l'interprétation des résultats. En effet, la couleur grise et la grande dureté du mortier indiquent qu'il s'agit probablement d'un ciment. Il n'existe pas de mortier de chaux gris, à l'exception de mortier hydraulique contenant une part de ciment. Les chaux hydrauliques étant beaucoup moins dures que les ciments<sup>48</sup>, il est plus probable qu'il s'agisse d'un ciment au vu de la difficulté à réaliser le prélèvement pour les analyses.

### Description des tesselles

L'observation macroscopique et microscopique des tesselles de la mosaïque L1357 a permis de définir qu'elles sont d'origines minérales naturelles et non issues d'une matière transformée

<sup>47</sup> Breuil, 2006, p.107.

<sup>48</sup> Le mortier blanc a pu être prélevé avec un scalpel alors que le mortier gris a dû être prélevé avec une pointe diamantée fixée sur un micro-tour.

comme le verre ou la céramique. La couleur, la dureté, la porosité, la présence de veine ou d'incrustation sont des critères pour l'identification de la nature des tesselles. Cinq couleurs ont été observées sur la mosaïque : beige, noir, jaune, rouge et vert. Plusieurs d'entre elles sont divisées en 2-3 nuances pour la réalisation de dégradés. Les tesselles beiges tapissent le fond du décor, le cœur du palmier et de ses feuilles. Les tesselles noires sont utilisées pour le liseré délimitant la scène, le contour des figures et la pointe du décor en fleurette. La seconde partie des fleurettes est constituée de tesselles rouges. Ces dernières comme les tesselles vertes et jaunes sont employées pour les décors figuratifs.

Ces tesselles sont probablement en roche calcaire quelconque ou en marbre. Cependant les tesselles noires pourraient aussi être en basalte, les tesselles rouges en grès, les tesselles vertes en basalte, en grès ou en serpentinite (cf. Annexe IV - Identification des tesselles, p.123)<sup>49</sup>. Les tesselles sont principalement des composés de calcium ou d'argile, on ne les traitera donc pas différemment durant les interventions de conservation-restauration puisqu'elles sont sensibles aux mêmes agents — notamment l'acidité. Seules les tesselles en verre font habituellement l'objet de traitement spécifique<sup>50</sup>.

#### Conclusion de l'étude technologique

La stratigraphie actuelle de la mosaïque est singulière à plusieurs niveaux : l'absence de mortier dans les joints et la présence de ciment sous forme de résidu est particulièrement intrigante. En effet, le ciment est rarement présent sous forme de résidus du fait de la difficulté de son retrait. La plupart du temps, le ciment est réduit pour alléger le panneau, mais jamais retiré complètement, car il existe un risque trop important d'altération des tesselles. Ces dernières ont une dureté inférieure à celle du ciment ce qui rend le dégagement presque impossible. En revanche, il est peu probable qu'il s'agisse seulement de tâches accidentelles puisque les résidus sont répartis sur toute la surface de la mosaïque.

Plusieurs hypothèses peuvent être formulées mais aucune ne peut être confirmée à cause de l'état lacunaire de l'assise ne permettant pas d'obtenir assez d'informations.

Hypothèses : l'assise de la mosaïque aurait pu avoir subi une consolidation avec du ciment *in situ* avant la dépose. La mosaïque aurait aussi pu avoir été déposée une première fois et réutilisée sur une assise en ciment (au sol ou sur panneau) puis déposée une seconde fois pour faciliter son exportation. On peut supposer que le ciment ait pu être retiré grâce au film de mortier de chaux antique qui se trouve à l'interface entre les résidus de ciment et les tesselles, plus aisé à retirer. Quoiqu'il en soit, la dépose de cette mosaïque a demandé un travail méticuleux de dégagement, qui n'a d'ailleurs laissé aucune trace d'outils visible à l'arrière des tesselles.

---

<sup>49</sup> Ces hypothèses sont un résumé des propositions d'identification réalisées par des professionnels de la conservation-restauration de monuments ou de mosaïque : Mme Évelyne Chantriaux, Mme Kusi Colonna-Prete et M. Olivier Guyot.

<sup>50</sup> Communication écrite par e-mail avec Mme Évelyne Chantriaux, le 25/05/2021.

## 2.2 Constat d'état de la face arrière

L'examen de la mosaïque a dû être réalisé en deux temps puisque la face avant du *tessellatum* est recouverte d'un entoilage qui ne peut être retiré sans risquer la dissociation totale des tesselles. L'objectif de ce constat est de faire un bilan de l'état de conservation de la mosaïque, d'identifier si possible l'origine des altérations observées, de prévoir l'évolution de ces altérations et ainsi d'établir un pronostic. Ce dernier permettra de déterminer les interventions à réaliser en priorité durant ce travail.

Ce constat d'état distingue d'ores et déjà les matériaux utilisés pour la dépose de l'objet et les matériaux constitutifs de la mosaïque, qu'ils soient d'origines ou ultérieurs. L'étude de la mosaïque a été effectuée sous lumière diffuse et rasante, dans le domaine du visible et de l'ultraviolet, à l'échelle macroscopique et microscopique.

### 2.2.1 Altérations des matériaux constitutifs : *tessellatum* et mortiers



Fig. 16: Face arrière de la mosaïque — avant traitement

#### Dépôts

De manière générale, la face arrière est fortement empoussiérée et recouverte de divers dépôts : d'origine animale (carapace d'insecte), végétale (fibres, graines, feuilles séchées) et sédimentaires. Ces dépôts ne sont pas adhérents aux surfaces, à l'exception d'un dépôt sédimentaire compact rouge pâle adhérent non pas aux tesselles mais au textile au niveau des joints et des lacunes. Les dépôts non adhérents donnent un aspect jaune-gris à l'entièreté de la surface (cf. Fig. 16).



Fig. 17: Détail de la face arrière de la mosaïque — dépôt compact rouge pâle adhérent au textile

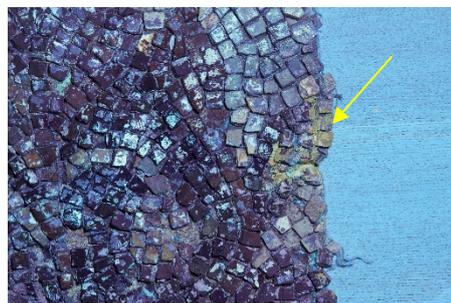
Deux types de dépôts adhérents aux tesselles ont été identifiés. Ils sont présents sous forme de taches et peuvent s'apparenter à des résidus d'adhésif. Un premier type de dépôt orange-brun, légèrement translucide a été observé sur deux zones de 4-5 cm<sup>2</sup> sur la bordure droite de la mosaïque (cf. Fig. 18 et Fig. 19) et sous forme de taches de quelques millimètres de diamètre dans les zones alentours (cf. Fig. 20, ci-après).



*Fig. 18: Dépôt orange brun situé sur l'une des feuilles de l'arbre fruitier* — *Fig. 19: Dépôt orange-brun situé sur la base de la branche de l'arbre fruitier*

*Fig. 20: Dépôt orange-brun situé entre la branche de l'arbre fruitier et le tronc du palmier*

Ces dépôts, rigides et cassants présentent une fluorescence orange sous rayon ultra-violet (cf. Fig. 21). Le dépôt a une surface hétérogène d'une épaisseur de 1 mm et contient des bulles (cf. Fig. 22). Ces dernières étant plus fines sont plus cassantes. L'une des zones recouvertes de ce dépôt semble s'être déformée lors du séchage ou à la suite de la réticulation de l'adhésif (cf. Fig. 23).



*Fig. 21 : Dépôt orange-brun sous lumière UV*



*Fig. 22 : Dépôt bullé présentant une fissure sur la partie la plus fine (en pointillé jaune)*



*Fig. 23 : Zone déformée : dans l'encadré bleu, les tesselles sont soulevées et repliées sur elle-même*

L'analyse élémentaire effectuée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier\* (IRTF) n'a pas permis d'identifier le type d'adhésif, mis à part informer qu'il n'est pas d'origine naturelle (cf. Annexe V – Rapports d'analyses, p.124).

Un second dépôt a été observé sur une plus grande partie de la mosaïque (cf. Fig. 24). Ce dernier, de couleur jaune, est présent sous forme de résidus sur la face arrière des tesselles uniquement (cf. Fig. 25).



*Fig. 24 : zone sur laquelle se trouve le second dépôt — coin inférieur droit de la mosaïque*



*Fig. 25 : Détail de la face arrière d'une tesselle*

Le dépôt est dur (insensible à la pointe du scalpel) et très adhérent à la surface. Le dépôt n'a pas pu être analysé du fait de sa finesse et de sa dureté plus importante que celles des tesselles empêchant tout prélèvement pertinent.

Sous lumière visible, le dépôt apparaît jaune clair tandis que sous lumière ultraviolette, il apparaît blanc (cf. Fig. 26 et Fig. 27).



*Fig. 26 : Dépôt jaune visible sous lumière visible*



*Fig. 27 : Dépôt jaune apparaissant blanc sous lumière UV*

### Altérations structurelles

Les altérations des tesselles sont uniquement structurelles. Certaines tesselles sont fragmentaires ou lacunaires. On peut distinguer deux types de fragmentation :

- les fractures perpendiculaires à la face avant de la tesselle, c'est-à-dire traversant la tesselle de l'avant à l'arrière. Certaines d'entre elles sont seulement fragmentées en deux, ou en trois, d'autres forment un réseau étoilé. Cette fragmentation n'entraîne pas la dissociation de certaines parties des tesselles puisque tous les fragments sont collés à la toile sur la face avant (cf. Fig. 28). Environ 600 tesselles sont concernées par cette fragmentation. Dans quelques rares cas, les faces des fractures sont recouvertes par du mortier gris (cf. Fig. 29).



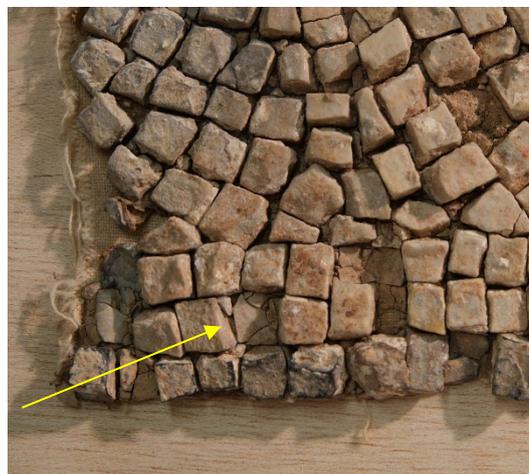
*Fig. 28 : Tesselles fracturées*



*Fig. 29 : Présence de ciment à l'interface de la fracture*

- les fractures parallèles à la face avant de la tesselle, c'est-à-dire traversant la tesselle dans l'épaisseur. Cette fragmentation entraîne la perte de la partie arrière des tesselles, les parties avant restantes mesurent entre 0.5 mm et 1 mm d'épaisseur. Ces dernières présentent elles-mêmes des fracturations perpendiculaires (cf. Fig. 30). Environ 160 tesselles sont concernées par ce type de fragmentation.

*Fig. 30 : Fragmentation parallèle ayant entraîné la perte d'une partie de la tesselle avec fragmentation perpendiculaire de l'élément restant*



La majorité des lacunes se situe sur la moitié supérieure de la mosaïque. Environ 330 lacunes isolées ont été observées sur la mosaïque<sup>51</sup>, en plus de deux zones de 3-4 cm<sup>2</sup> et d'une zone du fond de 23 cm sur 12 cm qui devait contenir environ 200 tesselles (cf. Fig. 31 et Fig. 32, ci-après).

<sup>51</sup> Tesselles rouges : env. 40, vertes : env. 100, jaunes : env. 2, beiges : env.85 et noires ou vertes foncées : env. 110.



*Fig. 31 : lacunes de quelques centimètres carrés localisés sur la moitié droite de la mosaïque*



*Fig. 32 : lacune localisée sur la moitié supérieure gauche de la mosaïque*

Les mortiers sont uniquement présents sous forme de résidus sur l'arrière des tesselles et parfois entre les joints. Ces derniers sont cohésifs, adhérents aux surfaces des tesselles et ne présentent pas d'altérations chimiques.

La surface du *tessellatum* n'est pas parfaitement plane, en plus de l'irrégularité des tesselles, trois élévations sont visibles sous forme de vagues au centre de la mosaïque. Ces dernières sont perpendiculaires au côté le plus long de la mosaïque et s'étalent sur plusieurs centimètres. La déformation par rapport au reste de la surface est peu visible (cf. Fig. 33 et Fig. 34).



*Fig. 33 : Détail de l'arrière de la mosaïque — en jaune : étendue de la zone d'élévation des tesselles*



*Fig. 34 : Détail de l'arrière de la mosaïque - surface arrière irrégulière due à la différence de dimension des tesselles*

### 2.2.2 Altération des matériaux mis en œuvre pour la dépose

Hormis l'empoussièrément généralisé, le textile - utilisé pour l'entoilage semble être en bon état de conservation. Seule une lacune a été observée au niveau du liseré noir situé sur la partie basse gauche de la mosaïque (cf. Fig. 35). *A contrario*, l'adhésif utilisé pour l'entoilage s'est fortement dégradé. D'aspect jaune dans le domaine du visible, il apparaît blanc-bleu dans le domaine de l'ultraviolet lorsqu'il est en film fin et bleu-vert lorsqu'il est plus épais. L'adhésif semble avoir jauni en se dégradant et avoir entraîné la déformation d'une zone du *tessellatum* (cf. Fig. 36 et Fig. 37)



Fig. 35 : Détail du coin inférieur gauche de la mosaïque — dans l'encadrer jaune : lacune du textile (seul l'adhésif maintient les tesselles en place, actuellement retournées), dans l'encadrer rouge : deux rangés de tesselles repliées sur leur face avant



Fig. 36 : Adhésif jaune sous lumière visible



Fig. 37 : Adhésif sous lumière UV — à droite en film fin, à gauche en film plus épais et collé au textile

La dissociation de plusieurs centaines de tesselles - environ 420 - laisse penser qu'en se dégradant l'adhésif a perdu son pouvoir adhésif. La perte d'adhérence s'effectue de manière localisée, à la fois entre l'adhésif et le textile, et entre l'adhésif et les tesselles. Cependant, l'adhésif est plus

adhérant aux tesselles qu'au textile. Des résidus d'adhésif sont présents sur la majorité des tesselles dissociées. D'une épaisseur d'environ 1 mm, le film d'adhésif garde une très grande élasticité malgré son état de dégradation. Cette élasticité laisse penser que l'adhésif est un élastomère, une analyse IRTF a permis de confirmer cette hypothèse, il s'agit d'un polymère à base de caoutchouc (cf. Annexe V - Rapports d'analyses, p.124). La perte d'adhérence de l'adhésif se manifeste aussi par la présence de tesselles désolidarisées toujours en place sur la mosaïque - environ 70 (cf. Fig. 38). Bien que la face avant des tesselles ne soit pas accessible pour le constat d'état, il est possible d'extrapoler leur état de conservation à partir des quelques tesselles dissociées n'étant que partiellement recouvertes de résidus d'adhésif. Ces dernières présentent une surface relativement lisse avec quelques aspérités dans lesquels se trouvent des résidus d'adhésif (cf. Fig. 39) Si l'on compare la face arrière et la face avant des tesselles, la face avant semble plus altérée. Les arêtes ne sont plus nettes mais arrondies. L'aspect de surface est moins rugueux comme si la face avant avait été polie (cf. Fig. 40 et Fig. 41).



*Fig. 38 : Tesselles dissociées conservées dans un sac plastique à côté de la mosaïque*



*Fig. 39 : Tesselle noire dissociée – face avant - exemple de surface altérée*



*Fig. 40 : Tesselle beige dissociée - face arrière avec des arêtes vives*



*Fig. 41 : Tesselle beige dissociée - face avant avec des arêtes arrondies*

### 2.2.3 Cartographie des altérations

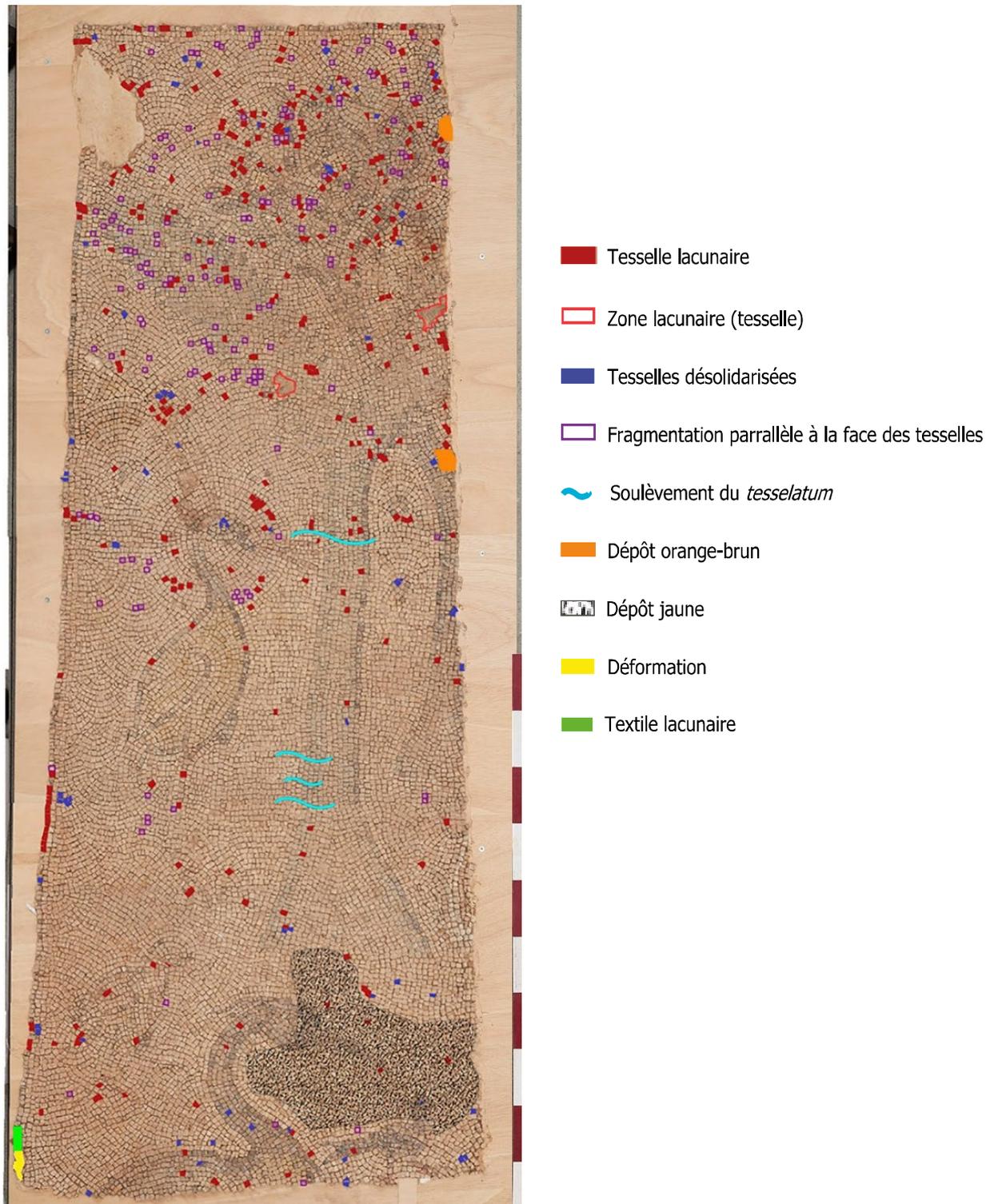


Fig. 42 : Cartographie des altérations (détails par section de la cartographie en Fig. 129 Fig. 130, Annexe I, p.115)

### 2.3 Diagnostic/pronostic

La majorité des altérations semble provenir de la méthode de dépose et des conditions de conservation. En effet, l'absence d'efflorescence sur les tesselles laisse supposer que les altérations structurelles sont uniquement liées à des actions mécaniques. Ces dernières peuvent avoir eu lieu dès la période de création mais aussi durant la période d'utilisation — qu'elle soit antique ou plus récente.

La présence de ciment dans certaines cassures peut témoigner d'une réparation durant la période d'utilisation, d'une consolidation avant la dépose ou encore d'une consolidation pendant une période d'utilisation entre deux déposes. L'histoire de l'objet étant inconnue, il est impossible de définir la provenance exacte de ces altérations. En revanche, on peut supposer que la méthode de dépose a joué un rôle important dans sa dégradation puisqu'elle implique généralement l'arrachement des tesselles ou l'apport important de vibrations. Le mode de conservation pour le transport a aussi pu engendrer des altérations structurelles sur les tesselles déjà fragilisées par la dépose. La mosaïque ayant été probablement roulée sur elle-même afin de permettre un transport plus discret jusqu'à la Suisse. Les tesselles fissurées ont pu se briser totalement sous la pression de leur propre masse. Finalement, les conditions de stockage probablement inadéquates et l'utilisation d'un adhésif d'entoilage instable ont entraîné l'altération de ce dernier. La dégradation de l'adhésif a mené à la diminution de son pouvoir adhésif et donc à la dissociation des tesselles. La mauvaise adhérence des tesselles à l'entoilage est aussi liée à la méthode d'application. En effet, la quantité importante de dépôt adhérent à la surface de l'adhésif au niveau des joints, ou encore de dépôt sédimentaire collé au textile au niveau des lacunes témoigne d'un nettoyage insuffisant avant l'application de l'entoilage. Concernant l'adhésif présent sous forme de taches, il provient probablement d'éclaboussures accidentelles du fait de sa répartition hétérogène et de sa présence en faible quantité.

Finalement l'aspect poli et la présence d'angle arrondi sur la face avant des tesselles sont probablement une usure liée à sa période d'utilisation et d'enfouissement. Cet état de conservation est couramment observé sur les mosaïques antiques.

Le risque principal pour la conservation de l'objet est lié à la perte d'adhérence des tesselles sur l'entoilage pouvant mener à plus ou moins long terme à la perte définitive de la mosaïque. Chaque manipulation entraînant la dissociation de nouvelles tesselles, la réalisation d'un nouveau support semble donc primordiale pour assurer sa conservation à long terme. L'adhérence du nouveau support au *tessellatum* pouvant être entravée par l'empoussièremment de la surface et les divers dépôts — notamment la colle brune qui est particulièrement cassante et fragile — le nettoyage de la face arrière avant la mise en place du nouveau support est impératif.

L'objectif de l'institut d'archéologie étant d'exposer la mosaïque dans leur musée, l'apport seul d'un nouveau support n'est pas suffisant pour redonner sa lisibilité à l'objet. Le retrait de l'entoilage et le nettoyage de la face avant sont donc nécessaires. Cette partie du traitement ne concernant plus la

conservation curative de la mosaïque ne sera pas effectuée durant ce travail, en revanche un protocole de conservation-restauration sera fourni à l'institution afin qu'il puisse achever le traitement.

## 2.4 Impact des altérations sur les valeurs culturelles

L'état de conservation actuelle de la mosaïque ne permet ni son étude, ni son exposition et encore moins une restitution puisque chaque déplacement entraîne la dissociation de tesselles. Le fort empoussièrement combiné à l'accès limité aux motifs par l'arrière du *tessellatum* rend l'étude stylistique et iconographique difficile. La présence de résidus de mortier rend notamment la distinction des coloris et des motifs complexe. La valeur esthétique et la valeur scientifique sont donc fortement impactées par l'état de conservation de la mosaïque. Les valeurs sentimentales et historiques ne sont en revanche pas impactées directement puisqu'elles ne dépendent, dans ce cas, pas uniquement de la matérialité de l'objet. La valeur historique pourrait même être augmentée. En effet, les conditions particulières de dépose combinées à la singularité de la colle utilisée pour l'entoilage font de cet objet un témoin des pratiques de déposes illégales et des problématiques qu'elles entraînent — lorsque les mosaïques peuvent être restaurées. Cependant les preuves matérielles de ces techniques doivent être remplacées sur cette mosaïque car elles entraînent un risque de destruction de l'objet.

# 3 Étude technique pour un nouveau support

---

L'instabilité structurelle induite par le mode actuel de conservation impose la réalisation d'un nouveau support. Cette étude a pour but d'établir les contraintes spécifiques de l'objet et son environnement ainsi que de proposer une solution durable et économique. Les options possibles seront présentées à travers une brève description des pratiques anciennes et actuelles. Les systèmes sélectionnés seront évalués selon des critères de commodité ainsi que par le biais d'une étude sur leurs résistances mécaniques<sup>52</sup>.

## 3.1 Problématique

### 3.1.1 Objectifs

La mise en place d'un nouveau support doit permettre de stabiliser structurellement la mosaïque et ainsi éviter tout risque de dissociation des tesselles. Le système proposé doit être suffisamment résistant pour une exposition à la verticale et facilement manipulable pour empêcher l'apparition de nouvelles altérations structurelles lors du transport ou de l'installation. L'exposition à la verticale implique

---

<sup>52</sup> La portée de l'étude a été limitée par les moyens matériels et le temps à disposition.

l'utilisation d'un système dont les forces d'adhérences sont suffisamment élevées pour prévenir tous problèmes de cisaillement\*. Le nouveau support doit aussi prévenir les problèmes de flexion de la mosaïque en son centre lors de la manipulation. En effet, au vu de la longueur de la mosaïque (2m30) et de la probabilité qu'elle soit un jour soulevée par les extrémités, il est nécessaire que le support proposé anticipe ce problème. Les matériaux rigides et légers sont donc à privilégier. Ces derniers devront aussi être compatibles avec les matériaux constitutifs de la mosaïque et adaptés au contexte de conservation future. La mosaïque sera exposée dans le musée de l'Institut d'Archéologie de Zurich où les conditions climatiques sont relativement stables — environ 20 °C avec probablement une légère hausse en été et une humidité relative variable. Si l'objet est amené à être conservé en réserve, il sera placé dans le dépôt, en sous-sol, où le climat est maintenu à une humidité de 40 % et à une température variant entre 16-20 °C.

### 3.1.2 Pratiques anciennes et actuelles

Depuis le XVIIe siècle, les méthodes de transfert de mosaïque n'ont cessé d'évoluer, l'un des objectifs étant toujours le même : faciliter la manipulation des œuvres. Au cours du temps, d'autres considérations ont été prises en compte, notamment la compatibilité des matériaux entre eux, la stabilité dans le temps et finalement la retraitabilité du support. Les premières techniques identifiées consistaient au collage du *tessellatum* sur des plaques de pierre à l'aide d'un mastic ou d'un mélange de cire et de térébenthine. D'autres supports étaient entièrement constitués de cire, mais ces derniers n'existent plus que sous forme de documentation écrite puisque ces systèmes instables ont été remplacés<sup>53</sup>. Au cours du XIXe siècle, les techniques de coulage dans des coffrages en bois se sont développées, formant des chapes de chaux, de plâtre et à partir de la seconde moitié du siècle, de ciment ou de béton<sup>54</sup>. Les deux derniers mortiers sont aujourd'hui fortement décriés en raison de leur composition riche en sels solubles pouvant remonter à la surface et altérer le *tessellatum*<sup>55</sup>. Ces sels correspondent généralement à la part de chaux libre présente après le séchage. Généralement cette part de chaux est considérée comme un atout, car elle permet de protéger les armatures en fer parfois présentes dans les bétons<sup>56</sup>. Or si cette dernière est solubilisée et migre à la surface, les éléments en fer ne sont plus protégés et un processus de corrosion peut démarrer. Le développement de produit de corrosion induit des tensions au sein du béton puisque les produits de corrosion du fer sont plus volumineux que le métal lui-même. Ces tensions peuvent mener à la fissuration des bétons.

---

<sup>53</sup> Breuil, 2006, p. 88.

<sup>54</sup> Breuil, 2006, p. 90.

<sup>55</sup> ICCROM, 1981, p. 39.

<sup>56</sup> Robinson, 1956, p. 919. Les ciments sont généralement renforcés par une armature en fer pour limiter les phénomènes de cintrage lors de la prise.

Avec l'apparition des résines synthétiques, les bétons sont remplacés au cours du XXe siècle par des résines thermodurcissables et plus particulièrement des époxy. Cette méthode consiste, le plus souvent, à mettre à nu l'arrière du *tessellatum* par des moyens mécaniques puis à couler la résine époxy directement sur les tesselles (cf. Fig. 43). La résine peut être appliquée en combinaison avec des fibres de verre<sup>57</sup>.

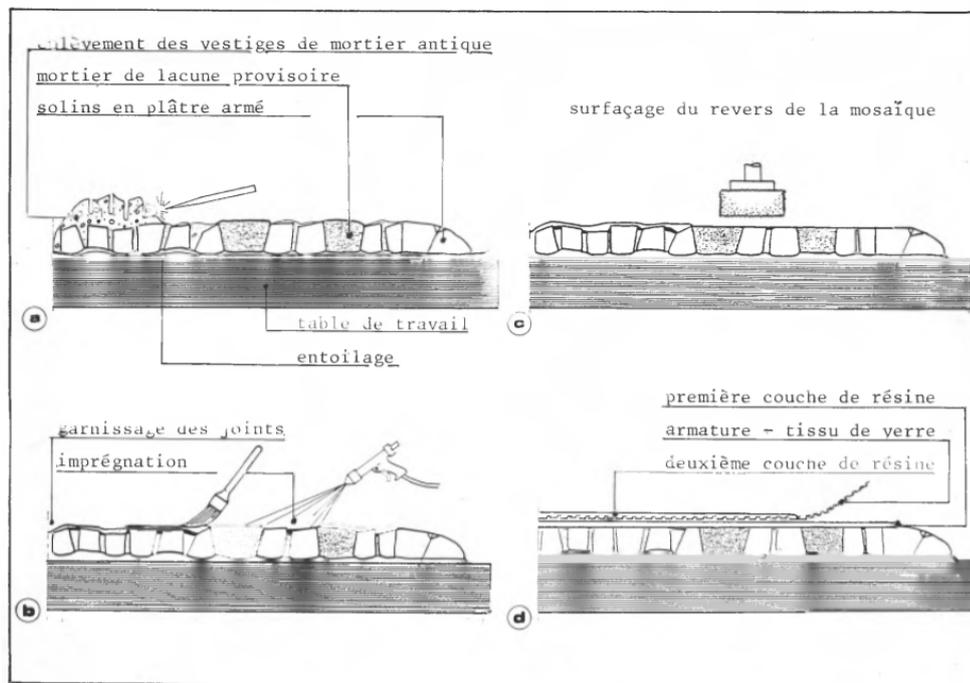


Fig. 43 : Exemple schématisé de remise sur nouveau support avec une résine époxyde à armature en fibre de verre © ICCROM, 1981

Parallèlement à l'élaboration de ces panneaux rigides, une nouvelle méthode de conservation sur support souple a été développée afin de faciliter la manipulation et l'assemblage de fragments prélevés séparément. Dans ce cas, le *tessellatum* est renforcé par une fine couche de résine mélangée à du sable et de la fibre de verre puis est suspendu sur des rails<sup>58</sup> (cf. Fig. 44). Les mosaïques pouvaient ensuite être collées sur des panneaux en nid d'abeilles en aluminium. Bien que coûteux, ces supports remplacent de plus en plus les panneaux de bois — autrefois utilisés pour les expositions à la verticale<sup>59</sup> — du fait de leur légèreté inouïe.



Fig. 44 : Tessellatum conservé sur support souple suspendu sur des rails © Wihr, 1978

<sup>57</sup> Marinelli, 1978, p.43.

<sup>58</sup> Wihr, 1978, p.58.

<sup>59</sup> ICCROM, 1981, p.44.

En plus de l'évolution technologique des supports, de nouveaux principes déontologiques se sont répandus à partir des années 70 grâce à divers colloques et conférences consacrés au traitement des mosaïques. Lors des conférences de l'ICCROM en 1981<sup>60</sup>, il a été établi qu'une couche d'intervention devait être appliquée que ce soit pour un transfert sur un nouveau support ou pour une remise en place *in situ*. La couche d'intervention a été définie comme une « *couche facilement décomposable ou réversible, intercalée entre le tessellatum et le support permettant, si nécessaire, de redétacher le tessellatum sans risques* »<sup>61</sup>. Plusieurs alternatives ont été proposées pour la composition de cette couche. La plupart sont composées de chaux mélangées à diverses charges minérales avec ou sans addition de résine et avec éventuellement une part de ciment. Seule l'une des recettes n'est uniquement composée de résine, de charge et d'adjuvant<sup>62</sup>.

Aujourd'hui, les pratiques sont divisées selon les habitudes culturelles : la résine chargée est la méthode la plus couramment utilisée en France<sup>63</sup> tandis qu'en Italie et en Suisse les mortiers à base de chaux sont préférés. Les recettes exactes varient quant à elles d'un atelier à l'autre puisqu'il n'existe que peu de publications de références proposant des recettes testées et adaptées aux nouvelles exigences actuelles, intégrant notamment la recherche d'une pratique plus écologique et prophylactique\*. De plus, depuis les années 1960, l'accent est porté sur l'amélioration des conditions de conservation *in situ*. Ce mouvement a été motivé par la prise de conscience des professionnels de la valeur du contexte géologique dans l'étude de ces biens archéologiques, « *le déplacement d'un monument ne peut être toléré que lorsque la sauvegarde du monument l'exige ou des raisons d'un grand intérêt national ou international le justifient* »<sup>64</sup>.

### 3.1.3 Supports envisagés

Bien que la conservation *in situ* soit aujourd'hui le mot d'ordre, une grande quantité d'œuvres déposées attendent encore dans les réserves d'être traitées. Deux systèmes ont été envisagés pour stabiliser la mosaïque traitée durant ce travail. Ils comprennent un support en nid d'abeilles apportant la rigidité principale du support, une couche d'intervention à base de chaux (cf. Fig. 45) ou de résine synthétique et dans le second cas une couche d'époxy supplémentaire pour rigidifier le système (cf. Fig. 46, ci-après).

---

<sup>60</sup> Les premiers textes fondateurs sont plus anciens, avec notamment les chartes d'Athènes et de Venise, mais l'application à ce type de patrimoine a mis plus de temps que pour les beaux-arts.

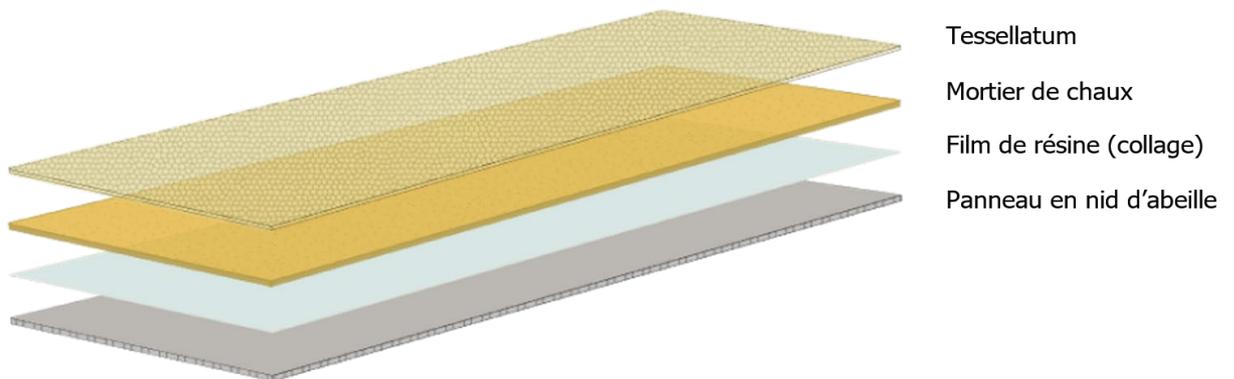
<sup>61</sup> ICCROM, 1981, p.11.

<sup>62</sup> ICCROM, 1981, p.30.

<sup>63</sup> Casado, 2019, p.143.

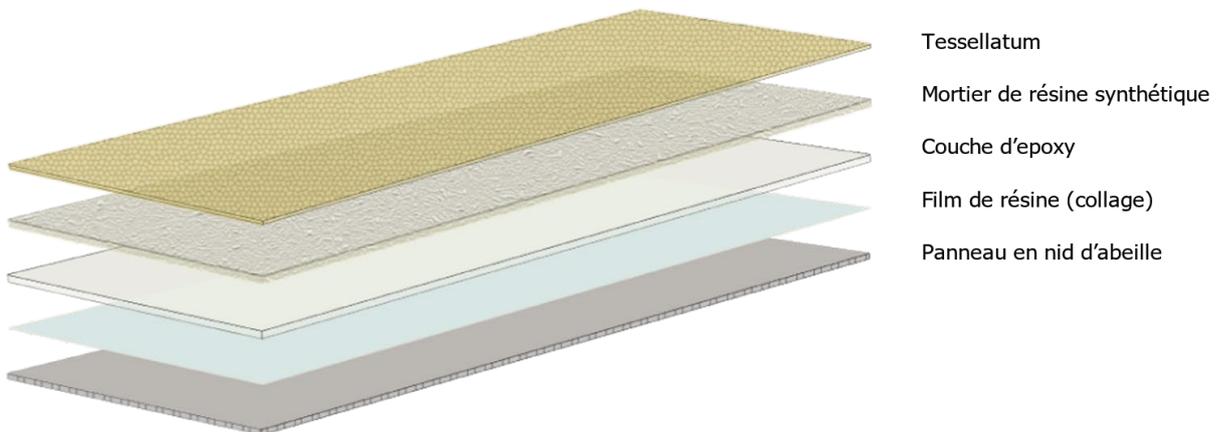
<sup>64</sup> Chartes de Venise, 1964, article 7.

Option n° 1



*Fig. 45 : Stratification comprenant une couche d'intervention à base de chaux encollée à un panneau en nid d'abeilles en aluminium avec une résine époxyde*

Option n° 2



*Fig. 46 : Stratification comprenant une couche d'intervention à base de résine synthétique de quelques millimètres et une couche de résine époxyde formant une strate rigide et plane encollée à un panneau en nid d'abeilles en aluminium avec une résine époxyde*

### 3.2 Choix des matériaux

Les techniques de restauration de mosaïque ont été peu théorisées par le passé, et particulièrement les techniques de remise sur nouveau support. Dans les colloques nationaux et internationaux des études sur des méthodes de restauration de cas indépendants sont présentées mais rarement des études plus générales. Il existe à ce jour peu d'études concernant les mortiers à utiliser

pour les mosaïques déposées. De plus, la majorité des professionnels de ce domaine n'ont souvent pas le temps de publier les résultats de leurs tests, et sont généralement effectués pour répondre à une demande spécifique à laquelle ils sont confrontés. Ils n'ont d'ailleurs même pas le temps ni le matériel pour réaliser des tests. Tout comme les recettes sont différentes selon les ateliers, elles peuvent aussi être différentes selon les problématiques spécifiques des objets. Pour ce travail, le choix des matériaux s'est fondé sur les résultats de deux études dont le contexte de recherche était similaire à celui de ce travail<sup>65</sup>. Les produits présentant les meilleures propriétés parmi le panel étudié ont été sélectionnés. L'expérience et l'expertise des professionnels du laboratoire de conservation-restauration du SMRA ont aussi été mises à profit pour la sélection des matériaux dont ils ont déjà eux-mêmes pu évaluer les qualités. En effet, le laboratoire du SMRA est équipé de plusieurs appareils permettant d'évaluer les propriétés des mortiers — résistances mécaniques, retrait, compacité. Les essais réalisés durant cette étude ont été effectués au laboratoire du SMRA sous la supervision de M. Terrapon Noé, le conservateur-restaurateur responsable des monuments.

### 3.2.1 État de la recherche

Les deux études sur lesquelles est basé le choix des matériaux traitent des problématiques similaires à celles de ce projet de conservation : la recherche d'un support léger pour le remontage d'œuvre déposée. Dans le cas de Mme Casado Célia, la recherche est portée sur la composition du liant de la couche d'intervention. Tandis que l'étude de Mme Frey Géraldine se concentre sur la recherche d'une charge légère. L'une porte sur un panneau de mosaïque, l'autre sur un fragment de peinture murale.

La première étude porte sur la comparaison de plusieurs résines synthétiques acryliques et vinyliques (Acril® 33, Mowilith®, Vinavil® 59) et un liant minéral (chaux hydraulique) chargé avec du sable<sup>66</sup>. Les résines synthétiques ont à la fois été testées en tant que liant principal et en tant qu'adjuvant pour les mortiers à base de chaux. Les résultats obtenus ont permis de définir que les mortiers à base de Vinavil® 59<sup>67</sup> offraient les meilleures propriétés, les critères d'évaluation considérés étant la masse volumique, le pH, le module d'élasticité, la résistance mécanique à la flexion et la réversibilité. Le mortier à base de Vinavil® 59 présente un potentiel hydrogène\* (pH) neutre, une élasticité et une résistance mécanique supérieure aux autres mortiers testés dans l'étude de Mme Casado Célia, une masse volumique plus faible et a l'avantage d'être soluble à l'eau (cf. Annexe VI - Bilan de l'étude de Mme Casado Célia, p.127). Bien que les résultats obtenus soient satisfaisants, les mortiers proposés restent lourds du fait de l'utilisation de sable comme charge minérale. Il a donc été

---

<sup>65</sup> Casado, 2019 et Fray, 2007.

<sup>66</sup> La sélection des liants à tester dans ce mémoire a été définie en fonction des produits couramment utilisés par les professionnels.

<sup>67</sup> La Vinavil® 59 est un homopolymère d'acétate de vinyle en dispersion aqueuse.

jugé intéressant de tester dans cette nouvelle étude les propriétés de ce liant avec une charge dont la densité est moins élevée.

La seconde étude effectuée par Mme Fray a quant à elle permis de définir la charge légère à tester. Plusieurs pré-tests ont été effectués sur diverses charges légères : billes d'argiles expansées, roches volcaniques expansées (vermiculite et perlite) et le polystyrène. Seules les billes d'argiles expansées et la perlite ont été sélectionnées pour l'étude finale puisqu'elles présentaient de meilleures caractéristiques<sup>68</sup>. Les résultats obtenus sont proches. Les billes d'argiles apportent une meilleure résistance à la flexion et à la compression mais une moins bonne résistance à la traction et au cisaillement que la perlite. Le choix de l'un par rapport à l'autre dépend donc des contraintes auxquelles sont confrontés les objets en condition réelle.

La recherche de Mme Fray se concentrant sur l'évaluation de diverses charges légères et non sur les liants, seule la chaux hydraulique NHL3.5 a été utilisée pour tous les mortiers. En revanche, l'utilisation d'adjuvants telle que des résines synthétiques (Aciril® 33) ou des fibres synthétiques (polypropylène) ont aussi été évaluées. Contrairement aux résultats obtenus par Mme Casado qui démontraient que l'ajout de résines synthétiques à la chaux ne semblait pas améliorer de manière significative la résistance mécanique des mortiers, les résultats obtenus dans cette étude semblent tendre en faveur de ces adjuvants puisqu'ils augmentent le pouvoir adhésif du mortier et permettent d'alléger le mortier grâce à la formation de bulles<sup>69</sup>. L'utilisation de chaux additionnée de résine synthétique n'est donc pas à exclure puisque l'adhérence est un facteur important pour une exposition à la verticale de la mosaïque — soumise à des forces de cisaillement prolongées.

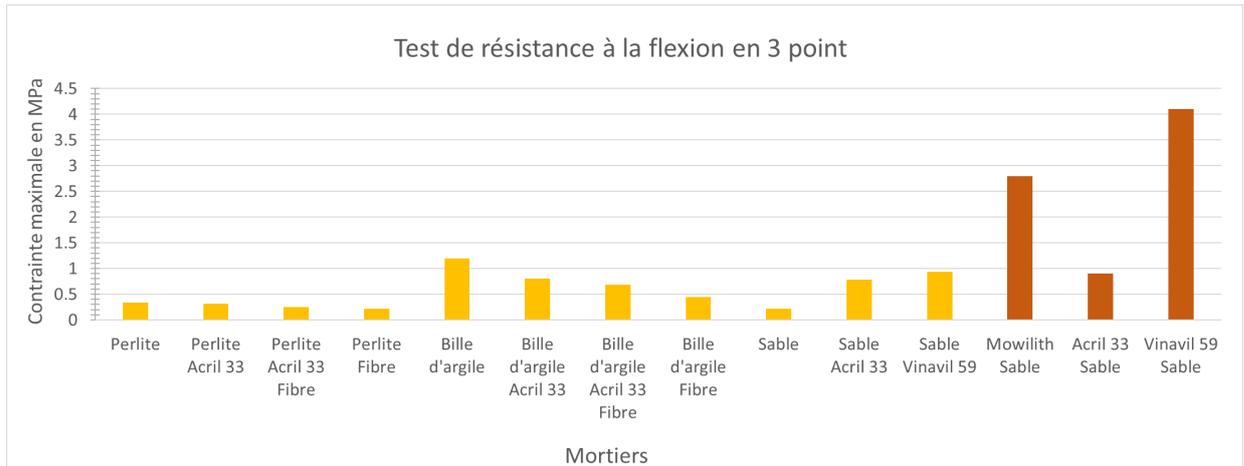
Si l'on compare les données de résistance à la flexion obtenues par les deux études (cf. Graphique 1, ci-après)<sup>70</sup>, il est clair que les mortiers de chaux sont moins performants que les mortiers à base de résines synthétiques. Une telle résistance à la flexion n'est forcément pas nécessaire dans tous les cas de figure, un mortier de chaux pourrait tout de même être adapté dans les cas où les œuvres ne subissent pas de contrainte menant à la flexion.

---

<sup>68</sup> La vermiculite n'a pas été sélectionnée car elle possède une trop grande capacité d'absorption qui nécessite un apport d'eau important. Ce dernier augmente les risques de retrait du mortier lors du séchage, de fissuration et par conséquent diminue sa résistance. Les billes de polystyrènes n'ont pas non plus été choisies à cause de leur trop faible résistance à la compression et à la chaleur (max 60 °C) en plus de leur sensibilité aux micro-organismes (Fray, 2007, p 74).

<sup>69</sup> Fray, 2007, p. 88.

<sup>70</sup> Casado, 2019, p. 192. Fray, 2007, p. 80.



Graphique 1 : récapitulatif des résultats obtenus dans les études de Mme Casado et Mme Fray, les mortiers présentés en jaune sont composés d'un liant à base de chaux hydraulique tandis que les mortiers en brun sont composés d'un liant à base de résine vinylique et acrylique

Sur la base de ces résultats, il a été décidé d'évaluer les propriétés mécaniques d'un mortier à base Vinavil® 59 chargées avec des billes d'argile. Parallèlement, nous avons défini théoriquement les contraintes auxquelles sera exposé l'objet de cette étude.

### 3.2.2 Contraintes spécifiques à la mosaïque

Les deux contraintes identifiées représentant un risque pour l'objet sont le cisaillement et la flexion. Le premier cas concerne la période d'exposition où l'objet est positionné à la verticale. Le second cas s'applique à la phase de manipulation de l'objet. Si la mosaïque est soulevée par ses deux extrémités, cette dernière pourrait fléchir sous son propre poids et entraîner la fissuration de la couche d'intervention. Alors que la flèche\* induit une contrainte en traction dans le mortier, le *tessellatum* subit une contrainte inverse en compression. La compression peut être évitée en réalisant des joints légèrement en retrait, ce qui permettrait aux tesselles de se rapprocher sans créer de tension (cf. Fig. 47) .

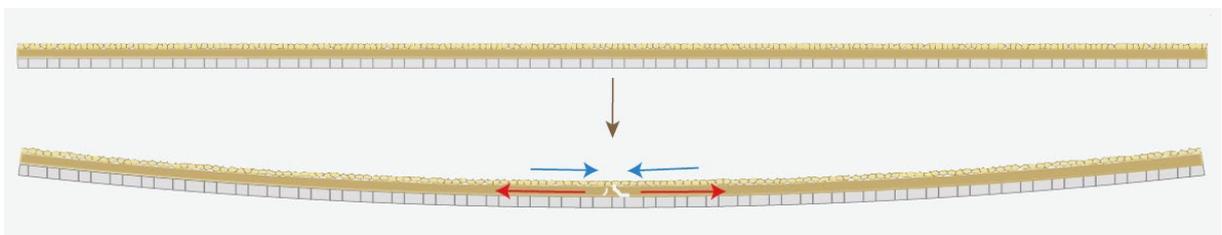


Fig. 47 : Schéma des contraintes pouvant s'appliquer sur l'objet lors d'une flexion, en rouge la zone de fissuration due à la contrainte de traction, en bleu une zone de compression © A. Regnault — HE-Arc

Le risque de cisaillement étant relativement faible au vu de la composition du système<sup>71</sup>, l'étude s'est concentrée sur le calcul de la distance maximale jusqu'à laquelle pourrait fléchir le support en son centre<sup>72</sup>. Le résultat de cette étude théorique a mené à la conclusion qu'un mortier de chaux, théoriquement rigide et cassant, pourrait tout de même être envisagé puisque l'amplitude de flexion maximum à laquelle le système pourrait être confronté sous son propre poids ne serait que de 1.5 mm<sup>73</sup>. Bien que cette valeur soit faible, il est possible que le mortier de chaux ne soit tout de même pas suffisamment souple pour supporter cette flexion. Il a donc été décidé de tester des mortiers de chaux contenant des résines synthétiques afin d'évaluer dans quelle mesure leur apport améliore leur élasticité en plus d'accroître leur pouvoir adhésif.

### 3.2.3 Matériaux sélectionnés <sup>74</sup>

Pour rappel, un mortier est un mélange de liant, d'agrégats, d'eau et parfois d'adjuvant. Le premier a pour rôle de lier les agrégats ensemble pour former un matériau dur (ex : ciment, chaux, colle). Les agrégats quant à eux donnent leurs principales caractéristiques au mortier : leur masse, leur texture, leur couleur, leurs propriétés mécaniques (ex : sables, graviers, granulats légers). L'eau permet à la fois d'entraîner la prise du mortier et d'influencer les caractéristiques du mortier. En effet, une trop faible quantité d'eau rend difficile sa mise en œuvre et une quantité trop importante augmente les risques de retrait. L'eau courante est généralement utilisée du fait de sa faible salinité et son pH neutre. Finalement les adjuvants ont pour rôle d'améliorer les propriétés des mortiers ; par exemple, leur résistance, leur temps de prise, leur couleur, leur texture ou encore leur imperméabilité.

#### Les liants

Les deux liants sélectionnés pour cette étude sont la chaux et la résine vinylique Vinavil® 59. La chaux a été choisie entre autres pour sa stabilité et pour ses propriétés mécaniques qui sont connues et reconnues depuis des millénaires. La résine Vinavil® 59 a été sélectionnée pour sa résistance mécanique plus importante, et plus particulièrement pour son élasticité.

Sur le marché actuel, il existe plusieurs types de chaux dont les caractéristiques varient selon leur pureté. La chaux aérienne utilisée depuis l'Antiquité est une chaux très pure mêlée à seulement 0 à 5 % d'argile. Elle n'a pas été sélectionnée pour cette étude, car elle présente un temps de prise trop long<sup>75</sup>. La teneur en argile a un impact direct sur le temps de prise des mortiers puisqu'elle permet une

---

<sup>71</sup> Les problématiques de cisaillement sont présentées dans la partie 3.3.3, p. 55.

<sup>72</sup> En résistance des matériaux, cette distance est nommée « flèche ».

<sup>73</sup> Les détails de l'étude sont présentés en annexe VII, p.126.

<sup>74</sup> Liste des fournisseurs en annexe XIII, p.172.

<sup>75</sup> De plus, la mise en œuvre plus complexe nécessite des conditions de travail particulières auxquelles le laboratoire de l'institut d'Archéologie de Zurich n'est pas adapté.

prise hydraulique en plus d'une prise aérienne. Lors de la cuisson de la chaux, la silice contenue dans l'argile se lie au calcium pour former des silicates de calcium. En présence d'eau, les silicates de calcium vont former des hydrates insolubles, ce qui confère ainsi un caractère hydraulique au mortier. Le processus de carbonatation habituel prend ensuite le relais pendant plusieurs mois<sup>76</sup>. Plus le mortier est riche en silice, plus la prise est rapide. Ces liants riches en argile sont connus sous le nom de chaux hydraulique naturelle ou NHL et sont classés selon leur indice d'hydraulicité<sup>77</sup> et leur résistance à la compression.

Tableau 1 : Comparatif des chaux aériennes, hydraulique naturelle (NHL) et hydraulique transformée (NHL-Z)<sup>78</sup>

Type de chaux	Indice de Vicat	Taux d'argile <sup>79</sup>	Résistance à la compression <sup>80</sup>
Chaux aérienne	0 à 0.10	0 à 5 %	-
Chaux faiblement hydraulique (NHL2)	0.10 à 0.16	5 à 8 %	2 à 7 MPa
Chaux moyennement hydraulique (NHL3.5)	0.16 à 0.30	8 à 15 %	3.5 à 10 MPa
Chaux hydraulique (NHL5)	0.30 à 0.40	15 à 20 %	5 à 15 MPa
Chaux éminemment hydraulique (NHL-Z)	0.40 à 0.50	20-30 %	-

Selon les conventions, la chaux aérienne a l'avantage d'être très plastique mais a une résistance mécanique faible. À l'inverse, la chaux NHL5 a une résistance mécanique élevée, mais elle est par conséquent plus dure et cassante<sup>81</sup>. Pour la plupart des travaux, le choix se tourne généralement vers la chaux NHL3.5 qui semble être un bon compromis alliant une souplesse et une résistance moyenne ainsi qu'un temps de prise raisonnable<sup>82</sup>. Cependant comme on peut le voir sur la dernière colonne du tableau, les industries sont soumises à des normes imposant des fourchettes de valeurs larges ne permettant pas de distinguer *a priori* leur résistance mécanique. Une chaux étiquetée NHL2 peut ainsi avoir une résistance mécanique supérieure à une NHL5. De plus, comme les tests sont réalisés au bout de 28 jours selon des normes établies pour les ciments (alors qu'ils ont un temps de prise beaucoup plus rapide), les résultats peuvent ne pas être représentatifs de la résistance réelle des mortiers. Les NHL2 ayant un temps de prise plus lente que les NHL5 n'atteindront leur maximum que bien plus tard. Une étude réalisée en Angleterre sur ce sujet a démontré qu'après deux ans de séchage/carbonatation,

<sup>76</sup> Adam, 2001, p.29.

<sup>77</sup> Ou indice de Vicat caractérisant leur capacité à carbonater sous l'eau.

<sup>78</sup> La chaux NHL-Z n'est pas considérée comme une chaux hydraulique naturelle, mais une chaux transformée puisqu'elle contient une part de ciment ou autres adjuvants (ex : pouzzolane).

<sup>79</sup> Adam, 2001, p.30.

<sup>80</sup> NF EN 459-1, 2012, p.19.

<sup>81</sup> Labesse, 2005, p. 15.

<sup>82</sup> Fray, 2006, p.70. — Casado, 2019, p.166. — Conserv®, 2021 [en ligne].

les NHL2 présentait des résistances mécaniques supérieures aux autres NHL et que certaines NHL5 avaient les résistances les plus faibles et étaient donc moins dures et moins cassantes<sup>83</sup>. L'étude a été réalisée avec des mortiers de plusieurs marques et aucune des NHL5 n'a atteint le minimum de résistance établie par les normes. Le manque de fiabilité des indications devrait être activement pris en compte dans le monde de la conservation et ne plus être un critère de sélection. Les premiers dégâts liés à ces informations erronées ont d'ailleurs déjà été observés : lors d'un projet de consolidation d'une façade d'un monument en pierre, une chaux NHL2 avait été spécifiquement sélectionnée pour agir comme élément sacrificiel et ainsi protéger la pierre calcaire d'origine. Cependant, la dureté du mortier a été beaucoup plus importante que prévu et la pierre a continué à se détériorer, seul le mortier est resté intact 14 ans après la restauration (cf. Fig. 48)<sup>84</sup>. Actuellement le choix de la chaux selon des critères de résistance est presque impossible à définir sans tests préalables ; ces derniers étant très chronophages, ils ne peuvent être que rarement réalisés — surtout pour des projets à temps limité.



*Fig. 48 : Pierre ayant continué de se dégrader laissant visible la chaux NHL 2 intacte © Alison*

Les conditions de conservation futures de la mosaïque étant optimales (stables et en intérieur) réduisent considérablement les risques d'altérations de la mosaïque. Seule la plasticité du mortier est un facteur important. Cependant le temps à disposition pour ce travail ne permet pas d'effectuer de pré-tests avec différentes chaux. Il a donc été décidé d'utiliser une chaux NHL5 couramment employée par le laboratoire du SMRA<sup>85</sup>. En plus de permettre une prise plus rapide, l'intérêt d'utiliser une chaux qui est couramment utilisée par le SMRA est de pouvoir en connaître les défauts grâce à l'expérience des restaurateurs. Par le passé, ils ont été confrontés à l'apparition d'efflorescences sur les mosaïques *in situ* et ont supposé que ce phénomène était lié à la présence de chaux libre résiduelle dans les NHL.



*Fig. 49 : Chaux NHL5*

<sup>83</sup> Figueiredo, 2018, p. 136.

<sup>84</sup> Figueiredo, 2018, p. 136.

<sup>85</sup> D'après une communication orale avec M. Terrapon Noé, en Suisse, l'approvisionnement de la chaux NHL5 est plus simple que la chaux NHL3.5, c'est pourquoi il l'utilise majoritairement.

Il a en effet été observé sur les ciments qu'en présence d'humidité, de sulfates ou d'acides, les hydroxydes de calcium non liés se solubilisent et migrent à la surface des mortiers. Comme ce phénomène concerne aussi les mortiers actuels, les industries se sont intéressées au développement d'adjuvants dont le rôle est de se lier à la chaux libre et de former des composés stables. Les restaurateurs du SMRA ont alors décidé d'utiliser l'un de ces produits en tant qu'adjuvant pour la chaux NHL5. Le produit en question est composé de kaolinite pure, un silicate d'alumine hydraté activé par calcination (Metaver®). Jusqu'à présent, les mortiers de chaux NHL5 réalisés par le SMRA contenant du Metaver® n'ont pas présenté d'efflorescences.

Bien que les chances de solubilisation de la chaux libre soient faibles pour un objet conservé en intérieur contrôlé, il a tout de même été décidé d'utiliser cet adjuvant, car il apporte d'autres qualités : il rend le mortier plus plastique, facilite ainsi sa mise en œuvre et améliore ses performances mécaniques<sup>86</sup>.

Le métakaolin (kaolinite calcinée) peut être comparé aux pouzzolanes utilisées dans les mortiers antiques. Ce sont tous deux des roches volcaniques permettant d'améliorer la prise hydraulique<sup>87</sup>. Une prise rapide est avantageuse dans ce cas puisque l'objet pourra être manipulé relativement rapidement sans risque d'altérer le support.



Fig. 50 : Kaolinite — Metaver®



Fig. 51 : Vinavil® 59

© CTS

Le second liant sélectionné pour cette étude est la résine vinylique Vinavil® 59. Il s'agit d'un homopolymère acétovinylique non plastifié en dispersion aqueuse au pH neutre. D'après l'étude de Mme Casado, la Vinavil® 59 apporte une résistance mécanique bien supérieure aux mortiers de chaux<sup>88</sup>. De plus, la Vinavil® 59 a l'avantage d'être moins sensible à la lumière que les autres PVAC qui ont tendance à jaunir et perdre leur pouvoir adhésif sous l'effet de la lumière<sup>89</sup>. La couche d'intervention n'étant pas exposée à la lumière, le risque de perte de stabilité est faible<sup>90</sup>. Cette résine a aussi l'avantage d'être facilement accessible puisqu'elle est abordable et disponible sous forme de bidon de 1 kg chez le fournisseur CTS®.

<sup>86</sup> Velosa, 2007, p.6.

<sup>87</sup> Coutelas, 2009, p.19.

<sup>88</sup> Casado, 2019, p. 192.

<sup>89</sup> Domenech-Carbo, 2011, poster.

<sup>90</sup> Les résines synthétiques sont des matières organiques et comportent donc de manière générale un risque de dégradation sur le très long terme.

### Le granulat

Le choix du granulat était dans un premier temps tourné vers les billes d'argiles expansées car elles apportent de bonnes résistances à la flexion et à la compression. Mais les conditions d'approvisionnement difficiles en Suisse ont finalement orienté notre choix vers la perlite. Cette dernière est disponible sous forme de sac de 100L dans les magasins de bricolage courants et à la bonne granularité\* (entre 0-6.5mm). La granularité de la charge est un facteur fondamental dans la réalisation des mortiers. Elle influe sur la maniabilité, le retrait et la résistance mécanique.



Fig. 52 : Perlite — roche volcanique expansée

La granularité du sable, situé entre 0-6.5 mm<sup>91</sup>

fait office de référence pour la sélection du granulat. La perlite disponible en magasin se situe aussi entre 0-6 mm tandis que les billes d'argiles expansées ne sont en vente qu'à une granularité de 4-8 mm, la perlite est donc plus adaptée pour cette utilisation.

### Les adjuvants

Trois adjuvants ont été sélectionnés à partir des études précédemment citées : l'Acрил® 33, le Vinavil® 59 et le Peoval® 33. Ce dernier n'avait pas été évalué puisque le produit n'avait pas été livré à temps pour l'étude de Mme Casado. Cet adhésif est décrit par le fournisseur comme étant spécialement formulé pour l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers de chaux dans le domaine de la restauration. Il a donc semblé intéressant de l'évaluer.

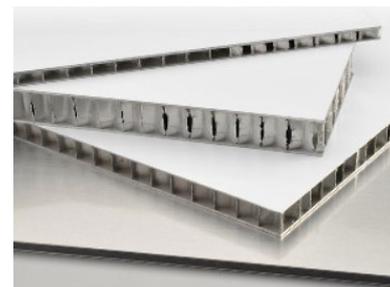
Tableau 2 : Comparaison de l' Acрил® 33, du Vinavil® 59 et du Peoval® 33

Produit	Acрил® 33	Vinavil® 59	Peoval® 33
Composition	Copolymère acrylique	Homopolymère acétovinyle non plastifié	Copolymère de l'ester de l'acide versatique avec acétate de vinyle
Milieu	Dispersion aqueuse	Dispersion aqueuse	Dispersion aqueuse
Viscosité	2500-5000 mPas. s	3500-12500 mPa. s	7000 +12500 mPa. s
Résidus solides	45-47 %	42 +/- 1 %	42 +/- 1 %
pH	9-10	7	6-7
Description Des fiches techniques	Résistant aux alcalis donc particulièrement adaptés aux liants hydrauliques	Particulièrement adapté au bois, plastique et aux matériaux poreux	Améliore les résistances mécaniques, la stabilité, l'hydrofugation
Conservation	Illimité	Max 1 an	Illimité

<sup>91</sup> Adam, 2001, p.41.

### Panneau en nid d'abeilles

Le panneau sélectionné est composé de deux tôles en aluminium émaillées au four et d'un noyau en nid d'abeilles\* en aluminium. L'épaisseur du panneau a été choisie en fonction des disponibilités sur le marché. Une épaisseur de 5 cm aurait permis de compenser tout problème de flexion du panneau. Cependant ce n'est pas une dimension standard, elle n'est donc produite que pour des commandes industrielles. La dimension maximum vendue au détail est de 2,5 cm. Cette épaisseur a été estimée suffisante en considérant le retour d'expérience du SMRA. Des panneaux de 5 cm d'épaisseur sont disponibles chez CTS®, mais ces derniers ne proposent pas de service de coupe. Au vu des dimensions du panneau et du matériel disponible à l'IAZ, il a été jugé préférable de commander un panneau chez un fournisseur proposant un service de découpe.



*Fig. 53 : Panneau en nid d'abeille Alucore® © Allega*

### Résine pour le collage du panneau

Les adhésifs utilisés pour le collage peuvent être de deux types : les adhésifs structuraux et non structuraux. Les premiers sont généralement utilisés pour les collages de grande surface nécessitant un grand pouvoir adhésif. Les adhésifs structuraux se distinguent donc des adhésifs non structuraux par leur résistance supérieure à la traction et au cisaillement (<10-12 MPa pour les non structuraux et >20 MPa pour les structuraux)<sup>92</sup>. Parmi les adhésifs structuraux, on trouve les résines époxydes, les acryliques, les phénoliques et les polyuréthanes. La résine époxyde a été sélectionnée pour ses bonnes caractéristiques mécaniques, son pouvoir adhésif important, son mode de prise, sa viscosité faible, son temps de manipulation et surtout le faible taux de retrait. Les époxydes bicomposantes ont l'avantage de n'entraîner qu'un très faible retrait puisqu'elles durcissent par polymérisation et non par séchage (ce dernier menant à l'évaporation de l'un des composants et donc un retrait important). La résine époxyde sélectionnée est la résine EPO® 150 combinée au durcisseur K151.

Le choix de cette résine a été principalement influencé par ses caractéristiques techniques (compatibilité avec les matériaux en béton, pierre, en terre cuite ou en bois) mais aussi par les quantités disponibles en magasin. Elle est disponible sous forme de bidon de 1 kg à un prix raisonnable chez le fournisseur CTS®, ce qui permet d'éviter les délais douaniers et assure donc une livraison dans les temps. Actuellement, les résines spécialement formulées pour le collage sont presque uniquement disponibles en très petite quantité (seringue) ou en très grande quantité (bidon de 25 kg). La plupart des



*Fig. 54 : Résine époxyde EPO 150 et durcisseur K151 © CTS*

<sup>92</sup> Bretton, 2004 [en ligne].

résines époxydes facilement accessibles dans des quantités plus adaptées sont très onéreuses car elles sont purifiées afin d'obtenir des résines très transparentes (ce qui n'est pas nécessaire dans notre cas).

De plus, bien que les résines époxydes soient couramment utilisées depuis quelques années dans le domaine de la création, le choix est de plus en plus restreint. En effet, les industries se tournent désormais vers les adhésifs siliconés qui présentent de meilleures qualités mécaniques. Le SMRA a utilisé quelquefois ces nouveaux adhésifs et semble satisfait des résultats obtenus. Il déconseille toutefois leur utilisation pour le collage de grande surface puisqu'une fois en contact avec la colle, le pouvoir adhésif est tel que le panneau ne peut plus être ajusté. Elles sont donc plus difficiles à mettre en œuvre<sup>93</sup>.

### 3.2.4 Composition des mortiers

La proportion des différents composants des mortiers est fondamentale. Par exemple un mortier trop riche en chaux aura une résistance mécanique bien plus faible à cause du phénomène de retrait plus important. À l'inverse un mortier avec trop de granulat par rapport au liant n'aura pas assez de cohésion et sera donc friable. La composition des mortiers a été définie à partir des études précédentes<sup>94</sup> qui se sont elles-mêmes basées sur les proportions attestées depuis l'antiquité, mais aussi sur l'expérience de professionnels de la conservation-restauration ou de prétest.

Tableau 3 : Composition des mortiers

M	Liants	Granulat	Eau (+ Adjuvant)
C	Chaux NHL5 + Métakaolin (85 : 15) 1 volume	Perlite + sable (90 :10) 3 volumes	1 volume
CA	Chaux NHL5 + Métakaolin (85 : 15) 1 volume		1 volume Acril® 33 à 5 %
CP	Chaux NHL5 + Métakaolin (85 : 15) 1 volume		1 volume Peoval® 33 à 5 %
CV	Chaux NHL5 + Métakaolin (85 : 15) 1 volume		1 volume Vinavil® 59 à 5 %
VP	Vinavil® 59 + eau (80 : 20) 1.25 volume	Perlite + sable (90 :10) 4 volumes	-

Les proportions ont dû être ajustées à l'aide de prétests, car la quantité d'eau conseillée pour les mortiers de chaux était trop importante<sup>95</sup>. La quantité d'eau a donc été ajustée en évaluant la consistance des mortiers. D'après l'expérience de M. Terrapon Noé, conservateur-restaurateur,

<sup>93</sup> Communication orale avec M. Terrapon Noé.

<sup>94</sup> Casado, 2019, p.168. Fray, 2007, p.78.

<sup>95</sup> La quantité d'eau est généralement définie en fonction de la porosité du granulat. La granularité de la perlite étant légèrement différente de celle utilisée dans l'étude de Mme Fray, il n'est pas anormal que les proportions soient à ajuster.

responsable des monuments au SMRA, un mortier que l'on peut lisser et qui tient à la truelle si on la positionne à la verticale est un bon mortier (peu de retrait ou de risque de fissuration). La quantité d'eau établie est en réalité légèrement inférieure à 1 volume. Les mortiers contenant des adjuvants contiennent logiquement moins d'eau puisqu'une part de ce volume est occupé par la résine. Habituellement, les résines sont diluées entre 5 à 10 % en poids/poids dans l'eau<sup>96</sup>. Dans ce cas, il a été décidé d'apporter un minimum de résine, le but étant d'améliorer le mortier sans le plastifier totalement. La quantité de résidus secs étant d'environ 42 % pour toutes les résines, ces dernières ont été diluées à 10 % pour obtenir une dilution réelle de 5 %. Comme chaque résine ne contient probablement pas la même quantité molaire de polymère, cette étude ne permet pas une évaluation stricte des qualités des adhésifs selon leurs proportions réelles. En revanche elle permet de comparer l'utilité de ces résines dans un mortier telles qu'elles seraient utilisées dans la pratique — c'est-à-dire diluées en poids/poids ou poids/volume et non en fonction de la masse molaire<sup>97</sup>.

La quantité de métakaolin a été définie selon les recommandations d'utilisation du fournisseur : 5 à 15 % du volume du liant doit être remplacé par du métakaolin. Il a été choisi de remplacer 15 % du volume pour assurer la stabilisation totale du mortier, et créer une réserve de métakaolin, prévenant ainsi tous problèmes liés à la présence de sels solubles.

La composition du granulat a finalement été modifiée à la suite de l'étude de la courbe granulométrique de la perlite, qui certes se trouve dans la même fourchette de dimension mais n'a pas du tout la même répartition granulométrique\*. La perlite contient une majorité de grains entre 2 et 4 mm tandis que le sable est plus riche en grains entre 500 µm et 2 mm. Cette différence a pu être observée lors des prétests : le mortier de perlite était plus grossier et moins facile à lisser. Dans certains cas, ce manque de régularité n'est pas un problème mais dans le cas de cette mosaïque le mortier sera directement appliqué sur les tesselles qui sont elles-mêmes irrégulières. Il est donc fondamental que le mortier soit appliqué de manière homogène pour qu'il y ait suffisamment de surface de contact entre le mortier et chacune des tesselles. L'étude théorique de la répartition granulométrique de la perlite a permis de définir la quantité minimum de sable à ajouter pour homogénéiser le mortier sans pour autant l'alourdir de manière significative (cf. Annexe VIII - Étude sur la répartition granulométrique des mortiers, p.129).

---

<sup>96</sup> Casado, 2019, p.198.

<sup>97</sup> Définir la masse molaire des adhésifs synthétiques est presque impossible puisque les fournisseurs informent rarement de la composition exacte d'un adhésif. De plus, un adhésif n'est pas composé d'un seul polymère répété plusieurs fois, mais de plusieurs isomères dont la longueur des chaînes varie, et ces isomères sont présents en différentes quantités. Il est possible de mesurer des moyennes de masse molaire à seulement trois moments de la distribution des isomères à l'aide d'une analyse chromatographique par diffusion de lumière statique (SEC-MALS — Multiangle light scattering). Le résultat obtenu est donc seulement une moyenne et non une composition exacte, qui semble aujourd'hui inaccessible pour un praticien de la restauration (Guehno, 2017, p.35).

### 3.3 Protocole des tests

L'étude des propriétés mécaniques des différents mortiers a été réalisée en trois temps. Une première partie a été consacrée à l'étude de la résistance à la flexion selon les normes en vigueur afin d'obtenir des résultats comparables aux études précédentes. Une seconde partie a été dédiée à l'étude des résistances mécaniques appliquées au cas de la mosaïque traitée dans ce mémoire. Pour finir, une dernière partie s'est focalisée sur l'évaluation de la cohésion du mortier sous la contrainte de force de cisaillement. Les différents tests de résistance mécanique ont été réalisés au sein du laboratoire de conservation-restauration du SMRA.

#### 3.3.1 Flexion en 3 points

Le module d'élasticité\* des différents mortiers a été évalué à l'aide du test de résistance à la flexion en trois points selon la norme EN NF 196-1. Le principe du test est de soumettre chaque éprouvette de mortier à une charge externe avec une force d'application croissante jusqu'à la rupture (cf. Fig. 55). Le comportement de chaque mortier est enregistré par l'appareil et permet d'obtenir une courbe de déformation et une valeur maximale de résistance sous la contrainte à la rupture (en MPa). La courbe de déformation exprime le rapport entre la charge appliquée en Newton (N) et la flèche en mm.

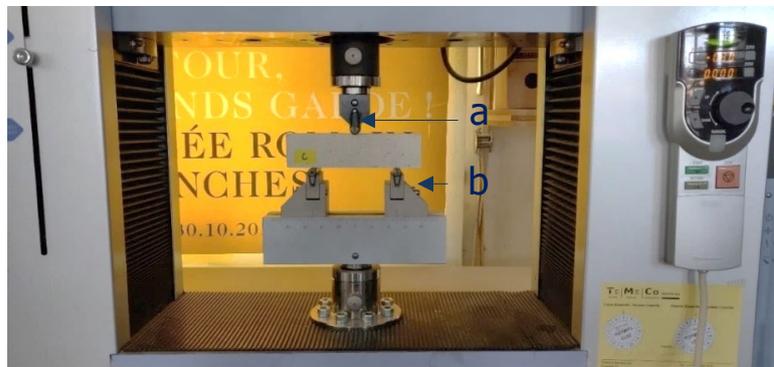


Fig. 55 : Banc d'essai du test de Flexion en 3 points — Shimadzu AG-X plus associé au logiciel Trapezium X pour le traitement des données. a : charge appliquée ; b : appuis

La valeur maximale de contrainte à la rupture est obtenue à partir du calcul suivant :

$$\sigma_r = \frac{3 (F_r * L)}{2 * l * e^2}$$

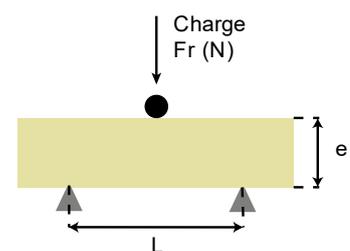
$\sigma_r$  : contrainte à la rupture (MPa)

$F_r$  : force de rupture (N)

$L$  : distance entre les appuis (mm)

$l$  : largeur de l'éprouvette (mm)

$e$  : épaisseur de l'éprouvette (mm)



Les éprouvettes ont été réalisées selon la norme AFNOR EN NF 196-1 à l'aide d'un malaxeur MIXMATIC 092N programmé à cet effet (cf. Fig. 56). Le mode opératoire de préparation des mortiers suit le protocole suivant :

- introduire l'eau et le liant dans le récipient ;
- dès que l'eau et le liant entrent en contact, mettre immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse ;
- après 30 sec. de malaxage, introduire régulièrement tous les granulats pendant les 30 sec. suivantes ;
- passer le malaxeur sur grande vitesse et continuer le malaxage pendant 30 sec. supplémentaires ;
- arrêter le malaxeur pendant 90 sec. Pendant les premières 30 sec., enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc ou en plastique tout le mortier adhérent aux parois et au fond du bol et le placer au milieu du bol ;
- reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60 secs.<sup>98</sup>



Fig. 56 : Malaxeur

Mixmatic 092N © SMRA

Une fois prêt, le mortier de gâchage est coulé dans des moules en acier inoxydable, répondant eux aussi à la norme EN NF 196-1. Ces derniers permettent de préparer trois éprouvettes du même mortier en même temps<sup>99</sup> (cf. Fig. 57). Chaque mortier sera ainsi évalué trois fois afin d'assurer la fiabilité du résultat. Seul le protocole de séchage n'a pas été suivi puisqu'il aurait pu empêcher ou retarder le séchage des mortiers contenant de la résine synthétique. La norme impose la mise en étuve des éprouvettes démoulées à 50 % d'humidité relative après 48 h de séchage. Dans notre cas, le démoulage n'a pas été possible après 48h. Il semble donc qu'en plus de ne pas permettre la mise en étuve, les résines synthétiques retardent le séchage et probablement la prise du mortier.

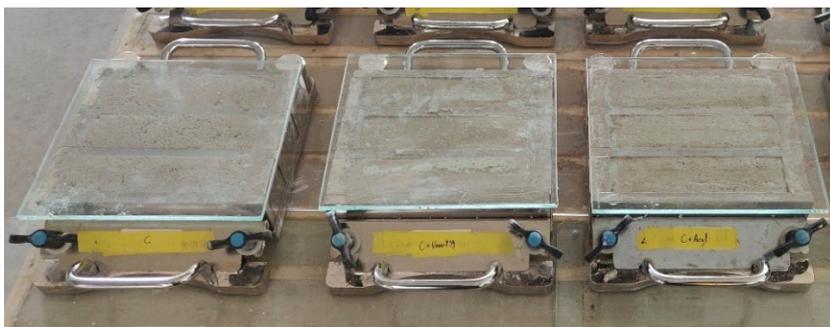


Fig. 57 : Moules industriels en acier inoxydable à 3 compartiments. Chaque élément du moule peut être retiré afin de démouler les mortiers sans les altérer © A. Regnault – HE-Arc

<sup>98</sup> Norme AFNOR EN NF 196-1.

<sup>99</sup> Dans notre cas des moules supplémentaires ont été utilisés pour réaliser une quatrième éprouvette pour prévenir tout problème de casse lors du démoulage ou autre facteur rendant inexploitable l'une des éprouvettes.

### 3.3.2 Application au cas de la mosaïque : essais de flexion

La distance maximale de déformation (flèche) et le module d'élasticité sont directement influencés par les dimensions des éprouvettes. Plus l'échantillon est long et fin plus son module d'élasticité est faible<sup>100</sup> et sa flèche élevée. Les éprouvettes aux dimensions normalisées ne permettent pas d'étudier le comportement des mortiers en conditions réelles. Des éprouvettes aux dimensions réduites et proportionnelles à celles de la mosaïque ont été préparées afin d'évaluer l'élasticité des mortiers selon ces nouvelles variables (cf. Fig. 58). L'objectif de ce test est principalement d'évaluer si les mortiers à base de chaux présentent une élasticité suffisante pour ne pas être altérés si la mosaïque venait à fléchir sous son propre poids. Les éprouvettes seront soumises à une charge à l'aide du système de flexion en trois points jusqu'à atteindre une flèche de 1.5 mm<sup>101</sup>. Le but est d'observer l'éventuelle apparition de fissures et d'identifier leur flèche maximale — dans le cas où les mortiers auraient rompu avant la valeur définie. Les éprouvettes seront collées à l'aide d'époxy sur un support en nid d'abeilles dont l'épaisseur est aussi adaptée proportionnellement.



Fig. 58 : Éprouvettes aux dimensions proportionnelles au format de la mosaïque (longueur et épaisseurs) — ELI : 0.5 x 50 x 5 cm

### 3.3.3 Cisaillement

Le test de cisaillement est basé sur la méthode élaborée par l'institut de conservation du Getty pour les mortiers d'injection. À l'origine ce test est prévu pour évaluer l'adhérence des mortiers à la pierre<sup>102</sup>. Dans notre cas, le risque de perte d'adhérence des tesselles au mortier est minime<sup>103</sup>, de même que le risque de perte d'adhérence à la résine époxy. En revanche la couche d'intervention étant plus fragile, le risque de rupture cohésive de cette couche est important. La préparation des éprouvettes a donc été adaptée pour l'évaluation de la cohésion des mortiers.

<sup>100</sup> Les matériaux au module d'élasticité élevé sont plus rigides et plus cassants. Un module d'élasticité faible n'est pas forcément négatif puisque le matériau est plus souple. Il peut ainsi être déformé temporairement et retrouver sa position d'origine lorsqu'il n'est plus soumis à la contrainte.

<sup>101</sup> Valeur définie dans l'étude sur les contraintes spécifiques à l'objet (cf. Annexe VII, p.127)

<sup>102</sup> Biçer-Simsir, 2013, p.62.

<sup>103</sup> L'interface entre les tesselles et le mortier n'est pas lisse et uniforme, le mortier de la couche d'intervention est appliqué jusque dans les joints sur quelques millimètres. Les forces appliquées sont donc réparties sur plusieurs surfaces et non uniquement à l'arrière des tesselles. Le risque de cisaillement est ainsi fortement réduit.

Le protocole du Getty consiste à réaliser un assemblage composé de deux échantillons de pierre au profil rectangulaire au milieu desquels est coulé le mortier à évaluer (cf. Fig. 59). Le test de cisaillement est ensuite réalisé avec le dispositif à l'origine prévu pour l'étude de la compression des mortiers (cf. Fig. 60).

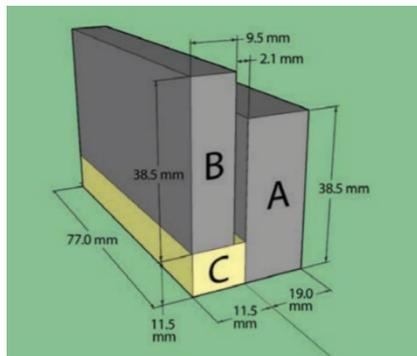


Fig. 59 : Préparation schématisée des échantillons — le mortier est coulé entre A et B, la partie C est retirée une fois le mortier sec © J. Paul Getty Trust

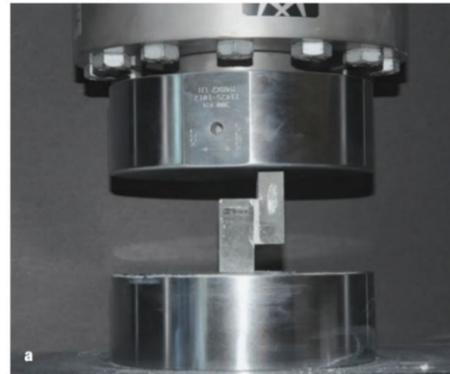


Fig. 60 : Test de cisaillement — Dispositif de compression © J. Paul Getty Trust

Pour cette étude, l'élément A est remplacé par une plaque en acier inoxydable et l'élément B par un échantillon de panneau en aluminium en nid d'abeilles. Les mortiers ne sont pas coulés dans les interstices mais séchés à part<sup>104</sup>. Les éprouvettes sont ensuite collées à l'aide de résine époxy sur les deux éléments métalliques (cf. Fig. 61 et Fig. 62).

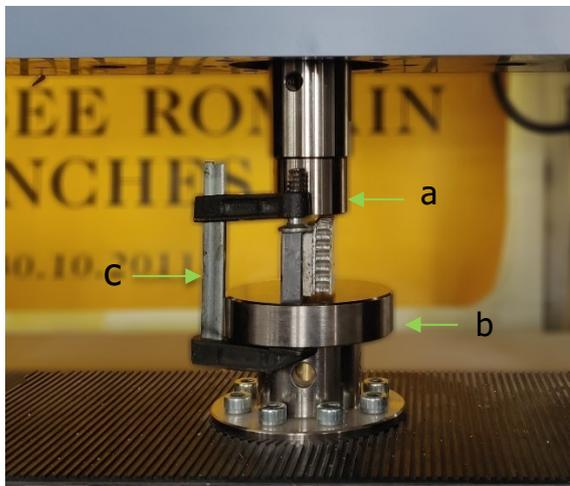


Fig. 61 : Banc d'essai du test de cisaillement — a : charge appliquée ; b : base fixe ; c : système de maintien adapté

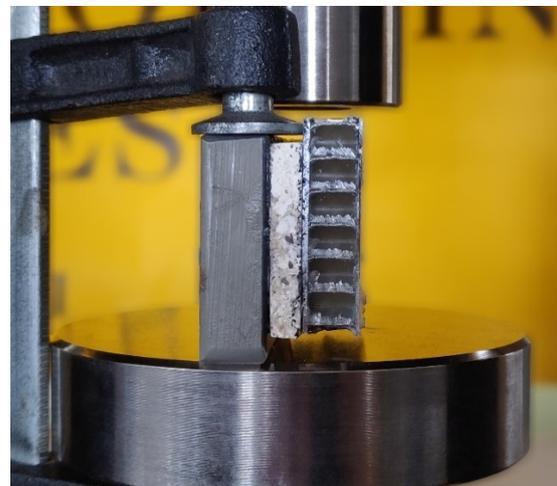


Fig. 62 : Test de cisaillement — mortier collé à l'époxy entre une plaque en aluminium alvéolé et une plaque en acier inoxydable

<sup>104</sup> Les éprouvettes réalisées pour le test de flexion (appliqué à la mosaïque) ont été découpées et réutilisées pour ce test.

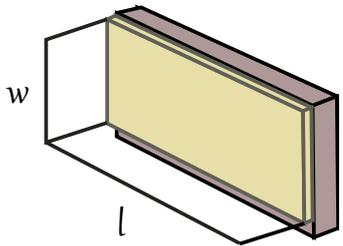
Le remplacement de la partie B par une plaque de panneau en nid d'abeilles permet de réduire l'apport de poids sur le mortier à T0. Si une seconde plaque en acier inoxydable avait été utilisée, les échantillons de mortier auraient pu céder avant le début de l'essai ou fausser les résultats. Cela permet aussi de reproduire la stratification de support futur et ainsi de vérifier la capacité de collage de la résine époxyde à la surface émaillée du panneau en aluminium.

Comme pour le test de flexion, le principe du test est de soumettre les éprouvettes à une charge croissante jusqu'à la rupture. Le comportement de chaque mortier est retranscrit par une courbe de déformation (en N) ainsi qu'une valeur de résistance maximum de contrainte à la rupture (en N/mm<sup>2</sup>).

La contrainte maximale à la rupture se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$f_{sb} = \frac{F}{w * l}$$

$f_{sb}$  : résistance au cisaillement (N/mm<sup>2</sup>)  
 $F$  : force appliquée (N)  
 $w$  : largeur de l'éprouvette (mm)  
 $l$  : longueur de l'éprouvette (mm)



Les échantillons de mortier testés ont été préparés selon le même protocole que pour les autres tests puisque les éprouvettes ont été découpées dans celles utilisées pour le test de flexion aux dimensions adaptées à celle de la mosaïque. Trois éprouvettes de chaque mortier ont été découpées pour le test.

### 3.4 Résultats

Avant de réaliser les essais de flexion, les éprouvettes normalisées ont été pesées afin de déterminer la densité de chaque mortier. La densité exprime le rapport entre la masse volumique d'un corps et la masse volumique d'une entité de référence, généralement l'eau pure. La volumique de l'eau étant de 1, on peut en déduire que la densité est égale à la masse volumique du corps à évaluer. La masse volumique d'un corps se calcule en divisant sa masse par son volume.

$$d = \frac{\rho_{corps}}{\rho_{eau}} = \frac{\rho_{corps}}{1} = \rho_{corps}$$

$$\rho_{corps} = \frac{m}{V}$$

$d$  : densité (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho$  : masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)  
 $m$  : masse (g)  
 $V$  : volume (cm<sup>3</sup>)

Le tableau ci-après présente les résultats obtenus pour chaque mortier.

Tableau 4 : Masse et masse volumique

	Éprouvette 1 (g)	Éprouvette 2 (g)	Éprouvette 3 (g)	Moyenne (g)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
C	304.8	266.2	302.0	291.0	1.13
CA	216.4	217.2	220.2	217.9	0.85
CP	287.2	287.1	289.4	287.9	1.12
CV	238.2	248.6	243.3	243.3	0.95
V	160.6	161.6	162.1	161.4	0.63

Le mortier à base de Vinavil® 59 présente la densité la plus faible avec 0.63 g/cm<sup>3</sup> et le mortier de chaux sans adjuvants la plus élevée avec 1.13 g/cm<sup>3</sup>. L'ajout de résine synthétique allège les mortiers considérablement, la Vinavil® 59 diminue presque de moitié la densité du mortier. Seul le Peoval® 33 n'a pas influencé de manière notable la densité du mortier.

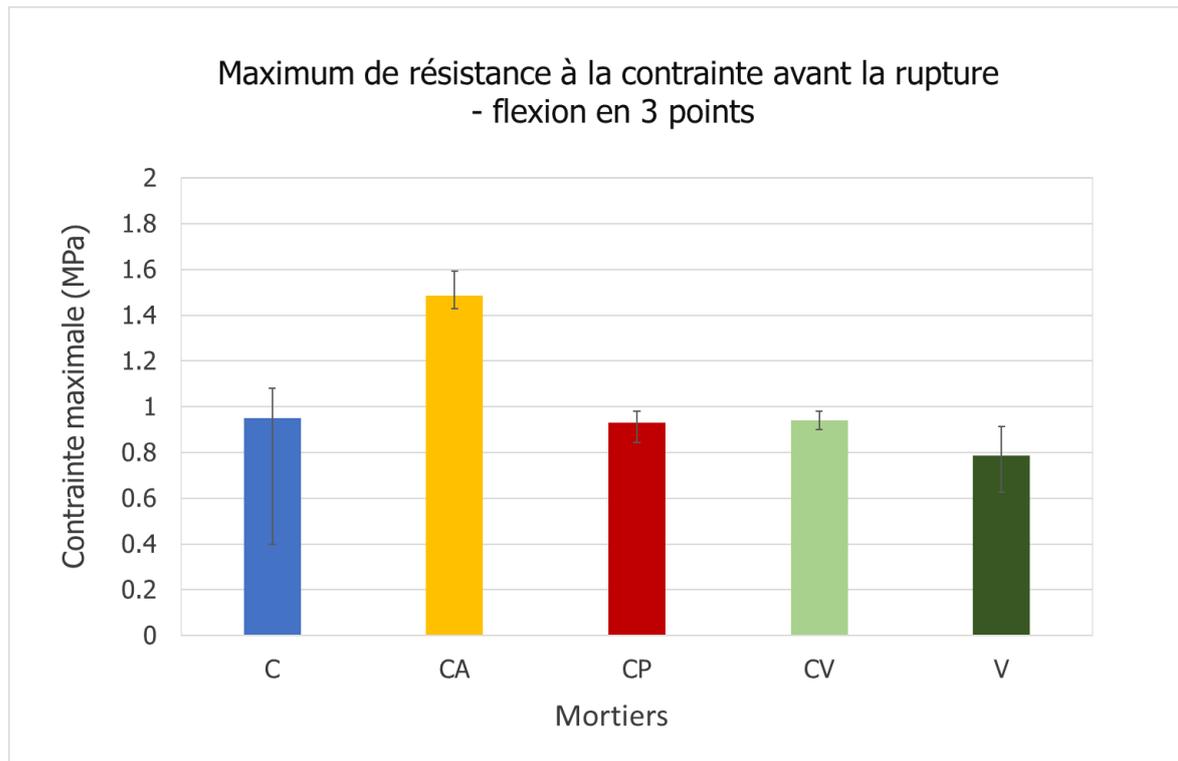
#### 3.4.1 Test de flexion en 3 points

Le test de flexion en 3 points a permis de définir la valeur maximale de contrainte que supporte chaque mortier avant la rupture (en MPa). Ces données ont ensuite été converties en kg/dm<sup>2</sup> afin de définir de manière tangible la masse que supporte les mortiers sur 10 cm<sup>2</sup>.

Tableau 5 : Maximum de résistance à la contrainte avant la rupture en MPa

Mortier	C	CA	CP	CV	V
Éprouvette 1	0.82	1.43	0.84	0.96	0.82
Éprouvette 2	0.40	1.59	0.98	0.98	0.91
Éprouvette 3	1.08	1.43	0.97	0.90	0.63
Écart-type	0.34	0.09	0.08	0.04	0.15
Moyenne	0.94	1.48	0.93	0.94	0.79
kg/dm <sup>2</sup>	785.18	1513.64	952.00	962.35	802.23

Les mortiers de chaux contenant des résines synthétiques ont présenté des résultats plus homogènes avec un écart-type inférieur à 0.1 MPa. Les résultats des mortiers de chaux sans additifs sont plus hétérogènes. La valeur de l'essai n° 2 du mortier C n'est notamment pas prise en compte pour le calcul de la moyenne des résultats, car celle-ci est probablement erronée (cf. rapport d'analyse — Annexe IX, p.133). L'écart-type obtenu est de 1.18 MPa. Les résultats étant majoritairement homogènes, la moyenne peut être utilisée comme valeur de référence pour la comparaison des résultats.

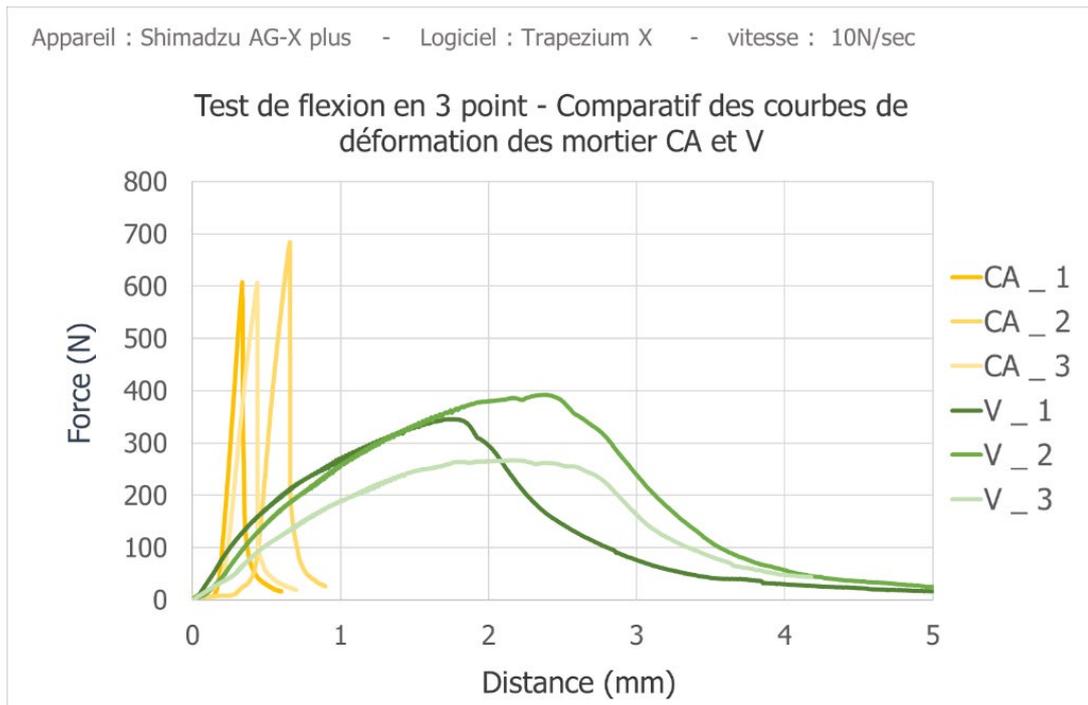


Graphique 2 : Bilan comparatif des maximums de résistance à la contrainte avant rupture et des écartypes

Le mortier CA présente la meilleure résistance à la flexion avec une moyenne de 1.48 MPa. Les mortiers C, CP et CV supportent la même contrainte d'environ 0.94 MPa tandis que le mortier V à la résistance la plus faible avec une moyenne de 0.79 MPa.

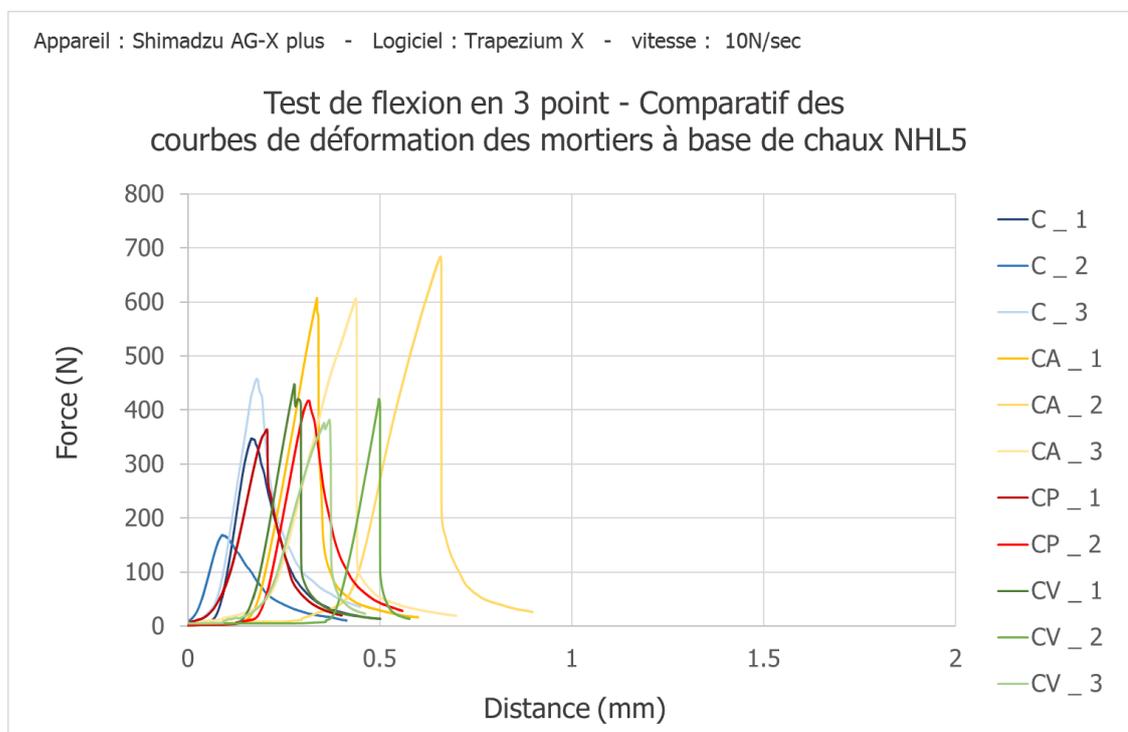
#### Déformation et comportement à la rupture

Les courbes obtenues grâce au test de flexion ont révélé la présence de deux types de comportements : rupture fragile et rupture ductile. La rupture fragile se caractérise par une chute rapide de la courbe après le point de rupture (cf. Graphique 4 : Courbes de déformation des mortiers à base de chaux avec ou sans adjuvant — rupture fragile Graphique 3, mortier CA). La rupture fragile est liée au clivage de la matière entre les grains de mortier. À l'inverse, la rupture ductile est liée à la déformation plastique du matériau. La courbe décroît lentement sur une plus grande distance (cf. Graphique 3, mortier V).



Graphique 3 : comparaison des courbes de déformation des mortiers CA (rupture fragile) et V (rupture ductile) — les courbes de même teinte correspondent aux répliqua d'un même mortier

L'ajout de résine synthétique au mortier de chaux n'a pas changé fondamentalement les propriétés physiques du mortier de chaux puisqu'il conserve le même comportement sous contraintes. Tous les mortiers à base de chaux présentent une rupture fragile (cf. Graphique 4).



Graphique 4 : Courbes de déformation des mortiers à base de chaux avec ou sans adjuvant — rupture fragile

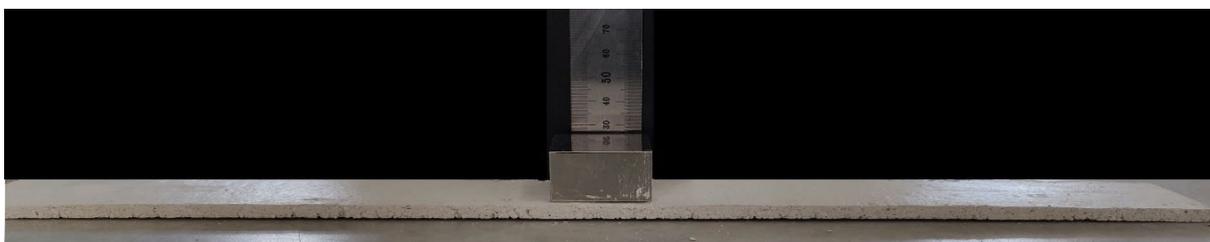
### 3.4.2 Tests de flexion appliqués au cas de la mosaïque

Les éprouvettes aux dimensions adaptées à celle de la mosaïque n'ont pas pu être testées selon le protocole prévu à cause de la déformation des éprouvettes lors du séchage. Le moule fabriqué pour ces éprouvettes étant totalement en bois a probablement accéléré le processus de séchage en absorbant l'eau contenue dans le mortier et provoqué le cintrage des éprouvettes. De plus la surface étant extrêmement lisse n'a pas permis l'accroche du mortier au support, ce qui a aussi pu jouer un rôle dans la déformation des éprouvettes. Le cintrage des éprouvettes ne permet plus de les coller sur un support en nid d'abeilles. Il a donc été décidé d'évaluer l'élasticité des mortiers avec un protocole simplifié.

Les éprouvettes sont placées sur une surface plane, puis sont chargées progressivement à l'aide de poids jusqu'à l'apparition de fissure ou la rupture. Une échelle métrique (précise au mm) est placée contre l'éprouvette afin de mesurer la distance jusqu'à laquelle le mortier se fissure ou rompt par rapport à sa position d'origine. Cette différence permettra d'évaluer quel mortier est le plus élastique (cf. Fig. 63 et Fig. 64, ci-après).



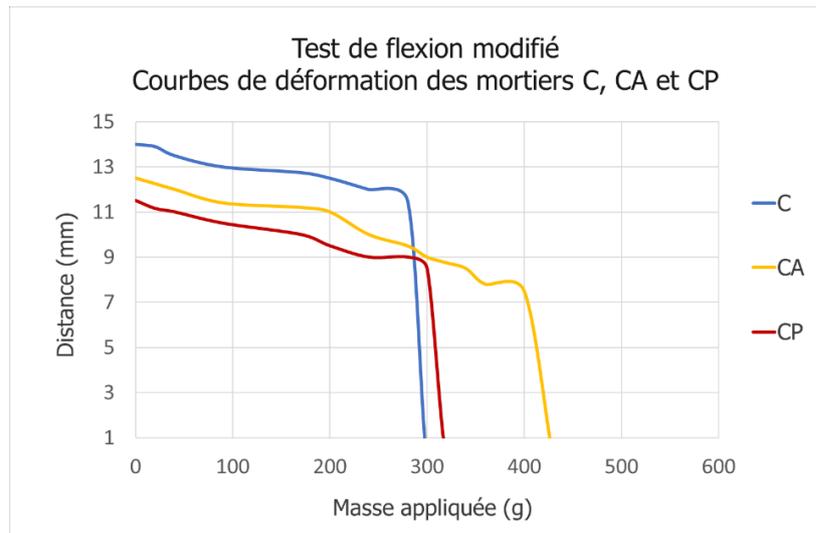
*Fig. 63 : Test de flexion simplifié — vu du système avant application de poids sur le mortier*



*Fig. 64 : Test de flexion simplifié — vu du système en cours d'essais sur le mortier CA juste avant la rupture*

Seuls les mortiers C, CA et CP ont pu être évalués, car les mortiers CV et V ne se sont pas cintrés en séchant. Le mortier V est très souple à la manipulation contrairement aux mortiers à base de chaux. On peut donc affirmer, malgré l'absence de test de flexion, que le mortier le plus élastique est le mortier V. L'absence de cintrage du mortier CV peut indiquer que son pouvoir adhésif est plus important, ce qui aurait permis de maintenir plan les éprouvettes.

Parmi les mortiers évalués, le mortier CA a la plus grande souplesse. Il a supporté une déformation de 5 mm sans subir de déformation plastique ou de rupture. Le mortier CP a un module d'élasticité inférieur permettant une déformation de 3 mm. Finalement, le mortier C présente l'élasticité la plus faible avec une distance de 2 mm. Les trois mortiers présentent le même comportement avec une déformation lente puis une rupture fragile (cf. Graphique 5).



Graphique 5 : Courbe de déformation des mortiers C, CA et CP — 0 g correspond à la position d'origine des mortiers

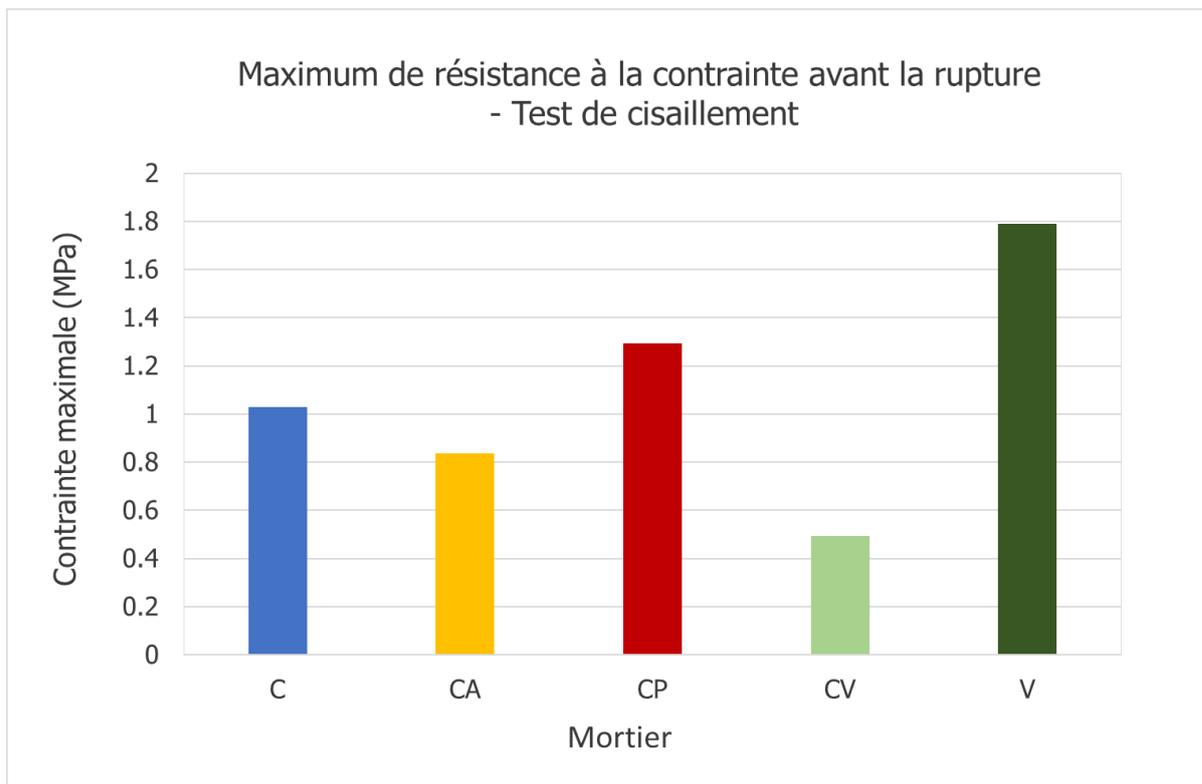
### 3.4.3 Tests de cisaillement

Les résultats du test de cisaillement sont très hétérogènes. L'observation des fractures et des tranches des mortiers a permis d'écarter les résultats erronés liés à une consolidation du mortier par l'époxy ou encore une application hétérogène de cette dernière (cf. Annexe IX, p.136).

Tableau 6 : Maximum de résistance sous la contrainte avant la rupture — test de cisaillement

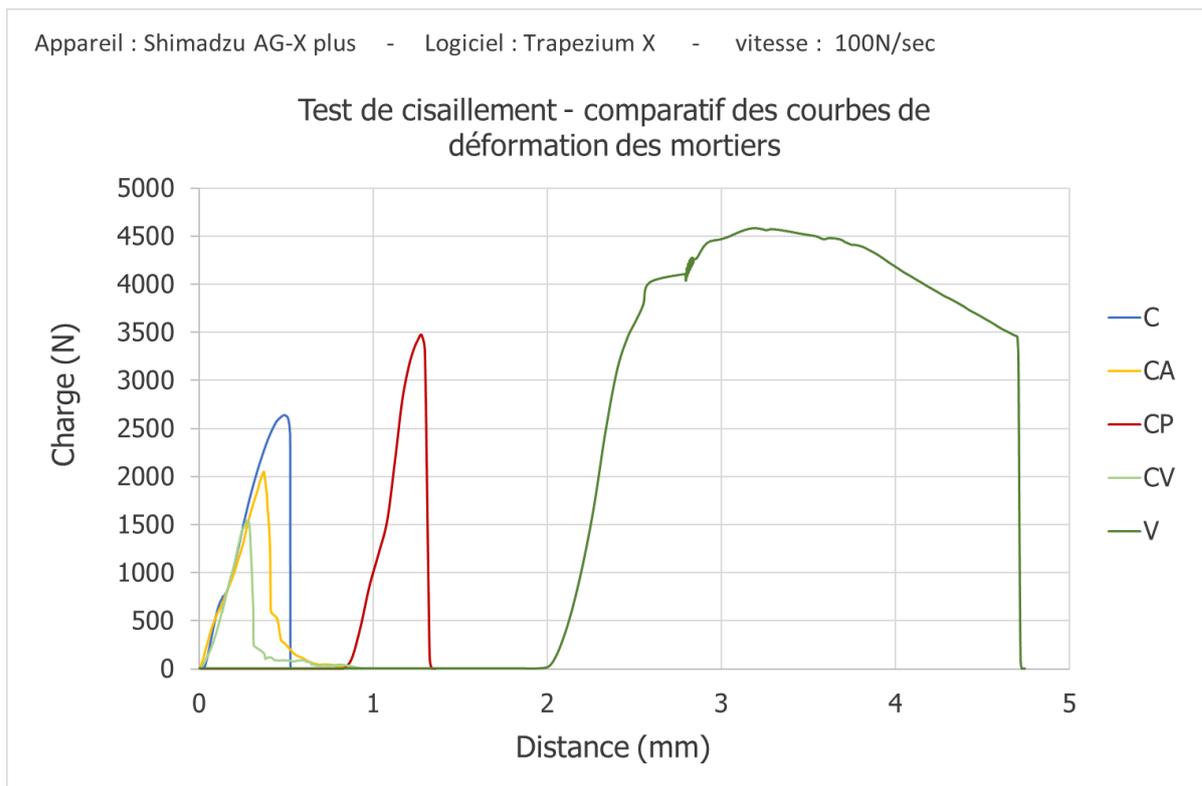
Mortier	C	CA	CP	CV	V
Force (N)	2700	2200	3400	1300	4700
Contrainte max (MPa)	1.03	0.84	1.30	0.50	1.79
kg/dm <sup>2</sup>	1049	854	1320	505	1825

Le mortier V présente la meilleure résistance au cisaillement avec une résistance à 1,79 MPa. L'ajout de Peoval® 33 dans le mortier de chaux a amélioré la résistance au cisaillement, à l'inverse l'Aciril® 33 et le Vinavil® 59 abaissent la résistance du mortier (cf. Graphique 6).



Graphique 6 : bilan des tests de cisaillement — résistance maximum à la contrainte avant la rupture

Concernant les courbes de déformation, on peut observer les mêmes comportements que pour le test de flexion en trois points : une rupture ductile pour le mortier à base de Vinavil® 59 et une rupture fragile pour les mortiers à base de chaux (cf. Graphique 7). La courbe du mortier V est irrégulière et semble montrer une rupture fragile après une déformation plastique. Pour interpréter cette courbe, il faut la diviser en trois étapes : à 2.5 mm la partie supérieure du support en aluminium s'est déformée, puis à 3.1 mm le mortier V commence à subir une déformation plastique et finalement à 4.75 mm une rupture adhésive à l'interface entre l'époxy et le support en aluminium. La rupture adhésive est causée par la déformation plastique qui a modifié l'angle d'appui sur le système. Les forces appliquées étaient à la fois par cisaillement et pelage.



Graphique 7 : courbe de déformation sous la contrainte des mortiers — test de cisaillement

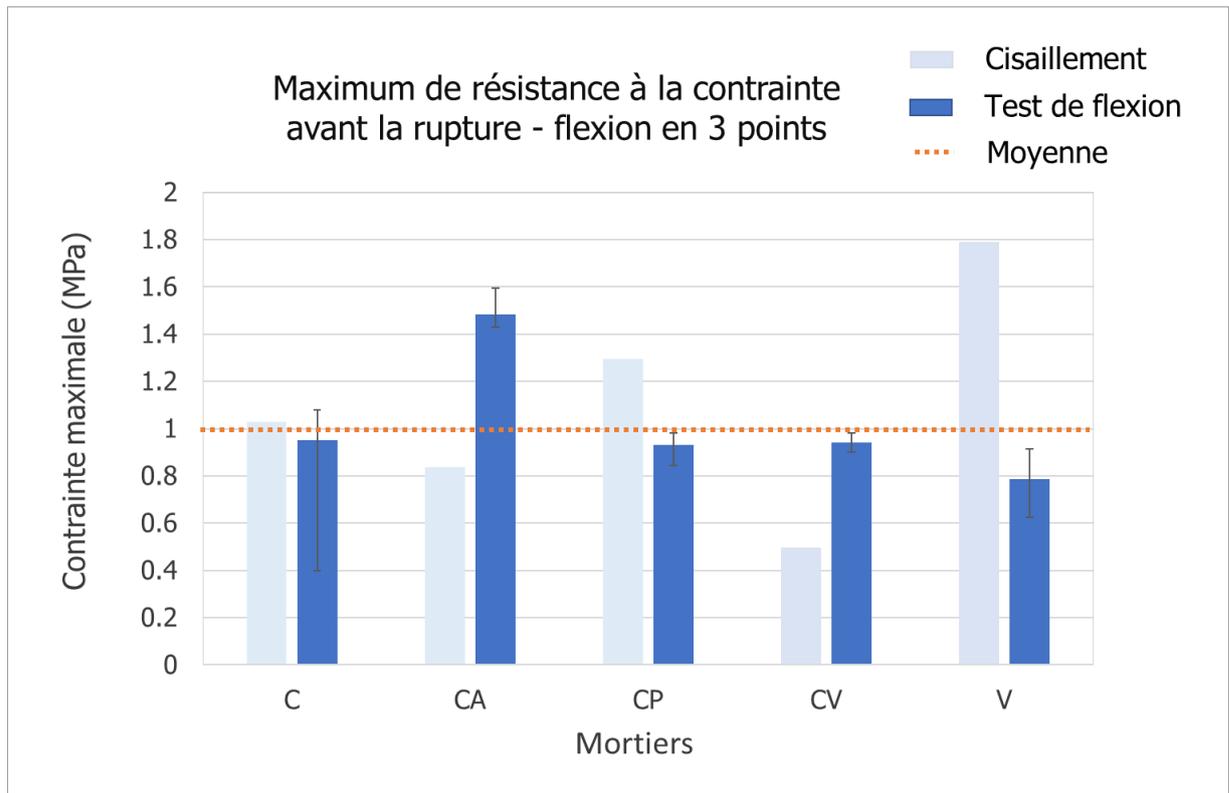
#### 3.4.4 Croisement des résultats

La comparaison des résultats des différents essais permet d'observer que les mortiers qui présentaient une résistance à la flexion la plus faible ont, à l'inverse, les résistances les plus élevées aux contraintes par cisaillement, à l'exception du mortier CV qui a présenté des résultats de résistance médiocres à faible pour les deux essais (cf. Graphique 8, ci-après).

Le mortier C présente des valeurs de résistances proches pour les deux tests avec une résistance légèrement supérieure face au cisaillement.

Si l'apport d'Aciril® 33 améliore considérablement la résistance à la flexion, l'élasticité et allège le mortier, il abaisse aussi la résistance au cisaillement. À l'inverse, l'apport de Peoval® 33 améliore la résistance au cisaillement sans abaisser la résistance à la flexion. En revanche il ne permet pas d'alléger le mortier. L'utilisation de Vinavil® 59 en tant qu'adjuvant ne semble pas adaptée puisqu'il n'améliore pas la résistance à la flexion et abaisse celle au cisaillement.

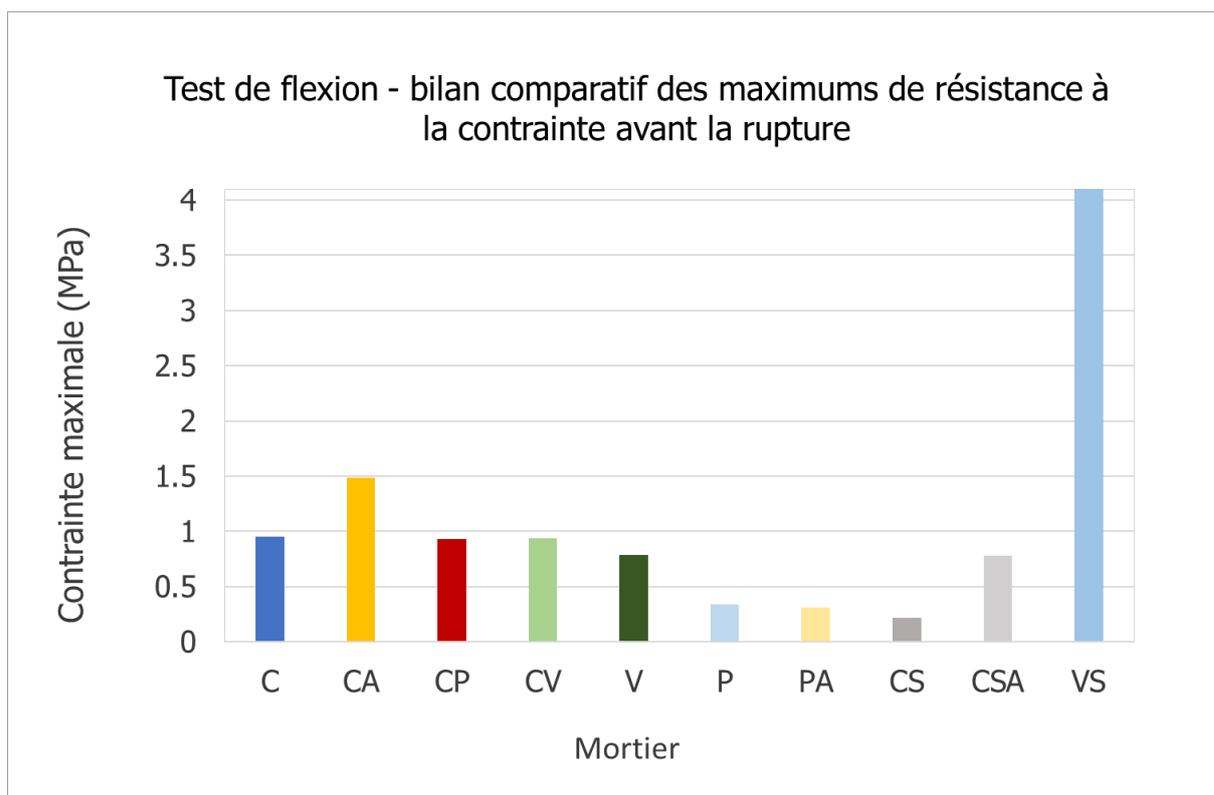
Le mortier synthétique en comparaison au mortier de chaux a une résistance à la flexion inférieure, mais une résistance nettement plus élevée au cisaillement et une plus grande élasticité. Il a aussi l'avantage d'être deux fois moins lourd.



*Graphique 8 : Bilan comparatif des tests de flexion et de cisaillement – les barres d'erreurs en noir correspondent aux écartypes*

Si l'on compare les résultats obtenus dans les études de Mme Fray et de Mme Casado<sup>105</sup>, on peut constater que l'utilisation de perlite à la place du sable avec le liant Vinavil® 59 abaisse considérablement la résistance à la flexion (cf. Graphique 9, ci-après). En revanche, la perlite ne semble pas avoir eu le même impact sur les mortiers de chaux. Les mortiers de cette étude présentent des résistances nettement supérieures aux autres mortiers. Cette différence peut s'expliquer par l'utilisation d'une chaux NHL5 qui aurait effectivement des propriétés intrinsèques supérieures. L'ajout de sable à la perlite a aussi pu jouer un rôle sur les propriétés des mortiers puisque théoriquement les mortiers chargés au sable sont plus résistants.

<sup>105</sup> Casado, 2019, p.168. Fray, 2007, p.78.



Graphique 9 : Comparaisons des résultats obtenus dans cette étude et celles de Mme Fray, et Mme Casado — P = chaux + perlite ; PA : Chaux + perlite + Acril® 33 ; CS : Chaux + sable ; CSA : Chaux + sable + Acril® 33 ; VS : Vinavil® 59 + sable

### 3.5 Discussion des résultats et sélection du mortier

Avant de sélectionner le mortier le plus adapté pour la restauration, il est important de préciser que les tests ont été réalisés selon les normes prévues pour la fabrication de ciment qui atteignent leurs propriétés finales dès 28 jours. Les résistances des mortiers de chaux peuvent continuer à évoluer puisque ces derniers atteignent une carbonatation complète après plusieurs années. De plus, la quantité restreinte du nombre d'éprouvettes ne permet pas d'assurer la certitude statistique des résultats. En revanche, l'étude réalisée sur deux ans par l'équipe de recherche de l'organisation Historic England<sup>106</sup> laisse penser que la chaux NHL5 ayant une prise majoritairement hydraulique atteint plus rapidement ses résistances finales. On peut donc en conclure que les résultats obtenus dans cette étude peuvent être utilisés pour comparer des tendances.

Le tableau ci-après compare les résultats obtenus en fonction de la moyenne des résultats : en rouge, les valeurs inférieures à la moyenne des résultats (considérés comme négatif), en bleu les résultats proches de la moyenne (neutre) et en vert les valeurs supérieures à la moyenne (positif). Seul le critère d'élasticité n'est pas évalué en fonction de la moyenne des résultats. Les valeurs sont

<sup>106</sup> Figueiredo, 2018, p. 136

comparées à la donnée de référence définie dans l'étude préalable des contraintes spécifiques de la mosaïque (cf. Annexe VII, p.128). La valeur à atteindre est une flèche de 1.5 mm : tous les mortiers évalués ont dépassé cette valeur. Même si le mortier de chaux C devenait deux fois plus rigide durant la phase de carbonatation, la souplesse du mortier serait toujours suffisante pour supporter la flexion. De plus, l'étude préalable ne prenait pas en compte la rigidité qu'apportent la colle époxy, les tesselles et le mortier lui-même au système. La flèche est donc, en condition réelle, probablement inférieure à la donnée calculée théoriquement.

*Tableau 7 : Comparaison des résultats – en vert les résultats positifs, en bleu les résultats neutres et en rouge les résultats négatifs*

Mortier	C	CA	CP	CV	V
Flexion [MPa]	0.94	1.48	0.93	0.94	0.79
Cisaillement [MPa]	1.03	0.84	1.30	0.50	1.79
Flèche [mm]	2.5	5	3	-	-
Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	1.15	0.85	1.12	0.95	0.63

Si l'objectif principal était la légèreté du mortier, les mortiers CA et V auraient été les plus adaptés. Cependant, dans le cadre de cette étude, l'objectif est de trouver un compromis entre légèreté, stabilité et économie avec pour contrainte indiscutable une résistance mécanique suffisante pour supporter les contraintes auxquelles est confronté l'objet.

Les essais de flexion sur les éprouvettes aux dimensions adaptées à celles de mosaïque ayant confirmé l'hypothèse que les mortiers de chaux étaient suffisamment souples pour être utilisés pour la restauration de la mosaïque, le mortier synthétique est écarté de la sélection. Son utilisation impliquerait l'achat d'une grande quantité de résine, moins écologique et plus cher que la chaux qui de plus est offerte par le SMRA. Écarter le mortier V impose une réflexion sur la question de la retraitabilité, ce dernier était en effet le seul mortier pouvant être retiré par action chimique. Sa solubilité dans l'eau permettrait théoriquement de faciliter son retrait. Cependant une fois appliqué entre la couche de résine époxy et les tesselles, l'accès à ce mortier ne serait possible que par les tranches. Cette difficulté d'accès rendrait la tâche extrêmement fastidieuse et chronophage, donc peu réaliste pour un objet de cette taille. Pour définir la méthode de retraitabilité adaptée, il faut se questionner sur les raisons qui pousseraient à retirer cet objet. Généralement cette question est abordée à cause de la dégradation chimique des matériaux de restauration qui entraîne une rigidification, un jaunissement ou une perte de ses propriétés adhésives. Si un mortier constitué de matériaux minéraux inertes est utilisé et non une résine organique, ce risque de dégradation n'existe plus. Si l'objectif est de retirer le support et la couche d'époxy, cette tâche peut aisément être effectuée de manière mécanique à l'aide par exemple

d'une scie ou d'une défonceuse. L'époxy étant un thermodurcissable très rigide se découpe aisément avec des outils adaptés. De plus, dans le cas de cette mosaïque qui n'a plus de mortier d'origine, retirer entièrement la couche d'intervention entraînerait un risque important de dissociation ou de destruction de la mosaïque.

L'apport de résine synthétique n'améliorant que légèrement les propriétés du mortier de chaux et entraînant un risque de dégradation sur le long terme, le mortier de chaux sans adjuvant semble être le choix le plus adapté pour cette restauration. Même si la résine Acril®33 est considérée comme stable dans le temps, il est difficile d'évaluer les conséquences que pourrait avoir le mortier sur cette résine. En effet, le pH du mortier restera basique pendant plusieurs années jusqu'à sa carbonatation complète. À l'inverse, les mortiers de chaux sont incontestablement stables puisque l'on retrouve encore aujourd'hui intacts des mortiers de chaux ayant plus de 2000 ans. Le mortier C semble donc être le mortier plus adapté pour la restauration de la mosaïque.

## 4 Conservation-restauration

---

### 4.1 Projet de conservation curative

#### 4.1.1 Objectifs

L'absence de mortier d'origine combiné à la perte d'adhérence de l'entoilage au *tessalatum* mène à une instabilité structurelle alarmante. L'objectif de ce traitement de conservation curative est de stabiliser le *tessellatum* pour assurer sa conservation sur le long terme. Il faut pour cela réaliser un nouveau support pour le *tessellatum* et, en amont, retirer tous les éléments pouvant entraver l'accrochage de celui-ci.

#### 4.1.2 Proposition de traitement

##### Dépoussiérage et nettoyage

Des examens préalables ont dû être réalisés afin de définir un traitement adéquat. Des tests de solubilité ont notamment été effectués sur les dépôts adhérents (taches brunes et jaunes) afin d'identifier les solvants adaptés pour leurs retraits. Un dépoussiérage par aspiration et action mécanique au pinceau doux a été réalisé en amont sur les zones de tests.

##### Tests de solubilité

Les tests de solubilité réalisés sur la colle jaune et dure - visible à l'arrière des tesselles sur la partie basse droite de la mosaïque - ont donné des résultats négatifs, tant dans les solvants polaires

qu'apolaires (cf. Fig. 65). Les tests ont d'abord été réalisés avec des bâtonnets ouatés puis sous forme de compresses protégées d'un film imperméable (cf. Fig. 66). L'application de chaleur n'a donné aucun résultat. L'utilisation de méthodes mécaniques n'étant pas possible du fait de la dureté plus importante du dépôt par rapport à la pierre, il a été décidé de ne pas retirer ces dépôts. En effet, ce dépôt présent en infime quantité ne constitue pas un risque pour l'accroche du nouveau support car il est extrêmement adhérent aux tesselles.



*Fig. 65 : Colle jaune et dure*

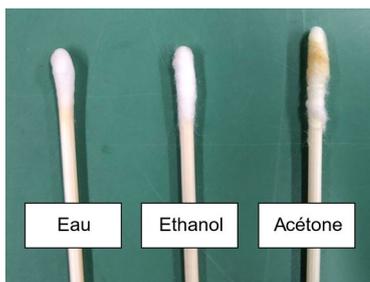


*Fig. 66 : Comresse en coton imbibé de solvant couverte d'un film imperméable et d'une plaque en laiton pour assurer le contact avec la tesselle*

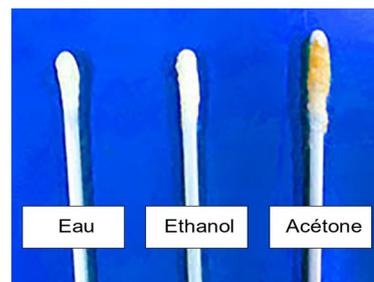
À l'inverse, le domaine de solubilité du dépôt brun a pu être défini facilement : il est uniquement soluble dans l'acétone (cf. Fig. 67). L'importante solubilité dans ce solvant permet un retrait aisé par frottement avec un bâtonnet ouaté imprégné de solvant (cf. Fig. 68 et Fig. 69).



*Fig. 67 : Colle brune*



*Fig. 68 : Exemple de solvant testé sous lumière visible*



*Fig. 69 : Exemple de solvant testé sous UV*

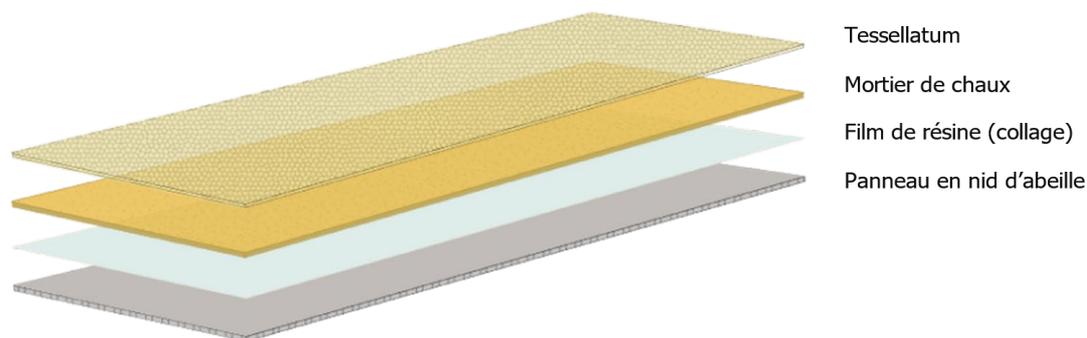
Le dépoussiérage de l'ensemble de la mosaïque peut être réalisé de la même manière que pour les zones de tests, puisque cette méthode s'est montrée très efficace sur ces dernières.

### Traitement des altérations structurelles

La consolidation des tesselles fragmentaires n'a pas été estimée nécessaire puisque tous les fragments sont individuellement solidaires à l'entoilage. La réintégration des tesselles avant la mise en place du mortier a été envisagée mais non réalisées, car la distinction des dégradés de couleurs des motifs étant obstruée par la présence de résidus de mortiers sur les tesselles engendrait un risque trop important de réintégration erronée. La méthode la plus adaptée est d'effectuer la réintégration par l'avant de la mosaïque lorsqu'elle sera nettoyée. En revanche, les tesselles désolidarisées de l'entoilage mais toujours en place sur la mosaïque doivent être recollées avec un adhésif aisément retraits avant l'application du nouveau mortier afin de ne pas perdre leur emplacement. Une documentation de la position des tesselles aurait pu être effectuée et réutilisée lors de la réintégration par l'avant. Cependant, la tâche a été considérée comme trop chronophage par rapport à la quantité de tesselles à documenter et au bénéfice qu'elle aurait apporté. Les zones où le *tessellatum* est déformé par la réticulation de l'adhésif utilisé pour l'entoilage doivent être remises en forme et doublées avant l'application de la couche d'intervention. Ces interventions peuvent être réalisées avec la résine synthétique Vinavil® 59 qui a l'avantage d'être soluble à l'eau, donc facilement retraits. Une seule et même résine est utilisée pour toutes les interventions nécessitant un adhésif afin de limiter le nombre de paramètres à prendre en compte lors du traitement par la face avant.

### Mise en place d'un nouveau support

La méthode proposée est basée sur l'étude technique pour la réalisation d'un nouveau support (Chapitre 3, p.37). Le système sélectionné est composé d'une couche d'intervention en mortier de chaux allégé sans additifs synthétiques et d'un panneau en nid d'abeilles en aluminium collé avec une résine époxy.



*Fig. 70 : Stratification sélectionnée pour la mise en place du nouveau support*

Avant l'application de la couche d'intervention, un coffrage doit être réalisé ainsi qu'un comblement temporaire des zones lacunaires et des joints. Les zones lacunaires de grandes dimensions peuvent être comblées avec de la mousse d'une épaisseur de 1 cm (équivalente à la hauteur des

tesselles) tandis que les joints et les petites lacunes peuvent être temporairement colmatés avec une charge inerte telle que des microbilles de verre ou de la poudre de quartz par exemple.

La réalisation du nouveau support impose une réflexion en amont sur l'aspect final de la mosaïque puisque ce dernier définira les dimensions de l'objet. Des essais virtuels ont été réalisés afin de comparer deux options : une première composition avait été imaginée dans le but d'aider le visiteur à comprendre qu'il ne s'agissait que d'un fragment d'un pavement bien plus vaste, cependant la forme trapézoïdale du *tessellatum* ne permettait pas une telle scénographie. L'objectif était d'ouvrir la scène, en agrandissant les côtés où le décor n'était pas fermé par un liseré noir (cf. Fig.71).



*Fig. 71 : Aperçu virtuel de l'aspect final de la mosaïque (uniquement pour les dimensions)*

#### 4.1.3 Impact des interventions sur les valeurs culturelles

Les interventions proposées n'auront pas d'impact discutable sur les valeurs culturelles puisqu'il s'agit d'une phase de conservation curative qui vise à préserver l'objet de la destruction. Seul le dépoussiérage de l'objet permettra une meilleure lisibilité des couleurs et donc de distinction des motifs, ces derniers étant particulièrement importants pour la recherche de provenance de l'objet. L'application du nouveau support obstruera totalement la lecture du décor jusqu'à la période de désentoilage de la face avant. Il est donc nécessaire de réaliser une documentation exhaustive de l'arrière du *tessellatum* avant la mise en place du nouveau support. Les interventions de conservation curatives ne permettent pas à elles seules d'exposer l'objet. Une intervention de conservation-restauration sur la face avant de l'objet est donc nécessaire pour révéler à nouveau les décors.

## 4.1.4 Bilan du projet d'intervention

Tableau 8 : Récapitulatif du projet d'intervention

Intervention	Étape	Objectifs	Matériel	Temps
Nettoyage de la face arrière	Dépoussiérage	Retrait des éléments exogènes non adhérents	- Pinceau souple - Aspirateur	16 h
	Nettoyage	Retrait des dépôts adhérents	- Acétone - Bâtonnet ouaté	2 h
Stabilisation et remise en forme	Collage	Collage des tesselles désolidarisées	- Vinavil® 59 - Pinceau siliconé	2 h
	Doublage	Remise en place des tesselles soulevées par la réticulation de l'adhésif	- Vinavil® 59 - Pinceau siliconé - Textile/toile	1 h
Mise en place du nouveau support	Coffrage	Définition des dimensions et préparation pour l'application du mortier	- Latte en bois - Vis/Perceuse/visseuse - Scie circulaire - Plastiline®	4 h
	Comblement temporaire	Créer des zones de réserves pour la réintégration des tesselles ou du mortier de finition	- Mousse d'une épaisseur de 1cm - Vinavil® 59 - Charge inerte de petites dimensions - Pinceau souple	6 h
	Application du mortier	Stabilisation et protection du <i>tessellatum</i> par l'application d'une couche d'intervention	- Mortier : chaux NHL5, Metaver®, perlite, sable, eau - Mélangeuse portative - Truelles, règles - Bâche de protection	8 h
	Collage du panneau en nid d'abeilles	Stabilisation du support par l'ajout d'un panneau rigide	- Résine Epoxy - Panneau en nid d'abeilles - Balance / Récipients	2 h

## 4.2 Traitement curatif

### 4.2.1 Nettoyage

La première partie du nettoyage de la face arrière a consisté en un dépoussiérage de la surface à l'aide d'un aspirateur et un pinceau souple. L'aspiration a été contrôlée en ajustant la distance entre l'embout et la surface ainsi qu'en couvrant l'embout d'un textile à armature lâche afin de ne pas aspirer les tesselles désolidarisées. Une tige en acier à profil rond a été placée sous le *tessellatum* pour créer momentanément une différence de niveau entre les tesselles et ainsi faciliter le dépoussiérage des joints (Fig. 72).



*Fig. 72 : En cours de traitement - Dépoussiérage des joints dont l'accès est facilité par l'utilisation d'une tige en métal placée sous le Tessellatum*



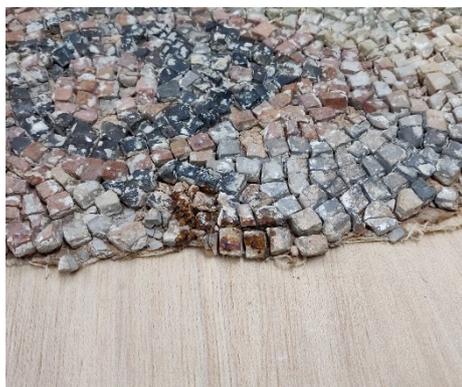
*Fig. 73 : Mosaïque L1357 avant dépoussiérage*



*Fig. 74 : Mosaïque L1357 après dépoussiérage*

La totalité des dépôts non adhérents a pu être facilement retirée. Le dépoussiérage seul a permis de révéler les couleurs et une partie des motifs en fleurette invisibles avant le traitement (cf. Fig. 85 et Fig. 86). Le dépoussiérage a nécessité **12h de travail**.

La seconde partie du nettoyage consiste au retrait des dépôts bruns adhérents présents de manière localisés sur l'arrière des tesselles. Les tests de solubilité de dépôts ont permis de définir le solvant à utiliser pour nettoyer ces dépôts : l'acétone. Le traitement a été réalisé sous hotte aspirante par frottement mécanique avec un bâtonnet ouaté imprégné d'acétone. Les dépôts présents en petites quantités ont été facilement retirés. Le nettoyage des dépôts bruns a nécessité **2h de traitement**.



*Fig. 75 : Dépôt brun avant traitement*



*Fig. 76 : Après traitement du dépôt brun*



*Fig. 77 : Dépôt brun avant traitement*



*Fig. 78 : Dépôt brun après traitement*

#### 4.2.2 Consolidation et remise en forme

La stabilisation du *tessellatum* a consisté, dans un premier temps au collage des tesselles désolidarisées et dans un second temps à la remise en place des tesselles dont la position a été changée à cause de la réticulation de l'adhésif de l'entoilage.

Le collage des tesselles a été réalisé avec la résine Vinavil® 59, la face avant des tesselles ont été couvertes d'un film de résine avec un pinceau siliconé et ont été replacées sur l'entoilage. En amont

l'avant de l'entoilage a été protégé par un film siliconé afin que ce dernier n'adhère pas à la planche sur laquelle il repose. Des poids ont été placés sur les tesselles afin d'assurer un bon contact avec l'entoilage.

Les zones déformées ont subi un traitement similaire avec, dans un premier temps, la découpe des parties d'adhésif empêchant la remise en forme et dans un second temps le doublage de l'entoilage avec un textile (cf. Fig. 79 et Fig. 82). Le doublage et le collage des tesselles ont été réalisés avec la Vinavil® 59. L'interface entre l'entoilage et la planche a aussi été protégée par un film siliconé. La consolidation et la remise en forme du *tessellatum* ont demandé **3h de travail**.



*Fig. 79 : Zone déformée avant traitement – coin gauche sur la partie basse de la mosaïque*



*Fig. 80 : En cours de traitement - doublage et collage d'une zone déformée*



*Fig. 81 : En cours de traitement - Doublage d'une seconde zone déformée où le textile est lacunaire*



*Fig. 82 : Après traitement de consolidation et remise en forme d'une zone du tessellatum*

#### 4.2.3 Mise en place du nouveau support

La mise en place du nouveau support a nécessité un travail préparatoire comprenant la fabrication d'un coffrage en bois et le comblement temporaire des joints, des lacunes et des zones de réserves sur les bords de la mosaïque. Le coffrage a été réalisé avec des planches en bois contreplaqué

vissées au support en bois déjà existant (cf. Fig. 83). Les jointures ont ensuite été colmatées avec de la Plastiline® afin d'étanchéifier le coffrage (cf. Fig. 84).



*Fig. 83 : En cours de traitement - après la mise en place du coffrage*



*Fig. 84 : En cours de traitement - Colmatage des jointures avec de la Plastiline®*

Les grandes lacunes et les zones de réserves sur les côtés de la mosaïque ont ensuite été comblées avec de la mousse d'une épaisseur de 1 cm. La mousse a été découpée dans une plaque qui n'est généralement pas utilisée pour les conditionnements car elle correspond à l'extrémité du bloc et possède une surface lisse sur l'une des faces (cf. Fig. 86). Dans ce cas, l'imperméabilité de la mousse est avantageuse puisqu'elle permet d'éviter que le mortier utilisé pour la couche d'intervention pénètre dans la porosité de la mousse et rende son retrait plus difficile. Les interstices entre les tesselles et les petites lacunes ont ensuite été comblés avec des billes de verre expansé Poraver® d'un diamètre de 0.5 à 0.7 mm (cf. Fig. 85). Habituellement de la chaux, de la poudre de quartz ou du sable sont utilisés pour combler les joints. Pour ce traitement, les billes de verre ont été retenues car elles ne contiennent pas de particules fines difficiles à enlever qui pourraient entraver l'accroche du mortier aux tesselles. La petite dimension et la forme ronde des billes permettent de les introduire très facilement et rapidement dans les joints sans salir la surface



*Fig. 86 : En cours de traitement - Comblement des lacunes avec de la mousse*



*Fig. 85 : En cours de traitement - Comblement des joints avec des billes de verre expansé*

des tesselles. Les billes ont été versées dans les joints puis balayées avec un pinceau souple jusqu'à ce qu'il ne reste que des billes au fond des joints inatteignables par le pinceau. Ainsi, une partie des joints est réservée pour le mortier de finition et l'autre partie sera comblée avec le mortier de la couche d'intervention. La préparation pour la mise en place du nouveau support a demandé **12h de travail**.

La couche d'intervention à base de mortier de chaux NHL5, de sable, de perlite et d'eau a été préparée à l'aide d'un mélangeur à béton portatif. Le mortier a ensuite été appliqué en plusieurs couches sans séchage intermédiaire, la première à la main pour assurer la pénétration de mortier dans les joints. Les couches suivantes ont été appliquées avec une truelle (cf. Fig. 87). La texture du mortier n'était pas la même que celle obtenue pour les éprouvettes de l'étude technique – pour lesquelles le mortier avait été réalisé en plus petite quantité. Bien qu'exactement les mêmes proportions aient été utilisées, la texture n'était pas la même. Lors des tests, le mortier semblait être facile à utiliser ; en conditions réelles la présence perlite rendait la texture plus grossière et difficile à appliquer. Le mortier semblait plus sec et granuleux au lieu de former une pâte cohérente. La difficulté d'application du mortier a augmenté le temps nécessaire à réaliser la couche d'intervention. Cinq heures avaient été prévues pour la réalisation de ce mortier ; cependant la difficulté d'application du mortier a étendu **le temps de traitement à 7h30**, temps qui n'a pas été suffisant pour terminer l'application. Le musée fermant ses portes à 18h30 sans dérogation possible à cause de la présence d'alarmes, la dernière couche permettant d'égaliser et d'aplanir le mortier n'a pas pu être réalisée (cf. Fig. 88). Cela nécessitera une intervention ultérieure. Le mortier de chaux a nécessité un **temps de séchage d'au moins 1 mois**. Une bâche a été placée sur le mortier afin de ralentir le séchage et limiter les risques de fissurations et de retrait (cf. Fig. 89).



Fig. 87 : En cours de traitement - application de la couche d'intervention à base de chaux

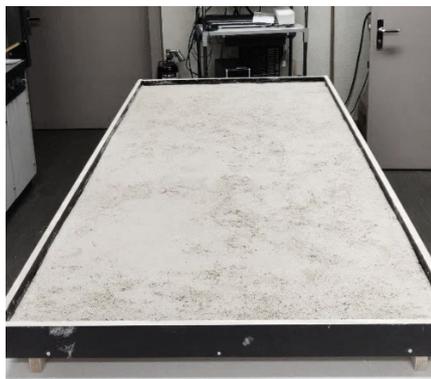


Fig. 88 : En cours de traitement - après la pose de la couche d'intervention

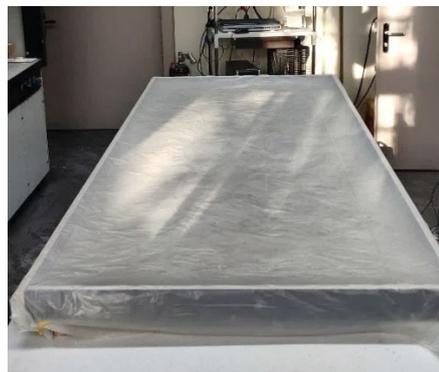


Fig. 89 : En cours de traitement - Mortier recouvert d'une bâche pendant le séchage

Les aspérités de surface du mortier révélées lors du séchage ont été comblées avec un mortier riche en chaux chargé de poudre de perlite et de sable à granulométrie fine. Ce dernier a été seulement appliqué dans les aspérités, les excédents ont été retirés. , il ne forme donc pas une seconde couche sur la surface (cf. Fig. 90 et Fig. 91).



*Fig. 90 Surface de la couche d'intervention à base de chaux avant comblement des aspérités*



*Fig. 91 : Surface de la couche d'intervention à base de chaux après le comblement des aspérités*

Cette intervention a été réalisée afin d'étanchéifier la surface avant l'application d'une couche de résine époxy. La surface du mortier n'ayant pas pu être égalisée lors de la première intervention, l'application d'une couche de résine époxy est nécessaire pour aplanir la surface avant le collage du panneau en nid d'abeilles. Durant la période de séchage du second mortier de chaux (**temps d'immobilisation d'un mois**), de nouvelles contraintes ont été mises en évidence et ont mené à la conclusion que la mosaïque devait être retournée une première fois avant l'application de la résine époxy et du panneau en nid d'abeilles. La mosaïque L1357 est un cas particulièrement complexe puisque la colle utilisée pour l'entoilage est insoluble et donc presque irréversible. Selon l'expérience des professionnels avec qui j'ai pu échanger, la seule méthode qui semble fonctionner pour ce type de situation est la vapeur d'eau combinée à une action mécanique<sup>107</sup>. L'apport d'eau important nécessaire pour ce traitement pourrait entraîner l'altération du mortier de chaux. À la suite de plusieurs discussions avec des professionnels de la conservation-restauration de mosaïque, il a été décidé d'effectuer une semelle temporaire à l'arrière du mortier pour permettre le retournement de la mosaïque. Cette phase intermédiaire permettra d'évaluer la résistance du mortier pendant les tests de désentoilage mais aussi de vérifier si les tesselles ont bien adhéré au mortier. Ce dernier étant expérimental une phase de contrôle semblait indispensable avant la poursuite des interventions.

Plusieurs options ont été envisagées pour la réalisation de la semelle temporaire : un mortier synthétique à base de résine polyvinylique et de sable, une résine époxy chargée de billes de verre, une

<sup>107</sup> Le traitement adapté pour le retrait de l'entoilage est développé dans le chapitre 4.3.2, p.83.

résine époxy moussante et une mousse de polyuréthane expansive. La première option a été écartée bien qu'elle soit la plus économique car elle présente deux inconvénients non négligeables : un temps de séchage long et un risque de retrait important au vu de la surface à combler. Les résines époxy bi-composantes ayant une prise par polymérisation ne perdent pas de volume. L'époxy moussante, au contraire, s'expande. Des tests ont été réalisés pour évaluer la maniabilité des deux systèmes moussants envisagés.

Deux coffrages en bois de 50 cm sur 50 cm ont été préparés pour l'évaluation des deux mousses. Le fond a été rempli d'un mortier de chaux hydraulique chargé avec du sable sur une épaisseur de 2.5 cm (cf. Fig. 92). Ce dernier a servi à simuler la couche d'intervention présente sur la mosaïque<sup>108</sup>. Le mortier (sec) a été recouvert d'une bâche fine pour isoler le mortier de l'agent moussant. Le couvercle en bois a ensuite été fixé sur le coffrage (cf. Fig. 93). Au préalable des trous ont été percés afin de pouvoir introduire les produits et permettre l'évacuation du surplus lors de l'expansion des mousses (cf. Fig. 94).



Fig. 92 : Coffrage en bois réalisé pour évaluer les systèmes moussants



Fig. 93 : Évaluation des systèmes moussants - mortier recouvert d'une bâche fine



Fig. 94 : Évaluation des systèmes moussants - coffrage fermé avec couvercle ajouré

La résine époxy moussante de la marque Sicomin® PB 250 a été utilisée en combinaison avec le durcisseur M02, cette résine a l'avantage d'augmenter de quatre fois son volume en gardant une rigidité importante. Aucune charge inerte n'a besoin d'être ajoutée, elle garde ainsi une masse faible. Elle forme des microbulles régulières pendant son expansion à l'inverse de la mousse polyuréthane Pro ONE® B240 qui forme des bulles de dimensions plus importantes et irrégulières. Cette dernière est moins stable mais offre des propriétés amortissantes. La résine époxy après polymérisation complète

<sup>108</sup> Le matériel a été fourni par le SMRA.

est dure alors que la mousse polyuréthane est élastique, elle peut être compressée et reprendre sa forme après décompression (cf. Fig. 95). La mousse polyuréthane expansive semblait à priori la plus simple à utiliser puisqu'elle ne nécessitait pas d'effectuer de mélange préalable (cf. Fig. 96). Cependant le résultat obtenu n'a pas été concluant : lors du dévissage du couvercle, un phénomène de décompression a été observé. Le centre de la mousse a gonflé, la semelle n'épousait donc plus la surface du mortier (cf. Fig. 98). À l'inverse, la résine époxy moussante a présenté de très bons résultats : facile à mettre en œuvre elle permet de réaliser une semelle rigide adaptée à la surface (cf. Fig. 97 et Fig. 97). Le seul inconvénient est son coût onéreux (cf. Annexe XIII, p.174), sachant qu'il ne s'agit que d'une semelle temporaire une telle option n'était pas envisageable. En revanche cette option a été retenue pour la proposition de traitement final de l'objet puisqu'en plus d'être facile à utiliser et légère, cette technique permet de créer un ancrage mécanique dans le panneau en nid d'abeilles grâce à l'expansion de la résine dans les trous de coulée.



*Fig. 95 : Essai de semelle avec de la résine époxy moussante – vu du dessus*



*Fig. 96 : Essai de semelle avec de la mousse polyuréthane expansive - en cours d'expansion - vu du dessus*



*Fig. 97 : Résine époxy moussante – vu de profil*



*Fig. 98 : Mousse polyuréthane expansive – vu de profil - phénomène de décompression menant à la déformation de la semelle (la bâche a été retirée pour faciliter la compréhension du phénomène)*

La semelle temporaire a donc été réalisée avec de la résine époxy non moussante et d'une charge inerte. La résine EPO® 150 combinée au durcisseur K151 et des billes de verre expansées de la marque Poraver® ont été utilisés pour réaliser la semelle. Le mortier a préalablement été recouvert d'une bâche afin de l'isoler de la couche d'époxy. La résine a été appliquée en deux couches : une première d'une consistance pâteuse (proportion résine/durcisseur/Poraver® = 1 : 0.25 : 1.5 en

masse/masse) pour combler les parties les plus épaisses (cf. Fig. 99). Puis une seconde couche a été réalisée avec un mélange plus liquide (1 : 0.25 : 0.5) pour les parties les plus fines. La présence de la bâche a rendu l'application de la résine difficile. La surface obtenue n'est pas parfaitement homogène mais offre des surfaces planes suffisamment grandes pour permettre le retournement de la mosaïque. L'application de la semelle a nécessité **4h de travail et deux périodes d'immobilité de 24h.**



Fig. 99 : En cours de traitement – après l'application de l'époxy à consistance pâteuse



Fig. 100 : En cours de traitement - après l'application de la couche d'époxy liquide

#### 4.2.4 Manutention en vue du retournement

Une planche en bois renforcée par trois tasseaux a été vissée sur le coffrage pour assurer la stabilité du système lors du retournement et servir de support temporaire durant la phase de traitement de la face avant (cf. Fig. 101). Le poids relativement léger de l'ensemble a permis d'effectuer le retournement manuellement avec l'aide de 5 personnes. La réalisation du coffrage et le retournement de l'objet ont demandé **2h de travail.**

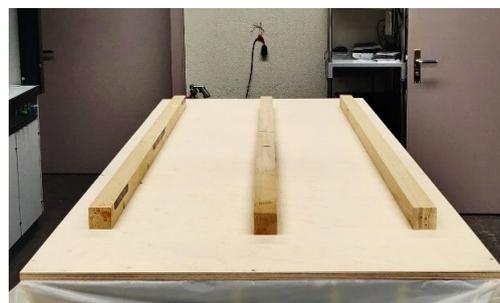


Fig. 101 : mise en place du support en bois pour le retournement de la mosaïque

#### 4.2.5 Bilan des interventions réalisées

Les interventions réalisées durant ce mémoire ont nécessité 42 h de travail effectif entrecoupées de deux périodes d'un mois d'immobilisation. Les objectifs sont partiellement atteints puisqu'il a été décidé de mettre en place le panneau en nid d'abeilles seulement en dernière étape du traitement de la mosaïque. En plus de stabiliser le *tessellatum*, ces premières interventions ont permis d'améliorer la compréhension des contraintes auxquelles peuvent être confrontés les restaurateurs lors d'un traitement d'un objet d'une telle dimension. Cette expérience me permet ainsi de proposer un protocole d'intervention réaliste pour le traitement de la face avant de la mosaïque et la mise en place du support final. Si ces interventions devaient être reproduites, au moins 2 personnes devraient être présentes pour la réalisation de la couche d'intervention, 3 personnes auraient été l'idéal pour terminer l'intervention à

temps et obtenir une surface plane. L'étape d'application d'une semelle aurait ainsi pu être évitée. Concernant la réalisation de la semelle temporaire, une épaisseur d'au moins 1 cm sur toute la surface aurait grandement facilité l'application de l'époxy chargée.

### 4.3 Projet de conservation-restauration de la face avant

L'objectif de ce projet de conservation-restauration est de proposer un protocole pour le traitement de la face avant de la mosaïque et des dernières interventions à réaliser pour la mise en place du nouveau support. Le système d'accrochage pour l'exposition de la mosaïque n'est pas étudié dans ce mémoire car l'Institut d'Archéologie a déjà développé une méthode pour d'autres objets du musée ayant un format similaire et souhaite garder une homogénéité des modes de présentation<sup>109</sup>.

#### 4.3.1 Constat d'état après le retournement de la mosaïque

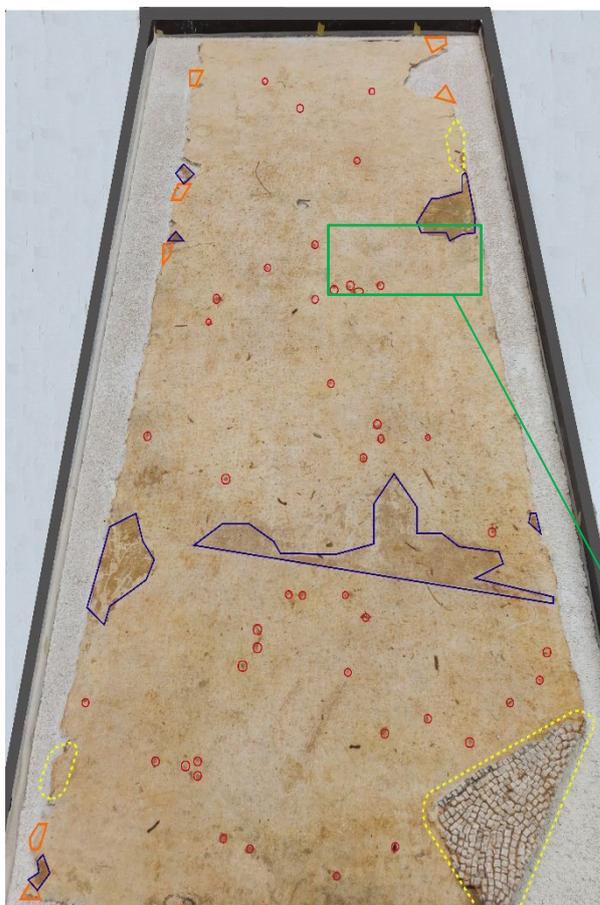


Fig. 102 : Constat d'état de la mosaïque après retournement

La surface du textile est fortement empoussiérée, recouverte de dépôts végétaux et de sédiments. La toile est tachée d'auréole jaune-brun sur toute la surface. Des taches plus foncées localisées sur les bords du textile et sur la partie centrale de la section inférieure de la mosaïque (en bleu - Fig. 102). Sur ces zones, les fibres sont imprégnées d'adhésif les rendant plus rigides que sur le reste de la toile. Des taches de couleurs similaires de dimension d'un 1cm<sup>2</sup> sont réparties sur toute la surface (en rouge - Fig. 102).



Fig. 103 : Détail des différents types de tache et auréole jaune-brun visible sur l'entoilage

<sup>109</sup> Aucune illustration de ce système ne peut être présentée, car le musée étant actuellement en travaux la collection est inaccessible.

Le *tessellatum* n'a pas adhéré à la couche d'intervention sur le coin inférieur droit et sur deux zones localisées sur les bords de la mosaïque (en pointillé jaune - Fig. 102). Plusieurs tesselles n'ont localement pas adhéré au mortier sur les bords de la mosaïque (en orange - Fig. 102). Bien que certaines tesselles n'aient pas adhéré au mortier, une empreinte de leur emplacement est visible dans le mortier. Les tesselles peuvent y être réinsérées dans leur position d'origine dans le mortier. Ce dernier a un aspect granulaire\* et bullé mais ne présente pas de fragilité structurelle apparente (cf. Fig. 104).



*Fig. 104 : Surface du mortier vu de la face avant de la mosaïque*

#### Diagnostic/pronostic

La présence d'auréoles sur le textile semble liée à la méthode de dépose. Il est possible que l'adhésif utilisé pour l'entoilage ait migré dans les fibres du textile et ait jauni la surface en s'altérant. La présence de taches plus foncées peut être liée à la méthode de dépose ou à un apport accidentel d'adhésif sur le textile. Ces taches ne semblent en revanche pas être apparues suite à la diffusion dans le textile des taches de colle brune visibles à l'arrière du *tessellatum* puisqu'elles ne sont pas localisées sur les mêmes zones. Les taches de petite dimension et réparties de manière éparse sur la surface pourraient provenir de la phase de conservation curative. Les tesselles désolidarisées ayant été recollées localement avec de la résine Vinavil® 59 sur le textile, il est probable que l'adhésif ait pénétré les fibres du textile et ait donné un aspect plus foncé au textile qui est normalement de couleur écru.

L'absence d'adhérence du *tessellatum* au mortier sur le coin inférieur droit peut être expliquée par un phénomène de retrait différentiel du mortier. La couche d'intervention n'ayant pas pu être égalisée lors de l'application, l'épaisseur de la couche n'est pas la même sur toute la surface. Cette zone présentait l'épaisseur la moins importante de mortier. Il est probable que cette zone ait séché plus vite et se soit légèrement cintrée. Le cintrage a entraîné le soulèvement du mortier, l'adhésif de l'entoilage ayant un pouvoir adhésif plus important que le mortier a maintenu les tesselles sur le support. Les tesselles ont ainsi été détachées du mortier. Lors de l'évaluation du mortier avant le retournement de la mosaïque, un effet de ressort avait été observé sur cette zone lorsque l'on appuyait sur le mortier, ce phénomène laissait présumer que le mortier s'était légèrement cintré. Ce phénomène a été la source de la première remise en question de l'adhérence du mortier au *tessellatum* et qui a mené à la réflexion sur la réalisation d'un premier retournement de la mosaïque avant la mise en place du reste du support. Les tesselles localement désolidarisées du mortier peuvent avoir subi le même phénomène de retrait puisqu'il existe une légère différence de niveau entre les zones lacunaires et le bord du

*tessellatum*, ces zones ont pu sécher plus rapidement. Cela peut aussi être lié à l'absence de mortier sur l'une des faces diminuant l'accroche mécanique des tesselles.

Malgré la présence de zones où le mortier s'est détaché des tesselles, le reste du *tessellatum* semble avoir bien adhéré au mortier. En revanche, l'aspect granulaire et la présence de bulle d'air dans le mortier laissent penser que certaines tesselles pourraient ne pas adhérer au mortier en raison d'une trop faible surface d'accroche. De plus, il est courant qu'une partie des tesselles se détache lors du désentoilage, même lorsque ce dernier est réalisé par les restaurateurs eux-mêmes avec des produits adaptés. Une méthode de stabilisation et de réintégration des tesselles doit être proposée pour le désentoilage de la mosaïque. Le coin inférieur droit doit notamment être réintégré avant le désentoilage et le nettoyage des tesselles.

#### Impact des altérations sur les valeurs culturelles

Bien que le *tessellatum* ait été partiellement stabilisé par les interventions de conservation curative, l'état de conservation de l'objet ne permet toujours pas son exposition ou sa restitution. L'accès aux décors est totalement obstrué par l'entoilage. Les interventions à venir visent alors à stabiliser complètement la mosaïque, à rendre à nouveau visibles les décors – qui devraient être plus lisibles que par la face arrière puisque les tesselles ne seront pas recouvertes de résidus de mortier- et se rapprocher de l'aspect d'origine supposé de la mosaïque. En plus de fragiliser le *tessellatum*, l'absence de joint entre les tesselles modifie la perception du décor de la mosaïque par rapport à son aspect d'origine.

#### 4.3.2 Proposition d'intervention

L'intervention proposée consiste dans un premier temps au dépoussiérage complet de la surface puis à la réintégration des tesselles n'ayant pas adhéré au mortier. Le désentoilage de la surface peut ensuite être réalisé en parallèle de la réintégration des tesselles qui se détacheraient pendant le traitement. Une fois le nettoyage et la stabilisation du *tessellatum* réalisés, un rejointoiement et un comblement des zones latérales doivent être effectués pour assurer l'accroche mécanique des tesselles et ainsi permettre l'exposition de la mosaïque. Une fois l'avant de la mosaïque traitée, elle pourra être retournée pour terminer l'application du nouveau support. La restauration ne pouvant pas être effectuée durant ce mémoire, plusieurs essais ont été réalisés pour chacune des interventions envisagées afin de déterminer le traitement adéquat et proposer un protocole de conservation-restauration détaillé à l'Institut d'archéologie de Zurich (cf. Annexe XI, p.145).

#### Dépoussiérage

La même méthode de dépoussiérage que pour le revers de la mosaïque est proposée, c'est-à-dire par aspiration à l'aide d'un pinceau souple pour aider au retrait des dépôts légèrement adhérents aux surfaces.

### Désentoilage et nettoyage

La nature de l'adhésif ayant été identifié rapidement – un polymère à base de caoutchouc - des hypothèses ont pu être émises quant à la technique à utiliser pour le désentoilage de la mosaïque. Ce type d'adhésif est, par sa composition, considéré comme irréversible. En effet, la structure tridimensionnelle des élastomères obtenue lors du processus de réticulation leur confère des propriétés élastiques et les rend insolubles. En revanche, quelques solvants organiques permettent de les faire gonfler. Ce phénomène modifie de manière irréversible leurs propriétés. Nous pouvons alors supposer qu'il est possible d'altérer les propriétés adhésives du polymère en l'exposant à des solvants le faisant gonfler. Trois phases de tests ont été réalisées : une première par immersion sur des échantillons d'adhésifs, une seconde par compresse sur des tesselles dissociées et une dernière phase sur l'entoilage de la mosaïque après son retournement. Le choix des solvants et le détail des deux premières phases sont présentés en Annexe X, (p. 143). La première phase n'a pas donné de résultats positifs, la seconde phase a révélé l'efficacité de l'acétone et de l'acétate d'éthyle sur les résidus d'adhésif mais n'a pas permis de conclure sur leur efficacité lorsque le textile est toujours présent. Un seul échantillon présentant cette configuration était disponible pour effectuer les tests. Ce dernier ayant subi plusieurs essais, les résultats ont pu être biaisés. L'absence de coloration des solutions d'acétone et d'acétate d'éthyle durant la première phase de test est étonnante si l'on compare à la coloration très marquée des compresses dans la seconde phase de test. Cette différence pourrait être expliquée par la présence d'une couche intermédiaire entre le film à base de caoutchouc et les tesselles. Il est possible que la surface ait été badigeonnée avec un autre adhésif avant l'application de la colle à base de caoutchouc. Cette couche a pu être appliquée afin de consolider la surface, d'améliorer l'adhérence de l'entoilage ou peut-être de protéger la surface.

La dernière phase de test a été effectuée directement sur la mosaïque et a permis de confirmer l'efficacité de l'acétone et de l'acétate d'éthyle pour le désentoilage de la mosaïque. Des essais ont été réalisés à la fois sur les zones tachées (Fig. 105 et Fig. 106) et sur les zones écruées (cf. Fig. 107 et Fig. 108). La quantité d'essais a été limitée par la présence de tesselles se dissociant du mortier sur les coins et les bords de la mosaïque.



*Fig. 105 : Avant test de désentoilage - zone tachée*

*Fig. 106 : Après test de désentoilage - zone tachée*

La présence du dépôt brun dans le textile ne semble pas compliquer le désentoilage.



*Fig. 107 : Avant test de désentoilage - zone sans tache*



*Fig. 108 : Après test de désentoilage - zone sans tache*

Le test de désentoilage sur la mosaïque a révélé que des fragments de tesselles n'avaient pas adhéré au mortier, probablement lié au manque de surface de contact. Après discussion avec M. Urs Lang, le conservateur-restaurateur du musée, il a été estimé qu'il s'agissait d'une perte tolérable par rapport à l'état d'origine de la mosaïque et du résultat obtenu.

Le désentoilage de la mosaïque peut ainsi être réalisé à l'aide de compresses d'acétate d'éthyle combinées à une exposition en amont à des vapeurs d'acétone afin de diminuer la quantité de solvant à utiliser. Le nettoyage des résidus peut ensuite être réalisé par frottement mécanique avec un bâtonnet ouaté imprégné d'acétate d'éthyle. Ces interventions doivent impérativement être réalisées sous hotte aspirante et avec un équipement de protection adapté (masque à solvant, gants, etc.).

#### Réintégration des tesselles

Dans un premier temps, il avait été envisagé de proposer une réintégration des tesselles à l'aide d'un mortier de chaux de même nature que celui utilisé pour combler les joints. Cependant, lors des tests de rejointoiement présenté dans la partie suivante, il a été constaté que la tâche était difficile à réaliser et entraînait des différences de niveau entre les tesselles réintégrées et le reste du tapis de tesselles. De plus, le temps de prise long de la chaux n'est pas compatible avec le traitement à réaliser. Le risque de démarcation avec le mortier de rejointoiement est aussi un inconvénient pour cette technique. Une réintégration à l'aide de résines synthétiques semble être la solution la plus adaptée puisqu'elle peut être appliquée de manière localisée et nécessite un temps de séchage plus court. L'inconvénient majeur est le risque de dégradation du polymère dans le temps en raison de sa nature organique. Cependant, si ce dernier était amené à perdre son pouvoir adhésif le risque de dégradation de la mosaïque serait minime car une fois le mortier de rejointoiement en place, l'adhésif est compensé par l'accroche mécanique du mortier.

L'adhésif à utiliser doit respecter plusieurs critères fondamentaux :

- Être insoluble dans les cétones et esters puisque ces solvants sont utilisés pour le désentoilage ;
- Avoir un pouvoir adhésif suffisant pour maintenir les tesselles en place pendant le désentoilage ;

- Être suffisamment visqueux pour ne pas consolider le mortier en profondeur et ne pas le rendre imperméable ;
- Supporter les pH basiques, puisqu'il sera exposé à un pH de 8-9 lors du comblement des joints ;
- Être aisément retraitable, dans l'hypothèse où la mosaïque devrait être restaurée à nouveau.

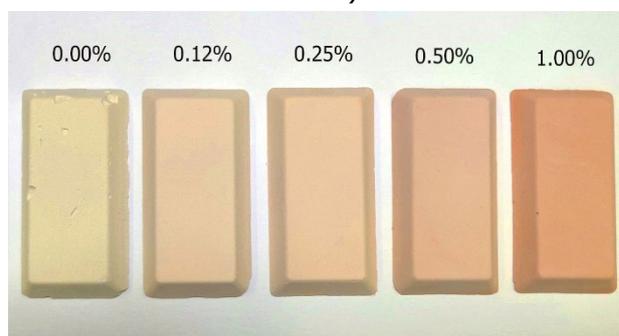
Plusieurs adhésifs ont été envisagés mais aucune proposition ne peut être effectuée puisque les tests permettant la sélection de l'adhésif sont en cours d'élaboration. Des tests de pelages seront réalisés sur des tesselles collées avec différents adhésifs sur des échantillons de mortiers. Des rubans adhésifs du type ruban de masquage (par exemple Scotch Blue™ 2090 de la marque 3M™) seront appliqués comme un entoilage sur les tesselles. L'adhésif n'ayant pour utilité que de maintenir les tesselles le temps du désentoilage, la force à appliquer est relativement faible. Le retrait d'un ruban adhésif peu adhérent a été estimé équivalent au retrait de l'entoilage. Parmi les adhésifs utilisés en conservation-restauration, seules quelques résines sont insolubles ou peu solubles dans les cétones ou les esters : par exemple, la résine acrylique Paraloid™ B67, la résine hydrocarbonée Regalrez® 1094. Le Paraloid® B67 est peu soluble dans ester mais pas dans les cétones. Ces adhésifs possèdent un faible pouvoir adhésif, ils sont généralement seulement utilisés pour réaliser des revêtements de protection (cf. XII.3 - Fiches techniques, p.155). Cependant la force à supporter étant relativement faible, il pourrait tout de même être adapté pour ce traitement. Les tests seront réalisés en solution dans l'isooctane pour le Regalrez® 1094 et dans le toluène pour le Paraloid B67 à un pourcentage élevé permettant d'obtenir une viscosité suffisante – la texture pouvant être ajustée en ajoutant une infime part de silice micronisée. Si les résultats de ces tests s'avéraient négatifs, un changement de méthode pour le désentoilage devrait être envisagé : l'utilisation de solvant épaissit avec un éther de cellulose (Klucel™), un acide polyacrylique neutralisé (Carbopol®) ou une argile synthétique (Laponite®RD) pour contrôler l'apport de solvant. Le pH du solvant épaissi avec de la Klucel™ doit impérativement être vérifié puisqu'il peut devenir très acide – pH auquel est particulièrement sensible la pierre. L'utilisation d'un gel épaissi permettrait ainsi l'utilisation de la résine acrylique Paraloid™ B72 pour réintégrer les tesselles. Cette résine, stable, a un pouvoir adhésif important et correspond au deuxième Paraloid™ étant le moins soluble dans les esters (cf. XII.3 - Fiches techniques, p.158). Des compresses argileuses peuvent aussi être envisagées comme support pour le solvant. Ces techniques peuvent être envisagées car le textile utilisé pour l'entoilage agira comme interface de protection et limitera le risque de dépôt de résidus.

### Rejointoiement

Le mortier présent dans les joints est obtenu lors de l'insertion des tesselles dans le lit de pose. Ce dernier est une couche fine de 5 à 10 mm d'épaisseur très riche en chaux. La quantité en granulat est moindre que pour les strates inférieures et la granulométrie plus fine. Le granulat utilisé est le sable fin avec parfois une part de tuileau. Ce dernier pouvant donner une teinte légèrement rosée au mortier

qui est généralement de couleur blanche<sup>110</sup>. Il a pu être observé lors de l'étude technologique de la mosaïque L1357 que son lit de pose contenait du tuileau. Elle devait probablement apparaître moins blanche que la plupart des mosaïques antiques. L'utilisation d'un mortier de rejointoiement teinté pour la restauration de la mosaïque pourrait être intéressante puisqu'il permettrait de se rapprocher de l'aspect d'origine du mortier. L'ajout de terre d'ocre rouge permet par exemple de teinter le mortier de manière homogène, ce qui permet de le différencier facilement avec un mortier antique qui a un aspect plus hétérogène. Un nuancier de couleurs a été élaboré afin de proposer plusieurs options de teintes. Ces tests ont permis de définir les proportions exactes nécessaires pour obtenir une teinte spécifique. La composition de départ du mortier a été définie à partir d'un protocole élaboré et utilisé par le SMRA. Ce dernier est composé de chaux CL90 (composé d'hydroxyde de calcium), de métakaolin (Métaver®) et de farine de quartz (K-4)<sup>111</sup> en proportion (0.5 : 0.5 : 1 dans 1 volume d'eau). Les essais réalisés ont

été effectués avec de la chaux NHL5 et non de la chaux CL90 pour garder une uniformité de traitement avec la couche d'intervention et faciliter l'acquisition du matériel. Une part d'ocre rouge a aussi été ajoutée pour teinter le mortier, quatre pourcentages ont été testés (cf. Fig. 109). Ces derniers sont relativement bas car ils



sont calculés par rapport à la masse des matériaux, l'ocre rouge étant deux fois moins lourde que le quartz. Le détail des différentes proportions est donné dans le protocole de restauration en Annexe XI, p.145.

Sans ajout d'ocre rouge, le mortier de chaux NHL5 possède déjà une teinte beige et non un aspect complètement blanc. Une très faible quantité d'ocre rouge permet de teinter le mortier uniformément. En plus des essais de coloration du mortier, des tests de maniabilité ont été effectués. La surface des tesselles étant altérée, l'utilisation d'un mortier liquide à injecter à l'aide d'une seringue dans les interstices a été envisagée. Cette méthode permet d'éviter la phase de nettoyage du surplus habituellement réalisée avec les mortiers pâteux. Le mortier étant appliqué seulement dans les joints, le risque de laisser des résidus de chaux dans les aspérités est réduit. Deux éprouvettes ont été préparées avec des tesselles fournies par le SMRA. Il s'agit de tesselles antiques conservées par le laboratoire pour les essais : l'utilisation de tesselles antiques permet de réaliser les tests sur des tesselles dont l'état de surface est similaire à celui des tesselles de la mosaïque L1357. Les tesselles ont été recouvertes d'une couche de plâtre<sup>112</sup> par l'arrière (simulant la couche d'intervention). Le plâtre a été sélectionné car il permet un temps de préparation plus court qu'un mortier de chaux. Une fois sec, deux

<sup>110</sup> Coutelas, 2009, p.97.

<sup>111</sup> Les fiches techniques sont disponibles à la p.146.

<sup>112</sup> Mastic MoltoFill® d'intérieur – Molto.

méthodes ont été testées : la première avec un mortier en pâte classique (la même composition que pour les essais de colorations) et la seconde avec le même mortier auquel a été ajouté un fluidifiant\* composé de polycarboxylate modifié avec des lignosulfonates en phase aqueuse de la marque Sika : Sikament® 12-S (cf. XII – Fiche technique, p.152). L'ajout de seulement 1% en volume de fluidifiant permet de liquéfier considérablement le mortier sans ajouter plus d'eau. Le risque de retrait et de fissuration est ainsi limité. Ce produit agit comme agent dispersant, les grains de mortiers ayant tendance à s'agglomérer par des forces d'attraction sont dispersés, on parle de défloculation<sup>113</sup>.

Le test d'application du mortier fluidifié à l'aide d'une seringue n'a pas été concluant puisqu'il nécessite l'application de mortier dans chaque interstice, il s'étale peu entre les joints (cf. Fig. 111 et Fig. 112). De plus, les risques de débordement sont non négligeables, la surface doit ainsi tout de même être nettoyée. Le problème de dépôts dans les aspérités n'est donc pas évité. En revanche, lorsqu'il est appliqué comme un mortier classique - en léger surplus puis nettoyé – il nécessite l'utilisation de moins de forces pour faire pénétrer le mortier dans les joints qu'un mortier en pâte (cf. Fig. 110 et Fig. 112).



Fig. 110 : Éprouvette n°1 avant rejointoiment



Fig. 111 : Éprouvette n°2 avant rejointoiment



Fig. 112 : Éprouvette n°1 après rejointoiment

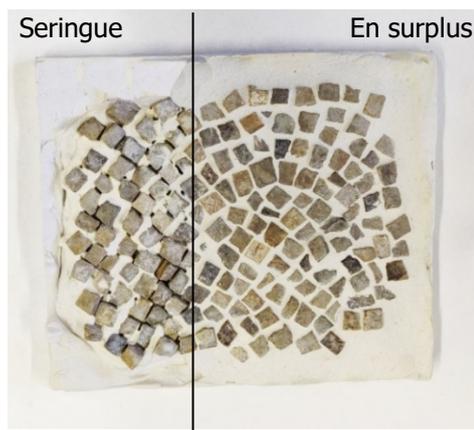


Fig. 113 : Éprouvette n°2 après rejointoiment

<sup>113</sup> Guiraud, 2018, [en ligne].

Les interstices de la mosaïque étant plus fins que ceux réalisés pour les éprouvettes, l'utilisation d'un mortier fluide semble plus adaptée. De plus, le mortier de la couche d'intervention étant poreux, l'accroche entre les deux mortiers sera améliorée puisque le mortier fluide pourra pénétrer dans les pores de la couche d'intervention. Les tests ont révélé que malgré l'altération de surface des tesselles, peu de résidus de mortier sont observés après le séchage du mortier. Le seul inconvénient observé est lié aux angles arrondis des tesselles, le mortier appliqué à fleur de la surface déborde sur les tesselles et réduit la surface apparente. La partie arrondie est dissimulée par le mortier, les joints apparaissent ainsi plus larges. Pour pallier ce problème, il est possible d'éponger une plus grande partie du mortier lors du nettoyage.

L'étape du rejointoiement est l'intervention ayant le plus d'impact quant à l'aspect final de la mosaïque. Le choix de la couleur et la contrainte de débordement du mortier sur le bord des tesselles peuvent changer fondamentalement l'aspect de la mosaïque par rapport à celui d'origine. Ces paramètres doivent être évalués par un consortium de spécialistes – dont au moins le conservateur de la collection et le conservateur-restaurateur du musée - afin de sélectionner le résultat le plus adéquat. Les deux teintes les plus foncées semblent être inadaptées pour la restauration en revanche les deux teintes claires pourraient être envisagées. Le mortier sans colorant ayant une teinte beige fourni déjà un résultat amplement satisfaisant.

#### Mise en place du nouveau support

Afin de finaliser le traitement, la mosaïque doit être retournée à nouveau. La surface du *tessellatum* doit être protégée avec un film de mousse avant la remise en place du support en bois. Une fois la mosaïque retournée, la semelle temporaire peut être retirée en soulevant la bâche se trouvant entre le mortier et la semelle. À la suite des tests présentés précédemment dans la partie 4.2.3 (p.75), il a été évalué que l'option la plus adéquate pour le collage du panneau en nid d'abeilles en aluminium était l'utilisation d'une époxy moussante (Sicomine® PB 250 et le durcisseur DM02). Cette technique permet à la fois de combler les différences de niveau du mortier, de coller le panneau en nid d'abeilles et d'éviter tout risque de rupture adhésive entre le panneau et la résine grâce aux clés d'ancrages créées par les trous d'évents (Cf. Fig. 114). Le panneau en nid d'abeilles doit donc être percé en amont à l'aide d'une scie-cloche. Les trous d'évents doivent être répartis sur toute la surface, des ouvertures plus petites doivent être percées sur les coins du panneau afin d'éviter la création de bulles d'air dans les coins du coffrage. Le panneau doit être maintenu surélevé selon l'épaisseur souhaitée de la couche d'époxy en utilisant des cales ou en fixant le panneau au coffrage. Après la polymérisation de la résine moussante, le surplus peut être retiré avec un ciseau à bois. Cette intervention doit être réalisée par deux personnes minimum car le temps de travail de l'époxy avant le début de son expansion est de seulement 4 minutes.

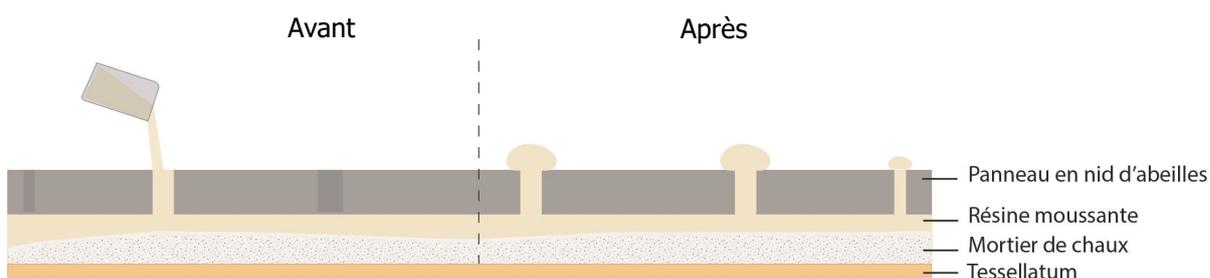


Fig. 114 : Schéma de l'application de la couche d'époxy moussante

Afin de permettre l'exposition de la mosaïque, un cadre en aluminium adapté aux dimensions de la mosaïque doit être fixé sur le panneau en nid d'abeilles dans le but de dissimuler les différentes strates du support et renfoncer la rigidité du système. Le cadre peut être fixé à l'aide d'une résine époxy ou vissé sur le panneau. Le modèle présenté ci-dessous permet de rigidifier le panneau dans la longueur et dissimuler les côtés du panneau (cf. Fig. 115).

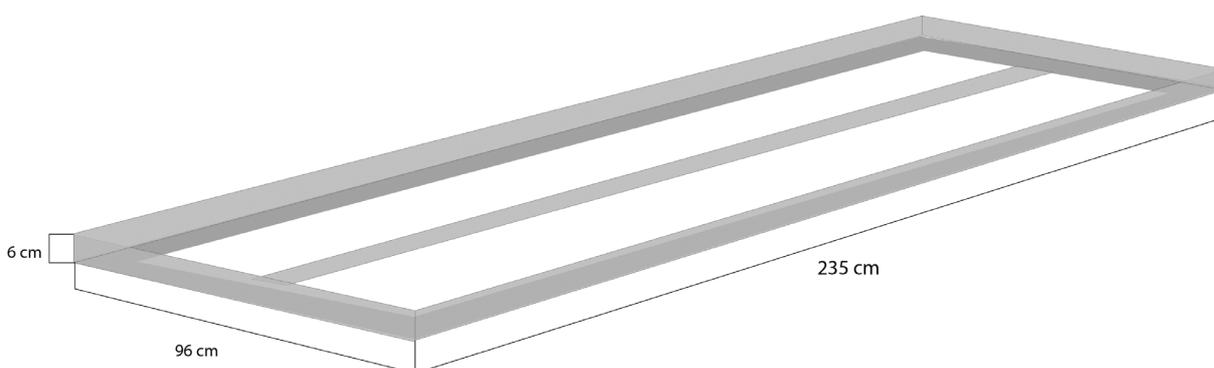


Fig. 115 : Modèle de cadre proposé pour la mosaïque L1357 (les cotes doivent être adaptées aux dimensions réelles après le traitement complet de la mosaïque)

#### 4.3.3 Bilan des interventions de conservation-restauration à réaliser

Tableau 9 : Récapitulatif du protocole d'intervention

Intervention	Étape	Objectifs	Matériel	Temps
Nettoyage	Dépoussiérage	Retrait des éléments exogènes non adhérents	- Pinceau souple - Aspirateur	4 h
Désentoilage/ Collage	Collage	Réintégration des tesselles	- Adhésif insoluble dans les cétones et les esters - Pinceau/pinceau siliconé	40 h
	Désentoilage	Retrait de l'entoilage	- Pince	

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ouate, film alimentaire</li> <li>- Récipient , ruban adhésif</li> <li>- Acétone/acétate d'éthyle</li> <li>- Masque à solvant et hotte aspirante</li> </ul>	
	Nettoyage	<p>Nettoyage des résidus d'adhésif présent sur les tesselles</p> <p>Retrait des billes de verres expansées</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bâtonnet/ouaté</li> <li>- Pince</li> <li>- Acétate d'éthyle</li> <li>- Aspirateur/ pinceau souple</li> </ul>	
Rejointoiement	Comblement des joints et des parties latérales avec un mortier de finition	Stabilisation du <i>tessellatum</i> et restitution d'un aspect proche de celui d'origine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mortier : chaux NHL5, Metaver®, poudre de quartz, eau, fluidifiant Sikament® S-12, (ocre )</li> <li>- Mélangeuse portative</li> <li>- Truelles, éponges</li> <li>- Bâche de protection</li> </ul>	5 h
Mise en place du support final	Manutention en vue du retournement	Protection de la surface et stabilisation pour le retournement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Film de mousse</li> <li>- Support en bois à visser sur le coffrage (déjà existant)</li> </ul>	0.5h
	Préparation des différents éléments	Perçage du panneau en nid d'abeilles	- Perceuse + scie cloche	3 h
		Protection du coffrage et imperméabilisation des rainures	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Film alimentaire/bâche fine</li> <li>- Plastiline</li> </ul>	
Collage du panneau en nid d'abeilles	Stabilisation du support par l'ajout d'un panneau rigide	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résine Epoxy</li> <li>- Panneau en nid d'abeilles préalablement percé</li> <li>- Balance / Récipients</li> <li>- Mélangeuse à hélice</li> <li>- Serre-joints</li> </ul>	4 h	

			- Tasseau - Papier émeri	
	Encadrement	Ajout d'un renfort structurel au système et dissimulation du support	- Cadre en aluminium réaliser dans un atelier de serrurier - Résine époxy/système de fixation	-

#### 4.3.4 Recommandation de conservation

Afin d'assurer la conservation à long terme de la mosaïque L1357, un dépoussiérage ponctuel de la surface devra être effectué. Un nettoyage au pinceau doux combiné à une aspiration peut être effectué à condition que l'intensité de l'aspiration soit contrôlée. Si la mosaïque était amenée à être conservée en réserve, un conditionnement à plat ou sur la tranche sur le plus grand côté est recommandé. La mosaïque doit être surélevée par rapport au sol en cas d'inondation des locaux et protéger de la poussière à l'aide d'un intissé de polyester (Tyvek®), de papier de soie ou d'un textile adapté à la conservation à long terme.

Concernant les recommandations de manipulation, par précaution la mosaïque ne devra jamais être soulevée par ses deux extrémités pour ne pas risquer la flexion du support. La mosaïque doit être portée par ses côtés latéraux, de préférence à quatre personnes. Elle ne doit pas être portée sur la tranche pour limiter les risques d'abrasion de la surface.

## Conclusion

Au début de ce projet, les seules informations concernant la mosaïque se résument à des hypothèses : provenant probablement de la Syrie, datant peut-être du Ve ou VIe siècle de notre ère, vraisemblablement issue du trafic illicite. Seule la précarité de l'état de conservation était certaine. Grâce au nettoyage de la face arrière du *tessellatum*, révélant les couleurs et les motifs cachés de la mosaïque, l'étude des décors a pu être réalisée avec plus de précisions. Cette analyse a abouti à l'identification et même l'authentification de la mosaïque en tant que mosaïque datant du dernier quart du Ve. siècle de notre ère provenant de la région d'Apamée en Syrie - avec la validation de Dr. Komait Abdallah, historien spécialisé dans l'étude des mosaïques syrienne.

Certains passages de son histoire restent encore obscurs puisque les conditions de dépose n'ont pas pu être déterminées. L'absence de trace d'outils à l'arrière des tesselles et la présence de béton uniquement sous forme de résidus à l'arrière des tesselles est étonnante puisque généralement le ciment est extrêmement difficile à retirer sans altérer la surface des tesselles. De nombreuses hypothèses peuvent être émises mais les preuves sont insuffisantes pour émettre une conclusion tangible.

Au début de ce travail, la mosaïque présentait un état de conservation précaire, chaque manipulation entraînait la dissociation des tesselles. Une stabilisation a alors été proposée à partir d'une étude technique sur la création d'un nouveau support. Cette étude a permis de définir les différentes parties du nouveau support. La recherche aboutit à la conclusion qu'un mortier allégé à base de chaux chargé de perlite et de sable était adapté pour la restauration de cette mosaïque. Les avantages majeurs sont : sa stabilité dans le temps par rapport à un mortier à base de résine synthétique et sa légèreté par rapport à un mortier chargé uniquement de sable. Les inconvénients sont : le risque de retrait et de fissuration lors du séchage, le pouvoir d'adhérence inférieure et sa texture plus grossière rendant son application difficile. L'application de ce mortier n'a donc permis qu'une stabilisation partielle de la mosaïque puisque les tesselles du coin inférieur droit de la mosaïque n'ont pas adhéré au mortier à cause d'un phénomène de retrait apparu au cours du séchage. Cependant la majorité du tessellatum a pu être stabilisée et repose désormais sur un mortier dont la stabilité dans le temps est indiscutable. La réalisation de ce support a permis le retournement de la mosaïque et ainsi la réalisation des tests de désentoilage. Un protocole de conservation-restauration complet a ainsi pu être réalisé pour l'Institut d'Archéologie, comprenant la méthode de désentoilage, de rejointoiement et de mise en place du panneau en nid d'abeilles. Seule la méthode de réintégration des tesselles n'ayant pas adhérees au mortier est encore à l'essai.

Ce travail, en plus d'authentifier la mosaïque, d'effectuer une stabilisation presque totale de celle-ci et de proposer un protocole de traitement de conservation-restauration, permet de mettre en perspective nos pratiques actuelles concernant la nature du mortier à utiliser à l'interface entre le matériau original et le support. L'étude technique a permis de révéler la résistance et surtout la grande souplesse des mortiers de chaux - ces derniers étant rarement utilisés ou quand ils le sont presque toujours additionnés de résine synthétique. Chaque mosaïque possédant ses propres contraintes, une évaluation doit être effectuée comparant les avantages d'utiliser un mortier de chaux par rapport à un mortier synthétique, en sachant qu'un mortier de chaux permettrait de conserver à très long terme la mosaïque. Une question se pose : le risque de fragilité structurelle d'un mortier de chaux n'est-il pas souvent surinterprété au profit de techniques moins stables mais plus rassurantes et parfois moins onéreuses ? Pour aider à répondre à cette question, des essais de flexion pourraient être réalisés sur des échantillons de longueurs similaires à celles couramment observées dans les musées. Une telle étude permettrait de vérifier le degré de souplesse des mortiers de chaux complètement carbonaté en condition réelle.

## Bibliographie

### Partie historique

Adam, 2001.

Adam, Jean-Pierre, *Technique et pratique de la chaux*, École d'Avignon, édition Eyrolles, Paris, 2001.

Appelbaum, 2007.

Appelbaum, Barbara. *Conservation Treatment Methodology*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2007.

Balty, 1977.

Balty, Jeanine. *Mosaïques antiques de Syrie*. Centre belge de recherches archéologiques à Apammée de Syrie, Bruxelles, 1977.

Balty, 1981.

Balty, Jeanine. « La mosaïque antique au Proche-Orient, I. Des origines à la Tétrarchie », in *Aufstieg und Niedergang der römischen Welt*. Edition Hildegard Temporini, 1981

Balty, 1995.

Balty, Jeanine. *Mosaïques antiques du Proche-Orient : chronologie, iconographie, interprétation*. Besançon : Unité de Franche-Comté, 1995.

Bürge, 2012.

Bürge, Martin. [siècle t.] Rapport d'expertise, Université de Zurich, Zurich, 2012, *non publié*.

BZBM, 2021.

BZBM, « The Mosse Art Restitution Project », in *History* [en ligne]. The Mosse Art Restitution Project, 2021 [consulté le 07/06/2021]

<https://mosseartproject.com/history.php>

Coutelas, 2009.

Coutelas, Arnaud. *Le mortier de chaux*. Collection archéologique, édition Errance, Paris, 2009.

English Heritage, 2008.

English Heritage. *Conservation Principles, Policies and Guidance for the sustainable management of the historic environment*. London, English Heritage, 2008.

DFAE, 2020.

Département fédéral des affaires étrangères. « Relations bilatérales », in *La Suisse et la Syrie* [en ligne]. Confédération suisse [consulté le 07/06/2021]

<https://www.eda.admin.ch/countries/syria/fr/home/relations-bilaterales/bilaterale.html>

Hugounenq, 2017.

Hugounenq, Sarah. *Des antiquités sur le retour* [en ligne]. La gazette Drouot, 2017 [consulté le 07/06/2021]

<https://www.gazette-drouot.com/article/des-antiquites-sur-le-retour/7078>

Lassus, 1938.

Lassus, Jean. « La mosaïque du phénix provenant des fouilles d'Antioche », in *Monuments et mémoires de la fondation Eugène Piot*. tome 36, fascicule 1-2, 1938.

LTBC, art.9.

Loi sur le transfert des biens culturels (LTBC) ;  
RS 444.1 ; art. 9 [consulté le 06/07/2021]

<https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/317/fr>

OFC, 2019.

Office fédéral de la culture.

« Actualités/Communiqués aux médias », in  
*Transfert des biens culturels* [en ligne].

Confédération suisse [consulté le 07/06/2021]

[https://www.bak.admin.ch/bak/fr/home/patrim](https://www.bak.admin.ch/bak/fr/home/patrimoine-culturel/transfert-des-biens-culturels.html)

[oine-culturel/transfert-des-biens-culturels.html](https://www.bak.admin.ch/bak/fr/home/patrimoine-culturel/transfert-des-biens-culturels.html)

Ordonnance du 8 juin 2012, art. 9a.

Ordonnance du 8 juin 2012 instituant des  
mesures à l'encontre de la Syrie ; RS  
946.231.172.7 ; art.9a [consulté le 07/06/2021]

<https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/394/fr>

Reusser, 2021 a.

Reusser, Christophe. *L'exposition permanente*  
[en ligne]. Archaologische Sammlung der  
Universität Zurich, 2021, [consulté le  
07/06/2021]. [https://www.archaeologische-](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung.html)

[sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung.html](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung.html)

Reusser, 2021 b.

Reusser, Christophe. « L'histoire de la collection  
archéologique », in *L'exposition permanente* [en  
ligne]. Archaologische Sammlung der Universität  
Zurich, 2021 [consulté le 07/06/2021].

[https://www.archaeologische-](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Geschichte-der-Sammlung.html)

[sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Geschic](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Geschichte-der-Sammlung.html)

[hte-der-Sammlung.html](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Geschichte-der-Sammlung.html)

Reusser, 2021 c.

Reusser, Christophe. « Moulage en plâtre et  
autres répliques », in *L'exposition permanente*  
[en ligne]. Archaologische Sammlung der  
Universität Zurich, 2021 [consulté le  
07/06/2021].

[https://www.archaeologische-](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Abgussammlung.html)

[sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Abguss](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Abgussammlung.html)

[ammlung.html](https://www.archaeologische-sammlung.uzh.ch/de/Dauerausstellung/Abgussammlung.html)

Riegl, 1984.

Riegl, Alois. *Le culte moderne des monuments,  
son essence et sa genèse*. Paris, Editions du  
Seuil, 1984.

## Partie technologique

Adam, 2001.

Adam, Jean-Pierre, *Technique et pratique de la  
chaux*, École d'Avignon, édition Eyrolles, Paris,  
2001.

Breuil, 2006.

Breuil, Nelly. *Conservation et restauration d'un  
fragment de mosaïque provenant d'Utique,  
IIIe siècle apr. J.-C. (Musée du Louvre, Paris).*

*Recherche sur les pratiques de mosaïques  
déposées*, mémoire de fin d'études, INP,  
spécialités arts du feu, 2006, non publié.

Coutelas, 2009.

Coutelas, Arnaud. *Le mortier de chaux*.  
Collection archéologique, édition Errance, Paris,  
2009.

Fiori, 2002.

Fiori, Cesare et Vandini, Mariangela. *Teoria e tecniche per la conservazione del mosaico*. II Prato, Ravenne, 2002.

Lavagne, 1987.

Lavagne, Henri. *La mosaïque*. Presse universitaire de France, Paris, 1987

MOSAÏKON, 2013.

MOSAÏKON. *Glossaire illustré : Formation de techniciens à l'entretien des mosaïques in situ*, Getty Conservation Institut/Institut national du patrimoine de Tunisie, Tunis, 2013.

### **Partie technique**

Adam, 2001.

Adam, Jean-Pierre, *Technique et pratique de la chaux*, École d'Avignon, édition Eyrolles, Paris, 2001.

Akabli, 2018.

Akabli, Moussa. *Relation entre compacité, ouvrabilité et caractéristique finales d'un béton* [en ligne]. Cours BTP, 2018 [consulté le 04/05/2021]

<https://btp-cours.com/relations-entre-compacite-ouvrabilite/>

Ashby, 2013.

Ashby, Michael et R. H. Jones, David. *Matériaux 1 : Propriétés, applications et conception*, 3<sup>e</sup> édition Dunod, Paris, 2013.

Berçil-Simsir, 2013.

Berçil-Simsir, Bertil et Rainer, Leslie. *Evaluation of lime-based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces – A manual of laboratory and field test methods*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2013.

Bretton, 2004.

Bretton, Chantal et Villoutreix, Gilbert. « Adhésifs structuraux et non structuraux : définitions et propriétés » in *Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural* [en ligne]. Technique de l'ingénieur, 2005 [consulté le 04/05/2021]

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/applications-des-plastiques-42141210/familles-d-adhesifs-et-caracterisation-d-un-collage-structural-am3560/>

Breuil, 2006.

Breuil, Nelly. *Conservation et restauration d'un fragment de mosaïque provenant d'Utique, III<sup>e</sup> siècle apr. J.-C. (Musée du Louvre, Paris). Recherche sur les pratiques de mosaïques déposées*, mémoire de fin d'études, INP, spécialités arts du feu, 2006, non publié.

Casado, 2019.

Casado, Célia. *Conservation et restauration d'une mosaïque de l'antiquité tardive en Gaule aquitaine (époque gallo-romaine ; Bordeaux, Musée d'Aquitaine). Étude comparative de mortiers pour le transfert sur un nouveau support*, mémoire de fin d'études INP, spécialité arts du feu, 2019, non publié.

Chartes de Venise, 1964 :

ICOMOS, *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites*, IIe Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques, Venise, 1964.

Conserv®, 2021.

*Hydraulic lime, wich NHL?* [En ligne]. Conserv®, 2021 [consulté le 10/04/2021]

<https://www.lime-mortars.co.uk/lime-mortar/guides/hydraulic-lime-which-nhl>

Coutelas, 2009.

Coutelas, Arnaud (dir.). *Le mortier de chaux*, Collection « Archéologiques » dirigée par Alain Ferdière, éditions Errance, Paris, 2009.

Domenech-Carbo, 2011.

Domenech-Carbo, Maria-Teresa. "An approach to the physico-mechanical changes induced by UV artificial aging of selected vinyl adhesives used in conservation", in *Proceedings of the Symposium : Adhesive and consolidants for conservation : research and applications*, Canadian conservation Institut, Ottawa, 2011.

Figueiredo, 2018.

Figueiredo, Cristiano, et al. "Hydraulic lime production coming full circle?", in *The Building Conservation Directory* [en ligne]. Cathedral communication, 2009 [consulté le 04/05/2021]

<https://www.buildingconservation.com/articles/hydraulic-lime-production/hydraulic-lime-production.html>

Fray, 2007.

Fray, Géraldine, *Étude et restauration d'un ensemble fragmentaire d'enduits peints gallo-romains découverts à Reims, rue Clovis. Recherche de mortiers allégés et mis au point d'une nouvelle méthode de présentation au musée Saint-Rémi*, mémoire de fin d'étude, INP, spécialité peinture, 2007, non publié.

Guehno, 2017.

Guehno, Giulia. *Advanced polymeric and nanostructured coatings for Cultural Heritage conservation and restoration*. Thèse de doctorat en chimie, Université Ca' Foscari, Venise, 2017.

Holcim, 2019.

« Granulat pour béton », in *Guide pratique du béton* [en ligne]. Holcim, 2019 [consulté 10/04/2021]

<https://www.holcimpartner.ch/fr/betonpraxis/granulats-pour-beton>

ICCROM, 1981.

ICCROM, *Mosaïque n°2 : Sauvetage, Carthage 1978, Périgueux 1980*, Actes du 2<sup>e</sup> symposium international sur la restauration des mosaïques, Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels, Rome, 1981.

Labesse, 2005.

Labesse Olivier, *Précis d'utilisation de la chaux naturelle hydraulique NHL*, Nantes, 2005.

Marinelli, 1978.

Marinelli, Guiseppe. « Quelques expériences sur l'usage des résines époxy pour imprégner le nucléus », in *Mosaïque n°1. Détérioration et*

*conservation*. Actes du 1<sup>er</sup> symposium international sur restauration des mosaïques, Centre international d'études pour la conservation des biens culturels, Rome, 1978.

Velosa, 2007.

Velosa, Ana et Do Rosario Veiga, Maria. "Lime-metakaolin mortars – Properties and applications", in *Portugal SB07, Sustainable Construction, Materials and Practices Challenge of the Industry for the New Millennium*, éditeurs : Luis Bragança, Manuel Pinheiro, Said Jalali, Ricardo Mateus, Rogério Amoêda, Manuel Correia Guede, 2007.

Wihr, 1978.

Wihr, Rolf, « La restauration des mosaïques en Allemagne », in *Mosaïque n°1. Détérioration et conservation*. Actes du 1<sup>er</sup> symposium international sur restauration des mosaïques, Centre international d'études pour la conservation des biens culturels, Rome, 1978.

### **Partie conservation-restauration**

Dupuy, 2012.

Dupuy, Claire. « Les solvants organiques neutres épais pour le nettoyage d'une couche picturale », in *EGG-2011 - Itinéraires* [En ligne]. CeROArt, 2012 [consulté le 07/07/2021]  
<http://journals.openedition.org/ceroart/2634>

Fenn, 2020.

Fenn, Julia et Williams, Scott. « La préservation des objets en caoutchouc ou en plastique », in Note de l'ICC 15 [en ligne]. Note de l'ICC n°15/1, 2019 [consulté le 07/07/2021]

<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation.html>

Guiraud, 2018.

Guiraud, Patrick. « Les modes d'actions des adjuvants », in *Adjuvants* [en ligne]. Infociment, 2018 [consulté le 07/07/2021]

<https://www.infociments.fr/betons/adjuvants>

Nohilé, 2010.

Nohilé, Cédric. *Étude de l'effet du gonflement par les solvants sur les propriétés du caoutchouc butyle*. Thèse de doctorat en Génie, École de technologie supérieure – Université du Québec, Montréal, 2010.

Palmade, 2010.

Palmade - Le Dantec, Nathalie et Picot, André. « La prévention du risque : le remplacement des solvants les plus toxiques par des solvants moins toxiques », in *Conservation-Restauration et Sécurité des personnes*, Actes du colloque LC2CR-CICRP, Institut national du patrimoine, Draguignan, 2010.

Skaf, 2003.

Skaf, Isabelle et Roby Thomas. « The preservation of detached Mosaics: Addressing storage and Transportation Problems resulting from the large scale re-development of the central District of Beirut », in *Les mosaïques : Conserver pour présenter ?*, Actes de la VII<sup>ème</sup> Conférence du Comité international pour la conservation des mosaïques, Musée d'Arles antique, Arles, 2003.

## Liste des figures

Fig. 1 : Face arrière de la mosaïque L1257 avant traitement.....	11
Fig. 2 : Mosaïque découverte à Antioche datant du IIe siècle dans une maison à atrium — concours de boisson entre Héraclès et Dyonisos (Campbell, 1988) © Marcus Agrippa .....	12
Fig. 3 : Mosaïque de la maison de Cassiopé — Fin du IIe siècle : Centaureomachie – simplification des formes, absence de dégradé © Balty .....	13
Fig. 4 : Mosaïque provenant de l'église Heir esh Sheikh datant de la fin IVe © Balty .....	13
Fig. 5 : Mosaïque découverte dans un édifice païen sous la cathédrale d'Apamée — fin du IVe siècle © Balty.....	13
Fig. 6 : Mosaïque provenant de Huarté datant du Vème siècle — Poursuite d'animaux avec fond en écaille à semi de fleurette © Balty .....	14
Fig. 7 : Représentation de la mosaïque vue par l'avant avec saturation et simplification des couleurs pour faciliter la lecture des motifs.....	15
Fig. 8 : Fragment de la nef centrale de l'église d'Oum al-Qoublé © K. Abdallah .....	16
Fig. 9 : Couvercle de la caisse de transport – Inscription « 2/5 » © Archäologisches Institut.....	18
Fig. 10 : Institut d'archéologie de Zurich © Archäologisches Institut.....	18
Fig. 11 : Collection de moulage de l'institut d'archéologie de Zurich © Archäologisches Institut .....	19
Fig. 12 : Collection de vases antiques grecque © Archäolo-gisches Institut .....	19
Fig. 13 : Stratigraphie de la mosaïque — la partie supérieure correspond à l'arrière du tessellatum...	25
Fig. 14 : Détail d'un résidu de mortier blanc .....	25
Fig. 15 : Détail d'un résidu de mortier gris localisé sur un résidu de mortier blanc.....	26
Fig. 16 : Face arrière de la mosaïque — avant traitement.....	28
Fig. 17 : Détail de la face arrière de la mosaïque — dépôt compact rouge pâle adhérent au textile ...	28
Fig. 18 : Dépôt orange — brun situé sur l'une des feuilles de l'arbre fruitier.....	29
Fig. 19 : Dépôt orange-brun situé sur la base de la branche de l'arbre fruitier.....	29
Fig. 20 : Dépôt orange-brun situé entre la branche de l'arbre fruitier et le tronc du palmier.....	29
Fig. 21 : Dépôt orange-brun sous lumière UV .....	29
Fig. 22 : Dépôt bullé présentant une fissure sur la partie la plus fine (en pointillé jaune).....	29
Fig. 23 : Zone déformée : dans l'encadré bleu, les tesselles sont soulevées et repliées sur elle-même	29
Fig. 24 : zone sur laquelle se trouve le second dépôt — coin inférieur droit de la mosaïque.....	30
Fig. 25 : Détail de la face arrière d'une tesselle.....	30
Fig. 26 : Dépôt jaune visible sous lumière visible .....	30
Fig. 27 : Dépôt jaune apparaissant blanc sous lumière UV .....	30
Fig. 28 : Tesselles fracturées .....	31
Fig. 29 : Présence de ciment à l'interface de la fracture .....	31

Fig. 30 : Fragmentation parallèle ayant entraîné la perte d'une partie de la tesselle avec fragmentation perpendiculaire de l'élément restant .....	31
Fig. 31 : lacunes de quelques centimètres carrés localisés sur la moitié droite de la mosaïque .....	32
Fig. 32 : lacune localisée sur la moitié supérieure gauche de la mosaïque.....	32
Fig. 33 : Détail de l'arrière de la mosaïque — en jaune : étendue de la zone d'élévation des tesselles	32
Fig. 34 : Détail de l'arrière de la mosaïque - surface arrière irrégulière due à la différence de dimension des tesselles.....	32
Fig. 35 : Détail du coin inférieur gauche de la mosaïque — dans l'encadrer jaune : lacune du textile (seul l'adhésif maintient les tesselles en place, actuellement retournées), dans l'encadrer rouge : deux rangés de tesselles repliées sur leur face avant .....	33
Fig. 36 : Adhésif jaune sous lumière visible.....	33
Fig. 37 : Adhésif sous lumière UV — à droite en film fin, à gauche en film plus épais et collé au textile .....	33
Fig. 38 : Tesselles dissociées conservées dans un sac plastique à côté de la mosaïque .....	34
Fig. 39 : Tesselle noire dissociée – face avant - exemple de surface altérée .....	34
Fig. 40 : Tesselle beige dissociée - face arrière avec des arêtes vives .....	34
Fig. 41 : Tesselle beige dissociée - face avant avec des arêtes arrondies.....	34
Fig. 42 : Cartographie des altérations (détails par section de la cartographie en Fig. 129Fig. 130, Annexe I, p.115) .....	35
Fig. 43 : Exemple schématisé de remise sur nouveau support avec une résine époxyde à armature en fibre de verre © ICCROM, 1981.....	39
Fig. 44 : Tessallatum conservé sur support souple suspendu sur des rails © Wihr, 1978 .....	39
Fig. 45 : Stratification comprenant une couche d'intervention à base de chaux encollée à un panneau en nid d'abeilles en aluminium avec une résine époxyde .....	41
Fig. 46 : Stratification comprenant une couche d'intervention à base de résine synthétique de quelques millimètres et une couche de résine époxyde formant une strate rigide et plane encollée à un panneau en nid d'abeilles en aluminium avec une résine époxyde .....	41
Fig. 47 : Schéma des contraintes pouvant s'appliquer sur l'objet lors d'une flexion, en rouge la zone de fissuration due à la contrainte de traction, en bleu une zone de compression © A. Regnault — HE-Arc .....	44
Fig. 48 : Pierre ayant continué de se dégrader laissant visible la chaux NHL 2 intacte © Alison Henry	47
Fig. 49 : Chaux NHL5 .....	47
Fig. 50 : Kaolinite — Metaver®.....	48
Fig. 51 : Vinavil ®59.....	48
Fig. 52 : Perlite — roche volcanique expansée .....	49
Fig. 53 : Panneau en nid d'abeille Alucore® © Allega .....	50
Fig. 54 : Résine époxyde EPO 150 et durcisseur K151 © CTS.....	50

Fig. 55 : Banc d'essai du test de Flexion en 3 points — Shimadzu AG-X plus associé au logiciel Trapezium X pour le traitement des données. a : charge appliquée ; b : appuis .....	53
Fig. 56 : Malaxeur Mixmatic 092N © SMRA.....	54
Fig. 57 : Moules industriels en acier inoxydable à 3 compartiments. Chaque élément du moule peut être retiré afin de démouler les mortiers sans les altérer © A. Regnault – HE-Arc.....	54
Fig. 58 : Éprouvettes aux dimensions proportionnelles au format de la mosaïque (longueur et épaisseurs) — ELI : 0.5 x 50 x 5 cm .....	55
Fig. 59 : Préparation schématisée des échantillons — le mortier est coulé entre A et B, la partie C est retirée une fois le mortier sec © J. Paul Getty Trust .....	56
Fig. 60 : Test de cisaillement — Dispositif de compression © J. Paul Getty Trust .....	56
Fig. 61 : Banc d'essai du test de cisaillement — a : charge appliquée ; b : base fixe ; c : système de maintien adapté .....	56
Fig. 62 : Test de cisaillement — mortier collé à l'époxy entre une plaque en aluminium alvéolé et une plaque en acier inoxydable .....	56
Fig. 63 : Test de flexion simplifié — vu du système avant application de poids sur le mortier.....	61
Fig. 64 : Test de flexion simplifié — vu du système en cours d'essais sur le mortier CA juste avant la rupture .....	61
Fig. 65 : Colle jaune et dure .....	69
Fig. 66 : Compresse en coton imbibé de solvant couverte d'un film imperméable et d'une plaque en laiton pour assurer le contact avec la tesselle .....	69
Fig. 67 : Colle brune .....	69
Fig. 68 : Exemple de solvant testé sous lumière visible.....	69
Fig. 69 : Exemple de solvant testé sous UV.....	69
Fig. 70 : Stratification sélectionnée pour la mise en place du nouveau support .....	70
Fig. 71 : Aperçu virtuel de l'aspect final de la mosaïque (uniquement pour les dimensions).....	71
Fig. 72 : En cours de traitement - Dépoussiérage des joints dont l'accès est facilité par l'utilisation d'une tige en métal placé sous le Tessellatum .....	73
Fig. 73 : Mosaïque L1357 avant dépoussiérage.....	73
Fig. 74 : Mosaïque L1357 après dépoussiérage.....	73
Fig. 75 : Dépôt brun avant traitement.....	74
Fig. 76 : Après traitement du dépôt brun .....	74
Fig. 77 : Dépôt brun avant traitement.....	74
Fig. 78 : Dépôt brun après traitement.....	74
Fig. 79 : Zone déformée avant traitement – coin gauche sur la partie basse de la mosaïque .....	75
Fig. 80 : En cours de traitement - doublage et collage d'une zone déformée .....	75
Fig. 81 : En cours de traitement - Doublage d'une seconde zone déformée où le textile est lacunaire.....	75
Fig. 82 : Après traitement de consolidation et remise en forme d'une zone du tessellatum .....	75

Fig. 83 : En cours de traitement - après la mise en place du coffrage .....	76
Fig. 84 : En cours de traitement - Colmatage des jointures avec de la Plasticine®.....	76
Fig. 85 : En cours de traitement - Comblement des joints avec des billes de verre expansé.....	76
Fig. 86 : En cours de traitement - Comblement des lacunes avec de la mousse .....	76
Fig. 87 : En cours de traitement - application de la couche d'intervention à base de chaux.....	77
Fig. 88 : En cours de traitement - après la pose de la couche d'intervention.....	77
Fig. 89 : En cours de traitement - Mortier recouvert d'une bâche pendant le séchage .....	77
Fig. 90 Surface de la couche d'intervention à base de chaux avant comblement des aspérités.....	78
Fig. 91 : Surface de la couche d'intervention à base de chaux après le comblement des aspérités ....	78
Fig. 92 : Coffrage en bois réalisé pour évaluer les systèmes moussants .....	79
Fig. 93 : Évaluation des systèmes moussants - mortier recouvert d'une bâche fine .....	79
Fig. 94 : Évaluation des systèmes moussants - coffrage fermé avec couvercle ajouré .....	79
Fig. 95 : Essai de semelle avec de la résine époxy moussante – vu du dessus .....	80
Fig. 96 : Essai de semelle avec de la mousse polyuréthane expansive - en cours d'expansion - vu du dessus .....	80
Fig. 97 : Résine époxy moussante – vu de profil .....	80
Fig. 98 : Mousse polyuréthane expansive – vu de profil - phénomène de décompression menant à la déformation de la semelle (la bâche a été retirée pour faciliter la compréhension du phénomène)....	80
Fig. 99 : En cours de traitement – après l'application de l'époxy à consistance pâteuse.....	81
Fig. 100 : En cours de traitement - après l'application de la couche d'époxy liquide .....	81
Fig. 101 : mise en place du support en bois pour le retournement de la mosaïque.....	81
Fig. 102 : Constat d'état de la mosaïque après retournement .....	82
Fig. 103 : Détail des différents types de tache et auréole jaune-brun visible sur l'entoilage .....	82
Fig. 104 : Surface du mortier vu de la face avant de la mosaïque .....	83
Fig. 105 : Avant test de désentoilage - zone tachée .....	85
Fig. 106 : Après test de désentoilage - zone tachée .....	85
Fig. 107 : Avant test de désentoilage - zone sans tache .....	86
Fig. 108 : Après test de désentoilage - zone sans tache .....	86
Fig. 109 : Nuancier pour le mortier de rejointoiement .....	88
Fig. 110 : Éprouvette n°1 avant rejointoiement .....	89
Fig. 111 : Éprouvette n°2 avant rejointoiement .....	89
Fig. 112 : Éprouvette n°1 après rejointoiement .....	89
Fig. 113 : Éprouvette n°2 après rejointoiement .....	89
Fig. 114 : Schéma de l'application de la couche d'époxy moussante.....	91
Fig. 115 : Modèle de cadre proposé pour la mosaïque L1357 (les cotes doivent être adaptées aux dimensions réelles après le traitement complet de la mosaïque) .....	91

Fig. 116 : Mosaïque de la nef centrale de l'église de Michaellion. Huarté — phénix en haut à droite © K. Abdallah.....	111
Fig. 117 : Mosaïque du phénix — Fouille d'Antioche © Cléo20 .....	111
Fig. 118 : La mosaïque d'une pièce annexe d'une église inconnue dans la région d'Apamée. Musée de Hama © K. Abdallah.....	111
Fig. 119 Reste du pavement de la nef centrale de l'église nord de Maarrata © K.Abdallah .....	111
Fig. 120 : Mosaïque du bas-côté sud de l'église d'Oum Nir Al-Qoublé © K. Abdallah.....	111
Fig. 121 : Mosaïque de l'abside de l'église d'Oum Nir Al-Qoublé © K.Abdallah.....	111
Fig. 122 : Détail de la partie haute de la mosaïque – lumière ultraviolette .....	112
Fig. 123 : Détail de la partie haute de la mosaïque – lumière ultraviolette .....	112
Fig. 124 : Détail de la partie centrale de la mosaïque – lumière ultraviolette.....	112
Fig. 125 : Détail de la partie centrale de la mosaïque – lumière ultraviolette.....	112
Fig. 126 : Détail de la partie basse de la mosaïque – lumière ultraviolette .....	112
Fig. 127 : Détail de la partie centrale de la mosaïque – lumière ultraviolette.....	112
Fig. 128 : Chronologie des restitutions effectuées par la Suisse à l'international — en rouge les restitutions auxquels a participé l'Institut d'archéologie de Zurich en tant que consultant ou tant que partie restituant. (À partir de OFC, 2019 [en ligne]).....	113
Fig. 129 : Cartographie des altérations — moitié supérieure de la mosaïque .....	114
Fig. 130 : Cartographie de la moitié inférieure du tessellatum .....	115
Fig. 131 : Localisation des prélèvements présentés dans la Fig. 132 .....	117
Fig. 132 : Échantillon sous forme de poudre analysé par diffraction des rayons X.....	117
Fig. 133 : Résultats d'analyses d'un cristal extrait de la poudre de l'échantillon n° 1 par DRX — Stoe IPDS-II .....	118
Fig. 134 : Résultats d'analyses de la poudre de l'échantillon n° 1 par DRX — PanAlytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer .....	118
Fig. 135 : Résultats d'analyses d'un cristal extrait de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — Stoe IPDS-II .....	119
Fig. 136 : Résultats d'analyses de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — PanAlytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer .....	119
Fig. 137 : Résultats d'analyses d'un cristal extrait de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — Stoe IPDS-II .....	120
Fig. 138 : Résultats d'analyses de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — PanAlytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer .....	120
Fig. 139 : Localisation des prélèvements présentés dans la Fig. 140 .....	121
Fig. 140 : Échantillons analysés par FRX (échantillons sur lesquels ont été prélevées les poudres pour la DRX).....	122
Fig. 141 : Localisation des zones de prélèvement des échantillons présentés en Fig. 142Fig. 143 ...	124

Fig. 142 : Echantillon 1 : détail de la zone de prélèvement de l'adhésif utilisé pour l'entoilage .....	125
Fig. 143 : Echantillon 2 : détail de la zone de prélèvement de l'adhésif présent sous forme de tache à l'arrière du tessellatum.....	125
Fig. 144 : Tableau comparatif des résultats de l'étude de mortier de Mme Casado © Casado — INP	127
Fig. 145 : Panneau soumis à une charge uniformément répartie, les traitillés évoquant la position d'origine, les flèches noires la charge uniformément répartie et la flèche rouge la flèche maximale.	128
Fig. 146 : moment quadratique d'une section rectangulaire .....	129
Fig. 147 : Compacité discontinue .....	130
Fig. 148 : Compacité continue .....	130
Fig. 149 : Tamiseur à ultrason.....	130
Fig. 150 : Exemple de tamis normalisés.....	130
Fig. 151 : Courbe recommandée par la société Holcim pour la confection des mortiers © Holcim....	132
Fig. 152 : Echantillons d'adhésif avant l'immersion dans les solvants.....	144
Fig. 153 : Echantillons d'adhésifs quelques secondes après l'immersion dans les solvants .....	144
Fig. 154 : Tesselles après traitement .....	144
Fig. 155 : Tesselles avant traitement .....	144

## Listes des tableaux

Tableau 1 : Comparatif des chaux aériennes, hydraulique naturelle (NHL) et hydraulique transformée (NHL-Z) .....	46
Tableau 2 : Comparaison de l' Acril® 33, du Vinavil® 59 et du Peoval® 33 .....	49
Tableau 3 : Composition des mortiers .....	51
Tableau 4 : Masse et masse volumique .....	58
Tableau 5 : Maximum de résistance à la contrainte avant la rupture en MPa.....	58
Tableau 6 : Maximum de résistance sous la contrainte avant la rupture — test de cisaillement .....	62
Tableau 7 : Comparaison des résultats – en vert les résultats positifs, en bleu les résultats neutres et en rouge les résultats négatifs .....	67
Tableau 8 : Récapitulatif du projet d'intervention.....	72
Tableau 9 : Récapitulatif du protocole d'intervention.....	91
Tableau 10 : équation chimique des réactions — chaux aérienne.....	116
Tableau 11 : équations chimiques des réactions — chaux hydraulique.....	116

## Listes des graphiques

Graphique 1 : récapitulatif des résultats obtenus dans les études de Mme Casado et Mme Fray, les mortiers présentés en jaune sont composés d'un liant à base de chaux hydraulique tandis que les mortiers en brun sont composés d'un liant à base de résine vinylique et acrylique.....	44
Graphique 2 : Bilan comparatif des maximums de résistance à la contrainte avant rupture et des écartypes.....	59
Graphique 3 : comparaison des courbes de déformation des mortiers CA (rupture fragile) et V (rupture ductile) — les courbes de même teinte correspondent aux répliqua d'un même mortier.....	60
Graphique 4 : Courbes de déformation des mortiers à base de chaux avec ou sans adjuvant — rupture fragile.....	60
Graphique 5 : Courbe de déformation des mortiers C, CA et CP — 0 g correspond à la position d'origine des mortiers.....	62
Graphique 6 : bilan des tests de cisaillement — résistance maximum à la contrainte avant la rupture	63
Graphique 7 : courbe de déformation sous la contrainte des mortiers — test de cisaillement.....	64
Graphique 8 : Bilan comparatif des tests de flexion et de cisaillement – les barres d'erreurs en noir correspondent aux écartypes.....	65
Graphique 9 : Comparaisons des résultats obtenus dans cette étude et celles de Mme Fray, et Mme Casado — P = chaux + perlite ; PA : Chaux + perlite + Acril® 33 ; CS : Chaux + sable ; CSA : Chaux + sable + Acril® 33 ; VS : Vinavil® 59 + sable.....	66
Graphique 10 : Echantillon 1 - spectre IRTF de l'adhésif utilisé pour l'entoilage.....	125
Graphique 11 : Echantillon 2 - spectre IRTF de l'adhésif présent sous forme de tache à l'arrière du tessellatum.....	126
Graphique 12 : Courbe granulométrique pour un volume de 1L de Perlite © A.Regnault — HE-Arc .	131
Graphique 13 : Comparatif des courbes granulométriques obtenues à partir d'un même volume de 3 granulats différents (1L) © A.Regnault-HE-Arc.....	131
Graphique 14 : Courbes granulométriques après modification de la répartition granulométrique © A.Regnault-HE-Arc.....	132

## Liste des abréviations

A.C.H : Aluminate de calcium hydraté

BTP : formation dans le bâtiment et les travaux publics

C : Chaux + perlite + sable

CA : Chaux + perlite + sable + Acril®33

CP : Chaux + perlite + sable + Peoval®33

CRAE : Conservation-restauration d'objets archéologiques et ethnographiques

CS : Chaux + sable

CV : Chaux + perlite + sable + Vinavil® 59

CSA : Chaux + sable + Acril®33

DFAE : Département fédéral des affaires étrangères

DRX : Diffraction des rayons X

FRX : Fluorescence des rayons X

HE-Arc CR : Haute École Arc conservation-restauration

IAZ : Institut d'Archéologie de Zurich

INP : Institut nationale du patrimoine

IRTF : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

LTBC : Loi sur les transferts des biens culturels

N.E. : Notre ère

NHL: Natural hydraulic lime

NHL-Z: Transformed natural hydraulic lime

OFC : Office fédéral de la culture

P : Chaux + perlite

PA : Chaux + perlite + acril®33

pH : Potentiel hydrogène

PVAC : Polyacétate de vinyl

S.C.H : Silicate de calcium hydraté

SMRA : Site et Musée romains d'Avenches

UV : Ultra-violet

VP : Vinavil® 59 + perlite

VS : Vinavil® 59 + sable

## Glossaire

**Adjuvant :** Produit ajouté au mortier en faible quantité pour améliorer certaines propriétés. On distingue les adjuvants modifiant les caractéristiques de mise en œuvre, et ceux intervenant sur les propriétés des mortiers ayant fait leur prise : amélioration des performances (Adam, 2001).

**Agrégat :** Matériau inerte, le plus souvent d'origine minérale (silice, calcaire), entrant dans la composition des mortiers, pour former la charge : sables, graviers, cailloux roulés issu du lit des rivières ou concassées (Adam, 2001).

**Assise :** Rangée de pierres disposées horizontalement et par extension tout support d'une strate supérieure, même en matériau autre que la pierre (ICCROM, 1986).

**Chaux :** La chaux est un liant obtenu par la calcination de calcaires plus ou moins siliceux. Les chaux se divisent en deux catégories, selon que leur prise s'effectue sous l'action du gaz carbonique de l'air (chaux aérienne) ou sous l'action de l'eau (chaux hydraulique) - (Info-ciment, en ligne).

**Charge** : substance que l'on ajoute à une matière pour lui donner du corps (Coutelas, 2009).

**Ciment** : Matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante capable d'agglomérer en durcissant des substances variées. Le ciment est un mélange de calcaire et de silicates d'alumine et de fer déshydratés en présence de charbon pulvérulent dans des fours spéciaux. En présence d'eau il se produit des réactions chimiques complexes avec phases d'expansion et de retrait au terme desquelles on obtient un produit très dur (ICCRUM, 1986).

**Dépose** : toute les actions aboutissant au prélèvement d'une mosaïque.

**Diffraction des rayons X** : technique de caractérisation de matériau à structure cristalline. Basée sur l'analyse de l'interaction entre un faisceau monochromatique de rayon X et les atomes d'un matériau solide, il permet notamment d'identifier les différentes phases cristallines composant le matériau.

**Elasticité** : Propriété d'un matériau à se déformer sous l'effet d'une charge et à reprendre exactement sa forme initiale lors que l'on relâche la charge (Info-ciment, 2021).

**Emblema** : voir la définition d'*Opus vermiculatum*.

**Flèche** : En résistance des matériaux, la flèche correspond à la distance maximale jusqu'à laquelle une poutre peut fléchir sous contrainte en son centre.

**Fluorescence des rayons X** : technique permettant la caractérisation d'un matériau au niveau élémentaire. Cette méthode consiste à exposer la matière à des rayons X. Les rayons réémis par la matière sont mesurés, c'est la fluorescence du matériau qui est analysée. On obtient ainsi un spectre caractérisant le matériau.

**Granulaire** : dans ce cas, surface dont on distingue les grains visuellement.

**Granularité** : Distribution dimensionnelle des grains d'un mélange granulaire obtenue par l'analyse granulométrique (Info-ciment, 2021).

**Granulat** : ensemble des constituants inertes d'un mortier ou d'un béton (Coutelas, 2009).

**Granulométrie** : Mesure de la granularité d'un granulat, c'est-à-dire de l'échelonnement des dimensions des grains qu'il contient, par passage de celui-ci à travers une série de tamis à mailles carrées dont les dimensions sont normalisées (Info-ciment, 2021).

**Lit de pose** : Mince couche de mortier, très riche en chaux, appliquée par sections sur le nucleus. Les tesselles sont insérées dans cette couche lorsque le mortier est encore frais (MOSAÏKON, 2013).

**Mosaïque** : Assemblage fait de petits cubes ou de fragments multicolores de divers matériaux (pierre, marbre, émail, verre, métal, bois, etc.) formant un motif décoratif qui pare le revêtement d'un sol, d'un mur, d'un plafond ou la surface d'un objet (CNRTL, 2021)

**Mortier de chaux** : Mortier dont le liant est la chaux (ICCRUM, 1986).

**Mortier de ciment** : Mortier dont le liant hydraulique est un ciment (ICCRUM, 1986).

**Noyau en nid d'abeilles** : Structure semblable aux alvéoles des abeilles dont la caractéristique est d'être rigide et léger.

**Nucléus** : Troisième couche préparatoire couvrant le *rudus*. Cette couche est moins épaisse

que la précédente et est composée d'un mortier fait de chaux et d'agrégats fins (MOSAIKON, 2013).

***Opus musivum*** : Décoration murale généralement composé de tesselles en verre ou en céramique.

***Opus tessellatum*** : Pavement composé d'éléments de petites dimensions (en général de 4 à 20 millimètres de côté) et de forme régulière, habituellement quadrangulaire, juxtaposés en rangées. Ces éléments, appelés tesselles, sont obtenus par la taille de différents matériaux tels que la pierre (communément marbre ou calcaire), la céramique ou la pâte de verre (MOSAIKON, 2013).

***Opus sectile*** : Pavement composé de plaques de pierre, le plus souvent de marbre, de différentes couleurs, taillées suivant des formes régulières et juxtaposées pour créer un motif géométrique ou figuré (MOSAIKON, 2013).

***Opus spicatum*** : Pavement composé d'éléments de céramique, en général de même taille et de forme rectangulaire, disposés en arêtes de poisson ou en épi (MOSAIKON, 2013).

***Opus vermiculatum*** : Type d'opus tessellatum composé de tesselles de très petites dimensions (en général inférieures à 4 mm de côté). Un petit panneau (généralement moins d'un mètre carré) fait en *opus vermiculatum* et inséré dans un pavement de mosaïque (ou parfois dans une paroi verticale) s'appelle un emblema. Il est généralement fabriqué séparément sur une plaque de pierre ou une grande tuile de céramique dans un atelier, avant l'exécution de la mosaïque dans laquelle il est inséré. Ce type de mosaïque a aussi été créé indépendamment de toute architecture comme œuvre d'art portable (MOSAIKON, 2013).

**Plâtre** : sulfate de calcium cuit au four. Le plâtre est gâché avec de l'eau et peut être utilisé comme liant, enduit ou pour des moulages d'ornement (Coutelas, 2009).

**Pouzzolane** : roche pyroclastique meubles ou de faible cohésion provenant des éruptions volcaniques de type explosifs (Coutelas, 2009).

**Potentiel hydrogène** : grandeur sans unité mesurant la quantité d'ions H<sup>+</sup> dans une solution, variant sur une échelle de 1 à 14 elle permet de définir l'acidité ou la basicité d'une solution.

**Prophylactique** : Qui préserve la santé de tout ce qui pourrait lui être nuisible (CNRTL, 2021)

**Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier** : technique d'analyse permettant d'identifier les fonctions chimiques des molécules en exposant la matière à des rayons infrarouges. Cette méthode permet de mesurer le spectre d'absorption, de diffusion, ou d'émission d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz. Chaque liaison chimique d'une molécule possède un domaine d'absorbance différent, ce qui permet de les différencier et de procéder à l'identification des matériaux.

**Rudus** : Deuxième couche préparatoire couvrant le statumen. Cette couche est composée d'un mortier de chaux avec de gros agrégats (MOSAIKON, 2013).

**Statumen** : Première couche préparatoire composée de grosses pierres enfoncées dans la terre ou maçonnées par un mortier grossier et qui permet de créer une surface nivelée et de stabiliser le sol pour éviter tassement et déformation (MOSAIKON, 2013).

**Tessellatum** : Couche qui constitue la surface de la mosaïque et qui est composée des

tesselles et du mortier qui remplit les interstices entre elles (MOSAIKON, 2013).

**Tesselle** : Entités élémentaires d'un décor de mosaïque, souvent carrés en surface, généralement plus haute que larges, fragment de pierre, de terre cuite ou de pâte de verre (Coutelas, 2009).

**Tuileau** : Fragment de briques , de tuiles de terre cuite pilées, utilisés dans les mortiers pour leur rôle pouzzolanique et parfois pour la coloration qu'ils apportent (Adam, 2001).

## Annexes

### I. Illustrations



Fig. 116 : Mosaïque de la nef centrale de l'église de Michaelion. Huarté — phénix en haut à droite © K. Abdallah

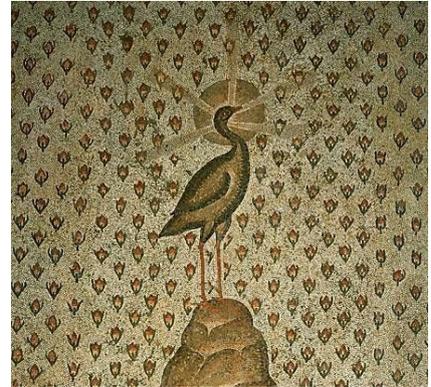


Fig. 117 : Mosaïque du phénix — Fouille d'Antioche © Cléo20



Fig. 118 : La mosaïque d'une pièce annexe d'une église inconnue dans la région d'Apamée. Musée de Hama © K. Abdallah



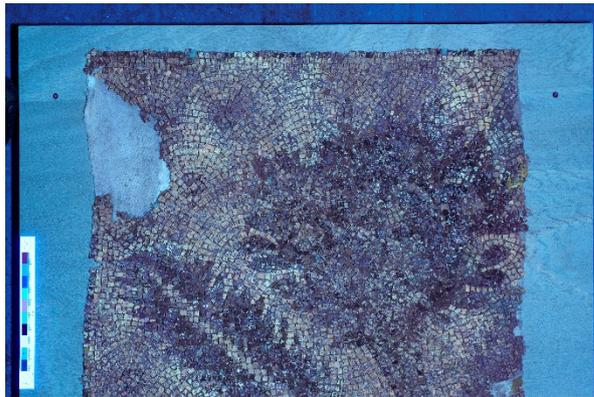
Fig. 119 Reste du pavement de la nef centrale de l'église nord de Maarrata © K.Abdallah



Fig. 120 : Mosaïque du bas-côté sud de l'église d'Oum Nir Al-Qoublé © K. Abdallah



Fig. 121 : Mosaïque de l'abside de l'église d'Oum Nir Al-Qoublé © K.Abdallah



*Fig. 122 : Détail de la partie haute de la mosaïque – lumière ultraviolette*



*Fig. 123 : Détail de la partie haute de la mosaïque – lumière ultraviolette*



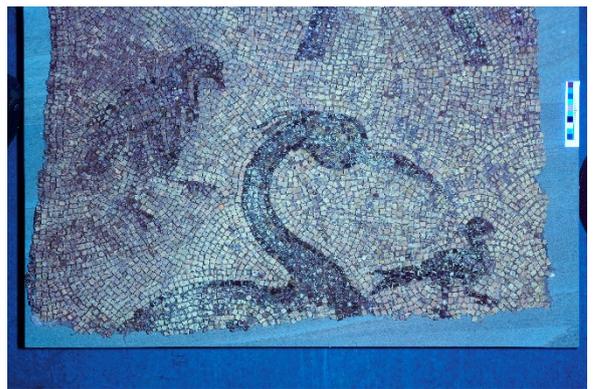
*Fig. 124 : Détail de la partie centrale de la mosaïque – lumière ultraviolette*



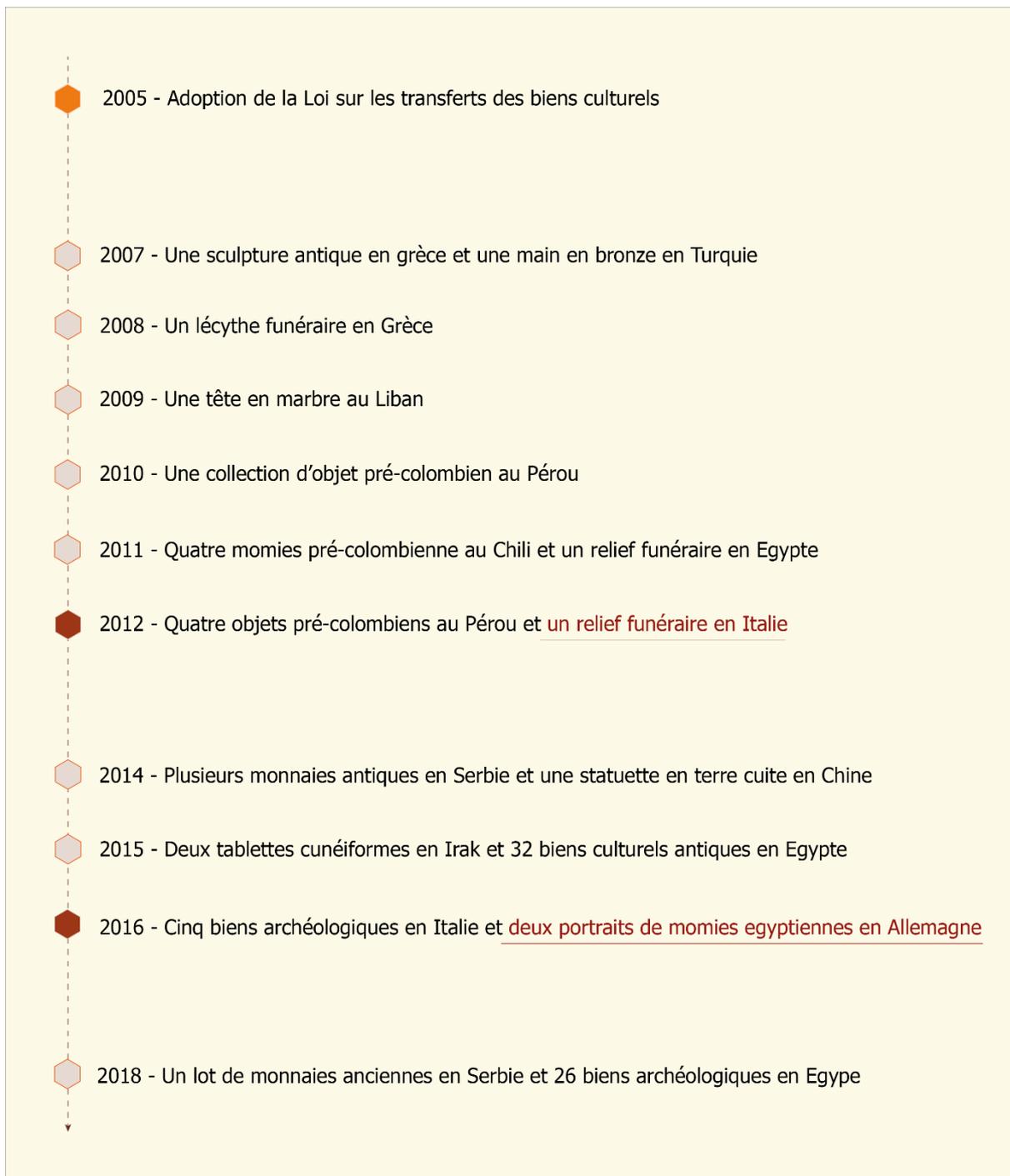
*Fig. 125 : Détail de la partie centrale de la mosaïque – lumière ultraviolette*



*Fig. 126 : Détail de la partie basse de la mosaïque – lumière ultraviolette*



*Fig. 127 : Détail de la partie centrale de la mosaïque – lumière ultraviolette*



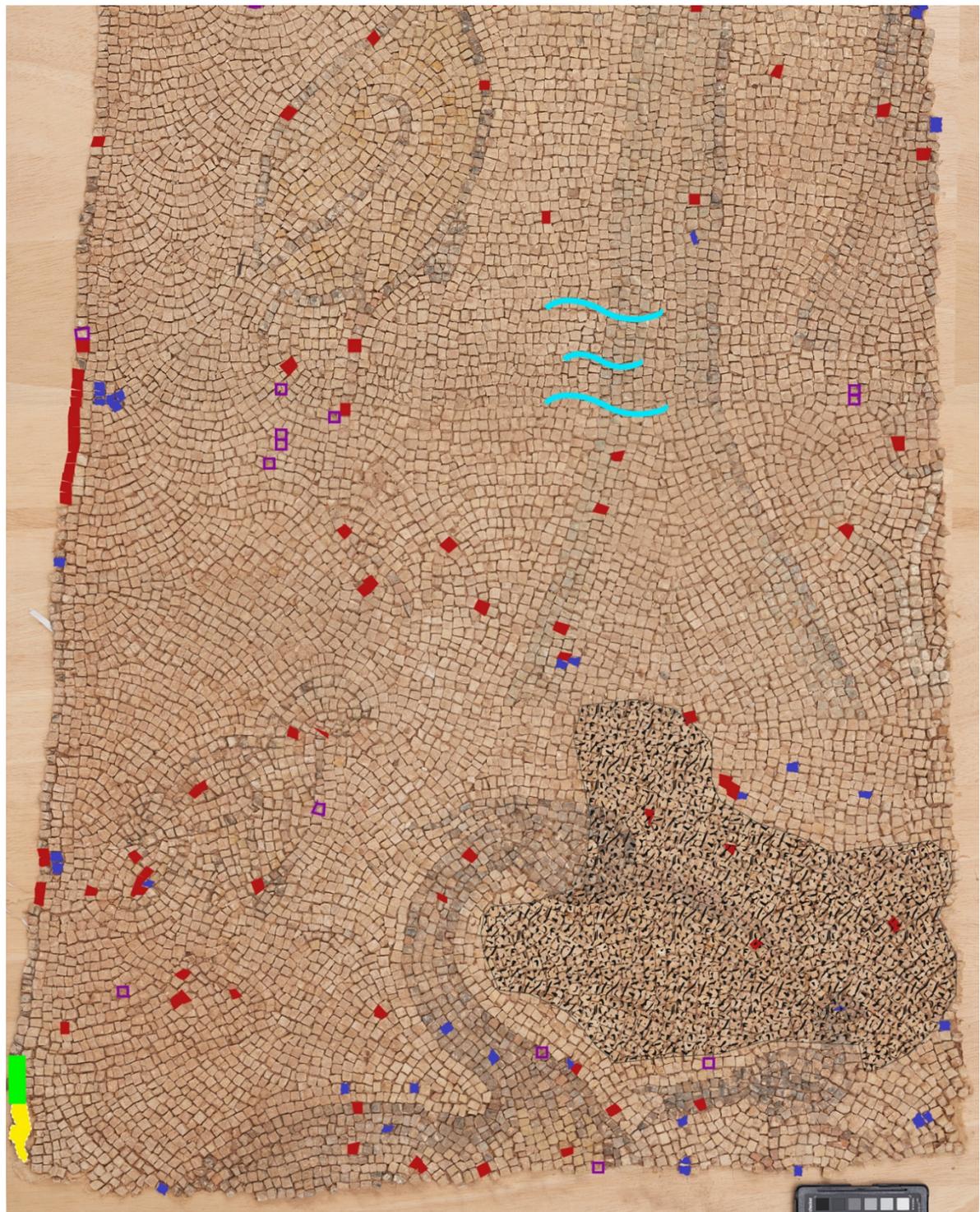
*Fig. 128 : Chronologie des restitutions effectuées par la Suisse à l'international — en rouge les restitutions auxquels a participé l'Institut d'archéologie de Zurich en tant que consultant ou tant que partie restituant. (À partir de OFC, 2019 [en ligne])*

La restitution des deux portraits de momies s'insère dans le projet de restitution d'art Mosse débuté en 2012. La collection de Rudolph Mosse avait été mise aux enchères durant le troisième Reich aux dépens de l'héritière légitime de la collection, persécutée par le gouvernement nazi (BZBM, 2021 [en ligne]).



- |   |                                    |                            |                     |
|---|------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| ■ Tesselle lacunaire                              | □ Zone lacunaire (tesselle)        | ■ Tesselles désolidarisées |                     |
| ■ Dépôt orange-brun                               | ■ Dépôt jaune                      | ■ Déformation              | ■ Textile lacunaire |
| □ Fragmentation parallèle à la face des tesselles | ~ Soulèvement du <i>tesselatum</i> |                            |                     |

Fig. 129 : Cartographie des altérations — moitié supérieure de la mosaïque



- |   |                                    |                            |                     |
|---|------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| ■ Tesselle lacunaire                              | □ Zone lacunaire (tesselle)        | ■ Tesselles désolidarisées |                     |
| ■ Dépôt orange-brun                               | ■ Dépôt jaune                      | ■ Déformation              | ■ Textile lacunaire |
| □ Fragmentation parallèle à la face des tesselles | ~ Soulèvement du <i>tesselatum</i> |                            |                     |

Fig. 130 : Cartographie de la moitié inférieure du *tesselatum*

## II. Processus de fabrication et de prise de la chaux

La chaux aérienne est obtenue par calcination d'un calcaire très pur formant dans un premier temps la chaux vive (1) puis dans un second temps la chaux éteinte par hydratation (2). L'extinction de la chaux permet de transformer les oxydes de calcium en hydroxyde de calcium (composé moins nocif pour l'utilisation). Finalement, en milieu humide le dioxyde de carbone présent dans l'air forme de l'acide carbonique va se fixer à la chaux pour former des carbonates de calcium (3)<sup>114</sup>.

Tableau 10 : équation chimique des réactions — chaux aérienne

1	Calcination (900 °C)	$\text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}_{[s]} + \text{CO}_{2(g)}$
2	Extinction	$\text{CaO}_{[s]} + \text{H}_2\text{O}_{[l]} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_{2(s)}$
3	Carbonatation (milieu humide)	$\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)}$

La chaux hydraulique est aussi obtenue par calcination, mais à des températures plus élevées afin de créer des composés hydrauliques tels que les silicates de calcium ou les aluminates de calcium (1). La forte chaleur permet de lier le calcium de la chaux avec la silice et les autres éléments présents dans la part argileuse. En présence d'eau, ces composés vont se transformer en hydrates insolubles : silicates et aluminates de calcium hydratés (S.C.H ou A.C.H), c'est la partie hydraulique de la prise (2). Finalement, comme pour la chaux aérienne les hydroxydes de calcium et S.C.H/ A.C.H vont subir un processus de carbonatation sur plusieurs mois/années (3-4)<sup>115</sup>.

Tableau 11 : équations chimiques des réactions — chaux hydraulique

1	Calcination (800 — 1500 °C)	$\text{CaCO}_{3(s)} + \text{SiO}_{2(s)} \rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_{2(s)}$
2	Prise hydraulique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_{2(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_{(s)} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
3	Carbonatation (hydroxydes)	$\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)}$
4	Carbonatation (S.C.H)	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)} + \text{SiO}_{2(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

<sup>114</sup> Adam, 2001, p.28.

<sup>115</sup> Coutelas, 2009, p.17.

### III. Résultats d'analyse des liants des mortiers

L'étude des liants mortiers a été effectuée par observation macroscopique et microscopique ainsi que par une analyse élémentaire et structurale. Une analyse par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée dans un premier temps, et a ensuite été complétée par une analyse par fluorescence des rayons X (FRX).

#### Résultats d'analyse par diffraction des rayons X

	<b>Mosaïque — mortier</b>	
	<u>Objet</u> : <b>Mosaïque L1357</b>	
	<u>Datation</u> : Ve de N.E.	
	<u>Lieu</u> : Empa — Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology — Dübendorf	
	<u>Demande</u> :	<u>Analyse réalisée par</u> :
	A. Regnault, étudiante master CRAE, 2021	Dr. Aurelio Borzi Prof. Antonia Neels
	<u>Objectif</u> : identification de la nature de deux mortiers et d'un dépôt minéral	
<u>Technique d'analyse</u> : diffraction des rayons X		
<u>Nombre d'analyse</u> : 2		
<u>Appareil</u> : Single crystal Stoe IPDS-II (Mo radiation) PanAnalytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer (Cu radiation)		

Fig. 131 : Localisation des prélèvements présentés dans la Fig. 132

#### Échantillons analysés :



Fig. 132 : Échantillon sous forme de poudre analysé par diffraction des rayons X

Hypothèses :

- Échantillon 1 : mortier à base de chaux
- Échantillon 2 : mortier à base de ciment
- Échantillon 3 : dépôt sédimentaire riche en oxyde de fer (teinte rouge)

Spectres obtenus

Échantillon n° 1

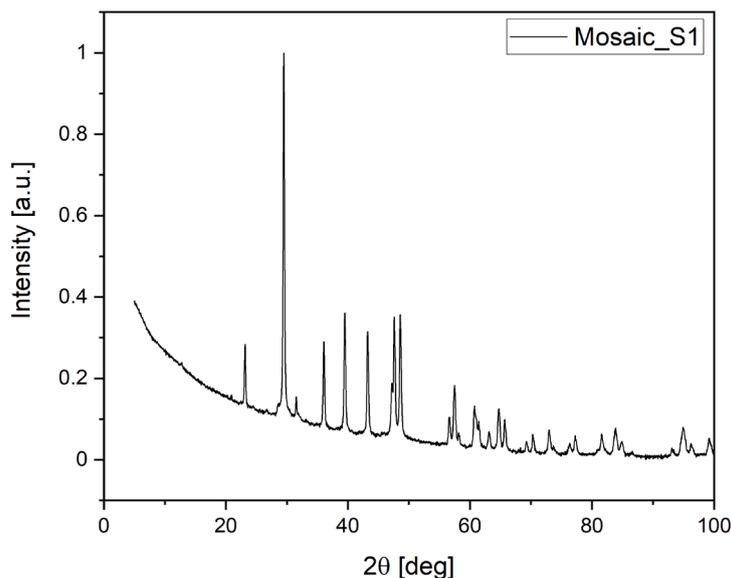


Fig. 133 : Résultats d'analyses d'un cristal extrait de la poudre de l'échantillon n° 1 par DRX — Stoe IPDS-II

Résultats — échantillon n° 1 :

Une seule phase identifiée

- Calcite hexagonale (CaCO<sub>3</sub>)

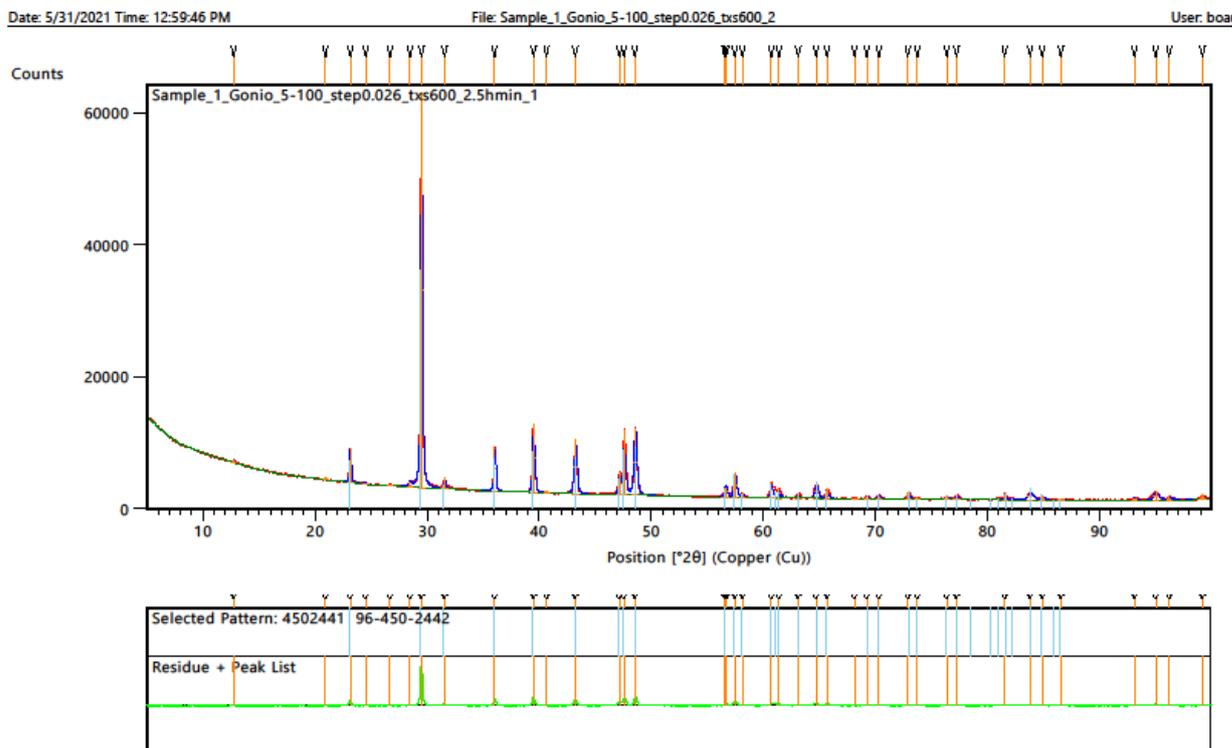


Fig. 134 : Résultats d'analyses de la poudre de l'échantillon n° 1 par DRX — Panalytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer

Échantillon n° 2

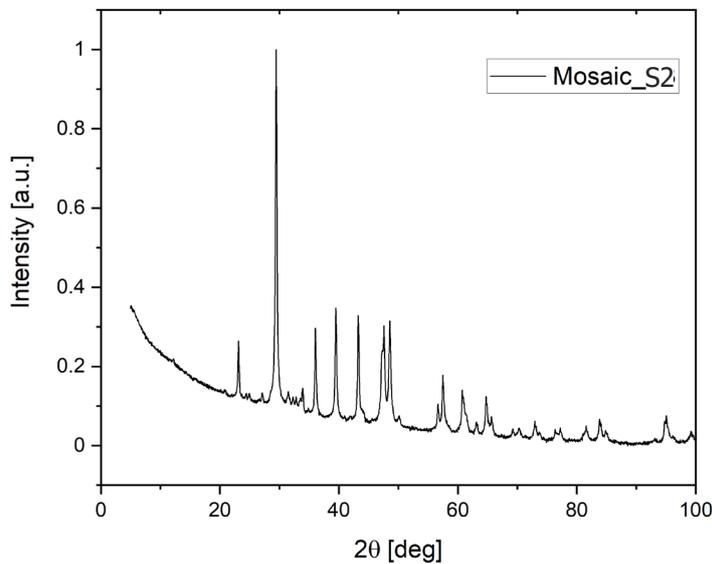


Fig. 135 : Résultats d'analyses d'un cristal extrait de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — Stoe IPDS-II

Résultats — échantillon n° 2 :  
CaCO<sub>3</sub> phases hexagonales

- Calcite hexagonale (CaCO<sub>3</sub>) 98 %
- Vaterite hexagonale (CaCO<sub>3</sub>) 2 %

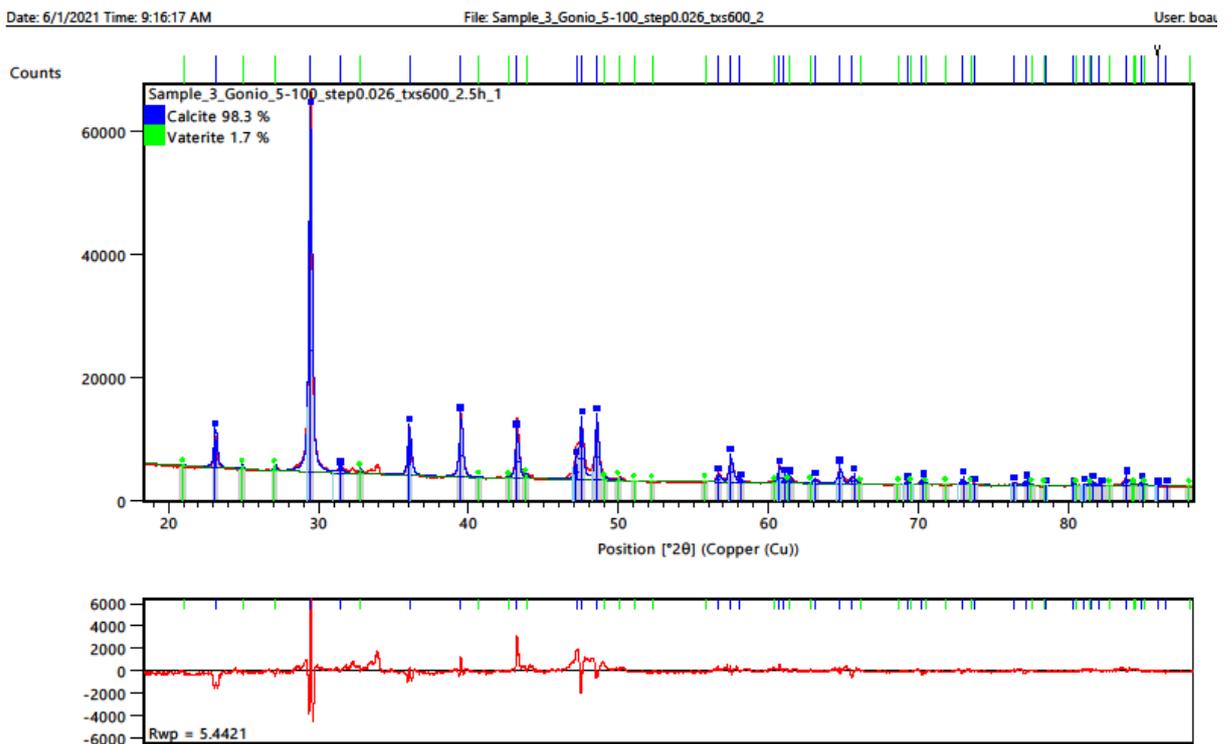


Fig. 136 : Résultats d'analyses de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — PanAlytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer

Échantillon n° 3

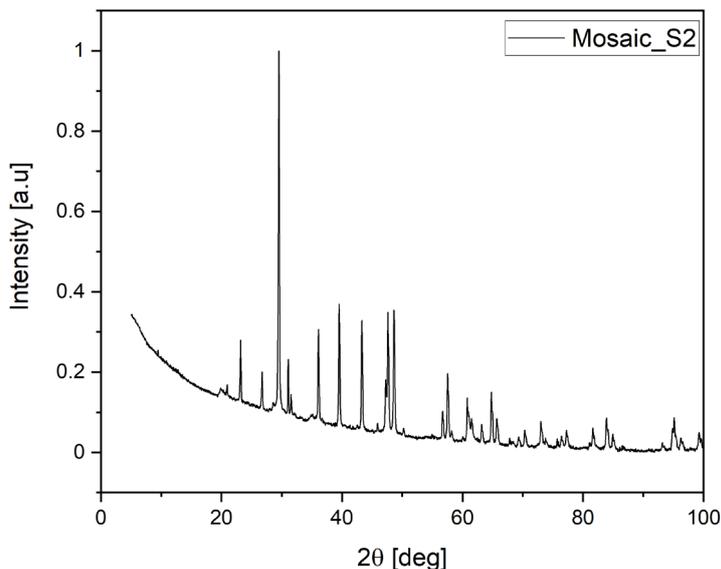


Fig. 137: Résultats d'analyses d'un cristal extrait de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — Stoe IPDS-II

Résultats — échantillon n° 2 :

CaCO<sub>3</sub> phases hexagonales

- Calcite hexagonale (CaCO<sub>3</sub>) >98 %
- Hexagonale (SiO<sub>2</sub>) 1 %
- Calcaire cubique (CaO) <1 %

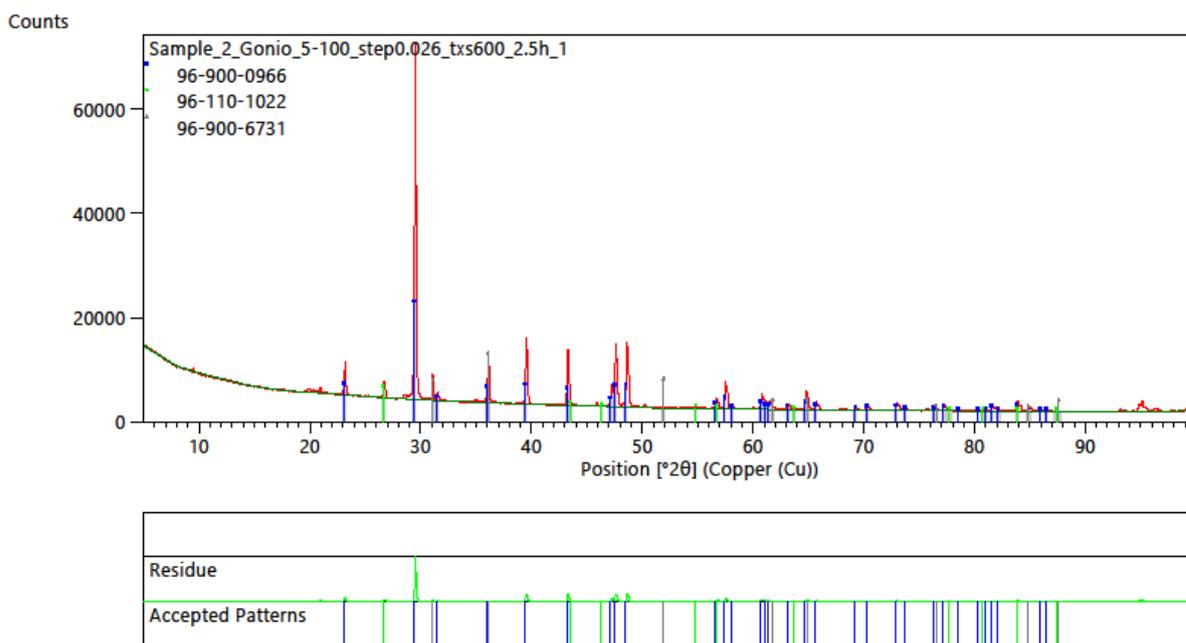


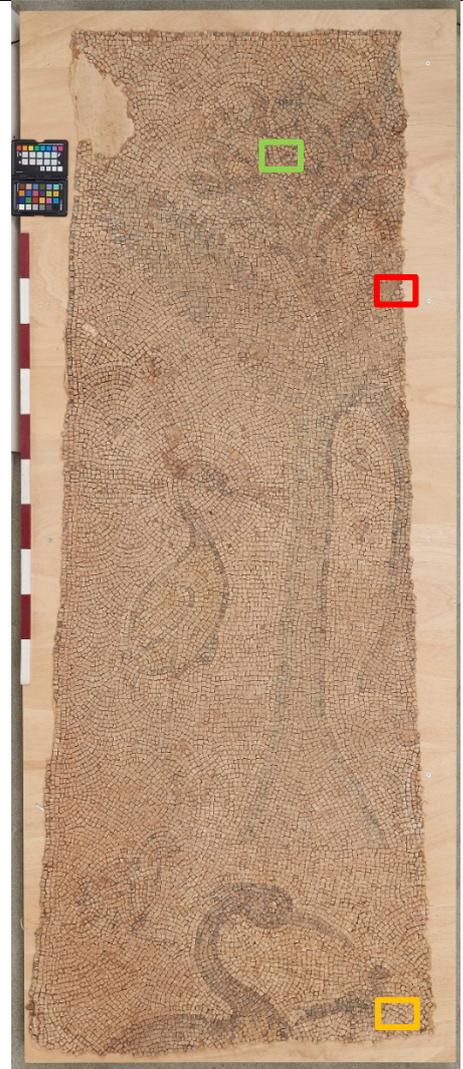
Fig. 138: Résultats d'analyses de la poudre de l'échantillon n° 2 par DRX — PanAlytical X'Pert Pro 3 powder diffractometer

Commentaire

Les analyses par diffraction des rayons X ont permis de mettre en évidence la présence de calcite dans tous les échantillons et d'identifier de la silice et du calcaire dans l'échantillon n° 3. Ces résultats étaient attendus. En revanche, la détection de Vatérite dans l'échantillon n° 2 est étonnante puisqu'il s'agit d'une phase instable facilement synthétisable en laboratoire, mais rarement observable

dans la nature, car elle se cristallise en une phase plus stable : la calcite ou l'aragonite. L'analyse par diffraction des rayons X n'a pas permis de distinguer le mortier de chaux antique du mortier à base de ciment, car les phases dont ce dernier est composé (aluminat de calcium et silicate de calcium) ne sont pas détectables à cause de leur faible cristallinité. La détection de silicium sous forme d'oxyde hexagonal dans l'échantillon n° 2, confirme qu'il s'agirait bien d'un dépôt sédimentaire composé de divers minéraux et non d'un mortier (ou la silice serait alors liée). Une analyse par FRX a été effectuée pour compléter les résultats et ainsi distinguer le mortier de chaux et le mortier de ciment au niveau élémentaire. On suppose que l'on observera une plus grande quantité d'aluminium et de silice dans le mortier de ciment.

### Résultats d'analyses par fluorescence des rayons X

	<b>Mosaïque — mortier</b>	
	<b>Objet : Mosaïque L1357</b>	
	<b>Datation :</b> Ve de N.E.	
	<b>Lieu :</b> Haute École Arc — Neuchâtel	
	<b>Demande :</b> A. Regnault, étudiante master CRAE, 2021	<b>Analyse réalisée par :</b> C. Degrigny
	<b>Objectif :</b> identification de la nature de deux mortiers et d'un dépôt minéral	
	<b>Technique d'analyse :</b> fluorescence des rayons X	
<b>Mode :</b> soil and mineral		
<b>Durée :</b> 70 sec		
<b>Nombre de pointé :</b> 1 pointé		
<b>Type de mesure :</b> analyseur tenu à la main		
<b>Appareil :</b> Niton® XL3t — Thermo Fisher Scientific		

*Fig. 139 : Localisation des prélèvements présentés dans la Fig. 140*

Échantillons analysés :

Fig. 140 : Échantillons analysés par FRX (échantillons sur lesquels ont été prélevées les poudres pour la DRX)

Les échantillons ont été prélevés à l'arrière du *tessellatum*, seul l'échantillon 2 n'était pas adhérent au *tessellatum* mais maintenu physiquement entre les tesselles.

Éléments analysés et indiqués sur l'écran de l'analyseur :

Analyse	Al	Si	Ca	Fe	Ti	K	P	Cl	S	Bal <sup>116</sup>
Fond	0.54	1.07	0.07	0.02	3.00	0.06	0.08	0.23	0.14	94.78
Échantillon 1	0.60	13.76	26.01	0.10	0.03	0.11	-	3.67	0.43	53.82
Échantillon 2	1.70	6.60	32.14	1.28	0.27	0.13	-	5.87	0.34	51.48
Échantillon 3	1.71	8.11	19.84	0.84	0.24	0.34	0.24	4.10	0.11	64.37

Commentaire

L'analyse par fluorescence des rayons X révèle la présence des éléments aluminium et silicium dans les trois échantillons, avec une plus grande quantité dans l'échantillon n° 2. Ce résultat était attendu étant donné que les ciments sont composés d'aluminat de calcium hydraté et de silicate de calcium hydraté. L'échantillon n° 1, contient la plus faible quantité en aluminium mais la quantité la plus importante en silice. Étonnamment le dépôt sédimentaire apparaît contenir une faible quantité d'oxyde de fer alors que sa couleur rouge pouvait laisser penser qu'il en contenait en plus grande quantité. Tous les échantillons prélevés contiennent des chlorures en quantité significative. Les sels solubles tels que les chlorures étant des facteurs d'altérations courant de la mosaïque, la présence de chlorure ne doit pas être négligée. Cependant le mortier n'étant présent que sous forme de résidus sur cette mosaïque, le taux de chlorures présent est certainement trop faible pour entraîner l'altération du *tessellatum*.

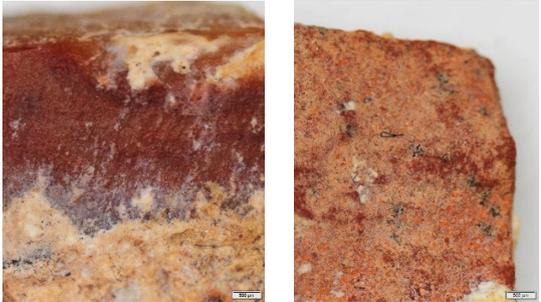
Croisement des résultats des analyses par DRX et XRF

Les résultats obtenus par DRX et FRX ne permettent pas de distinguer de manière évidente les différents échantillons bien qu'ils révèlent une quantité plus importante d'aluminium dans l'échantillon

<sup>116</sup> Autres éléments qui ne sont pas analysés par le spectromètre

n° 2, qui confirmeraient qu'il s'agit bien d'un ciment. Les résultats des analyses étant trop proches pour permettre une interprétation pertinente, l'identification se base alors principalement sur l'étude macroscopique qui dans ce cas est particulièrement révélatrice. La couleur grise et la grande dureté de l'échantillon n° 2 permettent d'affirmer sans hésitation que ce mortier est constitué d'une base de ciment.

#### IV. Identification des tesselles

Couleur	Description	Illustration
Beige	Tesselles de couleur opaque homogène, présence de veine grise sous forme de petit point. Certaines sont bicolores, le beige tend vers le rouge de manière très localisée. Aspect lisse et légèrement brillant. Hypothèses : Marbre ? Roche calcaire ?	
Noir	Tesselles de couleur homogène et opaque, aspect lisse et un peu brillant. Pas de trace de veines ou d'incrustation. Hypothèses : Basalte ? Roche calcaire ?	
Rouge	Tesselles de couleur opaque et hétérogène : alternance de teinte jaune et rouge. Aspect lisse et brillant sur la plupart des tesselles, d'autres ont un aspect granuleux et sont plus claires. Hypothèses : Marbre ? Roche calcaire à base d'oxyde anhydre (hématite ?) Grès ?	
Jaune	Tesselles de couleur homogène et opaque, présence de veine noire. Certaines sont bicolores, le jaune tend vers le rouge. Aspect lisse et brillant. Hypothèse : Marbre ? Roche calcaire contenant de l'ocre jaune à base d'oxyde hydraté ? Quartz ?	

Vert	<p>Tesselles de couleur homogène et opaque, présence de veines rouge orangé. Apparaissent moins saturées que les autres couleurs, tendent vers le gris.</p> <p>Hypothèse : Serpentine ? Basalte ? Marbre ? Grès ? roche métamorphique à base d'argile verte ?</p>	
------	---	--

## V. Rapports d'analyses des adhésifs

	<b>Mosaïque — Adhésifs</b>	
	<u>Objet</u> : <b>Mosaïque L1357</b>	
	<u>Datation</u> : Ve de N.E.	
	<u>Lieu</u> : HKB – Haute École d'art de Bern	
	<u>Demandé par</u> :	<u>Analyse réalisée par</u> :
	A. Regnault, étudiante master CRAE, 2021	Stefan Zumbühl
	<u>Objectif</u> : identification de la nature de l'adhésif utilisé pour l'entoilage et de l'adhésif présent sous forme de tache à l'arrière du <i>tessellatum</i>	
<u>Technique d'analyse</u> : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier – Mode ATR		
<u>Nombre d'analyse</u> : 6 (3 échantillons de chaque adhésif ont été analysés pour assurer la validité des résultats)		
<u>Appareil</u> : Microscope FT-IR LUMOS II – Bruker, Opus software		

Fig. 141 : Localisation des zones de prélèvement des échantillons présentés en Fig. 142 Fig. 143

### Echantillons analysés



Fig. 142 : Echantillon 1 : détail de la zone de prélèvement de l'adhésif utilisé pour l'entoilage



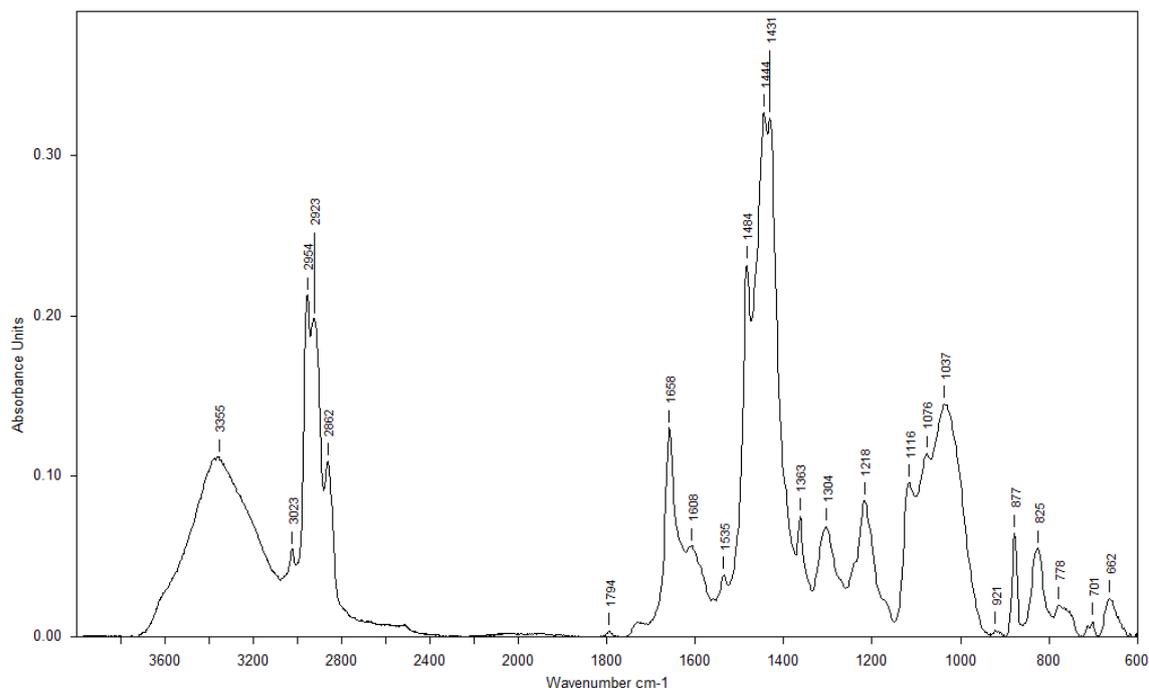
Fig. 143 : Echantillon 2 : détail de la zone de prélèvement de l'adhésif présent sous forme de tache à l'arrière du tessellatum

Les échantillons ont été prélevés avec un scalpel à l'arrière du *tessellatum*, l'adhésif utilisé pour l'entoilage n'était plus adhérent au textile sur la zone de prélèvement.

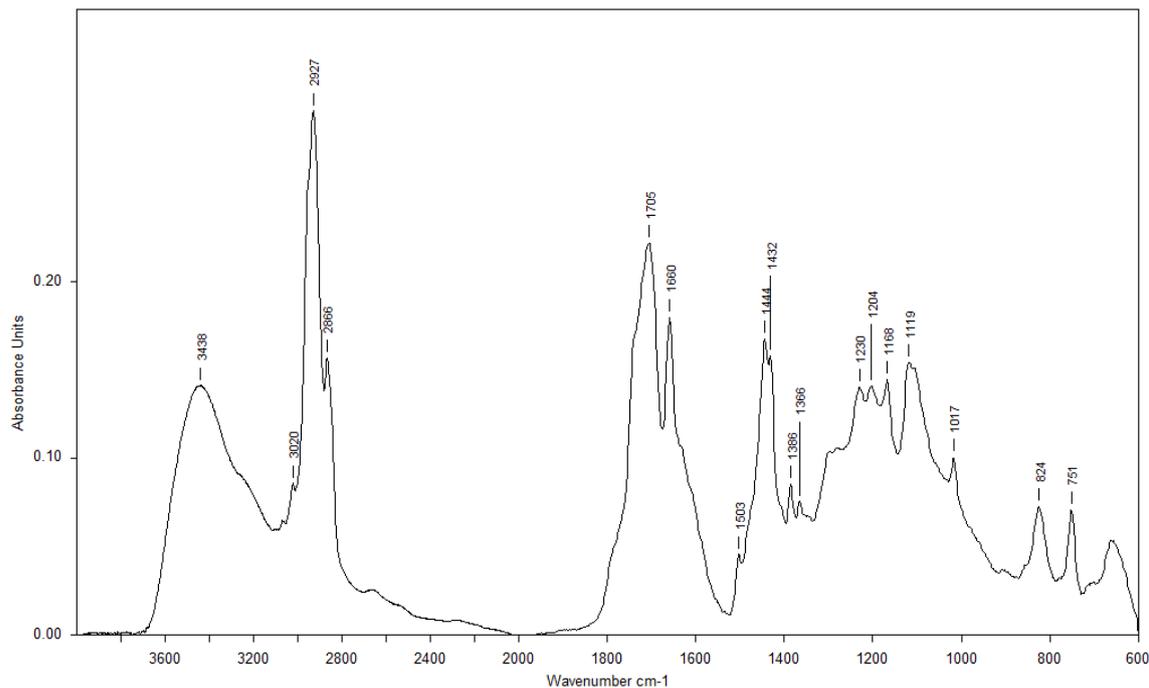
### Hypothèse

- Echantillon 1 : en raison de l'importante élasticité de l'adhésif utilisé pour l'entoilage, nous supposons que l'adhésif appartient à la famille des élastomères.
- Echantillon 2 : la fluorescence orange, la couleur brune sous lumière visible, l'aspect brillant, la texture cassante de l'adhésif laisse penser qu'il s'agirait d'un adhésif d'origine naturelle.

### Résultats d'analyses



Graphique 10 : Echantillon 1 - spectre IRTF de l'adhésif utilisé pour l'entoilage



Graphique 11 : Echantillon 2 - spectre IRTF de l'adhésif présent sous forme de tache à l'arrière du tessellatum

### Interprétation des résultats

- Echantillon 1 : L'adhésif n'a pas pu être identifié précisément puisqu'il s'agit probablement d'un mélange de plusieurs composés complexes. En revanche, il a pu être déterminé qu'il s'agit d'un polymère à base de caoutchouc, c'est-à-dire essentiellement un hydrocarbure. Il est possible qu'il s'agisse d'un copolymère de butadiène. L'adhésif semble être facilement oxydable, ce qui explique les différentes intensités de la bande carbonyle, caractéristique de ce type de matériaux. Il ne s'agit pas d'un polybutadiène-styrène car ce dernier émet un signal caractéristique et fort autour de  $700\text{cm}^{-1}$  qui n'est pas présent sur le spectre. Des éléments structurels aromatiques sont probablement présents. L'hypothèse d'un mélange avec une PVA avait été émise mais aucun pic caractéristique de ce type de polymère n'est présent. La composition exacte n'a pas encore été déterminée mais pourrait l'être en continuant les recherches dans la littérature puisque cet adhésif émet un pic à  $1658\text{cm}^{-1}$ , signal visible sur très peu de polymère<sup>117</sup>. L'hypothèse définissant l'adhésif comme un élastomère a ainsi pu être confirmée.

- Echantillon 2 : L'adhésif présent sous forme de taches n'a pas pu être identifié, en revanche l'hypothèse émise sur une origine naturelle a été écartée puisqu'il ne présente pas de signal caractéristique à ce type de matériau<sup>118</sup>.

<sup>117</sup> Communication écrite par e-mail avec M. Zumbühl Stefan le 15/06/2021.

<sup>118</sup> Communication orale avec M. Zumbühl Stefan le 29/04/2021.

## VI. Bilan de l'étude de Mme Casado Célia

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent que les mortiers de chaux ont une résistance à la contrainte inférieure aux mortiers synthétiques, de même qu'un module d'élasticité moindre. Le mortier à base de résine acrylique a un comportement et un pH similaire au mortier de chaux, en revanche, il présente une rupture ductile (avec une déformation plastique) et non une rupture fragile. Les deux mortiers présentant les meilleurs résultats sont ceux à base de Mowilith® et de Vinavil® 59. L'un des objectifs de cette étude étant de trouver une alternative à la Mowilith® en raison de la difficulté d'approvisionnement (par bidon de 25 kg/date d'expiration au bout d'un an et un changement de formulation), le choix final de cette étude s'est logiquement porté sur le mortier synthétique à base Vinavil® 59.

	Masse volumique	pH	Module élastique	Résistance mécanique	Réversibilité
Chaux	☹☹☹	Très élevé	☹	+	Eau : Dur
					Et. : dur
					Ac. : dur
Chaux/Acrlil®	☹☹	Très élevé	☹	+	Eau : dur
					Et. : dur
					Ac. : dur
Chaux/Vinavil®	☹	Très élevé	☹	+	Eau : dur
					Et. : dur
					Ac. : dur
Mowilith®	☹☹	Neutre	☺	+++	Eau : dur
					Et. : mou
					Ac. : tendre
Acrlil®/sable	☹	Basique	☹	++	Eau : mou
					Et. : tendre
					Ac. : tendre
Vinavil®/sable	☹	Neutre	☺	+++	Eau : mou
					Et. : mou
					A : tendre

Fig. 144 : Tableau comparatif des résultats de l'étude de mortier de Mme Casado © Casado — INP

La première colonne compare la masse volumique des différents mortiers : la chaux ayant la masse la plus élevée et les produits à base de Vinavil 59 et d'Acrlil® 33 les plus faibles. La seconde colonne compare le pH de chaque mortier avant séchage. « Très élevé » signifie un pH très basique probablement autour de 9 qui correspond au pH de la chaux, basique un intermédiaire en 9 et 7 et

neutre un pH de 7. La troisième colonne différencie les mortiers cassants des mortiers souples. La quatrième colonne compare les mortiers les plus résistants au moins résistants, « +++ » correspondant au mortier ayant le plus de résistance. La dernière colonne indique la réactivité des mortiers à l'eau, l'éthanol (Et.) et l'acétone (Ac.).

## VII. Étude théorique des contraintes de flexion appliquée à l'objet

Les deux contraintes identifiées pouvant entraîner l'altération de l'objet sont le cisaillement et la flexion. Cette étude se concentre sur l'étude de la contrainte à la flexion.

L'objectif de cette étude est de déterminer la déformation maximale que pourrait subir la mosaïque sur son support, en son centre. Cette donnée est obtenue en calculant la flèche maximale, c'est-à-dire la distance de déplacement au centre lorsque le panneau est soumis à une charge. Dans ce cas la charge est répartie uniformément sur la surface. Il faut donc appliquer la formule suivante :

$$w = \frac{5}{384} * \frac{q * L^4}{E * I}$$

w : Flèche au centre (mm)

L : Portée (mm)

q : charge (N/mm)

E : Module d'élasticité (N/mm<sup>2</sup>)

I : Inertie ou moment quadratique (mm<sup>4</sup>)

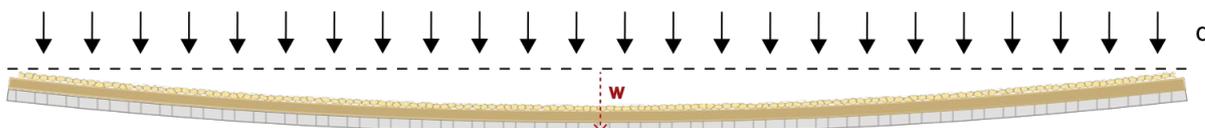


Fig. 145 : Panneau soumis à une charge uniformément répartie, les traitillés évoquant la position d'origine, les flèches noires la charge uniformément répartie et la flèche rouge la flèche maximale

La portée correspond à la longueur du panneau, dans ce cas, elle est de 235 cm. La charge, étant répartie uniformément, se calcule en multipliant la masse totale par la constante gravitationnelle g puis en divisant le résultat par la longueur du panneau. La charge a dû être estimée, car la masse exacte du système est inconnue. La masse moyenne d'une tesselle a été définie en pesant les tesselles déjà dissociées. Puis cette masse a été multipliée par le nombre de tesselles présentes sur la mosaïque (cette donnée a aussi été estimée en comptant le nombre de tesselles présentes sur 10 cm<sup>2</sup>). La masse obtenue a été arrondie à 15 kg pour intégrer la masse du rejointoiement. La masse du panneau étant de 16 kg, la *tessellatum* de 15 kg et la masse estimée du mortier le plus lourd de 51 kg, la masse totale prise en compte pour ce calcul est de 81 kg. On obtient donc une charge de 0,33 N/mm<sup>2</sup>.

Le module d'élasticité ou module de Young caractérise la rigidité d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte. Il définit à la fois une limite à partir de laquelle le matériau n'est plus élastique et le comportement du matériau pendant la déformation. Plus le module d'élasticité est élevé, moins le

matériau se déforme sous la contrainte, il est donc plus rigide<sup>119</sup>. Le module d'élasticité pris en compte dans cette étude est celui du panneau puisqu'il correspond au support principal du système. Cette donnée est fournie dans la fiche technique (cf. Annexe XII, p. 169) et s'élève à 70 000 N/mm<sup>2</sup>.

La résistance d'un matériau à la déformation varie aussi selon la géométrie de la section du panneau par rapport à un axe. L'inertie peut être calculée selon deux des trois dimensions du panneau (y, z), dans le cas d'une flexion longitudinale on cherche l'inertie de la section par rapport à l'axe y.

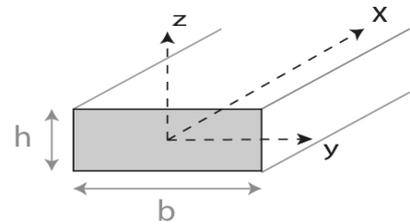


Fig. 146 : moment quadratique d'une section rectangulaire

On utilise la formule suivante :

$$I_y = \frac{(b * h^3)}{12}$$

$I_y$  : Inertie (mm<sup>4</sup>)

b : largeur du panneau (mm)

h : hauteur du panneau (mm)

L'inertie du panneau est alors de 12,56 x 10<sup>5</sup> mm.

On peut ainsi calculer la flèche maximale.

Calcul de la flèche maximale :

$$w = \frac{5}{384} * \frac{0,33 * 2300^4}{70000 * 12,56 * 10^5}$$

$$w = 1,5 \text{ mm}$$

Théoriquement, la distance maximale jusqu'à laquelle pourrait fléchir le panneau sous son propre poids par rapport à sa position d'origine serait de 1,05 mm.

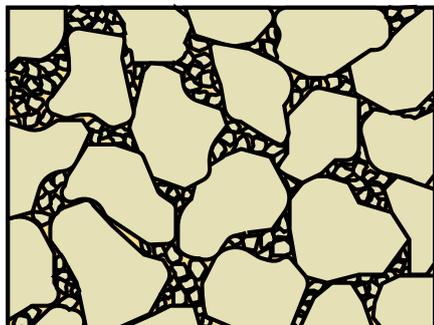
### VIII. Étude sur la répartition granulométrique des mortiers

Les agrégats ont pour rôle de donner du volume au mortier, de diminuer le phénomène de retrait, de former une armature permettant d'améliorer les performances mécaniques et de favoriser une meilleure porosité<sup>120</sup>. La granularité ou répartition granulométrique influe directement sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique. On distingue deux types de répartitions : continue et discontinue. Une répartition granulométrique discontinue améliore la résistance mécanique et l'imperméabilité des mortiers tandis qu'une répartition continue a théoriquement une résistance inférieure, mais une meilleure ouvrabilité. Les meilleures performances physiques d'un mortier à

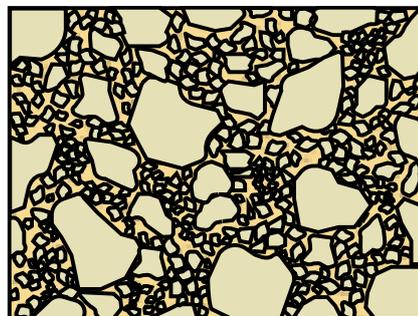
<sup>119</sup> Ashby, 2013, p.31.

<sup>120</sup> Adam, 2001, p.47.

granularité discontinue sont dues à sa meilleure compacité. La granularité discontinue est obtenue en supprimant la classe grains de tailles moyennes. On obtient ainsi un mortier composé de gros grains dont les interstices sont comblés par de très petits grains.



*Fig. 147 : Compacité discontinue*



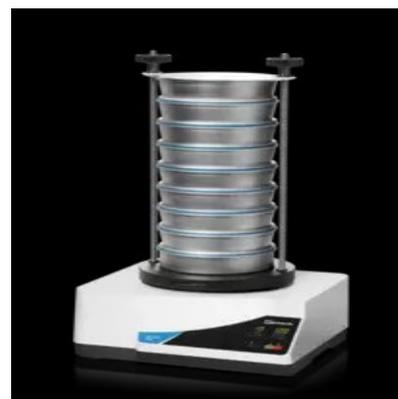
*Fig. 148 : Compacité continue*

Une répartition discontinue est particulièrement adaptée aux constructions en béton armé puisque l'imperméabilité des mortiers permet de garder l'armature en milieu anoxique et la protège ainsi de la corrosion<sup>121</sup>. Dans le cas de la couche d'intervention, une compacité continue semble plus adaptée puisqu'elle permet une mise en œuvre plus aisée. De plus, la résistance mécanique supérieure des compacités discontinues n'est que théorique puisqu'en réalité l'ouvrabilité étant plus difficile, il est probable que lors de la mise en œuvre, des vides soient laissés, ce qui peut fragiliser la structure.

Afin de connaître la répartition granulométrique de la perlite, un échantillon du paquet a été fractionné par taille à l'aide d'un tamiseur à colonnes. Six tamis normalisés<sup>122</sup> ont été utilisés allant de 0.063 mm à 4 mm, chaque refus de tamis a été pesé et retranscrit sur dans un tableur afin d'obtenir la courbe granulométrique de l'échantillon. Cette dernière permet de comparer le pourcentage de grains en fonction de la taille des tamis (cf. Graphique 12).



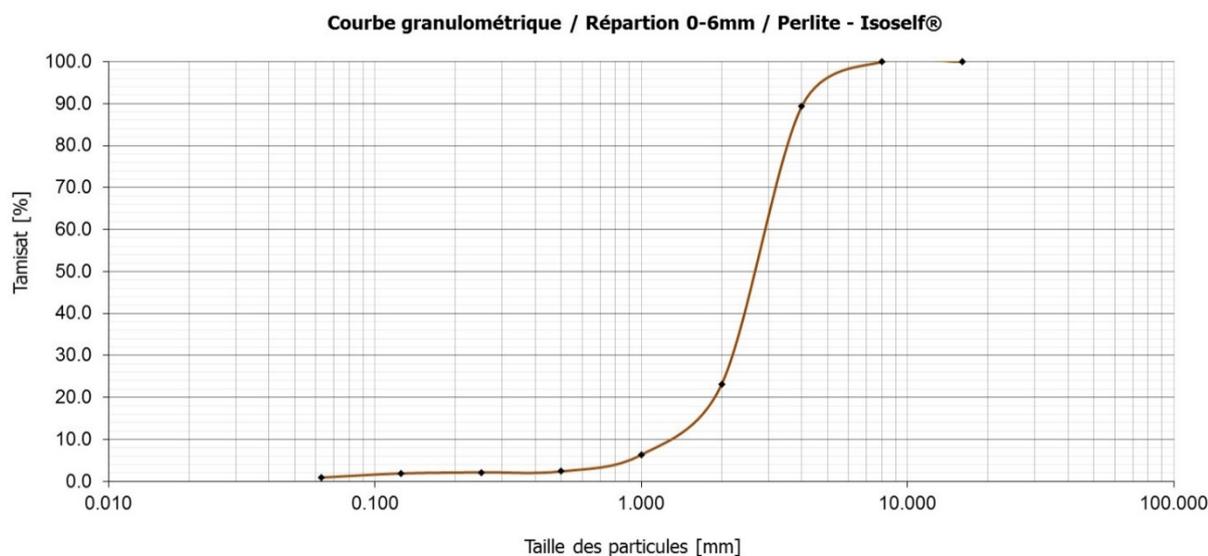
*Fig. 150 : Exemple de tamis normalisés*



*Fig. 149 : Tamiseur à ultrason*

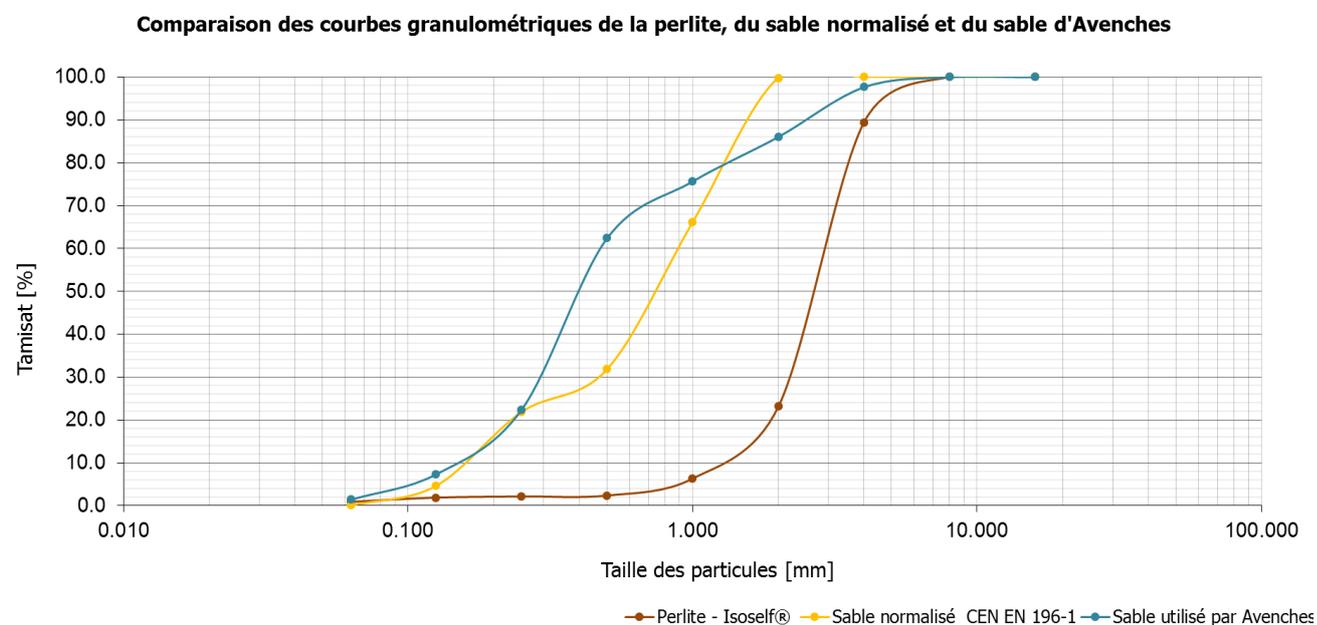
<sup>121</sup> Akabli, 2018 [en ligne].

<sup>122</sup> Conforme à la norme NF X 11501 et NF X 11-504.



*Graphique 12 : Courbe granulométrique pour un volume de 1L de Perlite*

La courbe granulométrique de la perlite indique qu'il s'agit d'une répartition continue (cf. Graphique 12). En présence d'une répartition discontinue, on observerait un palier au centre de la courbe. On peut constater que la répartition est peu homogène avec une majorité de grains entre 2 et 6 mm (environ 75 %). Si l'on compare cette courbe à celle d'un sable normalisé ou d'un sable régulièrement utilisé au SMRA, on peut constater que la quantité en grain entre 0 et 2 mm est trop faible et la quantité de grain entre 2 et 4 mm est trop importante (cf. Graphique 13).



*Graphique 13 : Comparatif des courbes granulométriques obtenues à partir d'un même volume de 3 granulats différents (1L)*

La perlite a été tamisée à deux reprises afin d'obtenir 3 classes de grains distinctes qui permettront de créer une nouvelle répartition granulométrique<sup>123</sup>. Le volume nécessaire de chaque classe granulaire a été défini théoriquement : 2 volumes de petits grains (0-2 mm), 0.8 volume de grains moyens (2-4 mm) et 0.2 volume de gros grains (4-6 mm). Cette nouvelle formulation a permis de rapprocher la courbe de celle recommandée par les industries cimentières<sup>124</sup>, mais reste encore très différente de la répartition granulométrique du sable (cf. Graphique 14). Il a donc été décidé d'apporter une part du sable d'Avenches afin de compenser le manque de grain de dimension 0.5 à 1 mm puisque ce dernier en a en excès. L'apport de sable a été le plus faible possible afin de ne pas alourdir le mortier de manière significative.

Sable 0/4 mm catégorie G, 85

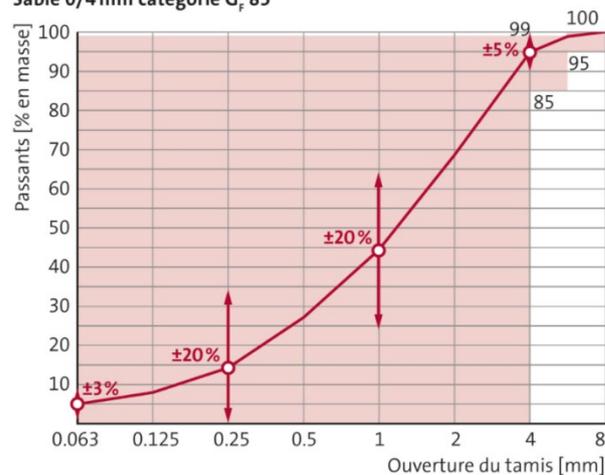
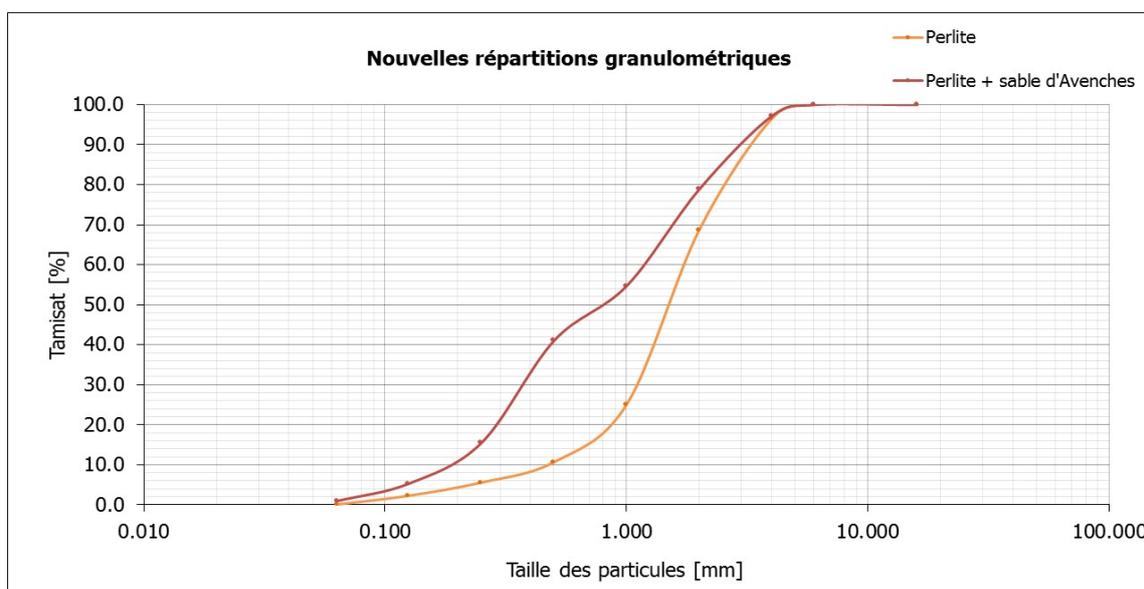


Fig. 151 : Courbe recommandée par la société Holcim pour la confection des mortiers © Holcim



Graphique 14 : Courbes granulométriques après modification de la répartition granulométrique

<sup>123</sup> La modification de la répartition granulométrique est spécifiquement nécessaire pour cette mosaïque du fait de sa surface très hétérogène. L'application d'un mortier homogène et fin est nécessaire pour assurer l'adhérence de chaque tesselle au mortier. Pour reproduire cette étude, il est possible de commander des granulats de la bonne dimension dans des industries étrangères. Sinon les tamis utilisés de dimensions 2 et 4 mm se trouvent dans les magasins de bricolage courant.

<sup>124</sup> Holcim, 2019 [en ligne].

Le mélange de perlite et de sable a été retenu pour la réalisation des mortiers à tester puisqu'il permet théoriquement une meilleure ouvrabilité, cette hypothèse a été confirmée lors de la réalisation des prétests. L'évaluation des résistances mécaniques de ces mortiers permettra de comparer les résultats à ceux obtenus dans l'étude de Mme Fray, qui a utilisé la perlite comme unique charge (sans en avoir modifié la répartition granulométrique).

## IX. Résultats de l'étude sur la résistance mécanique des mortiers allégés

### Rapport d'analyse flexion 3 points

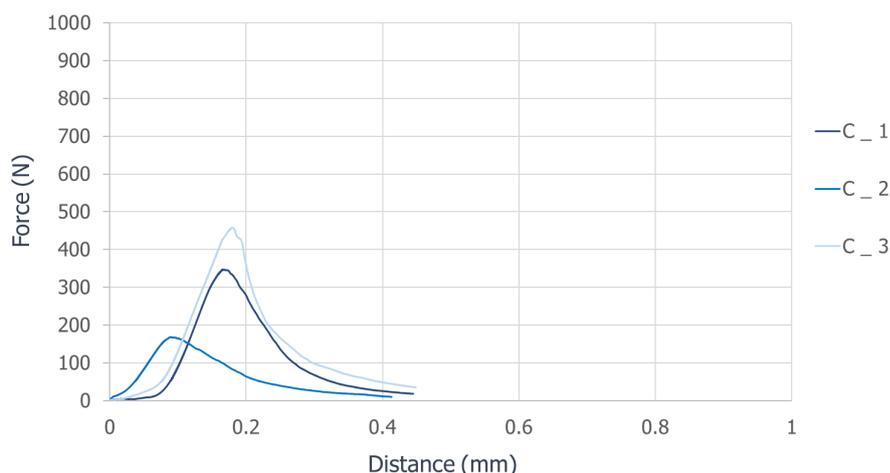
Mot Clé	Chaux NHL5, perlite, sable	Nom Produit	Mortier C
Nom du fichier essai	Test_3P_C.xtak	Nom du fichier méthode	Test_3P_Audrey.xmak
Opérateur	Audrey Regnault	Date du rapport	14.04.2021
Date d'essai	14.04.2021	Mode d'essai	Unidirectionnel
Type d'essai	Flexion 3 points	Vitesse	10N/sec
Forme	Plat	Nb de lots:	1
Qté/Lot:	3		

Nom Paramètres	Max_Force Calc. pour zones entières
Unité	N
C_1	347.646
C_2	168.959
C_3	458.177
Moyenne	324.927
Ecart-type	145.941
Maximum	458.177
Minimum	168.959
Médiane	347.646



Appareil : Shimadzu AG-X plus  
Logiciel : Trapezium X  
vitesse : 10N/sec

Test de flexion en 3 point - Mortier C



Rapport d'analyse 1 : Test de flexion 3 points — Mortier C

## Rapport d'analyse flexion 3 points

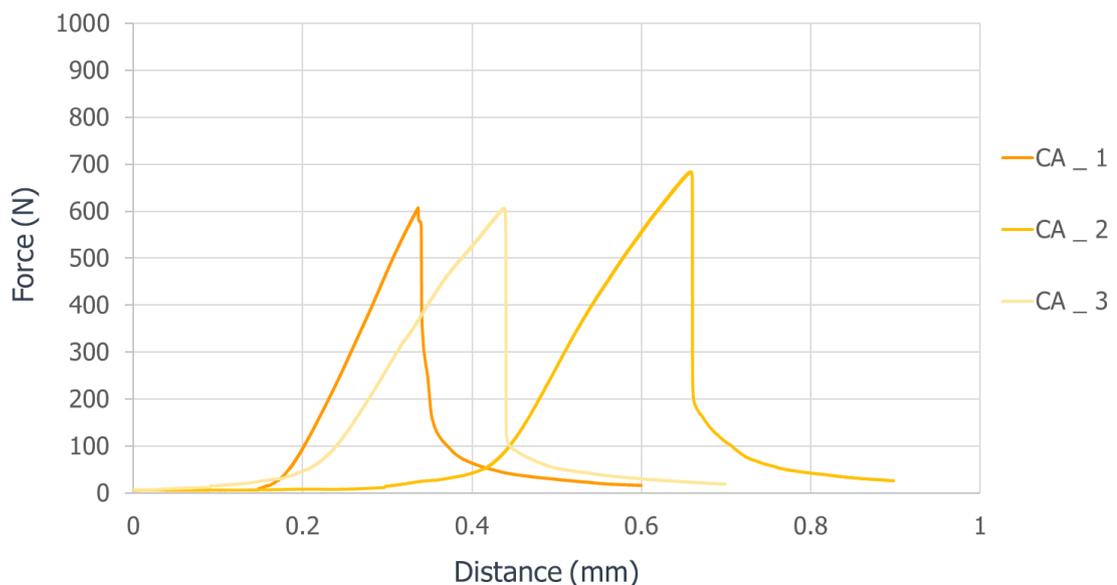
Mot Clé	Chaux NHL5, Acril, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier CA
Nom du fichier essai	Test_3P_CA.xtak	Nom du fichier méthode	Test_3P_Audrey.xmak
Opérateur	Audrey Regnault	Date du rapport	16.04.2021
Date d'essai	16.04.2021	Mode d'essai	Unidirectionnel
Type d'essai	Flexion 3 points	Vitesse	10N/sec
Forme	Plat	Nb de lots:	1
Qté/Lot:	3		

Nom Paramètres	Max_Force Calc. pour zones entières
Unité	N
CA _ 1	607.634
CA _ 2	684.333
CA _ 3	606.910
Moyenne	632.959
Ecart-type	44.4927
Maximum	684.333
Minimum	606.910
Médiane	607.634



Appareil : Shimadzu AG-X plus  
Logiciel : Trapezium X  
vitesse : 10N/sec

### Test de flexion en 3 point - Mortier CA



Rapport d'analyse 2 : Test de Flexion 3 points — Mortier CA

## Rapport d'analyse flexion 3 points

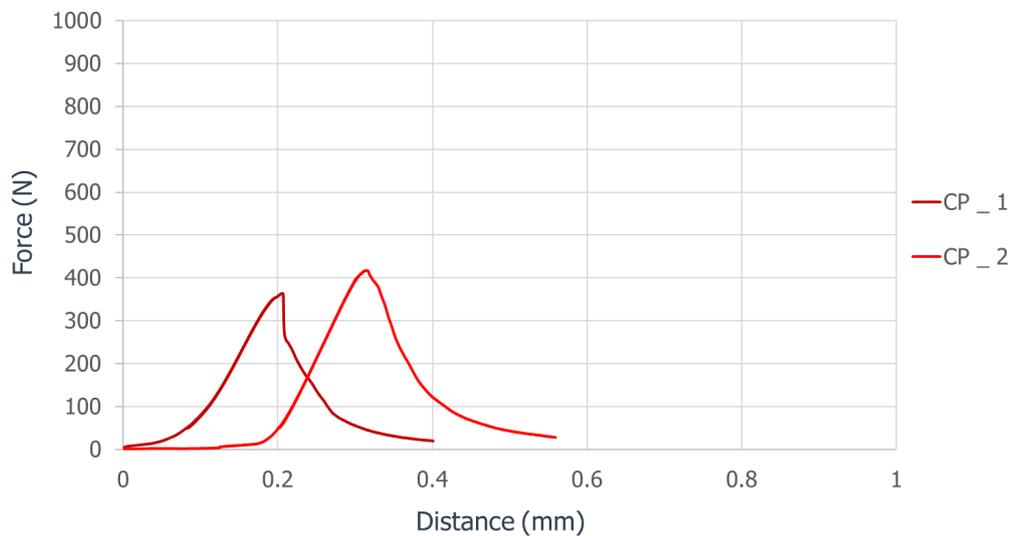
Mot Clé	Chaux NHL5, Peoval, perlite, sable	Nom Produit	Mortier CP
Nom du fichier essai	Test_3P_CP.xtak	Nom du fichier méthode	Test_3P_Audrey.xmak
Opérateur	Audrey Regnault	Date du rapport	22.04.2021
Date d'essai	14.04.2021	Mode d'essai	Unidirectionnel
Type d'essai	Flexion 3 points	Vitesse	10N/sec
Forme	Plat	Nb de lots:	1
Qté/Lot:	3		

Nom Paramètres	Max_Force Calc. pour zones entières
Unité	N
CP _ 1	364.264
CP _ 2	417.805
Moyenne	391.035
Ecart-type	37.8592
Maximum	417.805
Minimum	364.264
Médiane	391.035



Appareil : Shimadzu AG-X plus  
Logiciel : Trapezium X  
vitesse : 10N/sec

### Test de flexion en 3 point - Mortier CP



Rapport d'analyse 3 : Test de flexion 3 points — mortier CP

Commentaire : La courbe CP\_3 a été perdue suite à une erreur de manipulation du logiciel — la valeur max de CP\_3 est de 415 N.

## Rapport d'analyse flexion 3 points

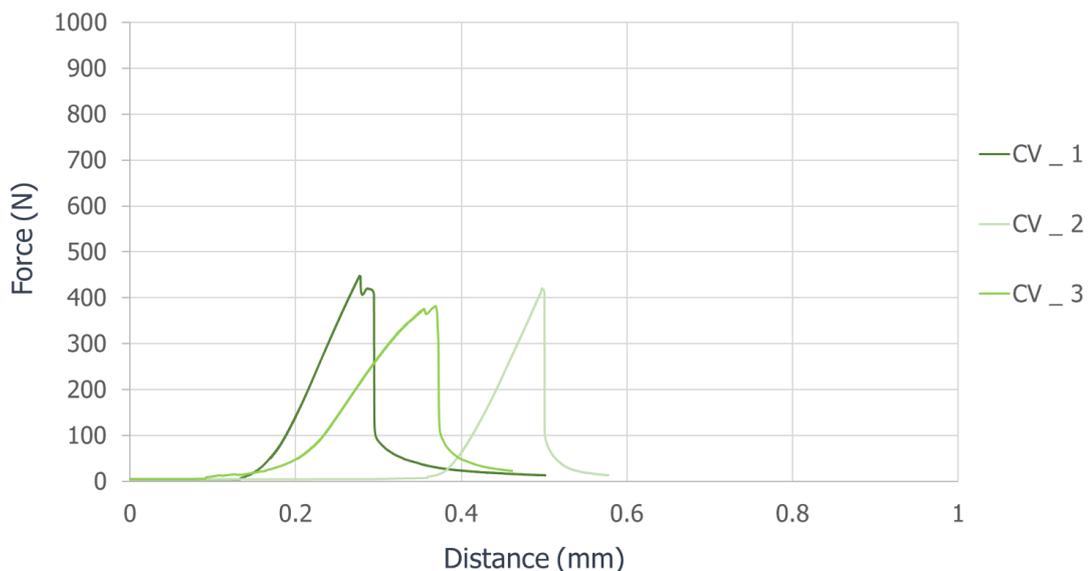
Mot Clé	Chaux NHL5, Vinavil, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier CV
Nom du fichier essai	Test 3P CV.xtak	Nom du fichier méthode	Test 3P Audrey.xmak
Opérateur	Audrey Regnault	Date du rapport	16.04.2021
Date d'essai	16.04.2021	Mode d'essai	Unidirectionnel
Type d'essai	Flexion 3 points	Vitesse	10N/sec
Forme	Plat	Nb de lots:	1
Qté/Lot:	3		

Nom	Max Force
Paramètres	Calc. pour zones entières
Unité	N
CV 1	447.933
CV 2	408.935
CV 3	382.209
Moyenne	413.025
Ecart-type	33.0523
Maximum	447.933
Minimum	382.209
Médiane	408.935



Appareil : Shimadzu AG-X plus  
Logiciel : Trapezium X  
vitesse : 10N/sec

### Test de flexion en 3 point - Mortier CV



Rapport d'analyse 4 : Test de flexion 3 points — Mortier CV

## Rapport d'analyse flexion 3 points

Mot Clé	Vinavil, perlite, sable	Nom Produit	Mortier V
Nom du fichier essai	Test_3P_V.xtak	Nom du fichier méthode	Test_3P_Audrey.xmak
Opérateur	Audrey Regnault	Date du rapport	14.04.2021
Date d'essai	14.04.2021	Mode d'essai	Unidirectionnel
Type d'essai	Flexion 3 points	Vitesse	10N/sec
Forme	Plat	Nb de lots:	1
Qté/Lot:	3		

Nom Paramètres	Max_Force Calc. pour zones entières
Unité	N
V_1	345.953
V_2	392.612
V_3	267.235
Moyenne	335.267
Ecart-type	63.3680
Maximum	392.612
Minimum	267.235
Médiane	345.953

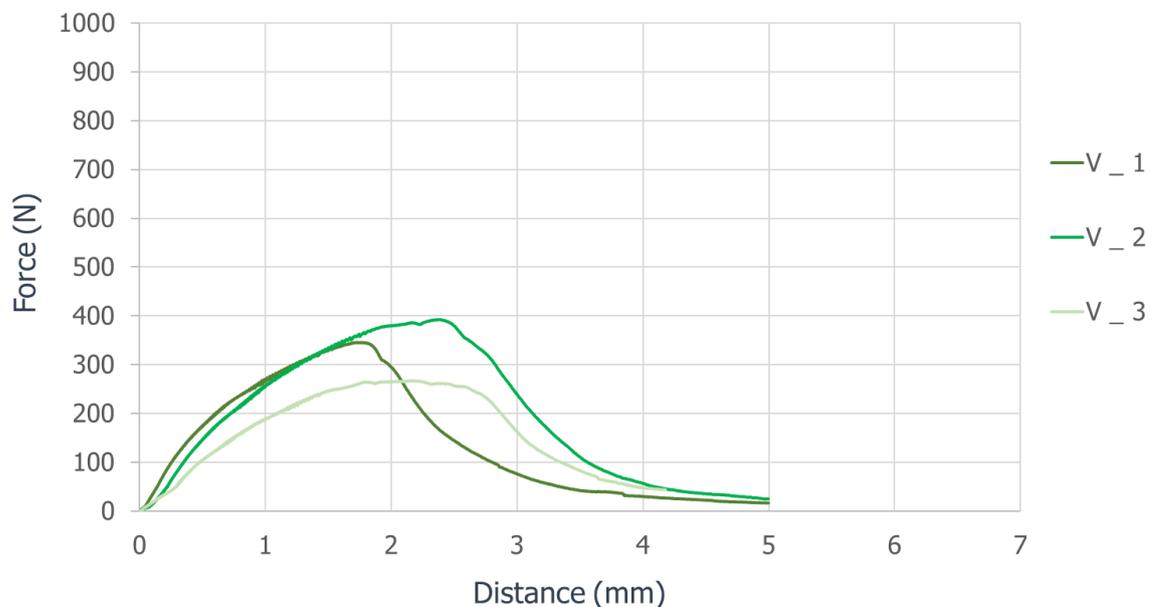


Appareil : Shimadzu AG-X plus

Logiciel : Trapezium X

vitesse : 10N/sec

### Test de flexion en 3 point - Mortier V

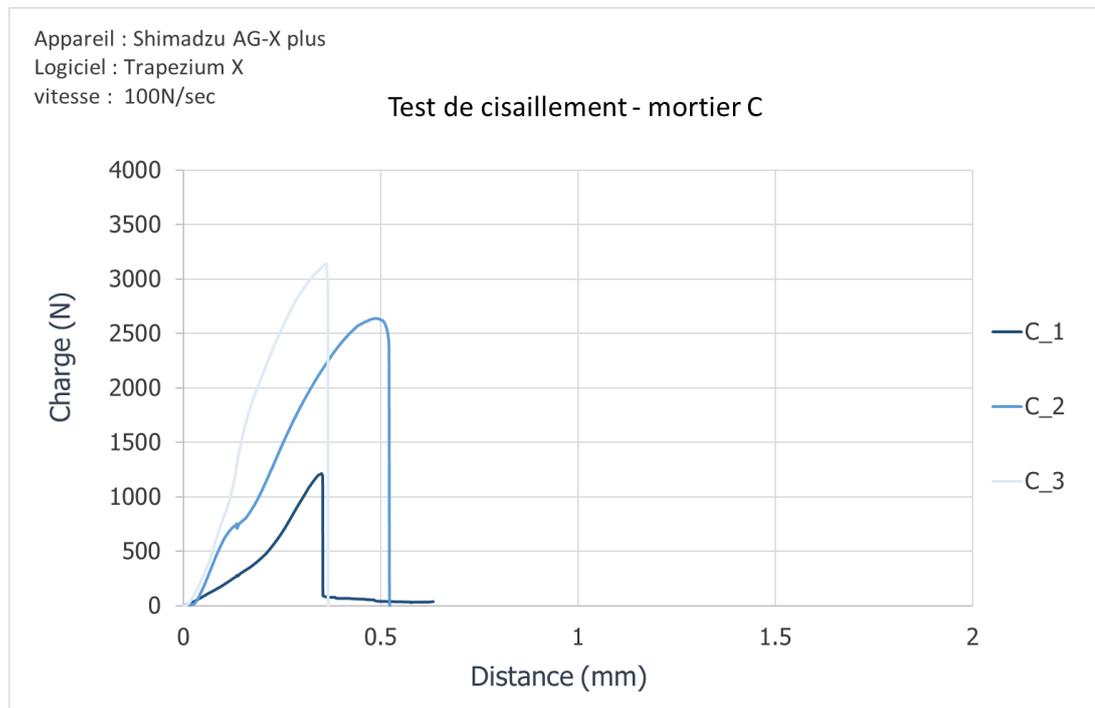
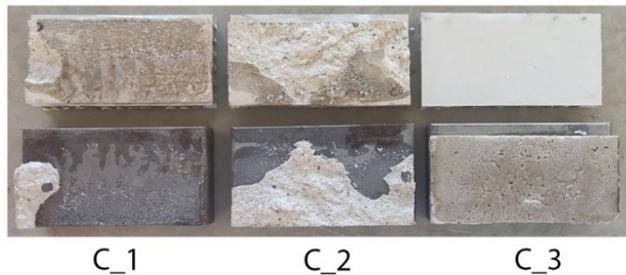


Rapport d'analyse 5 : Test de flexion 3 points — Mortier V

## Rapport - Test de cisaillement

Mot Clé	Chaux NHL5, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier C
Nom du fichier essai		Nom du fichier méthode	compr_AW_150615.xmak
Date du rapport	21.04.2021	Date d'essai	21.04.2021
Mode d'essai	Unidirectionnel	Type d'essai	Compression
Vitesse	100N/sec	Forme	Plat
Nb de lots:	1	Qté/Lot:	3

Nom	Max_Force
Paramètres	Calc. pour zones
Unité	N
C_1	1214.75
C_2	2637.71
C_3	3141.61
Moyenne	2331.35
Ecart-type	999.928



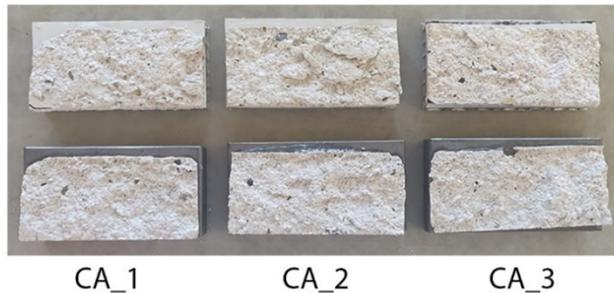
### Rapport d'analyse 6 : Test de cisaillement — Mortier C

Commentaires : Éprouvette C\_1 : collage hétérogène qui a faussé les résultats en provoquant une rupture adhésive à l'interface entre la plaque en acier et l'époxy. Éprouvette C\_2 : RAS. Éprouvette C\_3 : Collage hétérogène et imprégnation des tranches par l'époxy.

## Rapport - Test de cisaillement

Mot Clé	Chaux NHL5, Aciril, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier CA
Nom du fichier essai	Test_Cisaillement_CA.xtak	Nom du fichier méthode	compr_AW_150615.xmak
Date du rapport	21.04.2021	Date d'essai	21.04.2021
Mode d'essai	Unidirectionnel	Type d'essai	Compression
Vitesse	100N/sec	Forme	Plat
Nb de lots:	1	Qté/Lot:	3

Nom	Max_Force
Paramètres	Calc. pour zones
Unité	N
CA_1	2780.89
CA_2	2048.67
CA_3	1989.19
Moyenne	2272.92
Ecart-type	440.922



CA\_1

CA\_2

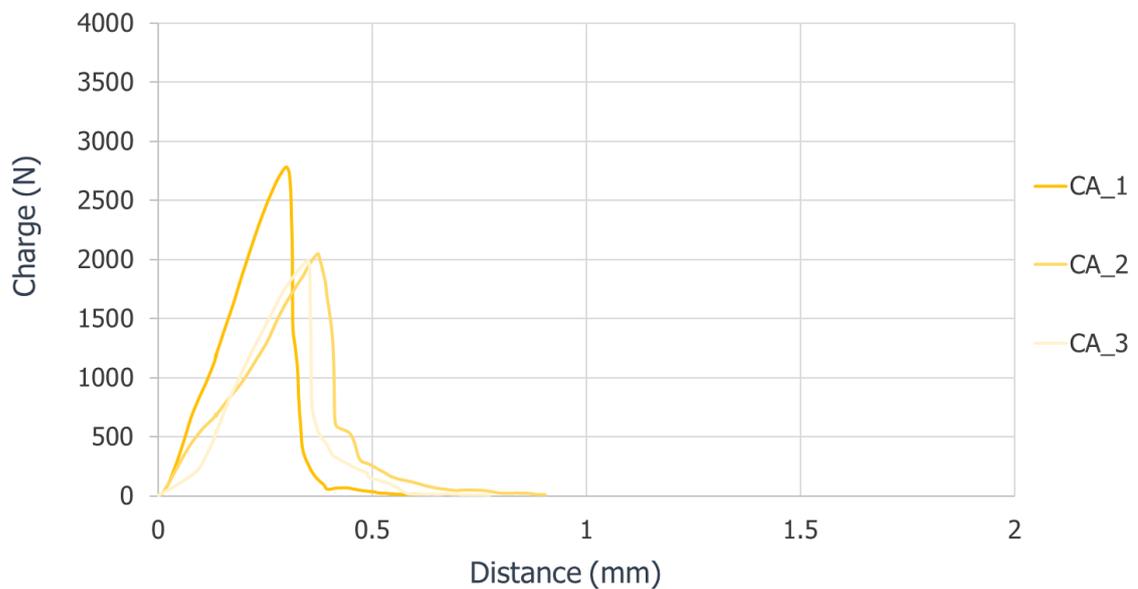
CA\_3

Appareil : Shimadzu AG-X plus

Logiciel : Trapezium X

vitesse : 100N/sec

### Test de cisaillement - mortier CA



Rapport d'analyse 7 : Test de cisaillement — Mortier CA

Commentaires : Résultats homogènes — rien à signaler concernant les éprouvettes — la valeur sélectionnée pour l'étude correspond à la moyenne des trois valeurs maximales.

## Rapport - Test de cisaillement

Mot Clé	Chaux NHL5, Peoval, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier CP
Nom du fichier essai	Test_Cisaillement_CP	Nom du fichier méthode	compr_AW_150615.xmak
Date du rapport	22.04.2021	Date d'essai	22.04.2021
Mode d'essai	Unidirectionnel	Type d'essai	Compression
Vitesse	100N/sec	Forme	Plat
Nb de lots:	1	Qté/Lot:	3

Nom	Max_Force
Paramètres	Calc. pour zones
Unité	N
CP_1	2465.91
CP_2	886.225
CP_3	3475.66
Moyenne	2275.93
Ecart-type	1305.13



CP\_1

CP\_2

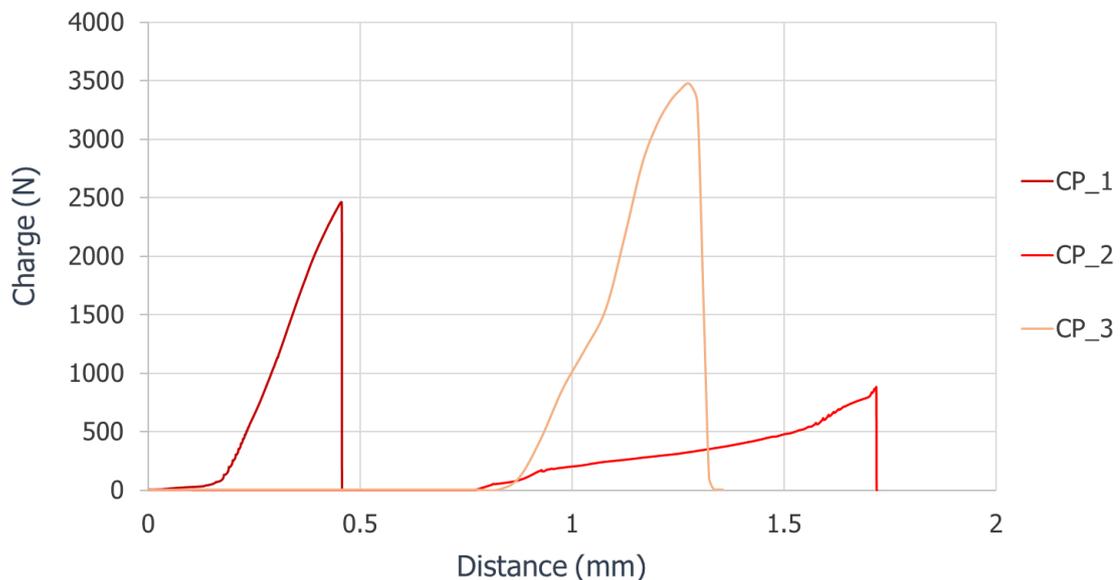
CP\_3

Appareil : Shimadzu AG-X plus

Logiciel : Trapezium X

vitesse : 100N/sec

### Test de cisaillement - mortier CP



#### Rapport d'analyse 8 : Test de cisaillement — Mortier CP

Commentaires : Éprouvette CP\_1 : collage hétérogène et époxy sur les tranches.

Éprouvette CP\_2 : Collage hétérogène. CP\_3 : RAS.

## Rapport - Test de cisaillement

Mot Clé	Chaux NHL5, Vinavil, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier CV
Nom du fichier essai	Test_Cisaillement_CV	Nom du fichier méthode	compr_AW_150615.xmak
Date du rapport	21.04.2021	Date d'essai	21.04.2021
Mode d'essai	Unidirectionnel	Type d'essai	Compression
Vitesse	100N/sec	Forme	Plat
Nb de lots:	1	Qté/Lot:	3

Nom	Max_Force
Paramètres	Calc. pour zones
Unité	N
CV_1	1547.17
CV_2	11551.9
CV_3	env. 700
Moyenne	1349.56
Ecart-type	279.467



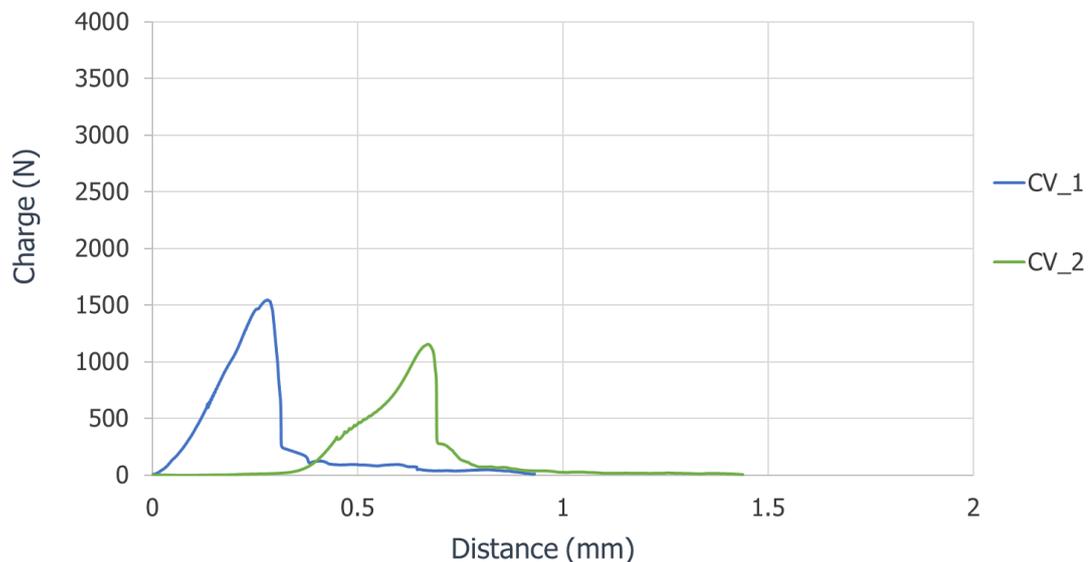
CV\_1

CV\_2

CV\_3

Appareil : Shimadzu AG-X plus  
Logiciel : Trapezium X  
vitesse : 100N/sec

### Test de cisaillement - mortier CV



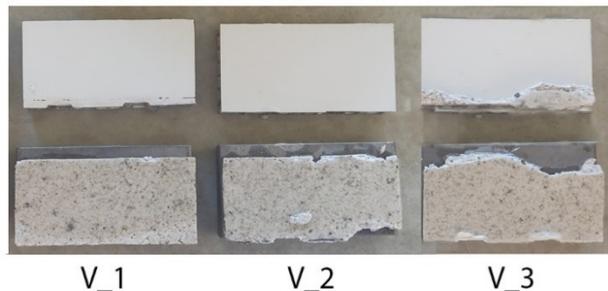
#### Rapport d'analyse 9 : Test de cisaillement — Mortier CV

Commentaires : Éprouvette CV\_1 et CV\_2 : RAS. La moyenne de ces deux essais a été utilisée pour l'étude. La courbe de l'éprouvette C\_3 a été perdue à cause d'une erreur de manipulation, cette éprouvette présentait un collage hétérogène.

## Rapport - Test de cisaillement

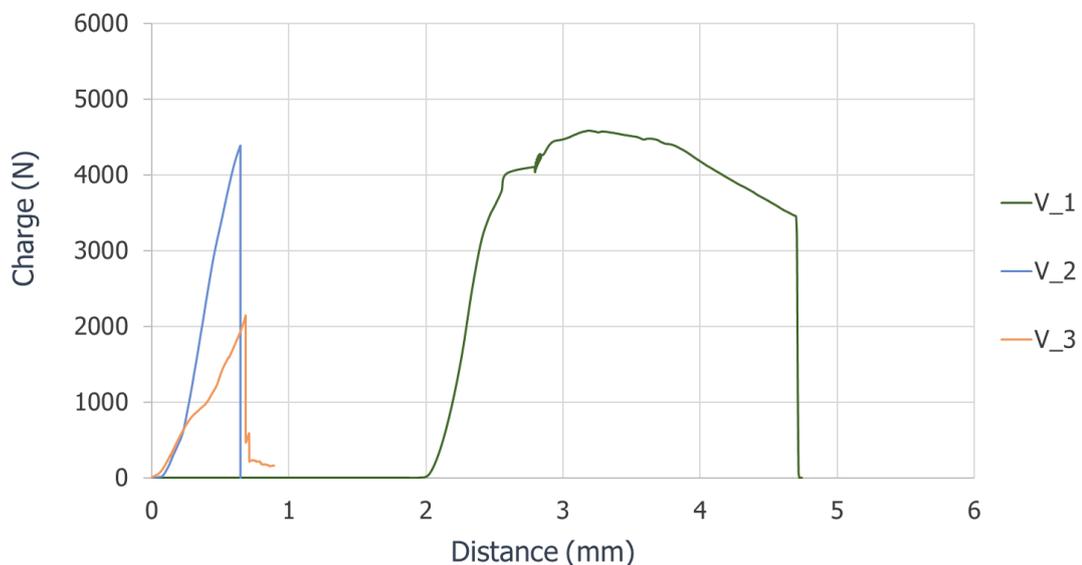
Mot Clé	Vinavil, Perlite, sable	Nom Produit	Mortier V
Nom du fichier essai	Test_Cisaillement_V	Nom du fichier méthode	compr_AW_150615.xmak
Date du rapport	22.04.2021	Date d'essai	22.04.2021
Mode d'essai	Unidirectionnel	Type d'essai	Compression
Vitesse	100N/sec	Forme	Plat
Nb de lots:	1	Qté/Lot:	3

Nom	Max_Force
Paramètres	Calc. pour zones
Unité	N
V_1	4765.45
V_2	4386.69
V_3	2144.21
Moyenne	3765.45
Ecart-type	1416.74



Appareil : Shimadzu AG-X plus  
Logiciel : Trapezium X  
vitesse : 100N/sec

### Test de cisaillement - mortier V



#### Rapport d'analyse 10 : Test de cisaillement — Mortier V

Commentaires : Éprouvette V\_1 : RAS. Éprouvette V\_2 : Rien à signaler concernant le collage, il semblerait que la Vinavil® 59 a une résistance similaire à celle de l'interface entre l'époxy et le support en aluminium. Éprouvette V\_3 : Collage hétérogène et époxy sur les tranches.

## X. Tests de désentoilage

### Sélection des solvants

Les témoignages de Mme Isabelle Skaf, conservatrice à la Direction générale des Antiquités au Liban et de M. Tom Roby, conservateur-restaurateur indépendant à Rome, sur le projet de conservation des mosaïques du site de Beirut présente l'un des seuls exemples de désentoilage de mosaïque réalisé avec un adhésif à base de caoutchouc. Dans ce cas, il s'agissait d'un adhésif de la marque Pattex®. Leur choix de traitement s'est tourné vers un hydrocarbure halogéné : le trichloroéthane<sup>125</sup>. Ce solvant, interdit à la vente depuis 1996 afin de protéger l'environnement<sup>126</sup>, n'a pas été testé dans ce mémoire bien qu'il ait montré des résultats satisfaisants. Trois autres solvants ont été identifiés dans la littérature comme pouvant faire gonfler le caoutchouc : le benzène, la méthyléthylcétone et le mélange éthanol-toluène<sup>127</sup>.

Des alternatives moins toxiques à ces produits ont été recherchées puisque la quantité importante de solvants nécessaires pour le traitement complet de la mosaïque entraîne un risque non négligeable pour la santé du restaurateur. L'acétone peut être utilisé à la place de la méthyléthylcétone, le mésitylène ou le cumène pour remplacer le benzène et le toluène. Parmi les solvants utilisés dans les industries pour évaluer la résistance de leur produit à base de caoutchouc - principalement composé de solvant hautement toxique - nous pouvons retenir l'acétate d'éthyle, l'heptane et le cyclohexane<sup>128</sup>. L'eau chaude et l'éthanol ont aussi été évalué puisque l'adhésif est probablement un mélange de plusieurs polymères et la part comprenant des liaisons polaires pourrait être altérée par ces solvants. L'heptane étant indisponible, l'isooctane a été utilisé pour les tests. Ni le cumène ni le mésitylène n'étant accessible également, le toluène a tout de même été utilisé à la place du benzène car il est légèrement moins toxique.

### Phase 1

Les tests ont été réalisés par immersion dans les différents solvants sélectionnés sur des échantillons d'adhésif prélevés sur la mosaïque avant l'application de la couche d'intervention. Les tests ne donnant pas de résultats positifs dans les premières phases (5, 10, 20 et 60 minutes), les échantillons ont été laissés immergés pendant 4h. Aucun gonflement n'a été observé, en revanche lors de l'immersion tous les échantillons sont devenus translucides. Dans l'acétone, l'acétate d'éthyle et le toluène les échantillons sont presque devenus transparents après quelques minutes d'immersion (cf. Fig. 152 et Fig. 153). Ils sont redevenus jaune-brun après leur séchage, aucun dépôt n'a été observé dans le récipient.

---

<sup>125</sup> Skaf, 2003, p.225.

<sup>126</sup> Palmade, 2010, p.10.

<sup>127</sup> Fenn, 2020 [en ligne].

<sup>128</sup> Nohilé, 2010, p.28.



Fig. 152 : Echantillons d'adhésif avant l'immersion dans les solvants

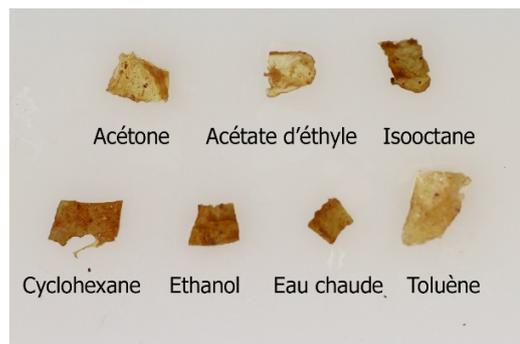


Fig. 153 : Echantillons d'adhésifs quelques secondes après l'immersion dans les solvants

## Phase 2

Une seconde série de tests a été effectuée, cette fois directement sur des tesselles dissociées sur lesquelles se trouvaient des résidus d'adhésifs. Des compresses imbibées d'acétone, d'acétate d'éthyle, d'isooctane, de cyclohexane et de toluène ont été appliqués sur les tesselles puis recouvertes d'un film alimentaire pour ralentir l'évaporation du solvant. Après quelques minutes, les compresses imbibées d'acétone et d'acétate d'éthyle se sont teintées en jaune. Après 20 minutes, la compresse imbibée de toluène s'est aussi légèrement teintée en jaune d'application. Après 30 minutes, les compresses ont été retirées, les résidus d'adhésif à l'origine adhérents à la surface ont pu être pelés sous forme de films à l'aide d'une pince sur les tesselles exposées à l'acétone, l'acétate d'éthyle et le toluène. Une partie de l'adhésif a aussi pu être retiré grâce à l'isooctane, une application plus longue aurait probablement permis de retirer la totalité de l'adhésif. Le toluène et l'isooctane ne seront pas proposés pour le traitement de la mosaïque car ils sont moins efficaces et plus toxiques.

Parallèlement des essais à l'aide de chaleurs (spatule chauffante, décapeur thermique) alterné avec une imprégnation d'acétone ont été réalisés sur le seul échantillon sur lequel se trouvaient à la fois l'adhésif et le textile. Ces méthodes avaient été conseillées par plusieurs conservateurs-restaurateurs, une méthode généralement efficace sur les adhésifs peu réversible<sup>129</sup>. Ces tests n'ont pas donné de résultats positifs. Un second essai a été réalisé avec une compresse d'acétone recouverte d'un film alimentaire. Après 30 min d'application, les compresses ne se sont pas teintées mais l'entoilage a tout de même pu être aisément pelé avec une pince.



Fig. 155 : Tesselles avant traitement

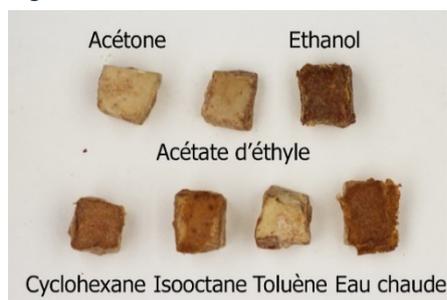


Fig. 154 : Tesselles après traitement

<sup>129</sup> Mme Chantriaux Evelyne, conservatrice-restauratrice et Mme De Corneillan Hortense, conservatrice-restauratrice.

## XI. Protocole de conservation-restauration

### Protocole de conservation - restauration

#### Dépoussiérage

- Utiliser un aspirateur et pinceau doux pour aspirer les dépôts non adhérents et les billes de verres expansées.
- Protéger l'embout de l'aspirateur avec un textile à tissage lâche afin de prévenir l'aspiration des tesselles peu adhérente.

#### Consolidation

- Appliquer l'adhésif sélectionné seulement sur l'arrière des tesselles et non sur le mortier pour limiter l'imperméabilisation de la surface.
- Appliquer des poids sur les surfaces collées pour assurer le contact entre les tesselles et le mortier.

#### Désentoilage

- Placer la mosaïque sous vapeur saturante d'acétone. Utiliser des récipients peu épais mais de grande surface pour faciliter l'évaporation dans l'enceinte. Couvrir la mosaïque d'une bâche, imperméabiliser les bords à l'aide de rubans adhésifs.
- Retirer progressivement la bâche en parallèle du désentoilage. La bâche peut être collée à la surface de l'entoilage avec du ruban adhésif.
- Utiliser des compresses de ouate imbibée d'acétate d'éthyle couvert de film alimentaire sur les zones plus difficiles à désentailer.
- Peler les films d'adhésif restant sur les tesselles à l'aide d'une pince.
- Nettoyer les tesselles avec un bâtonnet ouaté imbibé d'acétate d'éthyle.

Si des tesselles ne sont pas solidaires au mortier :

- Placer une grille rigide sur la surface de tessellatum pour maintenir les tesselles en place lors de l'utilisation d'un aspirateur pour retirer les billes de verres expansées.
- Coller les tesselles avec l'adhésif sélectionné.
- Une fois l'adhésif sec, nettoyer les tesselles avec un bâtonnet ouaté imbibé d'acétate d'éthyle.

Pendant le séchage des zones collées, l'étape de désentoilage peut être poursuivie sur un autre pan de la mosaïque.

**Utiliser un équipement de protection adapté : gants, lunettes, masque à solvant, blouse**

### Rejointoiement

- Protéger le sol et les surfaces de travail à l'aide de bâche en plastique.
- Préparer une zone pour la réalisation du mortier, cette étape amène de la poussière.
- Peser/mesurer tous les ingrédients nécessaires à l'avance selon les proportions suivantes.

	Chaux NHL5	Metaver®	Quartz K-4	Ocre	Fluidifiant	Eau
Part	0.5	0.5	1	-	0.01	1.56
Masse pour 100 ml	50 g	50 g	120 g	60 g	105 g	100 g
Option 1 (0.00%)*	77 g	77 g	370 g	-	3.1 g	245 g
Option 2 (0.12%)			359.8 g	0.95 g		
Option 3 (0.25%)			338.3 g	1.9 g		
Option 4 (0.50%)			334.4 g	3.8 g		
Option 5 (1.00%)			326.9 g	7.6 g		

\*Proportion à respecter pour un volume d'environ 1L

- Pour la préparation du mortier prévoir un récipient et mélangeur à hélice hélicoïdale, suivre le protocole suivant :
  1. Introduire l'eau dans le récipient ;
  2. Ajouter le fluidifiant (Sikament® 12-s) ;
  3. Commencer à mélanger à faible vitesse ;
  4. Ajouter progressivement la chaux – mélangé pendant au moins 1 minute ;
  5. Ajouter progressivement le Métakaolin – mélangé pendant au moins 1 minute ;
  6. Malaxer à grande vitesse pendant 1 minute ;
  7. Ajouter progressivement le quartz ;
  8. Malaxer à grande vitesse pendant 5 minutes ;
  9. Malaxer à vitesse moyenne durant au moins 5 minutes ;
  10. Appliquer le mortier – s'il est appliqué en plusieurs fois, mélanger régulièrement le mortier dans le récipient pour qu'il ne décante pas.
- Retirer le surplus de mortier avec une éponge, le procéder doit être répété jusqu'à ce que la surface des tesselles soit propre.
- Couvrir la mosaïque avec une bâche pendant 10 jours ou plus – laisser sécher pendant au moins 1 mois.

Cette intervention doit être réalisée par au moins 2 personnes équipées de protections adaptées : lunettes, gants, vêtement de travail, masque à poussière.

### Mise en place du support finale

Préparation de la surface

- Protéger la surface du *tessellatum* avec un film de mousse.

- Remettre en place le support en bois.
- Retourner la mosaïque (5-6 personnes).
- Retirer le support en bois.
- Retirer la semelle d'époxy temporaire en soulevant la bâche – prévoir un scalpel ou cutter dans le cas où l'époxy aurait débordé sur le coffrage.
- Poncer la surface du mortier pour assurer qu'il n'y ait pas de résidu du coulis de chaux - utilisé pour combler les aspérités - qui viennent entraver l'accroche de l'époxy au mortier.
- Dépoussiérer la surface avec un aspirateur.
- Protéger le coffrage avec du film alimentaire et imperméabiliser les jointures avec de la Plastiline®.

#### Préparation du support

- Parallèlement, percer le panneau en nid d'abeille avec une perceuse équipée d'une scie cloche, ne pas oublier de percer dans les coins du panneau pour permettre à l'air de s'échapper lors de l'expansion de la mousse.
- Positionner le panneau en nid d'abeille sur le mortier en laissant l'épaisseur souhaitée – le panneau peut être fixé au coffrage ou poser sur des cales inertes placées sur le mortier. Prévoir des tasseaux ou des barres métalliques et des serre-joints pour maintenir en place le panneau lors de l'expansion de la mousse.

#### Application de l'époxy

- Peser les deux composants dans des récipients séparés en fonction du volume prévu.
- Proportion : 36 g de durcisseur DM 02 pour 100 g de PB250
- Ajouter rapidement mais délicatement le durcisseur dans l'époxy, mélanger pendant 1-2 minutes avec une perceuse équipée d'un mélangeur à hélices hélicoïdales.
- Verser l'époxy à travers les trous d'évent percés dans le panneau, répartir la coulée dans plusieurs trous – l'époxy doit être appliqué rapidement puis que le temps de travail maximum est de 4 minutes.
- Ne plus toucher pendant au moins 24h – la mousse s'expande en 30 minutes mais polymérise en 24 à 48h. Le surplus peut être enlevé avec un burin après polymérisation ou avec une spatule 1 heure après la coulée de l'époxy.

**Cette intervention doit être réalisée par 2 personnes minimum au vu du temps de travail très court avant le début de l'expansion de la mousse.**

Le protocole de mise en place du cadre en aluminium dépend du système d'accroche sélectionné, si une accroche mécanique est choisie, il sera nécessaire de préparer le système avant le collage sur la mosaïque pour éviter les problèmes de vibration.

## XII. Fiches techniques

### XII.1 Granulats

#### Perlite



Isoself®

Nicht tragende Dämmstoffschüttung aus Perlit

#### Produktbeschreibung

Isoself® Dämmstoffschüttung besteht aus expandiertem Perlit, dem leichten, widerstandsfähigen und umweltgerechten Granulat mit hervorragenden Dämmeigenschaften zur effektiven Wärme- und Schalldämmung für Fußböden und Hohlräume bei Alt- und Neubauten.

#### Lagerung

Trocken auf Paletten lagern, Haltbarkeit unbegrenzt

#### Qualität

In Übereinstimmung mit der EN 14316-1 unterliegt das Produkt einer Erstprüfung sowie der ständigen werkseigenen Produktionskontrolle und trägt eine CE-Kennzeichnung.

#### Eigenschaften und Mehrwert

- Hervorragende Wärmedämmung
- Sehr leicht und diffusionsoffen
- Nicht brennbar
- Staubgebunden

#### Technische Daten

Bezeichnung	Norm	Einheit	Isoself®
Körnung	–	mm	0 – 6
Schüttdichte $\rho_s$ im unverdichteten Zustand	–	kg/m <sup>3</sup>	ca. 90
Flächengewicht (eingebaut)	–	kg/m <sup>2</sup> je cm	ca. 0,9
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R$	–	W/(m·K)	0,052
Nennwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_n$	–	W/(m·K)	0,050
Baustoffklasse	–	–	Nicht brennbar
Brandverhalten	DIN EN 14316-1	–	A1
Temperaturbeständigkeit	–	°C	bis 800
Schmelzpunkt	–	°C	ca. 1400
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$	–	–	3
Anwendungsgebiet	DIN EN 14316-1	–	DI, DZ

#### Materialbedarf und Verbrauch

Material	Verbrauch je m <sup>2</sup> und 1 cm Einbaudicke
Isoself® für Dachböden, Lagerhölzer	ca 10 l je nach Verdichtung
Isoself® für Dachschrägen, Hohlräume, Schächte	ca 11 l je nach Verdichtung

#### Lieferprogramm

Bezeichnung	Ausführung	Verpackungseinheit	Artikelnummer	EAN
Isoself®	100 l Sack	24 Sack/Palette	0008663	4003352121306

#### Nachhaltigkeit und Umwelt

Kurzbeschreibung	Einheit	Wert
Zertifikat	–	eco-INSTITUTE

## Poraver®



## TECHNICAL DATA SHEET

Lightweight aggregate according to DIN EN 13055-1

Product name	GRAIN SIZES				
	Poraver® 0.1-0.3	Poraver® 0.25-0.5	Poraver® 0.5-1	Poraver® 1-2	Poraver® 2-4
Granular size in mm	0.1-0.3	0.25-0.5	0.5-1	1-2	2-4
Bulk density in kg/m <sup>3</sup>	400 ± 60	340 ± 30	270 ± 30	230 ± 30	190 ± 20
Particle density in kg/m <sup>3</sup>	950 <sup>21</sup> ± 150	700 <sup>21</sup> ± 80	500 <sup>21</sup> ± 80	400 <sup>23</sup> ± 60	320 <sup>23</sup> ± 40
Crushing resistance in N/mm <sup>2</sup> according to DIN EN 13055-1 <sup>24</sup>	≥ 4.5	≥ 2.6	≥ 2.0	≥ 1.6	≥ 1.4
Oversize % by mass	≤ 10				
Undersize % by mass	≤ 15				
pH value	8 - 12				
Moisture content % by mass	≤ 0.5				
Water absorption % by volume 5 min. <sup>40</sup>	33	15	9	7	4.5
Water absorption % by mass 5 min. <sup>41</sup>	35	21	18	19	14
Softening point	approx. 700 °C				
Colour	creamy white				
Thermal conductivity W/(m·K)	-	-	-	-	0.07 <sup>25</sup>
CE according DIN EN 13055-1	*	*	*	*	*
Approval Z-3.42-1894	*	*	*	*	*
Approval Z-23.11-114	-	-	-	-	*

<sup>41</sup> Test according to DIN V 18004, calculation of apparent

(relative) density please see method DIN EN 1097-6

<sup>21</sup> Apparent (relative) density according to EN 1097-6<sup>23</sup> Values according to DIN V 18004 on request<sup>24</sup> Approximate values due to possible measurement tolerances<sup>25</sup> Calculated values DfBt according to Approval Z-23.11-114 (Thermal insulating material, non combustible according to construction material class DIN 4102-A1)

The strength grades may vary within the tolerance range of bulk densities. The availability and delivery conditions for special grain sizes will be agreed on an individual basis.

## CHEMICAL ANALYSIS

Constituent	Applied to the sample dried at 105°C	Analysis method
SiO <sub>2</sub>	70 - 75 %	DIN EN ISO 12677 measured with XRF
Na <sub>2</sub> O	10 - 15 %	
CaO	7 - 11 %	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 5 %	
MgO	0 - 5 %	
K <sub>2</sub> O	0 - 4 %	
Loss on Ignition	< 0.1 %	

Dennert Poraver GmbH  
Mozartweg 1  
96132 Schlüsselfeld/Germany  
☎ +49 (0) 9552 929 77-0  
☎ +49 (0) 9552 929 77-26  
✉ info@poraver.de  
www.poraver.com

## Farine de quartz

FICHE PRODUIT



Carlo Bernasconi SA

# Farine de Quartz K - 4

## Description du produit

La Farine de Quartz naturelle possède un niveau supérieur à 97 % d'oxyde de silice. Sa grande blancheur en fait un support de couleur idéal.

## Informations complémentaires

Granulométrie en m	97% < 0.160
Forme du grain	Moulu
Emballage	Sac en papier de 25 kg
Lieu du dépôt	Bärschwil, Berne, Zurich
Etat	Séché au four

## Données Techniques

Dureté selon Moh	7
Densité en vrac en kg/m <sup>3</sup>	1'100

## Références Chimiques

SiO <sub>2</sub>	98.30 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.80 %
K <sub>2</sub> O	0.40 %
Perte par calcination	0.30 %
CaO MgO	0.10 %
TiO <sub>2</sub>	0.06 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04 %
Na <sub>2</sub> O	0.01 %

## XII.2 Chaux – métakaolin - fluidifiant

Chaux hydraulique NHL5

ZEMENT-UND KALKWERKE

# OTTERBEIN



WIR BRINGEN STEINE  
ZUM LEBEN

## Technical Data Sheet

---

### Hydradur<sup>®</sup>

Natural Hydraulic Lime EN 459-1 NHL 5

**Mixing ratios for standard mortars in partitions**

Mortar group	Masonry mortar	Sand
I	Hydradur <sup>®</sup>	4.5
II		3
P II a	Plaster	3 to 4

**Composition**

Hydradur<sup>®</sup> is a natural hydraulic lime compliant with EN 459-1. It is manufactured by means of burning and slaking specially selected shell limestone. The hardness of Hydradur<sup>®</sup> is developed through carbonization and hydraulic hardening. Hydradur<sup>®</sup> is cement-free!

**Properties**

- traditional, cement- and gypsum-free, natural hydraulic binder
- sulphate-resistant
- low cracking sensitivity while setting
- very good post-hardening
- no application of damaging salts to the masonry
- high degree of plasticity and water retention value in the produced mortar
- very good edge adhesion on stone
- low modulus of elasticity

**Application**

To produce plaster and masonry mortar especially in building and residential construction where ecological and human health issues are relevant, as well as in renovation and historic conservation work.

**Delivery**

in 25-kg  
bags in big  
bags  
in silo vehicles

**Storage**

Dry, as much as possible on wooden gratings and protected from draft. Do not store for longer than 3 months.

**Technical Data**

Compression strength (according to EN 459-2): 28 days approx. 6.5 N/mm<sup>2</sup>  
6 months approx. 11.0 N/mm<sup>2</sup>  
12 months approx. 14.0 N/mm<sup>2</sup>  
Bulk density approx. 0.55 kg/dm<sup>3</sup>  
Free CaO approx. 30%  
SO<sub>3</sub> approx. 0.5%

**Safety indications**

Hydradur<sup>®</sup> reacts to strongly alkaline water. For this reason:  
Avoid contact with skin and eyes. In case of skin contact, rinse with plenty of water. In case of eye contact, seek medical attention.

**Quality monitoring**

Hydradur<sup>®</sup> undergoes continuous in-house monitoring in our factory laboratory and at a recognised testing institute to check its composition and properties. This ensures that product quality remains constant. Hydradur<sup>®</sup> bears the "Building Lime" quality mark and is certified to EN 459-1.

## Metaver®



## Product information

---

### Metaver® I

**Thermal treated pure kaolin (metakaolin)  
pozzolanic hardening admixture for cementitious building materials**

### Description

Metaver® I is produced by calcination of concentrated kaolin and is a reddish, mostly amorphous alum silicate reacting with Portlandite (calcium hydroxide) to build cementitious CSH-phases.

### Chemical composition (M.-%, approx.)

SiO <sub>2</sub>	51 - 56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 - 44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2,0
K <sub>2</sub> O	< 2,0

### Physical characteristics

Specific density	2,6 g/cm <sup>3</sup>
Particle size distribution	d <sub>50</sub> <5 µm d <sub>90</sub> <12 µm
Colour	reddish
Brightness R <sub>457</sub>	> 60
Bulk density	340 - 420 kg/m <sup>3</sup>

### Function

Metaver® I is mostly composed of the mineral Kaolinite – a layered silicate mineral with a distance of 7,2 Å between the layers. Between the layers of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in proportions of 1:2 water is imbedded in the layers that can be evaporated through heat treatment by calcination. The kaolin is then activated.

Portland cement develops ca. 25 % calcium hydroxide (free lime) in its hydration. This alkaline by-product is very soluble and is primarily attacked and dissolved in the presence of acids or sulphates.

Metaver® I special feature is its capacity to bind large amount of free lime in the form of stable CSH-phases. Speed and amount of this reaction may be controlled through chemical and construction adequate methods

In relation to its reactivity Metaver® I can be qualified as „medium“. Together with lime and water the setting will occur in about 12 hours (method Newchem).



### Application

Metaver® I is a pozzolanic mineral additive that may improve many performances of hydraulic cementitious mortars, concrete and analogous products.

Metaver® I is easily mixed in and gives a soft plastic consistence that is easy to work. Through its particle size distribution, no big increase in water demand is given.

Metaver® I has shown its advantages in applications where strength, density and resistance are requested.

In the following applications Metaver® I has been shown to be very useful:

Plasticity	shotcrete, repair mortars, coatings
Stability	self-compacting concrete and mortars, self-levelling compounds
Strength	renders based on lime and cement
Lime binding	tile adhesive, coating of water pipes and reservoirs
Resistance	coatings of waste water or see water constructions
Pigmentation	better dispersion in precast or visible concrete
Efflorescence	roofing tiles, facade precast
Durability	improved alkali silicate reaction

### Dosage

5 to 15 % replacement of cement by weight.

### Stability

unlimited in dry conditions.

### Storage

in protected and dry rooms.

### Packaging

in big bags of 1000 kg or bulk

The data quoted are determined by standard test methods. As they are based on naturally occurring raw materials that may change with time, we reserve the right to adapt the data if necessary.

The above information and recommendations are based upon our experience and are offered merely for advice. They do not absolve the consumer from making his own tests. Responsibility for damage arising from the use of our products cannot be derived from the recommendations given. The observance of any intellectual property rights of third parties is the responsibility of the consumer in each case.

MDS Metaver | 2019

## Sikament® 12-S



## FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

# Sikament®-12 S

Superplastifiant (FM)



### DESCRIPTION DU PRODUIT

Superplastifiant selon EN 934-2 à base de PCE et de lignosulfonates pour la fabrication de béton en hiver et en saison transitoire.

### EMPLOI

- Béton en hiver et en saison transitoire
- Convient particulièrement pour le béton avec des granulats contenant des impuretés (argile)
- Convient pour les injections à base de ciment
- Convient pour le béton pompé
- Convient pour le béton apparent
- Convient pour le béton dans les coffrages glissants
- Convient pour le béton avec réduction d'eau élevée
- Convient pour le béton étanche à l'eau (cuve blanche)

### AVANTAGES

- Forte réduction d'eau
- Bonnes propriétés rhéologiques

### INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

<b>Base chimique</b>	Polycarboxylate modifié avec lignosulfonates en phase aqueuse
<b>Conditionnement</b>	Emballage perdu (fût): 220 kg Conteneur plastique échangeable: 1000 kg (propriété Sika Schweiz AG)
<b>Aspect/Couleurs</b>	Brun foncé Homogène
<b>Conservation</b>	En emballage d'origine non entamé: 12 mois à partir de la date de production
<b>Conditions de stockage</b>	Stocker à des températures entre +5 °C et +35 °C. Protéger de l'influence directe des rayons du soleil et du gel. Pour l'entreposage, utiliser des réservoirs propres. Ceux-ci doivent être

- Particulièrement robuste contre les impuretés dans le béton
- Effet retardateur réduit
- Etanchéités et résistances élevées
- Comportement au retrait et au fluage amélioré
- Ralentissement de la carbonatation du béton
- Durabilité améliorée
- Ne contient ni chlorures ni autres substances susceptibles de provoquer ou de favoriser la corrosion de l'acier
- Inoffensif pour les constructions en béton armé et précontraint
- Ouvrabilité et évolution des résistances d'injections à base de ciment améliorées

### CERTIFICATS

Déclaration de performance (DoP) no 021301011000004521002: Marquage CE selon les exigences de la norme EN 934-2:2009+A1:2012 par les surveillants externes certifiés 2116

nettoyés et désinfectés au moins une fois par année.  
Si le produit Sikament®-12 S est gelé, celui-ci peut être réutilisé après avoir été lentement dégelé à température ambiante et après un malaxage intensif.

Densité	~ 1.07 kg/l	(Densité relative à +20 °C)
Valeur pH	~ 9.0	
Teneur usuelle en corps solides	~ 21.5 M.-%	
Teneur totale en ions de chlorure	≤ 0.10 M.-%	
Equivalent Na2O	≤ 3.0 M.-%	

### INFORMATIONS TECHNIQUES

**Directive pour le bétonnage** Pour assurer une mise en œuvre et un traitement de cure optimal du béton, il faut prendre les mesures nécessaires selon SIA 262.

### INFORMATIONS SUR L'APPLICATION

<b>Dosage recommandé</b>	0.6 - 1.8 % Le dosage se rapporte au poids du ciment.
<b>Compatibilité</b>	Sikament®-12 S <b>ne doit jamais</b> être combiné avec les produits à base de mélamine et/ou naphthaline. Des essais préliminaires sont indispensables.
<b>Mélange</b>	Sikament®-12 S peut être ajouté dans l'eau de gâchage ou dans le malaxeur en même temps que l'eau. Idéalement, le dosage se fait après 50 - 80 % de la plus grande partie de l'eau de gâchage. Ne jamais ajouter Sikament®-12 S dans le mélange sec. Pour profiter de façon optimale de la forte capacité de réduction d'eau, nous recommandons un malaxage mouillé soigneux pendant 60 secondes au minimum. Pour éviter un excès d'eau dans le béton, il faut veiller en plus à ne pas procéder au dosage fin de l'eau avant 40 secondes.

### VALEURS MESURÉES

Toutes les données techniques indiquées sur cette fiche produit se fondent sur des tests de laboratoire. Les données réelles mesurées peuvent être différentes pour des raisons indépendantes de notre volonté.

### RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter qu'en raison d'une réglementation locale spécifique, les données déclarées pour ce produit peuvent différer d'un pays à l'autre. Veuillez vous reporter à la fiche produit locale pour obtenir des informations exactes sur le produit.

### ÉCOLOGIE, PROTECTION DE LA SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL

L'utilisateur doit lire les dernières fiches de données de sécurité (FDS) avant d'utiliser les produits. La FDS contient des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination sûrs des produits chimiques, ainsi que des données physiques, environnementales, toxicologiques et autres relatives à la sécurité.

Fiche technique du produit  
Sikament®-12 S  
Novembre 2017, Version 02.01  
021301011000000452

BUILDING TRUST



Chaux CL90**KFN** Fiche technique**nekapur® 2**

<b>Désignation</b>	<b>nekapur® 2</b> Hydroxyde de calcium, Ca(OH) <sub>2</sub> (E 526) Chaux éteinte  Date limite de conservation 12 mois A conserver au sec  Adapté à la fabrication de denrées alimentaires et à l'épuration d'eau potable	
<b>Producteur</b>	<b>Kalkfabrik Netstal AG, CH-8754 Netstal/Suisse</b> Tél. +41 55 848 91 11/Fax +41 55 848 92 88/Internet: <a href="http://www.kfn.ch">www.kfn.ch</a> Renseignements: Marketing und Vertrieb/Tél. +41 55 848 92 19 E-Mail: <a href="mailto:info@kfn.ch">info@kfn.ch</a>	
<b>Analyse chimique</b>	Ca(OH) <sub>2</sub> CaO <sub>total</sub> MgO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>  Perte au feu H <sub>2</sub> O <sub>libre</sub> H <sub>2</sub> O <sub>liée</sub> CO <sub>2</sub>	97.1 % 74.9 % 0.4 % 0.02 % 0.01 % 0.05 % 0.02 %  25.0 % 0.4 % 24.0 % 1.0 %
<b>Données physiques</b>	Densité apparente (EN 459-2)  Analyse au tamis (EN 459-2) résidus Tamis 0.20 mm Tamis 0.09 mm  Blancheur (Spectro Color, R <sub>y</sub> )	0.5 g/cm <sup>3</sup>   0.0 % 1.6 %  98.6 %
<b>Formes de livraison</b>	<b>nekapur® 2</b> <b>nekapur® 2</b> <b>nekapur® 2</b>	en vrac en sacs de 25 kg en Big Bag de 800 et 1000 kg
<b>Remarques</b>	<b>nekapur® 2</b> correspond aux normes EN 459-1 CL 90-S. Pour une manipulation sûre de ce produit, veuillez vous en remettre à la fiche de sécurité. Les données de la fiche technique, obtenues après maints contrôles, sont des moyennes sans valeur juridique.	



## XII.3 Résines

Acril® 33

## ACRIL 33

### ÉMULSION ACRYLIQUE A 100%

#### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Résine de base:	copolymère acrylique
Aspect:	liquide blanc laiteux
Odeur:	Légèrement ammoniacquée
Matière sèche :	45-47%
Viscosité à 20°C.:	2500 - 5000 mPa.s
pH:	9-10
Diamètre moyen des particules:	0,15 microns
Température transition vitreuse :	6-8°C
Température minimum de formation du film (mft):	6°C

#### DESCRIPTION

Dispersion aqueuse de résine acrylique pure 100% avec des caractéristiques excellentes de résistance et de stabilité, pour intérieurs ou pour extérieurs.

**ACRIL 33** est distribué par C.T.S. S.r.l. en alternative au Primal AC.-33 de Rohm and Haas, selon une formulation chimique analogue.

La formulation d'**ACRIL 33** est caractérisée par une résistance excellente aux alcalis et s'avère donc particulièrement indiquée en combinaison avec des liants hydrauliques (chaux hydratée et/ou hydraulique, ciment, plâtre).

#### SECTEURS D'EMPLOI

**ACRIL 33** peut être utilisé dans tous les secteurs de la restauration conservatrice avec d'excellents résultats ;

Utilisations les plus courantes :

- additif pour mortier d'injection, rebouchages, intégrations, etc.;
- liant pour glacis et crépissage ;
- liant pour pigments naturels et synthétiques;
- consolidant et fixatif des couches picturales;
- adhésif pour documents papier.

#### PROPRIÉTÉ - CARACTÉRISTIQUES

- excellente stabilité au gel - dégel;
- grande compatibilité avec pigments et charges;
- excellente résistance aux sels solubles;
- bonne stabilité du pH;
- bonne stabilité mécanique.

#### PROPRIÉTÉ DES FILMS D'ACRIL 33

- résistance élevée au jaunissement et aux rayons U.V.;
- bonne transparence;
- excellent pouvoir liant;
- grande résistance aux alcalis.

#### MODALITÉS D'EMPLOI

Elles sont pratiquement illimitées que ce soit en dosages ou en champs d'application, car il est utilisé dans tous les secteurs de restauration (pierre, archéologie, papier, couches picturales,.....). Il est conseillé d'effectuer des essais préliminaires pour en vérifier éventuellement la consommation et l'efficacité.

#### RENDEMENT

Variable selon l'utilisation et la concentration.

#### EMBALLAGES

**ACRIL 33** est disponible en emballages de:  
**1 - 5 - 20 - 120 kg.**

#### STOCKAGE

**ACRIL 33** a une durée de vie pratiquement illimitée. Conserver le produit dans les récipients d'origine hermétiquement fermés à température d'environ 20°C.

**ACRIL 33 CRAINT LE GEL**; il peut coaguler à une température inférieure à 5° degrés.

Les indications et les données reportées dans la présente brochure sont basées sur nos expériences actuelles, sur des tests de laboratoire et sur une application correcte.

Ces renseignements ne doivent pas en aucun cas remplacer les tests préliminaires qu'il est indispensable d'effectuer pour s'assurer de l'aptitude du produit à chaque cas déterminé.

La société C.T.S. S.r.l. garantit la qualité constante du produit, mais ne répond pas de dommages éventuels causés par un usage incorrect du produit. En outre, elle peut à tout moment changer les composants et les emballages sans aucune obligation de communication.

## Paraloid™ B67



### **67420 Paraloid™ B-67**

#### **Solid Grade Thermoplastic Acrylic Resin**

##### **Summary**

Paraloid™ B-67 is an alkyd-compatible acrylic ester resin particularly designed to have good compatibility with medium- and long-oil alkyds, drying oils, and oleoresinous varnishes. The addition of Paraloid™ B-67 to alkyds, oils or varnishes produces coatings of improved hardness, faster drying speed, better color and gloss retention and improved hold out and brushing characteristics.

Paraloid™ B-67 is the most hydrophobic of the Paraloid™ thermoplastic resins and has excellent water resistance.

Paraloid™ B-67 is recommended for general product finishing and as a topcoat in vacuum metallizing applications. It is also a very good pigment dispersant.

##### **Physical Properties**

(Not to be used as specifications)

<b>Product Properties</b>	<b>Specification</b>
Appearance, as-is visual	Free of visible foreign matter
Appearance of solution*	Clear to slightly turbid viscous liquid, free of sediment, foreign particles or polymer granules
Color of solution, APHA ASTM D-1209	30, maximum
Turbidity Naphtha, scale	30, maximum
Viscosity, corrected, cps Brookfield LV, spindle #2, 60 rpm, 25°C	250 - 375

\* 45% solution by weight in toluene



### Solubility of PARALOID™ -Acrylic Thermoplastic Resins

(Values given are Viscosity, cps, at 25°C of a 40% solids solution, except as noted)

Solvents	PARALOID™ Types				
	<b>B-44</b> No. 67460	<b>B-66</b> No. 67480	<b>B-67</b> No. 67420	<b>B-72</b> No. 67400	<b>B-82</b> No. 67440
<b>Alkohols</b>					
2B Alcohol	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	De	PS <sup>d</sup>
Isopropanol	-	-	2 800	-	-
n-Butanol	-	94 <sup>e</sup>	2 500	130 <sup>e</sup>	-
Isobutanol	-	5 600 <sup>f</sup>	3 200	-	-
n-Amyl alcohol	-	-	3 200	-	-
Diacetone alcohol	10 000	6 200	2 300	3 500	3 000
<b>Chlorinated Hydrocarbons</b>					
Methylene chloride	2 700	850	520	960	1 200
Carbon tetrachloride	860 <sup>g</sup>	280 <sup>c</sup>	20 000	280 <sup>c</sup>	6 000 <sup>f</sup>
Ethylene dichloride	5 500	1 200	640	1 300	1 800
Trichloroethylene	12 000	7 200	2 100	4 800	3 400
<b>Esters</b>					
Ethyl acetate	1 800	940	240	500	610
n-Propyl acetate	1 800	570	180	550 <sup>g</sup>	580
n-Butyl acetate	2 600	875	250	700	630
Isobutyl acetate	3 100	960	240	660 <sup>g</sup>	700
Amyl acetate	5 600	1 110	320	850	980
1-Ethyl hexyl acetate	-	6 900	770	-	-
<b>Ethers</b>					
Dioxane	5 600	880	830	1 300	1 700

- c. Code for used letters: - = Insoluble; D = Dispersed; PS = Partially soluble  
 d. Results when using pure 2B alcohol. Paraloid™ B-82 is soluble in different alcohol/water-mixtures.  
 e. Viscosity determined at 20 % solids.  
 f. Viscosity determined at 30 % solids.  
 g. Hazy solution.

## Paraloid™ B72



### **67400 Paraloid™ B-72**

#### **Solid Grade Thermoplastic Acrylic Resin**

##### **Summary**

Paraloid™ B-72 is an excellent general purpose acrylic resin, supplied as a 100 % solid grade or as a 15 % solution.

It can be applied in either clear or pigmented coatings by a variety of application methods and can be air-dried or baked. Paraloid™ B-72 has a very low reactivity with sensitive phosphorescent and luminescent pigments. The durability and non-yellowing characteristics also make it valuable for use with these pigments.

Paraloid™ B-72 is compatible with other film forming materials such as vinyls, celluloses, chlorinated rubbers, and silicones and can be used in combination with them to produce coatings with a wide variety of characteristics.

Paraloid™ B-72 is very resistant against water, alkalis, acids, oils and chemical fumes. The coverings are very elastic and adhere on many different surfaces, e.g. also on light metals.

Paraloid™ B-72 is unique in possessing a high tolerance for ethanol. The property allows its use in applications in which strong solvents cannot be tolerated. The alcohol dispersions may be cloudy or milky; however, clear, coherent films are formed.

##### **Melting Point**

Paraloid™ B-72 is an acrylic resin with a high molar mass, thus, it doesn't have a defined melting point. It starts to melt at 70 - 75°C; the flowing point is at 145 - 150°C. TG: 40°C

##### **Physical Properties**

(Not to be used as specifications)

Physical form	Pellets
Bulk density, 25°C, lb/gal	9.6
Solubility parameter	9.3
Transition temperature, T <sub>g</sub> , °C	40
Ultimate hardness of clear films, KHN	10 to 11
Chemical composition	EMA Copolymer



### Solubility of PARALOID™ -Acrylic Thermoplastic Resins

(Values given are Viscosity, cps, at 25°C of a 40% solids solution, except as noted)

Solvents	PARALOID™ Types				
	B-44 No. 67460	B-66 No. 67480	B-67 No. 67420	B-72 No. 67400	B-82 No. 67440
<b>Alcohols</b>					
2B Alcohol	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	De	PS <sup>d</sup>
Isopropanol	-	-	2 800	-	-
n-Butanol	-	94 <sup>c</sup>	2 500	130 <sup>c</sup>	-
Isobutanol	-	5 600 <sup>g</sup>	3 200	-	-
n-Amyl alcohol	-	-	3 200	-	-
Diacetone alcohol	10 000	6 200	2 300	3 500	3 000
<b>Chlorinated Hydrocarbons</b>					
Methylene chloride	2 700	850	520	960	1 200
Carbon tetrachloride	860 <sup>g</sup>	280 <sup>c</sup>	20 000	280 <sup>c</sup>	6 000 <sup>f</sup>
Ethylene dichloride	5 500	1 200	640	1 300	1 800
Trichloroethylenc	12 000	7 200	2 100	4 800	3 400
<b>Esters</b>					
Ethyl acetate	1 800	940	240	500	610
n-Propyl acetate	1 800	570	180	550 <sup>g</sup>	580
n-Butyl acetate	2 600	875	250	700	630
Isobutyl acetate	3 100	960	240	660 <sup>g</sup>	700
Amyl acetate	5 600	1 110	320	850	980
1-Ethyl hexyl acetate	-	6 900	770	-	-
<b>Ethers</b>					
Dioxane	5 600	880	830	1 300	1 700

c. Code for used letters: - = Insoluble; D = Dispersed; PS = Partially soluble

d. Results when using pure 2B alcohol. Paraloid™ B-82 is soluble in different alcohol/water-mixtures.

e. Viscosity determined at 20 % solids.

f. Viscosity determined at 30 % solids.

g. Hazy solution.

## Peoval® 33



## PEOVAL 33

### CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Résine base:	VAc/VeoVa®
Aspect:	liquide laiteux blanc
Résidu sec:	42 ± 1%
Viscosité à 20°C.:	7000 + 12500 mPa-s
pH:	2,5 + 4
Densité:	1,0 kg/L
Dimensions particules:	1500 + 2000 nm
Température minimum de formation du film:	+ 1° C. env.

### DESCRIPTION

Dispersion aqueuse d'un copolymère de l'ester de l'acide versatique avec acétate de vinyle, ayant d'excellentes caractéristiques de résistance et de stabilité aussi bien en intérieur qu'en extérieur.

**PEOVAL 33 a été** formulé et produit expressément pour le secteur de la restauration par "Collano®" sur licence de C.T.S. S.r.l.

Dans la restauration architectonique, combiné avec les liants hydrauliques utilisés pour formuler des mortiers, des stucs, etc...(chaux, plâtre, ciment, etc.), il s'est avéré que **PEOVAL 33** améliore les résistances mécaniques, la stabilité et l'hydrofugation par rapport aux résines précédemment utilisées (acryliques, vinyliques, etc.).

### SECTEURS D'EMPLOI

**PEOVAL 33** s'utilise dans différents secteurs de la restauration conservatrice en tant que :

- additif pour mortiers à injecter, masticages, intégrations, etc.;
- liant pour glacis et badigeon;
- liant pour pigments naturels et synthétiques;
- consolidant et fixatif des couches picturales;
- colle pour documents papier.

### AVANTAGES

La formule particulière de **PEOVAL 33** permet d'obtenir une très haute résistance et compatibilité aux alcalis et par conséquent s'avère idéale pour un emploi avec des liants hydrauliques (chaux hydratée et/ou hydraulique, ciment, plâtre).

**PEOVAL 33** catalyse en présence d'ions calcium obtenant ainsi une hydrofugation et une résistance à l'eau élevées.

Les indications et les données reportées dans le présent opuscule sont basées sur nos expériences actuelles, sur des tests de laboratoire et sur une application correcte. Ces informations ne doivent en aucun cas remplacer les essais préalables qu'il est indispensable d'effectuer pour s'assurer de l'aptitude du produit à chaque cas déterminé.

C.T.S. S.r.l. garantit la qualité constante du produit mais ne répond pas d'éventuels dégâts causés par un usage incorrect du matériau. En outre, elle peut changer à tout moment les composants et les conditionnements sans obligation d'aucune communication.

### PROPRIETE - CARACTERISTIQUES

- excellente stabilité au gel - dégel;
- excellente résistance aux sels solubles;
- excellente stabilité du pH;
- grande compatibilité avec pigments et charges;
- stabilité mécanique;
- excellente résistance au jaunissement.

### PROPRIETE Du FILM

absorption en eau (après 24 heures)	22% env.
résistance de tension à rupture	4 N/mm <sup>2</sup> env.
allongement à rupture	450% env.

### RENDEMENT

Variable selon l'utilisation et le pourcentage d'emploi de **PEOVAL 33** dans le mélange.

### CONDITIONNEMENTS

**PEOVAL 33** est disponible en conditionnement de: 1 - 5 - 20 - 120 Kg.

### STOCKAGE

**PEOVAL 33** a une durée pratiquement illimitée. Conserver le produit dans les récipients d'origine hermétiquement fermés à une température d'environ 20° C.

**N.B.: PEOVAL 33 CRAINT LE GEL.**

Regalrez® 1094**67280 Regalrez® 1094 Hydrocarbon Resin**

Regalrez® 1094 hydrocarbon resin is produced by polymerization and hydrogenation of pure monomer hydrocarbon feedstocks. Regalrez® 1094 is a highly stable, light colored, low molecular weight, nonpolar resin suggested for use in plastics modification, adhesives, coatings, sealants, and caults. Regalrez® 1094 is especially suited to applications where the lowest color and most stability against weathering and thermal degradation is required. Regalrez® 1094 is suggested for use in elastomeric sealants and adhesives tapes where outdoor exposure will occur or where clarity and resistance to yellowing is a requirement. Regalrez® 1094 contains no added antioxidants or UV stabilizers.

**Typical Properties**

Softening point, ASTM E 28	95°C
Color	2.0
Density at 21°C (kg/l)	0.99
Cloud Point	
- MMAP	84°C
- DACP	59°C
- OMSCP	< -40°C
Molecular weight, Size Exclusion Chromatography	
Mz	1350
Mw	850
Mn	550
Mw/Mn	1.6
Melt viscosity	
115°C	1000 poise
125°C	100 poise
150°C	10 poise
190°C	1 poise
Glass transition temperature (T <sub>g</sub> )	40°C

**Compatibility and Solubility:**

Regalrez® 1094 is compatible with polyethylene, polypropylene, natural rubber, EPDM, butyl rubber, ethylene-propylene copolymers and the isoprene, ethylene-propylene and ethylene-butylene midblocks of SIS and SEPS, and SEBS block copolymers. Regalrez® 1094 can be used with EVA copolymers with less than 20% vinyl acetate, paraffin, microcrystalline and polyolefin waxes. Regalrez® 1094 is soluble in aliphatic and aromatic solvents, C5 and higher esters and ketones. It is insoluble in glycol ethers, glycol ether esters, and alcohols. For low/zero VOC systems Regalrez® 1094 is soluble in t-butyl acetate and perchlorobenzene tetrafluoride (PCBTC) and will tolerate some acetone and/or methyl acetate as a diluent in solvent systems based on TBA and/or PCBTF. VOC exemptions and environmental regulations vary regionally and compliance with local standards should be verified before any claims about VOC content are made.

**Storage:**

Flaked forms of resins are prone to gradual oxidation, some more than others. This could result in darkening and/or it could have an adverse effect on the solubility of the resin in organic solvents or on its compatibility with polymers. Accordingly, it is strongly recommended that strict control of inventory be observed at all time, taking care that the oldest material is used first.

Vinavil® 59



**C.T.S. S.R.L.**  
Via Piave, 20/22 - 36077 Altavilla Vicentina (VI) - Italy  
Tel. +39 0444 349088 - Fax +39 0444 349039  
www.ctseurope.com - cts.italia@ctseurope.com



**Milano**  
Via A. F. Stella, 5 - 20125  
Tel. +39 02 67493225  
Fax +39 02 67493233  
cts.milano@ctseurope.com

**Firenze**  
Via L. Gordini, 94 - 50127  
Tel. +39 055 3245014  
Fax +39 055 3245078  
cts.firenze@ctseurope.com

**Roma**  
Via G. Pantoni, 26 - 00149  
Tel. +39 06 55301779  
Fax +39 06 5530891  
cts.roma@ctseurope.com

**Napoli**  
Via delle Puglie, 228 int.4 - 80143  
Tel. +39 081 7582971  
Fax +39 081 7583118  
cts.napoli@ctseurope.com

**VINAVIL 59**  
**Medium viscosity vinyl glue**

PC 005 – 07/05

**Product type**

Vinyl acetate adhesive

**Range of use**

Vinavil 59 is an adhesive particularly suitable for bonding wood, veneer, plywood, plastic laminates on wood, paper, cork, cloth, tiles and porous materials.

**Method of use**

Remove any dust or grease from the surfaces to be bonded, spread a layer of adhesive approximately 0.5 mm thick on one of the two surfaces to be bonded (for difficult bonding spread on both surfaces). The adhesive can be applied using a brush or toothed trowel.

The adhesive can be diluted to the required viscosity or used as it is.

The approximate quantity for use is 100-150 g/m<sup>2</sup>, which can vary considerably depending on the wood porosity.

For improved hold, the bonded surfaces must be subjected to a pressure of 2.5-5 kg/cm<sup>2</sup>.

Joints covered by adhesive soften and are heat sealed at temperatures above 70-80°C.

**Vinavil 59 must be used at temperatures above +5°C.**

**Notes**

It does not stain the wood rich in tannin.

**Technical data**

**Components:** Polyvinyl acetate and water

**Specific weight:** 1.1 g/cm<sup>3</sup>

**Brookfield viscosity:** 12500 ± 3500 mPa.s

**Solids content:** 42 ± 1%

**pH:** 7 ca

**Open time:** 11 minutes

**Setting time:** initial 15/30 minutes; final 24 hours

**Yield:** 100-150 g/m<sup>2</sup>

**Minimum film-forming temperature:** +5°C

**Storage:** Protect from frost.

Store and use at temperatures above +5°C

**Shelf life:** If stored correctly the product is stable for one year

**Hazard notes:** None

**Pack sizes**

1 kg tin and 5 kg canister

EPO 150



## E P O 1 5 0

### RESINE EPOXY PURE A INJECTER

#### DESCRIPTION

**Epo 150** est un produit à base de résines époxydiques fluides réticulables à froid grâce à un durcisseur à base d'amines cycloaliphatiques.

Le mélange des deux composants produit un système à résistance élevée et très adhésif.

#### CHAMP D'APPLICATIONS

Le produit **Epo 150** est adéquat pour injections et/ou imprégnations sur support en béton, pierre, terre cuite et bois. **Epo 150** peut être utilisé pour le remplissage des fissures et l'ancrage de clous et de barres en fibre de verre.

**Epo 150** peut être chargée avec différentes charges inertes pour obtenir des mélanges à utiliser pour masticages et intégrations.

#### PREPARATION

Le système **Epo 150** est fourni en conditionnement double composé de Résine Epoxy pure **Epo 150** et du durcisseur **K 151**. Les deux composants sont mélangés dans le rapport suivant:

Résine Epoxy pure <b>Epo 150</b>	100g
Durcisseur <b>K 151</b>	25g

#### CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Aspect	liquide transparent
Poids spécifique 25°	1,04
Temps de travail de 200gr à 25°C	30-50 minutes
Résistance à la traction	400Kg/cm <sup>2</sup>
Résistance à la flexion	1000Kg/cm <sup>2</sup>
Résistance à la compression	1220Kg/cm <sup>2</sup>
Viscosité du système (25°C)	500-800mPa-s

#### MODE D'EMPLOI

**Epo 150** peut être appliqué à l'aide de seringues manuelles ou de systèmes d'injections mécaniques.

L'équipement doit être soigneusement lavé avec les solvants appropriés tout de suite après l'emploi.

Les composants doivent être mélangés avant l'emploi avec des agitateurs appropriés.

Les récipients après l'emploi doivent être hermétiquement fermés.

#### PRECAUTIONS

Le rapport de mélange doit être scrupuleusement respecté. Les erreurs tolérables de dosage ne doivent pas être supérieures à  $\pm 5\%$ .

Mélanger jusqu'à obtenir une parfaite homogénéité.

L'utilisation de gants et de vêtements de protection est recommandée pour éviter le contact direct avec la peau. En cas de contact, laver le plus vite possible avec de l'eau chaude et du savon.

Ne pas utiliser de solvants.

Sicomin® PB250 / Durcisseur DM02

FICHE TECHNIQUE

PB 170, PB 250, PB 400, PB 600  
Page 1 / 14  
Version 22/01/2014

## PB 170, PB 250, PB 400, PB 600

### Systèmes époxydes pour production de mousses alvéolaires

La série des produits PB sont des formulations à deux composants, destinées à la production de mousses

époxy de faibles densités.

Les résines **PB 170**, **PB 250**, **PB 400** ou **PB 600** donnent des mousses d'environ 170, 250, 400 et 600 kg / m<sup>3</sup> en expansion libre. Ce système est de couleur blanche; cependant il peut-être teinté avec des pigments compatible époxy.

Le durcisseur influe seulement sur la vitesse de durcissement et l'épaisseur coulable en une fois.

Les mélanges évoluent en deux temps :

- 1 → Expansion rapide de la coulée
- 2 → Durcissement lent de la masse

#### Performances :

Obtention de mousses de faibles densités

Pas de manipulation de micro sphères creuses

Systèmes bi-composants

Adhésion sur de nombreux supports.

Coulables sur pré-pregs, résines époxydes et polyester en cours de polymérisation (essais préalables indispensables)

Excellente homogénéité de densité

Excellente résistance à l'eau

#### Applications:

Production de mousse époxy

Matériaux d'âme sandwich coulables in situ

Volume de flottabilité

Densification de mousses, nids d'abeille

Isolation thermique

Blocs usinables pour modèles

### Résines époxy moussantes PB xxx

	PB 170	PB 250	PB 400	PB 600
Aspect	Liquide thixotrope			
Couleur	Blanc	Blanc	Blanc	Crème
Viscosité (mPa.s)				
Rhéomètre CP 50 mm20 °C	15 000 ± 3 000	22 000 ± 4 000	22 000 ± 4 000	32 000 ± 6 000
gradient de 25 °C	8 000 ± 1 500	12 000 ± 2 000	12 000 ± 2 000	16 000 ± 3 000
cisaillement 10 s <sup>-1</sup> 30 °C	4 500 ± 1 000	7 500 ± 1 500	7 000 ± 1 400	10 000 ± 2 000
40 °C	1 800 ± 350	3 800 ± 800	3 000 ± 600	4 000 ± 800
Densité	1.12 ± 0.01	1.10 ± 0.01	1.14 ± 0.01	1.17 ± 0.01
Picnomètre ISO 2811-1				
Stabilité au stockage	1 an à 15 – 20 °C. Mélanger le conditionnement avant utilisation			

**Durcisseurs DM 0x**

	<b>DM 03</b>	<b>DM 02</b>
Aspect / couleur	Liquide jaune clair	Liquide incolore à jaune clair
Réactivité type	Standard	Lent
Viscosité (mPa.s)		
Rhéomètre CP 50 mm <sup>15</sup> °C	320 ± 60	190 ± 40
gradient de 20 °C	210 ± 40	130 ± 25
cisaillement 10 s <sup>-1</sup> 25 °C	150 ± 30	100 ± 20
30 °C	100 ± 20	70 ± 15
40 °C	60 ± 10	40 ± 10
Densité 20 °C	1.00 ± 0.01	0.98 ± 0.01
Picnomètre ISO 2811-1		
Stabilité au stockage	2 ans, en emballage fermé	

**Dosages**

	<b>PB 170</b>	<b>PB 250</b>	<b>PB 400</b>	<b>PB 600</b>
<b>DM 03</b>	100 / 31 g	100 / 31 g	100 / 32 g	100 g / 30 g
<b>DM 02</b>	100 / 36 g	100 / 36 g	100 / 37 g	100 g / 35 g

**Paramètres d'exothermie**

Conductivité thermique du support

Moule ouvert ou fermé

Température des composants et ambiante

Géométrie, volume et masse de la coulée

Dans le cas de coulée sur stratifié épais en cours de polymérisation, il faudra tenir compte de la chaleur dégagée par la résine de stratification.

**Conseils de mise en œuvre**

Homogénéiser les résines PB avant dosage, à l'aide d'un agitateur hélicoïdal (type peinture).

Porter une attention particulière aux parois et fond du récipient.

Doser en poids avec la précision adaptée à la masse mise en œuvre

La réaction d'expansion est beaucoup plus rapide que la réaction de polymérisation: les temps de mélange et d'application doivent être les plus courts possibles, surtout avec les faibles densités.

Le temps de travail des mélanges est de 4 minutes maximum.



Lors du mélange de la résine PB et du durcisseur, de l'air est inclus. Ces bulles peuvent être en grande partie éliminées par passage du mélange à travers un tamis inox d'une maille de 1 à 2 mm

### Rapports d'expansion

	Densité finale en expansion libre à 20°C	Rapport volumique d'expansion à 20°C
<b>PB 170</b>	170 ± 20 kg / m <sup>3</sup>	x 6.2
<b>PB 250</b>	250 ± 25 kg / m <sup>3</sup>	x 4
<b>PB 400</b>	400 ± 30 kg / m <sup>3</sup>	x 2.5
<b>PB 600</b>	600 ± 40 kg / m <sup>3</sup>	x 1.7

Exemple, si le volume à remplir est de 10 litres, il faut :

10 / 6.2	=	1.62 kg	de mélange de <b>PB 170 / DM 0x</b>
10 / 4	=	2.5 kg	de mélange de <b>PB 250 / DM 0x</b>
10 / 2.5	=	4 kg	de mélange de <b>PB 400 / DM 0x</b>
10 / 1.7	=	5.9 kg	de mélange de <b>PB 600 / DM 0x</b>

Prévoir 5 à 10 % de mélange supplémentaire pour les pertes.

Attention au problème d'exothermie sur les volumes importants

Voir graphe: Mesure d'exothermie de la coulée en fonction de l'épaisseur à 20 °C, page 4 et 5.

**Polymérisation**

Attendre que la résine soit dure en tous les points de la coulée.

Si possible ne pas démouler

Un minimum de polymérisation de 6 heures à 40°C dans le moule, est nécessaire pour garantir la stabilité dimensionnelle de la pièce.

Cycle de production standard:

6 à 24 heures à température ambiante (18-23°C)

+ 6 heures à 40°C                   Obtention d'un Tg1 supérieur à 50 °C

+ 12 heures à 60°C Obtention d'un Tg1 supérieur à 70 °C

**Couleurs**

**PB 170, PB 250, PB 400, PB 600** : Blanc (coloration possible suivant cahier des charges)

**Autres couples :**

PB	SD	Dosage en poids	Tg 1 max en °C
PB 170	SD 2505	100 / 30	97
	SD 8203	100 / 30	115
	SD 7820	100 / 30	129
	DM 06	100 / 40 (2 / 1 volume)	90
PB 250	SD 8205	100 / 27	96
	SD 7820	100 / 30	125
	SD 560x	100 / 90 (1/1 volume)	60
	SD 2630	100 / 27	137
	DM 06	100 / 40 (2 / 1 volume)	90
PB 400	SD 7820	100 / 28	133
	SD 2630	100 / 27	135
	SD 560x	100 / 90 (1/1 volume)	62
	DM 06	100 / 40 (2 / 1 volume)	90
PB 600	SD 7820	100 / 27	137
	SD 2630	100 / 26	142
	SD 560x	100 / 70	/
	DM 06	100 / 40 (2 / 1 volume)	90

**Autres versions :****- PB 350 S / SD 1249.17**

Version sprayable de 350 Kg /m3 pour production de stratifiés allégés.

Pompes doseuses et mélanges en tête nécessaire. 2/1 en volume

**- PB 270 i / PB 370 i / PB 570 i**

Versions ignifugées, autoextinguible.

Répond à la Norme FAR 25 § 25-853 (a)

## XII.4 Support

Panneau en nid d'abeille**ALUCORE® POUR LE TRANSPORT, L'INDUSTRIE ET 'ARCHITECTURE**

Containers en construction légère, cabines de machines-outils, souffleries, habillages de salles, cloisons, mobilier de bateaux, ascenseurs ... il existe de nombreuses applications industrielles pour l'ALUCORE®. C'est pourquoi, nous proposons aux constructeurs, dès la phase de projet, des échantillons, des informations techniques détaillées et des méthodes d'essai personnalisées. Notre objectif est de satisfaire totalement nos clients dans des conditions d'efficacité et d'économie.

Les conditions générales, économiques et écologiques exigent de plus en plus que soient utilisés dans les transports, des matériaux de structure légers, stables et entièrement recyclables. ALUCORE® remplit intégralement ces exigences. On préfère ainsi utiliser le panneau composite à structure alvéolaire pour l'aménagement intérieur et extérieur des bateaux, car les panneaux composites pour cloisons, portes et plafonds sont faciles à mettre en forme et atteignent des valeurs optimales de résistance. Dans la construction automobile, les panneaux ALUCORE® conviennent remarquablement bien aux aménagements intérieurs, habillages muraux et de plafonds, carrosseries de camion ainsi qu'aux systèmes de porte et de basculement.

Les propriétés mécaniques d'une part, telle la résistance à la rupture des tôles, et les caractéristiques de mise en forme et d'esthétique d'autre part, font de l'ALUCORE® le matériau préféré des chefs de projets, des architectes et des designers. La finition des détails pour les applications les plus différentes, par ex. des solutions de façade et de toiture, peut être facilement réalisée avec un outillage courant. L'ALUCORE® fait également ses preuves dans l'agencement et la décoration intérieurs. Grâce à ce matériau plat, décoratif et rigide à la fois, des systèmes de fixation innovateurs pour plafonds et cloisons, à l'intérieur comme à l'extérieur, peuvent être mis en œuvre techniquement de manière irréprochable.

La multiplicité des couleurs et des surfaces donne au designer un degré élevé de liberté de création. La bonne aptitude au laquage de l'ALUCORE® complète les propriétés positives de ce matériau. La gamme étendue des couleurs standard et des teintes spéciales correspond aux normes de l'association Européenne Coil Coating (ECCA).

**DONNÉES TECHNIQUES**

Épaisseur standard [mm]	Unité	ALUCORE® / ALUCORE® A2						ALUCORE® lite		
		6	10	10,5	15	20	25	6	10	
Épaisseur des tôles de recouvrement, recto	[mm]	1,0						0,5		
Épaisseur des tôles de recouvrement, verso	[mm]	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5		
Poids	[kg/m²]	4,7	5,0	6,3	6,7	7,0	7,3	3,4	3,6	
<b>Caractéristiques mécaniques</b>										
Limite de résistance	W	[cm³/m]	2,5	4,5	8,63	13,1	18,1	23,1	2,5	4,5
Rigidité	E·J	[kNcm²/m]	7 100	21 900	34 800	75 500	138 900	221 600	5 800	17 300
Alliage des tôles de recouvrement (selon EN 485-2/EN 1396:2007)			EN AW-5005A (AlMg1) H22/H42			EN AW-5005A (AlMg1) H28/H48 (H22/H42)		EN AW 5005A (AlMg1)		
Module d'élasticité	E	[N/mm²]	70 000						70 000	
Résistance à la rupture des tôles de recouvrement	R <sub>m</sub>	[N/mm²]	≥ 125			≥ 185 (125)		≥ 125		
Limite élastique (0,2% limite)	R <sub>0,2</sub>	[N/mm²]	≥ 80			≥ 160 (80)		≥ 80		
Allongement à la rupture	A <sub>50</sub>	[%]	≥ 5			≥ 2 (5)		≥ 5		
Coefficient de dilatation linéaire	α		2,4 mm/m pour une différence de température de 100°						2,4 mm/m pour une différence de température de 100°	
<b>Noyau</b>										
Résistance à la compression		[N/mm²]	env. 2,5						env. 2,6	
Taille de cellule		[inch] [mm]	3/8 (9,5)						3/8 (9,5)	
<b>Surface</b>										
Laquage			Polyester blanc patine sur les deux faces ou laquage à base de fluoropolymères (par ex. PVDF), une ou deux faces						mat de laminage, deux faces	
Brillance (valeur de base)		[%]	25-40							
Dureté (dureté de crayon)			HB-F							
<b>Caractéristiques acoustiques</b>										
Facteur d'absorption du son	α <sub>s</sub>		0,05						0,05	
Amortissement phonique (selon la norme ISO 717-1, ISO 140-3)	R <sub>w</sub>	[dB]	21	21	21	22	23	25	env. 20	
<b>Caractéristiques thermiques</b>										
Conductivité thermique (concernant épaisseur totale, tôles de recouvrement comprises)	λ	[W/mK]	0,95	1,35	1,42	1,78	2,25	2,70	0,90	1,30
Résistance thermique	R	[m²K/W]	0,0063	0,0074	0,0074	0,0084	0,0089	0,0093	0,006	0,008
Coefficient de transmission de la chaleur	U	[W/m²K]	5,67	5,64	5,64	5,61	5,59	5,58		
Résistance à la température		[°C]	-40 à +80						-40 à +80	

## XII.5 Produit pour le nettoyage

Carbopol® ULTREZ 21**63812 Carbopol® EZ 2**

(Substitute for 63810 and 63811: Carbopol® 980 and 954)

Carbopol® EZ products are cross-linked polymers based on acrylic acid that are modified to make them very easy to add to water without lumping. At incredibly low levels, Carbopol® EZ 2 can turn water into a smooth, non-stringy syrup or a crystal-clear non-pourable gel. And your formulations will remain stable. Carbopol® EZ 2 can hold dispersed solids or emulsions in place for years - even under hot conditions.

Carbopol® EZ 2 offers outstanding yield value (initial resistance to flow). Yield value - more than viscosity - is the property that prevents suspended particles from settling or a fluid from sagging on a vertical surface. At only 0.10 % concentration, Carbopol® EZ 2 develops enough yield value to permanently suspend sand. Most other thickeners cannot do this at 10 times this concentration.

Carbopol® EZ 2 also gives unique flow properties: When enough force is applied to exceed the fluid's yield value it flows easily. Thus a paste that is thick (at rest) can be easily troweled, or a heavy coating sprayed.

Carbopol® EZ resins will work in nearly any system where these conditions are met:

- a polar media such as water is present
- long-term temperatures do not exceed 85°C
- the final pH can be set at 5 or higher
- high levels of soluble salts are not present
- the application is not pharmaceutical, food-contact or personal care

Viscosity in water:

0.2 % concentration	min. 10.000	max 30.000 cP
0.5 % concentration	min. 50.000	max 70.000 cP

**Specification**

Test Description	Test Results (20.00 kg)	Specification Limits	Test Method
0.5 % Mucilage visc.	51,400	50000 - 70000	BFG-430 I
Residual solvent ethylacetate %	.13	< 0.50	SA-009
Residual solvent cyclohexane %	.03	< 0.50	SA-009
Combined residual solvent %	.16	< 0.50	
% Loss on drying	.10	< 3 %	SA-004

Klucel® H**63700 - 63712 Klucel®, Hydropropylcellulose**

63700 Klucel® E

63706 Klucel® G

63710 Klucel® M

63712 Klucel® H

**CAS Number:** 9004-64-2**CAS Name:** Cellulose, 2-hydroxypropyl ether

Klucel® hydropropylcellulose (HPC) is a non ionic water-soluble cellulose ether with a versatile combination of properties. It combines organic solvent solubility, thermo plasticity, and surface activity with the thickening and stabilizing properties of other water-soluble cellulose polymers.

Klucel is a white powder with no odor or taste. It is available in various chain lengths, which means different viscosity.

**Properties and Uses**

Klucel® is soluble in many polar organic solvents and in water below 38°C, but is insoluble in water above 45°C.

Klucel® is highly surface-active, with low surface and interfacial tensions of solutions.

In films and coatings, Klucel® is heat-sealable, and it is extremely flexible without plasticizers.

The versatility of Klucel® is apparent in a wide variety of pharmaceutical applications, including tablet coatings, controlled-release products, encapsulation, tablet binding and as a suspension aid.

A solution in non-aqueous/denatured ethyl alcohol enables a water spot-free gluing of wall-paper or stabilization of paints.

**Viscosity Specification of Klucel®, Brookfield LVF at 25°C, mPas**

Type	Concentration in Water by weight			Molecular Weight
	1 %	2 %	10 %	
H	1275 - 3500	30000	-	1150000
M	-	3500 – 7500	-	850000
G	-	150 – 400	-	370000
E	-	7	250 – 800	80000

Type	Concentration in Anhydrous Alcohol by weight		
	1 %	2 %	10 %
H	1000 - 4000	-	-
M	-	3000 – 6500	-
G	-	75 – 400	-
E	-	-	150 – 700

## Laponite® RD



### **58935 Laponite® RD**

Laponite® RD is a synthetic layered silicate. It is insoluble in water but hydrates and swells to give clear and colorless colloidal dispersions. At concentration of 2% or greater in water, highly thixotropic gels can be produced.

#### **Application:**

Used for imparting a shear sensitive structure to a wide range of water-based formulations. These include household and industrial surface coatings, cleansers, ceramic glazes, agrochemical, oilfield and horticultural products.

#### **Typical characteristics:**

Appearance:	free flowing white powder
Bulk Density:	1.0 g/cm <sup>3</sup>
Surface Area (BET):	370 m <sup>2</sup> /g
pH (2% suspension):	9.8

#### **Chemical analysis (dry basis):**

SiO <sub>2</sub> :	59.5 %
MgO:	27.5 %
Li <sub>2</sub> O:	0.8 %
Na <sub>2</sub> O:	2.8 %
Loss on ignition:	8.2 %

#### **General specifications:**

Gel strength:	> 22 g
Sieve analysis (250 µm):	< 2 %
Free moisture (105°C):	< 10 %

#### **Storage:**

Laponite® is hygroscopic and should be stored under dry conditions.

### XIII. Fournisseurs

Les fournisseurs suisses ou les fournisseurs étrangers ayant des succursales en Suisse ont été privilégiés pour limiter les frais de transports et de douane ainsi que pour réduire les risques de livraisons retardées.

Produits	Fournisseurs	Quantité	Prix
Acril® 33	CTS®	1 kg	6,20 €
Billes de verre expansé — Poraver®	Poraver®	-	-
Carbopol® EZ 2	Kremer Pigments GmbH & Co. KG GmbH	1 kg	10,12 €
Chaux hydratée (KFN)	Kalkfabrik Netstal AG	-	-
Chaux NHL5 — Hydradur®	Cimenterie et chaux Otterbein GmbH & Co. KG	-	-
EPO® 150 + K151	CTS®	1 kg	27,30 €
Epoxy moussante PB250 + durcisseurs DM0	Sicomino Epoxy system – disponible chez Swiss-composite AG	6.8kg	200 €
Farine de Quartz K-4	Carlo Bernasconi SA	25kg	-
Klucel® H	Kremer Pigments GmbH & Co. KG	1kg	14.82 €
Laponite® RD	Kremer Pigments GmbH & Co. KG	1 kg	5.65 €
Métakaolin — Metaver®	Newchem®	-	-
Mousse de montage polyuréthane B240	Pro® One – disponible chez Getaz- Miauton SA	750ml	13 CHF
Ocre rouge	Kremer Pigments GmbH & Co. KG	100g	4.05 €
Panneau en nid d'abeille — Alucore®	Allega GmbH	1	652,3 CHF
Paraloid™ B72	Kremer Pigments GmbH & Co. KG	1 kg	27.32 €
Paraloid™ B67	Kremer Pigments GmbH & Co. KG	1 kg	30.70 €
Peoval® 33	CTS®	1 kg	8,90 €
Perlite — Isoself®	Knauf AG – disponible chez Hornbach GmbH	100L	22,50 €
Regalrez® 1094	Kremer Pigments GmbH & Co. KG	1 kg	36.41 €
Sikament® 12-S	Sika Schweiz AG	-	-
Vinavil® 59	CTS®	1 kg	9,80 €

Les produits ne présentant pas de prix sont ceux gracieusement offerts par le SMRA qui profite de prix réduits (liés aux commandes en grandes quantités).