République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار – عنابـــــــة

Faculté des Sciences de la Terre
Département d'Architecture

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3ème CYCLE

Filière : Architecture
Spécialité : Restauration et conservation

Préparée dans le cadre d'une cotutelle internationale
de thèse avec l'Université Bordeaux Montaigne

Archéométrie et reconstitution du mortier de chaux des constructions antiques du nord-est de l'Algérie : le cas du site d'Hippone

Volume 1

Présentée et soutenue publiquement le 3 juillet 2024

par

Mohamed Sofiane DJERAD

Sous la direction de Khedidja Boufenara et Jacques des Courtils

Membres du jury

M. Riad ZEGHIB, Maître de conférences A, Université Badji Mokhtar-Annaba	Président du jury
M. Jean-Yves MARC, Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
M. Zahreddine NAFA, Professeur, Université 8 mai 1945 Guelma	Rapporteur
Mme Laurence CAVALIER, Professeur, Université Bordeaux Montaigne	Examinatrice
Mme Mariette RAAIJMAKERS DE VOS, Professeur, Università di Trento	Invitée
M. Arnaud COUTELAS, Chercheur associé, UMR 8546 AOROC (CNRS-ENS Paris)	Invité

2023-2024

Université Badji Mokhtar-Annaba
B.P.12, Annaba, 23000 Algérie

Résumé

Archéométrie et reconstitution du mortier de chaux des constructions antiques du nord-est de l'Algérie : le cas du site d'Hippone

L'utilisation répandue du mortier de chaux dans l'architecture romaine témoigne de son importance et de sa durabilité. De nombreuses études ont examiné les recettes et les adaptations régionales de ce matériau, mettant en évidence le rôle crucial du savoir-faire des artisans locaux dans sa production. La présente étude se concentre sur le site archéologique d'Hippone en Algérie en explorant les méthodes de préparation et d'utilisation du mortier de chaux par les artisans de la cité. Trois hypothèses sont avancées quant à l'approche adoptée par ces artisans : une adaptation empirique des « recettes » aux ressources locales, une stricte conformité aux « normes romaines » rapportées par des textes antiques ou une combinaison des deux approches. Dans cette étude, des méthodes archéométriques telles que la pétrographie, la microscopie optique à cathodoluminescence (CL) et la microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) sont employées pour analyser les échantillons de mortier de chaux. L'objectif étant de déterminer leur composition et l'origine des matières premières utilisées par les artisans d'*Hippo Regius*. Les résultats sont ensuite confrontés aux données archéologiques et géologiques, ainsi qu'aux textes anciens d'auteurs tels que Caton l'Ancien, Vitruve et Pline l'Ancien, pour comprendre la production de la chaux et de la mise en œuvre du mortier de chaux dans la cité d'Hippone. Outre la portée méthodologique de ce travail dans le contexte général des études sur les mortiers romains, cette recherche met en évidence une appropriation par les artisans d'*Hippo Regius* des préceptes énoncés dans les traités anciens, lesquels étaient principalement mis en œuvre dans l'Italie romaine. Enfin, cette thèse permet également d'apporter un éclairage sur l'emploi par les artisans de la cité de diverses matières premières. Celles-ci comprennent à la fois des ressources locales comme les calcaires d'Aïn Kerma et les sables locaux, ainsi que des importations telles que la pouzzolane naturelle en provenance des dépôts pyroclastiques des champs Phlégréens, principalement de Pouzzoles.

Mots-clés : caractérisation, mortier de chaux, savoir-faire romain, provenance, matières premières, Hippo Regius

ملخّص

توصيف وإعادة تكوين وصفات ملاط الجير الموجود بالمباني الأثرية في شمال شرق الجزائر : دراسة حالة المدينة الرومانية هيبو ريجيوس

الإستخدام الواسع لملاط الجير في المنشآت الرومانية يشهد على أهميته وصموده. قامت الدراسات السابقة بفحص وصفات هذه المادة وتكييفاتها الإقليمية، مما أبرز الدور الحاسم لخبرة الحرفيين المحليين في إنتاجها. تركز هذه الدراسة على الموقع الأثري "هيبون" بالجزائر، حيث تبحث في أساليب تحضير واستخدام الجير من قبل حرفيي المدينة. يتم تقديم ثلاثة فرضيات حول النهج الذي اتخذه هؤلاء الحرفيون : التكيف التجريبي لـ "الوصفات" مع الموارد المحلية، أو الامتثال الصارم لـ "المعايير الرومانية" كما هو مذكور في النصوص القديمة، أو مزيج من النهجين. في هذه الدراسة، يتم استخدام أساليب علوم الآثار، الجيولوجيا والفيزياء مثل البتروغرافيا والتوصيف بالمجهر البصري بالضوء الكاثودي المنبعث والمجهر الإلكتروني الماسح مقترنًا بمطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية لتحليل عينات ملاط الجير. الهدف هو تحديد تركيبها وأصل المواد الخام المستخدمة من قبل حرفيي هيبو ريجيوس. يتم مقارنة النتائج بالبيانات الأثرية والجيولوجية، بالإضافة إلى النصوص القديمة لمؤلفين مثل الكاتو الأكبر وفيتروفيوس وبليني الأكبر، لفهم إنتاج الجير وتنفيذ ملاط الجير في مدينة هيبو ريجيوس .بالإضافة إلى النطاق المنهجي لهذا البحث في سياق الدراسات العامة عن ملاط الجير الروماني، يسلط هذا البحث الضوء على استيلاء حرفيي هيبو ريجيوس على النصوص القديمة، التي تم تطبيقها في الغالب في إيطاليا الرومانية. وأخيرًا تساهم هذه الأطروحة في تسليط الضوء على استخدام حرفيي المدينة لمجموعة متنوعة من المواد الخام، بما في ذلك الموارد المحلية مثل الحجر الجيري من عين كرمة والرمال المحلية بالإضافة إلى الواردات مثل البوزولان الطبيعي القادم من ترسبات بركانية في نابل الإطالية، بشكل أساسي من بوتسوولي.

الكلمات المفتاحية : توصيف، ملاط الجير، المهارة الرومانية، مصدر المواد، المواد الخام، هيبو ريجيوس

Abstract

Archaeometry and reconstitution of lime mortars from ancient structures in northeast Algeria: the case of *Hippo Regius*

The widespread use of lime mortar in Roman architecture testifies to its importance and durability. Several studies have examined the recipes and the regional adaptations of this material, highlighting the crucial role of local artisans' know-how in its production. The present study focuses on the archaeological site of *Hippo Regius* in Algeria, exploring the methods of preparation and use of lime mortar by the city's artisans. Three hypotheses are put forward regarding the approach adopted by these artisans: an empirical adaptation of the "recipes" to the resources available locally, strict adherence to the "Roman standards" as reported by ancient texts or a combination of both approaches. In this study, archaeometric methods such as petrography, optical cathodoluminescence (CL) microscopy, and scanning electron microscopy (SEM) coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) are employed to examine lime mortar samples collected from the archaeological site of *Hippo Regius*. The aim is to determine their composition and the origin of the raw materials used by the artisans of the city. The results are then compared with archaeological and geological data, as well as ancient texts from authors such as Cato the Elder, Vitruvius, and Pliny the Elder, to understand the production of lime and the implementation of lime mortar in the city of *Hippo Regius*. Beyond the methodological scope of this work within the broader context of studies on Roman mortars, this research highlights the adaptation by artisans in *Hippo Regius* of principles outlined in ancient treatises, predominantly implemented within Roman Italy. Finally, this thesis also sheds light on the use by the city's artisans of various raw materials. These include both local resources such as the limestone of Aïn Kerma and local sands, as well as imports such as natural pozzolana from the pyroclastic deposits of the Phlegraean Fields, mainly from Pozzuoli.

Keywords: characterization, lime mortar, Roman know-how, provenance, raw materials, Hippo Regius

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma reconnaissance envers tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer cette thèse de doctorat. Ensuite, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mes deux directeurs de thèse, les professeurs Khedidja Boufenara et Jacques des Courtils. Ils ont su me faire confiance, dès le début de cette aventure, et m'ont apporté un soutien sans faille tout au long de ce parcours doctoral. Je tiens vivement à les remercier pour leur patience, leurs conseils éclairés et leur grande disponibilité. Mes remerciements vont également aux membres du comité de formation doctorale, à savoir Redha Attoui, Hassib Rehailia et Abdelhak Bordjiba, ainsi qu'aux membres du comité de suivi de thèse : Laurence Cavalier, Olivier Devillers, Stéphanie Brossard et Alice Ognier. Leurs idées, commentaires et suggestions ont grandement enrichi mon parcours doctoral et la qualité de ce travail. Aussi, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers Arnaud Coutelas pour sa disponibilité, ses conseils et ses nombreuses remarques qui m'ont été d'une aide précieuse pour ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les institutions qui ont contribué à la réalisation de cette thèse en cotutelle : l'université Badji Mokhtar-Annaba, l'université Bordeaux Montaigne, l'école doctorale Montaigne-Humanités (ED 480), le Service Commun de Documentation, en particulier le personnel de la bibliothèque Robert Étienne (Nathalie, Renaud, Sandra et François), ainsi que les directeurs et les membres des unités mixtes de recherche Ausonois (UMR 5607) et Archéosciences Bordeaux (UMR 6034). Leur soutien inestimable et l'environnement propice qu'ils ont créé ont été essentiels pour mener à bien ce travail de recherche. Aussi, je souhaite saluer et exprimer ma reconnaissance envers l'ensemble du personnel des deux universités qui m'a toujours ouvert ses portes et facilité toutes les démarches administratives : Ahmed Nahal, Hocine Aouchal, Makram Mici, Stéphanie Brossard, Sylvie Abram, Ghizlane Bencheikh, Stéphanie Montagner, Bernard Coly, Chantal Duthu, ainsi que Béatrice Collignon, directrice de l'école doctorale Montaigne-Humanités.

Je tiens à remercier particulièrement Pierre Guibert pour son accueil au sein du laboratoire Archéosciences Bordeaux, ainsi que tous les membres de l'équipe de recherche, dont Brigitte Spiteri, Nadia Cantin et Yannick Lefrais qui m'ont formé à la préparation des échantillons et à la manipulation des divers instruments scientifiques du laboratoire et qui m'ont fourni toutes les ressources bibliographiques nécessaires à la réalisation des analyses archéométriques et à l'interprétation des résultats.

Ma reconnaissance s'étend au ministère algérien de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique, ainsi qu'au ministère français des Affaires étrangères, pour m'avoir accordé une bourse de mobilité PROFAS B+. Leur soutien financier, à travers Campus France, a été indispensable pour la concrétisation de cette thèse de doctorat en cotutelle. Par ailleurs, je tiens à souligner le rôle crucial du ministère algérien de la Culture dans le déroulement de cette recherche, en particulier sous la direction du ministre Azzedine Mihoubi, et à qui j'adresse mes sincères remerciements pour l'octroi des autorisations nécessaires à l'étude des échantillons de mortier de chaux. Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel de l'OGEBC et du Musée d'Hippone, particulièrement Amar Nouara, Sana Kara et Khalil Azzouni, pour leur accueil et leur disponibilité pendant mes nombreuses visites au site archéologique d'Hippone. De même, j'adresse mes remerciements au Consul d'Algérie à Bordeaux, Tewfik Tabeti, ainsi qu'à tous les membres du personnel impliqués, pour les facilitations de visas accordées aux membres du jury.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers tous mes amis, doctorants et jeunes chercheurs, avec lesquels j'ai eu le privilège de travailler tout au long de cette aventure : Nacer Eddine, Jean-Baptiste, Alice, Laura, Marie-Claire, Dante, Alexandre, Martin, Tom, Wendy, Méganne, Kevin, Marietta, Emilie, Clément, Marielle, ainsi que tous ceux que j'aurais éventuellement omis. En dernier lieu, mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont à ma famille : mes très chers parents, mon frère et ma sœur. Leur présence, leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours, ainsi que leurs mots d'encouragement, ont été une source de motivation essentielle pour l'aboutissement de cette thèse.

Avant-propos

L'idée d'entreprendre une thèse de doctorat sur le mortier de chaux romain a commencé à germer pendant les séminaires portant sur les techniques et les matériaux de construction romains dispensés par la professeure Mariette de Vos Raaijmakers, au cours de mon cursus de master en architecture. À la suite de mon admission en doctorat, les nombreuses discussions stimulantes avec les membres du comité de la formation doctorale, les professeurs Redha Attoui, Khedidja Boufenara, Abdelhamid Mendjel, et Hassib Rehailia, ont contribué à structurer et à mener à maturation ce projet de thèse. C'est lors d'un court séjour à Paris que j'ai eu l'occasion de rencontrer le professeur Jacques des Courtils afin de lui exposer mon projet de thèse. Avec une grande bienveillance, il a accepté de mettre en place une cotutelle de thèse avec l'université Bordeaux Montaigne. Il m'a également présenté aux membres du LabEx Sciences archéologiques de Bordeaux (LaScArBx), en particulier le professeur Pierre Guibert, qui m'a chaleureusement accueilli au sein du laboratoire d'archéométrie. Enfin, le financement de ce doctorat a été assuré par le programme algéro-français de bourses PROFAS B+. Cette subvention a été essentielle pour l'amorce de ce travail de recherche et a contribué à créer des conditions optimales tout au long de mes investigations, jusqu'à la finalisation de cette thèse.

Sur le plan de la forme, cette thèse est présentée en deux volumes. Le premier volume comprend l'intégralité du texte ainsi que les figures de synthèse. Quant au second volume, il comporte les fiches archéométriques qui regroupent les résultats de la caractérisation des échantillons de mortier de chaux. Il est important de préciser que cette version de la thèse correspond au tapuscrit déposé préalablement à la soutenance et par conséquent, ne prend pas en compte les remarques, les suggestions et les corrections émises par les membres du jury.

En outre, je tiens à signaler que toutes les figures présentées dans les deux volumes sont le résultat de mon propre travail, sauf mention contraire spécifiée dans les légendes. Les crédits des données SIG exploitées pour élaborer les fonds de cartes sont attribués à : *Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap and the GIS user community* pour les données d'ombrage des reliefs (World Hillshade) ; *OpenStreetMap et ses contributeurs, sous licence Licence de base de données ouverte Open Data Commons (ODbL) par la Fondation OpenStreetMap (OSMF)* pour les toponymes et les données hydrographiques du nord-est de l'Algérie ; *UN-OCHA Humanitarian Data Exchange Project* pour les frontières et les divisions administratives contemporaines ; *AQUASTAT FAO-UN Land and Water Division, derived from*

the World Wildlife Fund's (WWF) HydroSHEDS drainage direction layer and a stream network layer pour les données hydrographiques mondiales (AQUAMAPS:rivers_world_47950).

Enfin, il convient de noter qu'une partie des résultats de cette thèse a été publiée dans un article scientifique intitulé : *Multianalytical characterisation and provenance investigation of natural pozzolana in Roman lime mortars from the archaeological site of Hippo Regius (Algeria)*, paru le 5 décembre 2022. Cet article figure dans le troisième numéro du volume 22 de la revue *Mediterranean Archaeology & Archaeometry*, classée A selon la liste établie par la DGRSDT et possédant les numéros e-ISSN : 2241-8121 et ISSN : 1108-9628.

Sommaire

Introduction **3**

Partie 1 : État des connaissances **9**

Chapitre I : Introduction au mortier de chaux **11**

I.1. Définitions et terminologie du mortier 11

I.2. L'évolution historique des liants architecturaux 24

I.3. Les prescriptions des auteurs anciens 34

Chapitre II : Dynamique des recherches sur le mortier romain **49**

II.1. La question du savoir-faire romain 50

II.2. La question de la provenance des matières premières 56

II.3. La question de la chronologie des structures anciennes 63

Chapitre III : État des connaissances sur la cité d'Hippone (*Hippo Regius*) **71**

III.1. Le contexte d'implantation et l'histoire de la cité 72

III.2. Les recherches archéologiques 87

III.3. Les principales découvertes architecturales 92

III.4. Les matériaux de construction employés 97

Partie 2 : Archéométrie du mortier de chaux **101**

Chapitre IV : Matériel archéologique et protocoles de l'étude archéométrique **103**

IV.1. Le protocole de prélèvement des échantillons 104

IV.2. Le protocole de préparation des échantillons 105

IV.3. Les méthodes de caractérisation archéométrique 107

IV.4. La méthode d'interprétation des résultats 111

Chapitre V : Résultats de caractérisation et classification des échantillons **119**

V.1. Les observations macroscopiques 119

V.2. Les observations microscopiques 121

V.3. La classification des échantillons 139

Partie 3 : Reconstitution du mortier de chaux **145**

Chapitre VI : Réflexions sur la provenance des matières premières **147**

VI.1. Aperçu du contexte géologique autour d'*Hippo Regius* 148

VI.2. La provenance de la pierre à chaux 153

VI.3. La provenance des sables 155

VI.4. La provenance de la pouzzolane naturelle 158

VI.5. La provenance de la pouzzolane artificielle 164
VI.6. La provenance des tesselles de mosaïques 165

Chapitre VII : Réflexions sur la chaîne opératoire et le savoir-faire 169

VII.1. La chaîne opératoire : un essai de reconstitution 170
VII.2. La mise en œuvre : entre théorie et pratique 174

Conclusion et perspectives 185

Bibliographie 189

Liste des tableaux 213

Liste des figures 214

Table des matières 217

Fiches archéométriques 225

Plans de prélèvement des échantillons 433

Introduction

Introduction

Parmi les matériaux couramment utilisés dans l'architecture antique, le mortier de chaux est « certainement le plus caractéristique de l'époque romaine » (Frizot, 1975). En effet, composé principalement d'un liant à base de chaux, de sable et, dans certains cas, d'inclusions de pouzzolanes, le mortier de chaux était abondamment utilisé par les artisans romains, que ce soit à Rome ou dans toutes les régions conquises sous la République et l'Empire. Le mortier de chaux n'était alors plus employé comme un simple enduit de protection des parois ou à des fins décoratives, comme c'était le cas dans les civilisations minoenne et mycénienne. Dans la civilisation romaine, il était également employé comme élément structurel dans les fondations, les murs et les couvertures de l'architecture monumentale (Dilaria et Secco, 2022). En outre, l'avènement et la vulgarisation de l'*opus caementicium*, permettant de produire un matériau résistant, facile à mettre en œuvre et peu coûteux, révolutionnent les techniques de construction dès les deux derniers siècles de la République romaine (Furlan et Bissegger, 1975).

Plus tard, avec l'expansion rapide de l'Empire romain, la technique du mortier de chaux a atteint un niveau de perfection élevé. Les artisans romains ont employé ce matériau pour des revêtements hydrauliques et de décoration aussi bien que pour la construction de structures monumentales. De nombreuses structures anciennes témoignent du savoir-faire romain dans la mise en œuvre de ce matériau, telles que les larges voûtes hémisphériques autoportantes à oculus du « Temple de Mercure » dans les thermes de Baïes et du Panthéon de Rome ainsi que les plafonds voûtés du temple de Minerve Medica, des thermes de Trajan et de Caracalla et ceux de l'espace central « Grande Aula » des marchés de Trajan (Lancaster et al., 2011). Ainsi, à travers l'observation des nombreuses structures romaines qui ont résisté à l'épreuve du temps, il apparaît que le mortier de chaux faisait partie des matériaux de construction privilégiés des artisans romains. Cela se manifeste non seulement, par le volume et la masse de vestiges qu'il représente (Frizot, 1975), mais également, par l'originalité et la pérennité des structures qu'il a permis d'édifier dans les diverses provinces de l'Empire romain.

La question de la durabilité des structures romaines a suscité, depuis longtemps, beaucoup d'intérêt au sein de la communauté scientifique. En effet, dès l'avènement des Encyclopédies et la révolution chimique (Coutelas et Büttner, 2009a), de nombreux savants tels que Vicat (1818), Wallace (1865), Choisy (1873), Viollet-le-Duc (1875), et Dibbin (1901) avaient entrepris de découvrir le mystère de la durabilité du mortier de chaux romain et de reconstituer les diverses « recettes » qui ont contribué à ses caractéristiques remarquables. Cependant, une partie de ces travaux a eu pour conséquence l'abandon progressif de l'utilisation

de la chaux au profit du ciment Portland artificiel, popularisé lors de l'Exposition universelle de 1851 (Furlan et Bissegger, 1975). Plus tard, l'émergence de l'archéométrie (Stern, 2001), puis les travaux de l'ICOMOS et de l'ICCROM (Válek et al., 2012) ont impulsé une nouvelle phase de recherches sur le mortier de chaux romain. Ces recherches sont caractérisées par l'adoption de méthodes associant les aspects anthropologiques et historiques aux données scientifiques. Ainsi, au-delà de ses propriétés physiques et chimiques, le mortier de chaux est considéré comme un produit anthropique qui rend compte d'un état ponctuel de la technique et du savoir-faire des artisans romains (Frizot, 1975).

Parmi ces recherches, de nombreuses études pétroarchéologiques sur le mortier de chaux romain ont fait état d'une adaptation des recettes suivant les fonctions architecturales (Coutelas, 2005, 2011). De plus, elles ont mis en évidence une forme d'interprétation des recettes par les artisans, selon la région et en fonction des conditions et des ressources géologiques locales (Frizot, 1975 ; Seigne, 2004 ; Coutelas, 2005 ; Büttner et Prigent, 2007). Ces adaptations et interprétations des recettes témoigneraient de traditions techniques et de pratiques empiriques qui dictaient une production artisanale du mortier de chaux, s'accommodant facilement des conditions locales. Or, les traités des auteurs anciens tels que *De re rustica* de Caton l'Ancien, *De architectura* de Vitruve et *Naturalis historia* de Pline l'Ancien avaient contribué à établir et à diffuser des « normes romaines » dans plusieurs secteurs, dont celui de la construction. D'après Adam (2011), ces normes se traduisent souvent par une forme de « standardisation » des procédés de préparation et de mise en œuvre des matériaux de construction.

Parallèlement, de nombreuses études, notamment celles du groupe de recherche ROMACONS (Oleson et al., 2004 ; Vola et al., 2011 ; Jackson et al., 2012, 2013) ainsi que celles plus récentes (Belfiore et al., 2015 ; Montana et al., 2018 ; Rispoli et al., 2019, 2021 ; Dilaria et al., 2022 ; Dilaria, Secco, et al., 2023), ont permis d'apporter un nouvel éclairage sur l'exploitation des ressources naturelles par les artisans romains. En effet, ces recherches ont révélé l'usage de matières premières importées des champs Phlégréens et du complexe Somma-Vésuve en Campanie ainsi que des monts Albains dans le Latium, au sein des provinces romaines localisées dans le sud de l'Europe et de la Méditerranée orientale. Cela témoigne de la conformité des artisans à la norme romaine dans l'emploi d'une pouzzolane naturelle provenant essentiellement de la région volcanique de la baie de Naples, comme le recommandent Vitruve (*De architectura*, II, 6, 2) et Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXV, 47, 1). Cela souligne également, les compétences techniques et l'expertise des artisans romains qui régissaient leurs choix des matières premières pour les intrants, même lorsque les ressources

indispensables n'étaient pas disponibles localement, écartant ainsi l'idée d'un artisanat fruste qui se serait simplement adapté aux conditions locales. Par ailleurs, dans le contexte méditerranéen, les provinces romaines d'Afrique du Nord semblent avoir fourni peu d'informations sur le mortier de chaux romain et le savoir-faire associé à sa mise en œuvre. L'étude des fours à chaux de *Tipasa* (Baradez, 1957) représente l'unique travail de recherche qui nous renseigne sur la chaîne opératoire adoptée par les artisans de cette cité de Maurétanie césarienne. En ce qui concerne l'Afrique proconsulaire, il n'existe aucune étude archéométrique sur les mortiers romains qui soit comparable à celles menées dans les provinces romaines du sud de l'Europe et de la Méditerranée orientale.

À l'échelle de l'Afrique du Nord et plus particulièrement, dans le nord-est de l'Algérie, le site archéologique d'Hippone abrite les vestiges d'*Hippo Regius*, l'une des cités les plus importantes et anciennes de la région (Marec, 1954 ; Cote et Camps, 1988 ; Manfredi et al., 2019). Du point de vue historique, *Hippo Regius* apparaît comme un microcosme de l'histoire complexe de l'Afrique du Nord. La cité a été modelée et transformée par diverses influences culturelles, politiques et environnementales au fil des siècles. Cependant, la majorité des recherches archéologiques menées sur ce site (Gsell, 1903, 1928d ; Marec, 1950, 1954, 1958) se sont principalement focalisées sur son histoire, sa relation avec la religion chrétienne, ainsi que sur des aspects tels que l'artisanat et l'architecture de ses monuments (Delestre, 2005c ; Thébert, 2003 ; Amraoui, 2017 ; Lamare, 2019), sans toutefois fournir d'analyses détaillées sur les techniques et les matériaux de construction employés dans les nombreuses structures romaines de cette cité. Par ailleurs, les recherches consacrées à la céramique d'Hippone (Morel, 1965) ainsi qu'aux techniques et aux matériaux de construction (Delestre, 2005h), suggèrent que les artisans de la cité avaient recours à des techniques de construction vernaculaires, notamment l'*opus africanum*, et produisaient des céramiques imitant celles d'Italie en utilisant des matières premières provenant de la géologie locale. D'une part, cela atteste de la capacité d'adaptation des techniques par les artisans de la cité romaine d'*Hippo Regius* et d'autre part, de la connaissance et de l'exploitation par ces artisans des ressources géologiques locales.

L'objectif de notre recherche est multiple et s'inscrit dans cette dynamique, cherchant à acquérir une compréhension approfondie des « recettes » de mortier de chaux adoptées par les artisans de la cité, ainsi qu'à reconstituer la chaîne opératoire associée à sa préparation et à sa mise en œuvre. Il convient alors de se demander **dans quelle mesure les artisans de la cité d'*Hippo Regius* étaient perméables aux « normes romaines » énoncées dans les divers textes antiques abordant la préparation et la mise en œuvre du mortier de chaux**.

Devant ce questionnement et en s'appuyant sur les résultats des précédents travaux de recherche, trois hypothèses semblent plausibles. Une première suggère que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* suivaient une approche empirique dans la préparation du mortier de chaux. Celle-ci se traduirait par une adaptation des recettes en fonction du contexte géologique local, tout en tenant compte du facteur anthropique influencé par les paramètres culturels et l'adaptation aux contraintes architecturales (Büttner et Prigent, 2007). Une deuxième hypothèse suppose, au contraire, que les artisans de la cité observaient avec rigueur les prescriptions énoncées dans les traités des auteurs tels que Caton l'Ancien, Vitruve et Pline l'Ancien. Cette rigueur se manifesterait sous la forme d'une reproduction *stricto sensu* des recommandations et des recettes telles que pratiquées à Rome, de l'extraction et du traitement des matières jusqu'à la préparation et à la mise en œuvre du mortier de chaux. Enfin, une troisième hypothèse, éloignée de tout raisonnement binaire, pose l'idée d'une forme d'appropriation des recettes « idéalisées » par les auteurs anciens. Cette appropriation se traduirait par une attention particulière prêtée par les artisans de la cité au choix des matières premières, visant à assurer une qualité aussi conforme que possible aux normes de la construction romaine de cette époque.

Ainsi, le sujet de thèse porte sur les diverses variétés de mortier de chaux employées dans les structures romaines du site archéologique d'Hippone ainsi que sur les caractéristiques de la région géologique du nord-est de l'Algérie. En outre, nous avons adopté une approche pétroarchéologique dont l'efficacité est bien établie pour l'étude des mortiers archéologiques (Frizot, 1975 ; Büttner, 2002 ; Coutelas, 2003 ; Pavía et Caro, 2008 ; Vola et al., 2011 ; Ponce-Antón et al., 2020). Pour ce faire, nous avons mobilisé des méthodes et des instruments d'analyses archéométriques tels que le microscope optique polarisant, le microscope à cathodoluminescence (CL) et le microscope électronique à balayage (MEB) couplé à la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS). Cela afin d'identifier la nature des différents constituants entrant dans la composition des échantillons de mortier de chaux, pour ensuite établir l'origine de leur provenance. En dernier lieu, nous avons combiné les données archéologiques et historiques avec les résultats archéométriques pour les confronter aux textes antiques.

Afin de répondre à notre problématique de recherche et aux hypothèses formulées, cette thèse est structurée en trois parties et comprend sept chapitres. La première partie, intitulée « État des connaissances », présente un état général de la recherche et expose les fondations scientifiques qui nous ont permis d'orienter notre positionnement épistémologique et stimuler notre réflexion autour du sujet de thèse. Cette partie comprend trois chapitres. Le premier chapitre présente l'état actuel des connaissances sur le mortier de chaux en se basant sur la

littérature scientifique. L'objectif de ce chapitre étant de reconstruire le contexte historique de l'évolution des liants architecturaux, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de la chaux depuis son émergence dans l'architecture jusqu'à sa rareté au fil de l'histoire de la construction. De plus, une attention particulière est accordée aux prescriptions techniques des auteurs anciens dont les traités fournissent des informations précieuses sur les techniques de préparation et de mise en œuvre du mortier de chaux par les artisans romains. Le deuxième chapitre se penche sur l'état actuel des recherches concernant les mortiers romains, mettant en lumière les problématiques les plus pertinentes en lien avec notre sujet de thèse. Parmi ces problématiques figurent les interrogations sur le savoir-faire romain ainsi que les questions sur la provenance des matières premières. Au-delà de la compréhension du savoir-faire romain, nous explorons également les diverses méthodes permettant la datation des mortiers anciens. Le troisième chapitre offre une synthèse des connaissances relatives au site archéologique d'Hippone. Il retrace l'historique des fouilles archéologiques, expose les découvertes architecturales majeures, et présente les publications scientifiques les plus récentes portant sur les structures du site. L'objectif de ce chapitre est d'identifier les structures romaines caractérisées par l'utilisation de diverses variétés de mortiers, toutes aussi pertinentes pour notre recherche.

La deuxième partie est intitulée « Archéométrie du mortier de chaux » et expose les choix méthodologiques ainsi que les résultats de la caractérisation archéométrique des échantillons de mortier de chaux. Cette partie comprend deux chapitres. Le quatrième chapitre aborde le protocole de prélèvement des échantillons de mortier de chaux depuis les structures romaines d'*Hippo Regius* et présente en détail le protocole de leur préparation. Il développe également, les protocoles de caractérisation à multi-échelles que nous avons mis en place, ainsi que les critères pris en considération pour l'interprétation des résultats. Le cinquième chapitre présente les résultats de la caractérisation archéométrique des échantillons. Au niveau macroscopique, il met en lumière les caractéristiques morphologiques de chaque échantillon de mortier de chaux. Au niveau microscopique, il expose en détail les caractéristiques pétrographiques et physico-chimiques du liant, de la charge et des inclusions employés dans chaque spécimen. En outre, ce chapitre propose une classification des spécimens de mortier de chaux, en fonction des critères discriminants que nous avons retenus.

La troisième partie, intitulée « Reconstitution du mortier de chaux », discute des résultats de la partie précédente en les confrontant au contexte géologique local de la cité d'Hippone ainsi qu'aux prescriptions énoncées dans les traités antiques. Cette partie comprend deux chapitres. Le sixième chapitre explore diverses hypothèses liées à l'origine des matières

premières employées dans les mortiers romains à *Hippo Regius*. Il examine d'abord le contexte géologique environnant la cité pour identifier les formations rocheuses potentiellement exploitées par les artisans romains. Ensuite, une comparaison est établie entre les caractéristiques des composants et les propriétés des ressources minérales locales, afin de déterminer s'il s'agit d'une provenance locale ou de l'importation des matières premières.

En ce qui concerne le septième chapitre, il présente d'abord, une tentative de reconstitution de la chaîne opératoire associée à la production du mortier de chaux à *Hippo Regius*. L'objectif de ce chapitre étant de comprendre, à travers l'étude de la culture matérielle, les différentes étapes de préparation de ce matériau par les artisans de la cité, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa mise en œuvre. Enfin, il comprend des comparaisons entre les différents types de mortiers que nous avons analysés et les recettes « idéales » décrites par les auteurs anciens. Cette analyse comparative vise à vérifier la corrélation entre les procédés théorisés par des auteurs tels que Vitruve et Pline l'Ancien et la réalité des faits archéologiques observés à Hippone.

Partie 1 :
État des connaissances

Chapitre I : Introduction au mortier de chaux

Introduction

Le mortier de chaux est un liant architectural utilisé dans la maçonnerie pour les jointoiements et les scellements aussi bien que dans les revêtements pour l'imperméabilisation et la décoration. Plusieurs auteurs s'accordent à dire que ce matériau a atteint son plus haut degré de développement durant les époques romaines de la République et de l'Empire (Furlan et Bissegger, 1975 ; Frizot, 1977 ; Jackson et al., 2018 ; Artioli et al., 2019). Les artisans romains, soucieux d'adapter ce matériau à leurs besoins architecturaux et à l'expansion rapide de l'Empire, sont parvenus à produire un matériau solide à toute épreuve. De nos jours, le mortier de chaux fascine encore tant par sa durabilité que par sa complexité technique, mais il reste néanmoins d'usage très peu répandu à cause de son abandon progressif au profit du ciment portland artificiel dès la révolution industrielle, ce qui engendra la perte du savoir-faire lié à sa production et à sa mise en œuvre.

Ainsi, à travers ce premier chapitre, l'objectif est de présenter un état des connaissances sur le mortier de chaux. Tout d'abord, les définitions et la terminologie associées à ce matériau sont présentées. Ensuite, une revue de la littérature scientifique est exposée afin de reconstituer le contexte historique de l'évolution des liants architecturaux, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de la chaux depuis son apparition dans l'architecture jusqu'à sa raréfaction dans l'histoire de la construction. Enfin, une attention particulière est portée aux prescriptions techniques des auteurs anciens tels que Caton l'Ancien, Vitruve et Pline l'Ancien, dont les traités fournissent des indications précieuses sur les techniques de production et de mise en œuvre du mortier de chaux par les Romains.

I.1. Définitions et terminologie du mortier

Dans le but d'assurer une cohérence terminologique et de simplifier la compréhension des discussions ultérieures, nous entamons ce chapitre par des définitions du mortier de chaux, en tenant compte de ses acceptions étymologique, archéologique et technique. Par ailleurs, il est impératif pour nous de préciser les termes du lexique courant liés aux mortiers anciens, tels que les définitions des composants comme le liant, la charge et les inclusions. En outre, il nous

est essentiel d'introduire les divers types de mortiers archéologiques que nous évoquons tout au long de cette thèse.

I.1.1. Définition au sens étymologique

Le terme « mortier » trouve son origine dans le latin *mortarium* ou *mortariolum* qui est défini, selon le Dictionnaire des antiquités grecques et romaines, comme un récipient servant à concasser et à broyer des produits agricoles et des substances médicinales à l'aide d'un pilon. Ce terme désigne également l'auget dont se servaient les maçons pour mélanger la chaux et le sable (Daremberg et Saglio, 1969). On retrouve les occurrences de *mortario* avec cette acception dans la description de la mise en œuvre des enduits chez les Grecs, faite par Vitruve « *Graecorum uero tectores non solum his rationibus utendo faciunt opera firma, sed etiam mortario collocato, calce et harena ibi confusa, decuria hominum inducta, ligneis uectibus pisant materiam* […] » (*De architectura*, VII, 3, 10), ainsi que par Pline l'Ancien « *In Graecia tectoriis etiam harenatum, quo inducturi sunt, prius in mortario ligneis uectibus subigunt* » (*Naturalis historia*, XXXVI, 55). Par extension, le produit résultant du mélange de chaux et de sable a été appelé *mortario*, correspondant ainsi à la définition courante du liant employé dans l'architecture.

I.1.2. Définition archéologique et technique

Les archéologues définissent le mortier comme le résultat du durcissement, à la suite d'une réaction chimique, d'un mélange composé d'un liant, de matériaux rocheux meubles (charge) et d'eau (Coutelas et Büttner, 2009e) susceptible d'assurer la liaison entre des éléments rocheux solides (Ginouvès et al., 1985).

D'un point de vue technique, le mortier est un matériau anthropique composé d'un liant minéral et d'une charge inerte (Büttner et Coutelas, 2011). Le liant est le plus souvent le produit de la cuisson d'une roche sédimentaire, tandis que la charge est issue de la sédimentation détritique de formations géologiques variées (ignées, métamorphiques ou sédimentaires). Les propriétés des mortiers anciens pouvaient être améliorées avec l'ajout d'adjuvants (inclusions), durant leur mise en œuvre afin d'augmenter leur résistance, leur durabilité et leur hydraulicité[1].

[1] L'hydraulicité correspond aux propriétés de prise des mortiers sous l'eau, à une meilleure durabilité lorsqu'ils sont utilisés dans des milieux humides ainsi qu'une résistance mécanique supérieure. Elle est rendue possible par la formation de silicates et d'aluminosilicates de calcium hydratés, lors des réactions entre le liant à base de chaux et les granulats réactifs (pouzzolane naturelle ou artificielle) ou lorsqu'est utilisée une chaux hydraulique, issue de la calcination d'une roche calcaire contenant une fraction argileuse.

I.1.3. Terminologie relative aux composants

En suivant la définition du mortier comme matériau composite de nature anthropique, il est de rigueur de donner une définition pour chaque composant qui rentre dans sa formulation, ainsi que le vocabulaire et les termes retenus pour désigner les trois composants les plus fréquents dans les mortiers anciens, en dehors de l'eau de gâchage.

I.1.3.1. Le liant

De la même manière que le liant architectural assure la cohésion entre les éléments d'un appareil composé de moellons ou de briques, le liant est un composant essentiel du mortier qui est destiné à assurer la cohésion entre les grains qui constituent la charge (Frizot, 1975 ; Coutelas et Büttner, 2009e). Ainsi, ce terme qualifie toute substance minérale employée dans les mortiers anciens, de consistance pâteuse lors de la mise en œuvre du mortier et destinée à se solidifier par la suite. Dans le cadre de l'étude des mortiers anciens, on peut être amené à trouver des spécimens dont le liant est constitué de terres argileuses, de plâtre ou de chaux.

I.1.3.1.1. Le liant à base de terres argileuses

Les limons et les terres argileuses sont disponibles en abondance dans la nature et sont composés de phyllosilicates (silicates en feuillets) présentant une structure atomique feuilletée, où chaque feuillet est constitué de couches de tétraèdres de silice ou d'alumine et de couches d'octaèdres d'oxydes métalliques (Feneuille et al., 2016). Cette structure confère aux argiles la propriété de gonflement par humidification et de contraction par séchage, grâce à l'espace entre les feuillets qui leur permet d'absorber et de rejeter de l'eau et par conséquent d'en modifier le volume et la plasticité. Les propriétés de ce type de liant sont donc inhérentes à la quantité d'argiles que contiennent ces terres. Les avantages du liant à base de terres argileuses sont sa disponibilité, sa facilité d'utilisation et par conséquent, son faible coût.

I.1.3.1.2. Le liant à base de plâtre

Contrairement aux argiles, le plâtre est un produit anthropique obtenu par calcination du gypse à faible température (entre 130 et 150 °C). Le gypse est une roche sédimentaire de type évaporite composée de dihydrate de sulfate de calcium ($CaSO_4$, 2 H_2O), qui se forme principalement dans les lagunes marines ou lacustres par évaporation d'eau salée ou saumâtre. Lors de sa calcination, le gypse perd une partie de son eau pour devenir hémihydrate de sulfate de calcium ($CaSO_4$, ½ H_2O), produisant ainsi du plâtre qui sera réduit et utilisé en poudre.

Lors de la mise en œuvre du mortier de plâtre, l'hydratation de l'hémihydrate de sulfate de calcium le transforme en dihydrate de sulfate de calcium qui forme rapidement des cristaux de gypse ($CaSO_4$, 2 H_2O) en formes d'aiguilles. Les avantages liés à l'utilisation d'un liant à base de gypse sont sa faible température de calcination qui ne nécessite qu'une faible quantité de combustible, sa résistance au feu, ainsi que la possibilité de l'employer sans ajout de charge sableuse (Coutelas et Büttner, 2009e). Cependant, du fait de leur nature minéralogique, les mortiers de plâtre présentent une faible durabilité lorsqu'ils sont exposés à des environnements humides. De même, la disponibilité du gypse est restreinte aux formations sédimentaires des environnements évaporitiques.

I.1.3.1.3. Le liant à base de chaux

Comme le plâtre, la chaux est une substance qui ne se trouve pas à l'état naturel, mais nécessite une action anthropique dans le processus de sa formation. Elle est produite par calcination de roches calcaires composées de carbonate de calcium ($CaCO_3$), l'un des minéraux les plus courants et les plus répandus dans la croûte terrestre (Dix, 1982) et ce, à des températures élevées (entre 830 et 1 100 °C). Lors de la calcination des roches carbonatées à environ 900 °C, chaque molécule de carbonate de calcium ($CaCO_3$) nécessite 42,5 kcal d'énergie pour se décomposer en oxyde de calcium (CaO) et en dioxyde de carbone (CO_2), produisant la réaction endothermique suivante :

$$CaCO_3 + 42{,}5 \text{ kcal} \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (1)$$

L'oxyde de calcium obtenu est pulvérulent et constitue la chaux vive qui nécessite d'être hydratée par aspersion ou immersion dans l'eau. L'extinction de la chaux vive produit de l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$), également appelé « portlandite », selon la réaction exothermique suivante :

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15{,}5 \text{ kcal} \qquad (2)$$

La chaux éteinte qui résulte de cette réaction présente une consistance pâteuse qui est facilement utilisable lors de la préparation du mortier. Tandis que le bain ayant servi à l'extinction constitue un sous-produit appelé « lait de chaux », qui peut servir à la réalisation d'enduits peints. Après la mise en œuvre du mortier, la chaux éteinte entame la « prise » par réaction de carbonatation, en entrant en contact avec le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère. La carbonatation correspond à la phase finale du cycle de la chaux et conduit à la formation de carbonate de calcium ($CaCO_3$) selon la réaction suivante :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (3)$$

Cette réaction engendre la formation de calcite par cristallisation du carbonate de calcium et par conséquent, la cimentation des granulats et la solidification du mortier. Entre 60 et 70 % de l'hydroxyde de calcium est transformé en carbonate au bout de deux à trois semaines (Coutelas et Büttner, 2009e). Cependant, cette réaction peut durer jusqu'à environ un an avant que le mortier ne soit totalement carbonaté. Enfin, en présence d'éléments réactifs (inclusions de cendres volcaniques ou organiques, de tuileaux, *etc*.), des réactions supplémentaires se produisent avec le liant à base de chaux pour former des aluminosilicates de calcium hydratés (C-A-S-H) qui contribuent à accélérer la prise et améliorent les performances du mortier. La qualité finale de la chaux est intimement liée à la composition minéralogique de la roche calcaire choisie, qu'elle soit de la craie, du marbre ou de la calcite pure (Feneuille et al., 2016). Ainsi, suivant le calcaire utilisé, on distingue trois types de chaux : la chaux aérienne, la chaux hydraulique et la chaux magnésienne.

La chaux aérienne est obtenue par calcination des calcaires les plus purs (Frizot, 1975). Ainsi, la calcination des calcaires dits « très purs » qui contiennent moins de 1 % d'argiles produit une « chaux grasse », tandis que les calcaires qui contiennent une fraction argileuse comprise entre 2 et 8 % produisent une « chaux maigre ». Cette dernière est jugée moins facile à mettre en œuvre, car elle a une consistance moins onctueuse en raison de la présence d'argile (Adam, 2011). Cette chaux est qualifiée d'aérienne, car le phénomène de la prise doit se faire en contact avec l'air pour permettre la carbonatation. Quant à la chaux hydraulique, elle est obtenue par calcination de calcaires « impurs » contenant une fraction d'argiles comprise entre 8 et 20 %. La présence de phyllosilicates implique une cuisson de la roche calcaire, à des températures plus élevées allant jusqu'à 1 100 °C. Cependant, la prise ne nécessite pas une exposition au CO_2 atmosphérique pour permettre la carbonatation de la chaux. Ainsi, elle possède la propriété de durcir sous l'eau et de former des masses imperméables (Ginouvès et al., 1985). Cette propriété est due à la présence d'impuretés formées d'argiles riches en silice (SiO_2), en alumine (Al_2O_3) et en oxyde de fer (Fe_2O_3) qui réagissent avec le calcium pendant la cuisson pour former des silicates, aluminates et ferro-aluminates de calcium qui, au contact de l'eau, forment des hydrates insolubles (C-S-H et C-A-S-H). Enfin, le dernier type de chaux est la « chaux magnésienne ». Également appelée chaux dolomitique, elle est obtenue par calcination de calcaires dolomitiques qui contiennent une fraction de magnésium supérieure à 5 % qui produit de l'hydroxyde de magnésium[2] ou brucite ($Mg[OH]_2$) en plus de la portlandite.

[2] La formation d'hydroxyde de magnésium dans un liant à base de chaux magnésienne, qui se transforme en brucite lors de la prise du mortier a un impact sur le phénomène de carbonatation et la formation de carbonate de calcium. Ainsi, les mortiers à base de chaux magnésienne présentent un plus grand retrait lors de la prise et une faible résistance physico-mécanique en comparaison avec les mortiers à base de chaux aérienne ou hydraulique (Arizzi

L'utilisation d'un liant à base de chaux pour la mise en œuvre des mortiers présente de nombreux avantages dont, une bonne résistance mécanique grâce à la cristallisation de calcite dans la matrice, une meilleure résistance dans les environnements humides et la propriété de prise sous l'eau. De plus, la lenteur de la prise due au phénomène de carbonatation confère aux mortiers une plasticité permettant « un tassement lent et progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation » tout en assurant une meilleure répartition des pressions (Büttner, 2020b). Cependant, la chaux présente également des inconvénients : sa production nécessitant des températures de cuisson élevées, implique une forte consommation de combustible (bois et charbon de bois) et par conséquent un coût plus élevé, comparé à celui des liants à base de plâtre ou de terres argileuses. De même, elle nécessite des connaissances techniques évoluées pour la maîtrise des réactions liées aux phases de production de la chaux (calcination, hydratation et carbonatation) et des réactions pouzzolaniques par l'ajout d'éléments réactifs. Enfin, les mortiers à base de chaux subissent un retrait lors de la prise, ce qui rend indispensable le recours à l'ajout d'une charge sableuse au mélange pour remédier à ce problème.

I.1.3.2. La charge

Dans les liants architecturaux, la charge est la composante qui constitue l'ossature du mortier. Elle est formée de granulats inertes qui sont peu, voire pas réactifs avec le liant et sont issus de roches sédimentaires meubles, généralement des sables. La charge sableuse a pour effet d'assurer le maintien du volume lors de la prise du mortier à base de chaux par carbonatation (Coutelas et Büttner, 2009e) et d'en neutraliser le retrait. Elle aide également, à maintenir une certaine porosité dans le liant architectural à base de chaux, pour permettre la prise par carbonatation de la totalité du mortier en assurant la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2) jusqu'au cœur de la masse (Elert et al., 2002). Sans cela, le mortier à base de chaux risquerait de conserver une certaine plasticité, ce qui peut entraîner des tassements et des glissements (Coutelas, 2003), mettant ainsi en péril la stabilité de la structure.

Les sables composant la charge peuvent être de distributions granulométriques hétérogène ou homogène avec des dimensions de grains comprises entre 0,063 mm et 2 mm (Ginouvès et al., 1985). Les granulats de dimensions inférieures à 0,063 mm sont considérés comme des limons et des argiles, alors que les granulats de tailles supérieures à 2 mm (et jusqu'à 20 mm) sont considérés comme des graviers (Frizot, 1975). Enfin, on distingue généralement trois types de charges dans les mortiers anciens, classés suivant les compositions chimiques et

---

et Cultrone, 2012). De plus, ces mortiers favorisent la formation de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) qui a pour effet la dégradation des pierres de construction (Vaschalde et al., 2016).

minéralogiques (Feneuille et al., 2016) des sables utilisés : la charge siliceuse, la charge silico-calcaire et la charge calcaire.

I.1.3.2.1. La charge siliceuse

La charge siliceuse correspond au sable de carrière qui est composé principalement de cristaux de quartz et de feldspaths, ainsi que de fragments de roches siliceuses qui proviennent de la sédimentation naturelle des débris issus de roches mères désagrégées. Ces roches peuvent être généralement de nature magmatique intrusive (roches plutoniques) comme les granites et les gabbros, de nature métamorphique comme les micaschistes et les gneiss, ou de nature sédimentaire comme les grès siliceux, les arénites quartzeuses ou encore les quartzites.

Dans le cas d'un sable composé essentiellement de fragments de granite et de ses minéraux accessoires (muscovite et biotite), on parle d'un sable granitique ou d'une arène granitique (Coutelas, 2012).

I.1.3.2.2. La charge silico-calcaire

On entend par charge silico-calcaire, un sable formé par des débris de roches plutoniques, métamorphiques et sédimentaires constituant des dépôts siliceux contenant des quartz, des feldspaths alcalins et plagioclases ainsi que des minéraux accessoires, auxquels s'ajoutent des cristaux de calcite, des fragments de bioclastes et des fragments de roches calcaires. Les roches calcaires peuvent être de formation sédimentaire comme les grès calcaires ou avoir été consolidées par la diagenèse comme les biomicrites et les biosparites (roches fossilifères). Les fragments calcaires peuvent également être issus de l'altération naturelle des roches métamorphiques comme le marbre.

I.1.3.2.3. La charge calcaire

La charge calcaire est quant à elle constituée exclusivement de dépôts issus de l'altération naturelle de roches sédimentaires carbonatées comme des biomicrites, des biosparites et des calcarénites caractérisées par la présence de microfossiles dans une matrice carbonatée (Coutelas et Büttner, 2009c). La charge peut également, être composée de cristaux de calcite et de dolomite, issus de l'altération naturelle ou anthropique de roches métamorphiques dérivant du calcaire comme les marbres.

I.1.3.3. Les inclusions

Contrairement à la charge qui est considérée comme un composant inerte, les inclusions constituent l'ensemble des éléments réactifs, riches en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3), qui sont rajoutés, lors de la mise en œuvre pour réagir chimiquement avec le liant à base de chaux et conférer aux mortiers les propriétés de résistance à l'humidité et de prise sous l'eau.

On qualifie ces interactions chimiques de réactions « pouzzolaniques » en raison de la nature des granulats utilisés dans les mortiers anciens, tels que décrits par Vitruve dans le chapitre « *De pulvere Puteolano* » (*De architectura*, II, 6). On distingue dans les pouzzolanes[3], deux types de granulats : les granulats d'origine naturelle comme les cendres volcaniques et les granulats d'origine artificielle comme le tuileau ou les cendres issues de la combustion de produits organiques (plantes, carcasses d'animaux, *etc*.).

I.1.3.3.1. Les pouzzolanes naturelles

La catégorie des pouzzolanes naturelles comprend les granulats de nature « pyroclastique » produits lors des éruptions volcaniques explosives. Les produits de ces éruptions se présentent sous les formes de cendres volcaniques, de tufs volcaniques (débris volcaniques consolidés) et de pierres ponces (Boffey et Hirst, 1999). Ces fragments pyroclastiques sont naturellement riches en silice et en alumine et une fois introduits dans un liant architectural à base de chaux, ils réagissent avec l'hydroxyde de calcium au contact de l'eau pour produire des silicates et aluminosilicates de calcium hydratés (C-A-S-H). Les pouzzolanes naturelles sont généralement, utilisées directement lorsqu'elles se présentent sous une forme pulvérulente comme les cendres et les sables volcaniques (ponces), mais peuvent également, être broyées et réduites en poudre comme cela a pu être le cas de tufs volcaniques, comme l'indiquent des traces de tuf volcanique concassé, retrouvées à Pergame (*Pergamum*) et *Sagalassos* (Lancaster, 2019).

I.1.3.3.2. Les pouzzolanes artificielles

Les pouzzolanes artificielles sont la catégorie des granulats réactifs résultants de la production humaine, ayant été utilisées dans les mortiers anciens en remplacement des pouzzolanes naturelles, lorsqu'elles étaient encore méconnues ou n'étaient pas disponibles localement. On recense dans cette catégorie le tuileau, produit par le recyclage de terres cuites

[3] Le terme « pouzzolane » est issu du latin *puteolanus* qui qualifie les granulats réactifs d'origine volcanique provenant de *puteoli* l'actuelle ville de Pouzzoles (Lancaster, 2005) et qui se situe dans la baie de Naples, en Italie. L'expression *pulvis puteolanus* correspond à sable de Pouzzoles et apparaît dans les textes de Sénèque (*Naturales quaestiones*, III, 20, 3) et de Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXV, 13, 2).

architecturales (briques, tuiles, *etc*.) et des poteries en céramique (amphores, ustensiles domestiques, *etc*.). Ainsi, les fragments de céramique concassés peuvent être directement incorporés dans les mortiers ou réduits en poudre pour augmenter la surface de contact (surface spécifique) entre les particules de céramique et la chaux (Coutelas, 2003). Dans les pouzzolanes artificielles figurent également les cendres produites lors de la calcination de matières organiques d'origines végétale et animale (Lancaster, 2019 ; Secco et al., 2020). L'ensemble de ces inclusions, d'origine anthropique, présente des teneurs en silice et en alumine analogues aux pouzzolanes naturelles, permettant ainsi d'obtenir des réactions pouzzolaniques dans les liants architecturaux à base de chaux.

Enfin, d'autres types de granulats, plus ou moins réactifs, peuvent avoir été introduits dans les mortiers anciens, de manière intentionnelle ou accidentelle (Palazzo-Bertholon, 2000). Nous donnons, comme exemples, des débris du mortier mis en œuvre qui peuvent y avoir été inclus par contamination ou comme composant inerte de la charge. Aussi, des fragments de charbon de bois peuvent être rencontrés dans les mortiers anciens et sont issus, le plus souvent, de la contamination de la chaux pendant la calcination de la roche calcaire.

I.1.4. Classification typologique des mortiers

La typologie des mortiers a évolué concomitamment avec le développement de l'architecture afin de s'adapter aux nouvelles exigences des fonctions architecturales. Elle est passée de l'enduit de protection et de décoration, aux liants architecturaux utilisés dans les ouvrages structurels, tels que les maçonneries de blocage ou « *opus caementicium* ». Parmi les critères de classification des mortiers, nous retenons deux critères principaux pour les mortiers anciens : la nature du liant utilisé et les usages des mortiers.

I.1.4.1. Classification en fonction de la nature du liant

Dans cette catégorie, les mortiers sont classés selon la nature chimique des substances utilisées pour cimenter les granulats, à savoir les phases liantes de natures minérale ou organique.

I.1.4.1.1. Les liants minéraux

Les mortiers à base de liants minéraux sont les plus souvent rencontrés dans l'architecture. Le liant utilisé pouvant être soit d'origine naturelle comme l'argile ou bien d'origine anthropique comme le plâtre, la chaux ou plus récemment, le ciment Portland. On

parle alors, pour les mortiers anciens de : mortier de terres argileuses, mortier de plâtre ou mortier de chaux.

I.1.4.1.2. Les liants organiques

Les mortiers à base de liants organiques sont, quant à eux, rencontrés de manière anecdotique dans l'architecture. Le liant utilisé est souvent, d'origine naturelle comme le bitume et l'asphalte, qui ont été largement employés par les Babyloniens et les Assyriens pour lier les murs en maçonnerie de briques (Feneuille et al., 2016). D'ailleurs, l'utilisation d'un mortier de maçonnerie à base de bitume à Babylone est mentionnée par Vitruve dans « *Non enim uti Babylone abundantes liquido bitumine, pro calce et harena, et cocto latere factum habent murum* […] » (*De architectura*, I, 5, 8). D'autres mélanges à base de fleur de chaux et de produits organiques comme la résine végétale dure, la cire blanche ou encore du sang de bœuf, sont répertoriés dans l'ouvrage *Artis architectonicae privatis usibus adbreviatus liber* de Cetius Faventinus ; ce sont principalement des mastics destinés à colmater des brèches dans les bassins, à recoller le verre ou encore à rendre le marbre brillant (Coutelas et Büttner, 2009e).

I.1.4.2. Classification en fonction des usages des mortiers

Le second critère discriminant retenu est la fonction des mortiers. En effet, nous pouvons rencontrer dans l'architecture une large variété de mortiers avec des compositions qui peuvent être analogues, mais avec des utilisations différentes. Les mortiers peuvent alors, servir de liants architecturaux dans les maçonneries, être appliqués sous forme d'enduits de protection et de décoration, voire être utilisés comme bétons dans les ouvrages destinés à supporter des charges structurelles importantes.

I.1.4.2.1. Les mortiers de maçonnerie

Il s'agit de mortiers de pose, servant à assurer la cohésion entre les éléments d'une structure maçonnée en petit ou moyen appareil réalisée avec des moellons ou des briques de terres cuites « *opus testaceum* ». Ces mortiers sont monocouches et homogènes et sont généralement composés d'un liant à base de chaux, d'une charge et peuvent inclure de la pouzzolane. Les mortiers de maçonnerie comprennent également le mortier de blocage (Coutelas et Büttner, 2009h), également appelé « *opus caementicium* », considéré comme un béton[4] et qui consiste en un mélange de chaux et d'une charge composée de gros granulats

[4] On peut parler de béton lorsque les dimensions des agrégats qui composent la majeure partie de la charge sont de la taille des graviers et des galets (c'est-à-dire entre 2 mm et 20 mm). Le mélange de ces agrégats mélangés à la chaux durcit de la même manière que les mortiers, une fois coulé dans la construction (Ginouvès et al., 1985 ; Coutelas et Büttner, 2009e).

(fragments de roches, de moellons et de fragments de céramique recyclée), appelés « *caementa* » et dont les dimensions varient de 10 à 30 cm (Lancaster, 2015). La mise en œuvre du mortier de blocage est tripartite : il est pris entre deux parements en briques ou en moellons. Ainsi, la fonction structurelle du mur est assurée par le blocage, tandis que les parements des deux côtés ne servent qu'à l'habillage.

I.1.4.2.2. Les mortiers de jointoiement ou de regarnissage des joints

Il s'agit de mortiers appliqués après coup, pour protéger le mortier de pose d'une maçonnerie, en comblant les espaces présents entre les moellons. Ce type de mortier protège le mortier de pose d'une dégradation prématurée, surtout si ce dernier présente une faible teneur en chaux ou une forte teneur en sable (Coutelas et Büttner, 2009g). Ainsi, le mortier de regarnissage des joints permet d'améliorer la durabilité des parements des structures maçonnées.

I.1.4.2.3. Les mortiers de toitures

Bien que les systèmes de couvertures anciennes à *tegulae* et *imbrices* reposent sur la fixation par clous des tuiles sur la charpente, un mortier de toiture pouvait, dans certains cas, être utilisé pour fixer les tuiles directement sur le remplissage recouvrant l'extrados d'une voûte. De plus, le mortier de toiture pouvait être utilisé pour sceller l'imbrication des *tegulae* et des *imbrices* et les maintenir en place en cas de fortes rafales ou lorsque les tuiles étaient disposées sur une charpente présentant une pente importante (Coutelas, 2003).

Il serait tentant d'associer à ce type de mortier des propriétés hydrauliques, pour assurer une étanchéité complémentaire aux tuiles en terres cuites, toutefois, la composition des fragments de mortiers, retrouvés lors de fouilles archéologiques, ne comprend généralement pas de tuileau (Coutelas et Büttner, 2009k). Ils sont composés, le plus souvent, d'un liant à base de chaux comprenant une charge siliceuse très pure.

I.1.4.2.4. Les mortiers pour les revêtements de sol

Le traitement des sols dans l'architecture antique était souvent réalisé avec des matériaux meubles ou périssables comme la terre battue ou le bois, et ce principalement dans les bâtiments à usage privé (Coutelas et Büttner, 2009i). Cependant, les sols de certains espaces étaient maçonnés et recevaient des décors en mosaïques, des dalles en marbre ou encore des revêtements bétonnés. Les mortiers devant servir à la réalisation de sols en mosaïques ou « *opus tessellatum* » étaient généralement composés d'un radier et de couches de préparation et de finition (*statumen*, *rudus*, *nucleus*) destinés à assurer la stabilité du sol et à supporter les charges. Ces couches de mortier sont de compositions différentes, avec une variation dans la

charge utilisée dans chacune des couches. Lorsque le sol en mosaïque était destiné à des pièces humides, du tuileau finement broyé était ajouté aux couches de préparation et de finition. Les sols dallés en roches calcaires et en marbres étaient réalisés avec un mortier monocouche disposé sur un radier. Il est généralement composé d'un liant à base de chaux comprenant une charge siliceuse ou silico-calcaire avec des inclusions de céramique. L'ajout du tuileau permet une prise rapide du support, une bonne adhérence des dalles et une meilleure résistance à l'humidité (Coutelas et Prigent, 2009). Enfin, le revêtement en béton de tuileau, également appelé « *cocciopesto* » ou « *opus signinum* » (Ginouvès et al., 1985), est constitué d'un mélange de liant à base de chaux, de fragments de tuileau de la dimension des graviers (supérieur à 2 mm) et d'une charge siliceuse en faible quantité. Ce type de revêtement supporte aussi bien les fortes charges que la chaleur et le feu. Ainsi, dans les thermes romains, la dalle suspendue au-dessus de l'hypocauste (dalle de *suspensura*) était réalisée avec un béton de tuileau (Ginouvès, 1992), qui pouvait être lissé en surface ou être recouvert d'un dallage en marbre.

I.1.4.2.5. Les mortiers pour les supports de placages

Les placages de marbres sont des revêtements de décors pariétaux, d'usage très répandu dans l'architecture romaine, qui recouvraient généralement les parties basses des murs. Ils reposent sur une technique de pose spécifique : des crampons métalliques étaient insérés entre les briques ou les moellons du parement pour maintenir en place les plaques de marbre, le temps que le support en mortier durcisse et maintienne définitivement le décor en place (Coutelas et Prigent, 2009). Le support en mortier était réalisé en plusieurs couches successives, avec des épaisseurs décroissantes du mur vers le placage. Il est composé d'un mélange à base de chaux comprenant du tuileau et du sable. Des cales concaves en terre cuite étaient parfois insérées dans le support, à proximité des bords de plaques en marbre, pour réduire la résistance du mortier (Ball, 2002) et ainsi, faciliter l'ajustement du décor pendant sa pose.

I.1.4.2.6. Les mortiers d'étanchéité

Les mortiers étaient souvent employés pour assurer l'étanchéité dans les espaces humides et les ouvrages hydrauliques comme les thermes, en raison de leurs capacités à limiter les infiltrations et à prendre sous l'eau. On retrouve dans cette catégorie les joints d'étanchéités réalisés sous les formes de bourrelets en quart-de-rond ou en triangle rectangle (Coutelas et Büttner, 2009f), au niveau des jonctions des parois horizontales et verticales des bassins et des piscines. Ils sont le plus souvent composés d'une seule couche qui est constituée d'un liant à base de chaux, d'une charge sableuse et des inclusions de céramique. La pouzzolane naturelle pouvait être également utilisée, pour augmenter l'indice d'hydraulicité du mortier. On retrouve

également les chapes d'étanchéité dans cette catégorie, réalisées avec un béton de tuileau, coulé et lissé au-dessus des structures de couvrement, dans le but d'apporter une meilleure étanchéité aux ouvrages. Elles sont de compositions similaires à celles des revêtements de sol en « *opus signinum* ».

I.1.4.2.7. Les enduits d'étanchéité et de protection

Bien qu'ils soient de compositions analogues aux mortiers, les enduits se distinguent des mortiers en fonction de leur usage. En effet, ils sont destinés à recouvrir et protéger les sols et les parements, contrairement aux mortiers qui assurent la liaison entre les éléments architecturaux (Palazzo-Bertholon, 2000).

Les enduits de protection contre l'humidité se trouvent le plus souvent, à la base des murs et se composent d'une seule couche de mortier, constitué d'un liant à base de chaux, d'une charge sableuse et d'inclusions de céramique. D'autres enduits de composition similaire étaient destinés à protéger les parements des *praefurnia* et des *tubuli* dans les hypocaustes des thermes. Ils présentent quelquefois, un liant à base d'argile, mais le plus souvent une composition à base de chaux, d'une charge sableuse et de céramique concassée, avec une exécution en deux couches successives. Les enduits d'étanchéité étaient, quant à eux, destinés aux ouvrages en contact permanent avec l'eau tels que les bassins, les piscines et les citernes. Ils étaient réalisés par la superposition de couches successives de mortier et d'enduit, composés d'un liant à base de chaux comprenant une charge sableuse et des inclusions de céramique concassée. Les inclusions de céramique y jouent un rôle important pour assurer un indice d'hydraulicité élevé et présentent une variation décroissante dans la taille du granulat, de la couche de préparation à la couche de finition.

I.1.4.2.8. Les enduits de décoration

Les enduits pouvaient également être destinés à recevoir un décor, des fresques ou des peintures. Ces décors étaient réalisés avec des techniques d'exécution variées, sur des supports frais ou secs, à base de chaux ou de plâtre (Coutelas et Palazzo-Bertholon, 2009). Les enduits exécutés *a fresco* sont composés d'une superposition de couches (*rinzaffo*, *arricio*, *intonaco*, *intonachino*) d'épaisseurs décroissantes, de la couche de préparation à la couche d'épiderme. Les couches de préparations sont composées d'un mortier ordinaire à base de chaux comprenant une charge siliceuse, tandis que les couches de finition et d'épiderme sont réalisées avec un mélange de chaux et d'un sable calcaire riche en cristaux de calcite, généralement de la poudre de marbre (Ginouvès et al., 1985 ; Adam, 2011). Ces dernières couches étaient destinées à recevoir le dessin préparatoire de la fresque (*sinopia*). Les pigments étaient déposés en surface

pour être fixés par la carbonatation de l'enduit, au contact du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique.

I.1.4.2.9. Les enduits de stuc

Contrairement à l'enduit peint, l'enduit de stuc ou « *opus albarium* », est un décor architectural en relief façonné par modelage ou moulage, sur un support à base d'un liant minéral anthropique (Coutelas et Palazzo-Bertholon, 2009). Cette technique de décor était généralement exécutée en deux à trois couches de préparation et de finition. Les couches de préparation sont constituées d'un mortier ordinaire à base de plâtre ou de chaux comportant une charge sableuse, tandis que la couche de finition est composée d'un mélange de plâtre ou de chaux, d'une poudre de marbre et d'une colle organique (Ginouvès et al., 1985). Ainsi, l'enduit de stuc était employé pour créer des éléments de décors architecturaux factices, destinés à reproduire des éléments habituellement en marbre.

Ainsi, à travers cette liste non exhaustive, de types de mortiers, on s'aperçoit que les bâtisseurs ont réussi, depuis la préhistoire, à adapter les recettes et les techniques de mise en œuvre des mortiers, en fonction de leurs besoins architecturaux et des matières premières qui pouvaient s'offrir à eux.

I.2. L'évolution historique des liants architecturaux

Même si cette recherche s'intéresse principalement aux mortiers produits durant la période romaine en Afrique du Nord, il est de rigueur que l'on s'intéresse aux liants architecturaux dans un contexte historique général. La reconstitution de la chronologie de ces matériaux, de période préhistorique à la période moderne, nous permet de saisir les grandes phases de leurs mutations.

I.2.1. Dans l'architecture préhistorique

Plusieurs preuves de l'utilisation de liants architecturaux à base d'argiles nous proviennent de sites africains datant du Paléolithique, attestant du début de l'utilisation des liants architecturaux « naturels » dès l'apparition des premières civilisations humaines (Dilaria et Secco, 2022). Mais ce n'est qu'à partir de l'Épipaléolithique que les premiers liants « anthropiques » à base de chaux, ont été produits au Proche-Orient. En effet, des traces de carbonate de calcium recristallisé ont été découvertes sur des microlithes de quartz trouvés sur le site Lagama Nord VIII du Kébarien géométrique (12000 av. J.-C.). Ces traces indiquent la présence de chaux, qui devait servir de colle aux microlithes (Goring-Morris et Belfer-Cohen,

1997). Plus tard, avec la formation d'établissements humains et leur sédentarisation, ces populations ont commencé à considérer la construction de manière pérenne (Coutelas et Büttner, 2009a). Cette volonté d'une architecture durable s'est traduite par les premières utilisations de la chaux comme liant architectural, à partir du Natoufien, sur les sites préhistoriques de Hayonim (10400 – 10000 av. J.-C.) et de Aïn Mallaha (9000 av. J.-C.).

I.2.2. Dans l'architecture protohistorique

Durant le Néolithique précéramique B (PPNB), la production de la chaux se développe et se diffuse dans plusieurs territoires du Levant et d'Anatolie (fig. 1), où la chaux est utilisée exclusivement à des fins architecturales, notamment pour les revêtements des sols et des murs (Kingery et al., 1988). Des traces archéologiques de ces revêtements ont été retrouvées dans les établissements néolithiques de Byblos (8800 - 7000 av. J.-C.), Aïn Ghazal (8300 - 5800 av. J.-C.), Yiftahel (8000 - 7000 av. J.-C.), Çatal Höyük (7560 - 4340 av. J.-C.), Tell Ramad (7230 - 6800 av. J.-C.), Hacilar (7040 av. J.-C.).

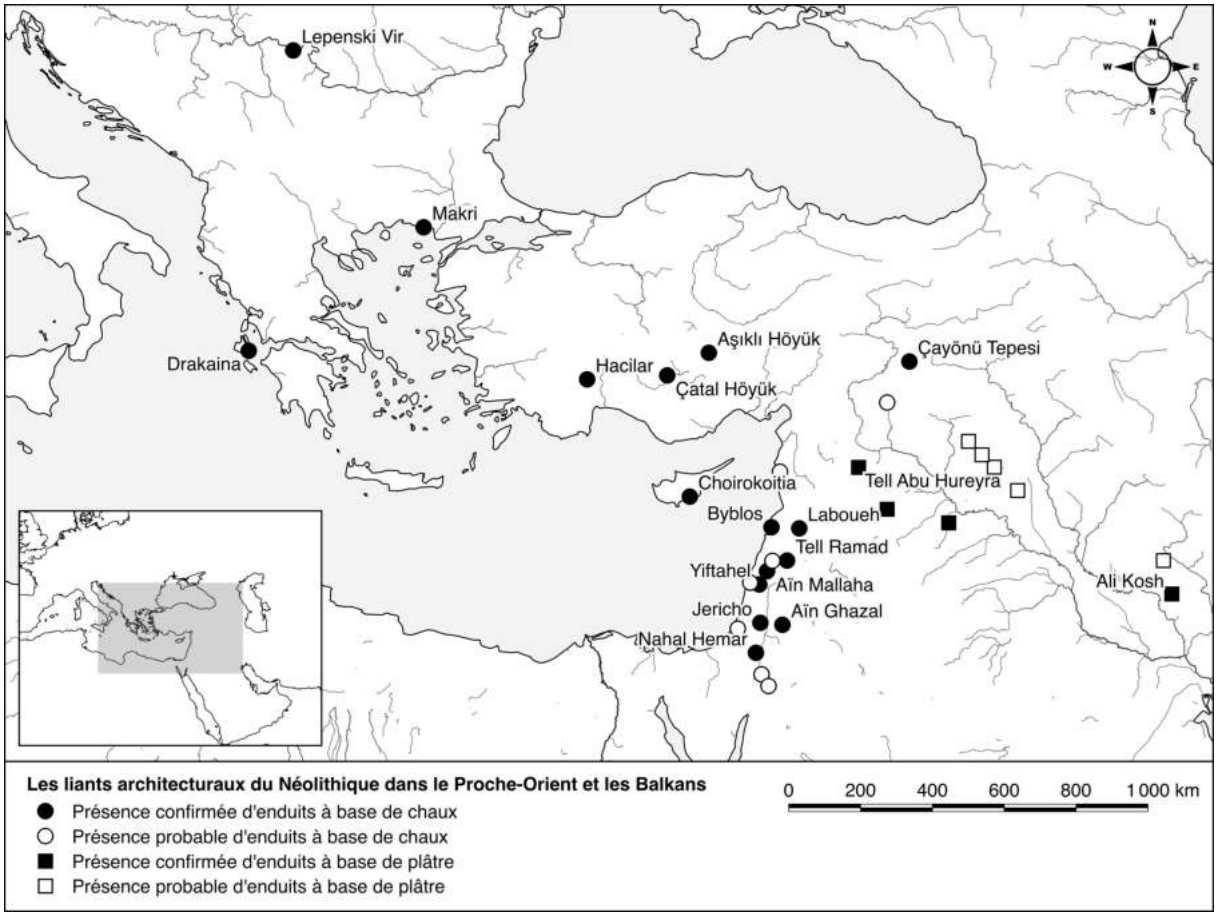

Figure 1 : Localisation des villages et établissements néolithiques où les premiers liants architecturaux à base de chaux et de plâtre ont été identifiés (d'après Hole et Flannery, 1962 ; Moore et al., 1975 ; Kingery et al., 1988 ; Karkanas, 2007 ; Bonsall et al., 2008 ; Philokyprou, 2012)

Cependant, c'est depuis Aşıklı Höyük (8200 - 7400 av. J.-C.) que nous parvient le témoignage de la première réaction pouzzolanique (Hauptmann et Yalcin, 2000) identifiée dans un revêtement de sol. Cette réaction a été obtenue par le mélange de particules de tuf volcanique broyé à l'enduit à base de chaux destiné au revêtement.

D'autres revêtements réalisés avec des enduits, dans lesquels la présence de la chaux a été confirmée, ont été retrouvés dans des sites néolithiques de la péninsule balkanique, notamment les habitats primitifs de Makri à Thrace et de Drakaina, dans l'île de Céphalonie (Karkanas, 2007), le village de Lepenski Vir, situé sur la rive sud du Danube, où les enduits sont datés entre 6300 et 5700 av. J.-C. (Bonsall et al., 2008) ainsi que les établissements de Kalavasos-Tenta et Choirokoitia à Chypre (Philokyprou, 2012). Ces exemples prouvent l'existence, au sein des sociétés primitives du Néolithique, d'une industrie de production de chaux qui nécessitait un travail de groupe coordonné (Garfinkel, 1987), ainsi qu'une maîtrise de la pyrotechnologie et du procédé de calcination des roches calcaires.

Plus à l'est, des enduits à base de plâtre ont été découverts dans des sites néolithiques du Levant et du Moyen-Orient (fig. 1), le long du Tigre et de l'Euphrate. En particulier, à Tell Abu Hureyra (Moore et al., 1975) des artefacts composés de plâtre pratiquement pur, ont été retrouvés, tandis qu'à Ali Kosh, des fragments d'enduits retrouvés présentent un mélange de plâtre avec des inclusions de sable et une petite quantité d'argile (Hole et Flannery, 1962). Ce même type de mélange a connu une utilisation à grande échelle dans l'architecture égyptienne (Dilaria et Secco, 2022), dès la période prédynastique (5000 - 3150 av. J.-C.), pour la réalisation d'enduits aussi bien que pour le jointoiement des blocs, comme en témoignent les traces retrouvées dans la pyramide de Khéops (Furlan et Bissegger, 1975). Cependant, des traces d'un prototype de mortier à base de chaux ont été identifiées dans les pyramides de Gizeh (Barsoum et al., 2006), sans pour autant prouver l'existence d'une industrie de la chaux en Égypte durant cette période. Les mortiers égyptiens à base de plâtre, utilisés pour les jointoiements, contiennent généralement, une faible charge siliceuse (entre 6 et 30 %), alors que ceux utilisés pour les enduits de finitions n'en contiennent qu'une très faible quantité (de 4 à 6 %) et sont exclusivement composés de sulfate de calcium (Goyon et al., 2004).

Par ailleurs, la présence d'un mortier de plâtre très peu épais entre les blocs du temple d'Amon à Karnak, indique que ce matériau devait également, servir de lubrifiant pour faciliter la mise en place des blocs de grès de grande taille (Martinet et al., 1992). Durant l'âge du bronze et l'âge du fer, les sociétés égéennes ont développé une industrie de la chaux qui s'est traduite par l'emploi courant de liants à base de chaux dans leur architecture (Dilaria et Secco, 2022). Les premiers témoignages de cette période, nous parviennent des sites minoens de Vasiliki et

Myrtos-Fournou Korifi (Shaw, 2009), où les fragments d'enduits découverts sur les murs sont constitués d'une première couche composée d'un mélange de chaux, d'argile et de fragments lithiques avec des inclusions de céramique concassée et une seconde couche plus fine à base de chaux, sans ajout d'agrégats. Plus tard, de la chaux pure a été employée systématiquement pour la réalisation des enduits de protection et de décoration, destinés à recouvrir les maçonneries à joints vifs des structures minoennes et mycéniennes. On retrouve un large emploi de ces enduits dans les sites de Kato Zakros, Malia, Nirou Khani, Tylissos et Phaistos (Shaw, 2009) ainsi qu'à Mycènes et Pylos (Guimier-Sorbets, 2021). Au palais de Cnossos, de remarquables enduits peints *a fresco* à base de chaux recouvraient les murs et les plafonds (Cameron et al., 1977 ; Carvalho et al., 2021). Ainsi, pas moins de cinq types d'enduits ont été retrouvés, dont des bétons dits « *tarazza* [*sic*] » composés d'un mélange de chaux et de petits galets marins de formes arrondies et de dimensions uniformes. D'autres enduits réalisés avec une chaux pure sans ajout d'agrégats (Shaw, 2009) pouvaient être laissés nus ou recevaient un décor peint de couleurs rouge ou ocre (Cameron et al., 1977).

À Tirynthe, le second palais abrite un revêtement de sol peint réalisé avec un enduit à base de chaux présentant un décor imitant un dallage de pierre, associé à des paires de dauphins adossés (Guimier-Sorbets, 2021). D'autres exemples d'enduits peints de l'Helladique récent, proviennent des palais de Thèbes (Brysbaert, 2008), où les décors présentent des scènes de processions avec des figures féminines, ainsi que des scènes de batailles. La plupart des enduits sont composés de deux couches : la première couche de préparation, à base d'argile, assure l'adhérence au support en maçonnerie et la seconde couche de finition, à base de chaux, reçoit et fixe les pigments du décor par carbonatation. De plus, des mortiers hydrauliques, des époques minoenne et mycénienne, ont été retrouvés à Chypre, dans les cités de Kition, Kalavasos-Ayios Dhimitrios, Maroni-Vournes et Maa-Palaiokastro (Theodoridou et al., 2013). Ils étaient utilisés pour les revêtements de sol des pièces humides et pour les enduits de finition des murs. Ces mortiers présentent des compositions similaires, à base de chaux, de sable calcaire ou siliceux et de poudre de céramique finement broyée, utilisée comme pouzzolane artificielle. Parallèlement, on retrouve en Crète, l'utilisation de la pouzzolane naturelle à Cydonia (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003) dans un enduit composé d'un mélange de chaux et de plâtre avec une charge sableuse et des inclusions d'agrégats volcaniques.

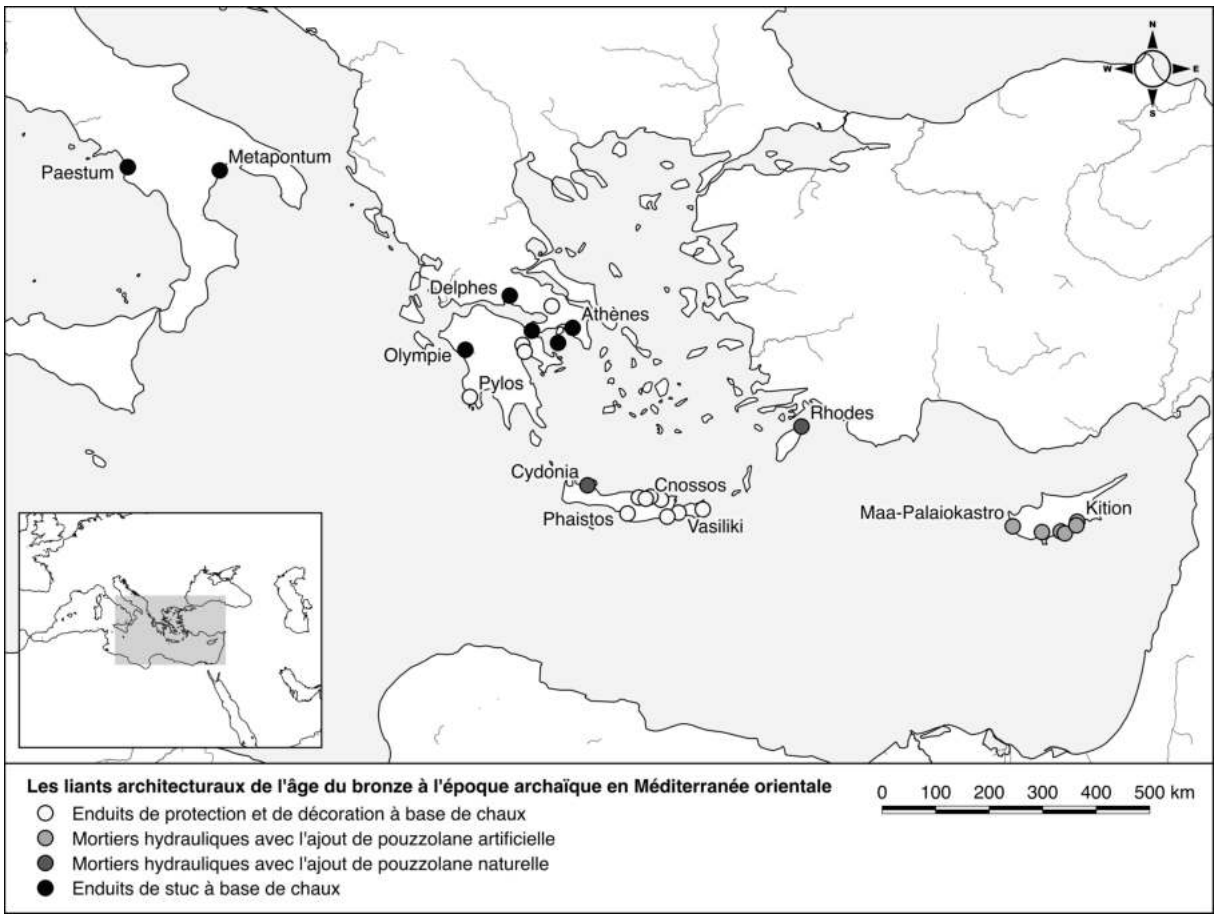

Figure 2 : Localisation des structures qui présentent des enduits de stuc, des enduits de protection et de décoration et des mortiers hydrauliques datant de l'âge du bronze à l'époque archaïque (d'après Iacopi et al., 1928 ; Orlandos, 1966 ; Cameron et al., 1977 ; Koui et Ftikos, 1998 ; Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003 ; Brysbaert, 2008 ; Shaw, 2009 ; Malacrino, 2010 ; Theodoridou et al., 2013 ; Guimier-Sorbets, 2021)

On observe à Rhodes, dans le site de Camiros, le témoignage de ce même usage de la pouzzolane naturelle, dans le béton qui servait d'enduit d'étanchéité à la citerne archaïque (Iacopi et al., 1928) dédiée à l'activité cultuelle de l'acropole (Bernardini, 2001). Ce béton est composé d'un liant à base de chaux, d'une charge constituée de sable et de gravier (2 à 20 mm) et des inclusions de sable d'origine volcanique (Koui et Ftikos, 1998). Durant l'époque archaïque, l'emploi des enduits de stuc s'est intensifié et s'est développé chez les Grecs (fig. 2). Ils étaient généralement constitués d'un liant à base de chaux comprenant de la poudre de marbre ou de roche calcaire, dans le but d'imiter l'aspect du marbre lorsque celui-ci n'était pas utilisé. On retrouve l'emploi du stuc dans le temple d'Athéna Pronaia à Delphes, qui était destiné à couvrir les futs et les chapiteaux de colonnes afin de masquer l'apparence du tuf de Corinthe (Furlan et Bissegger, 1975 ; Malacrino, 2010). D'autres enduits de stuc, datant de l'époque archaïque, ont été signalés à Égine, Athènes, Corinthe, Olympie, ainsi que dans les colonies grecques de Poséidonia (*Paestum*) et Métaponte (*Metapontum*) (Orlandos, 1966 ; Malacrino, 2010). Plus tard, le stuc est employé dans l'architecture de l'époque hellénistique,

pour les mêmes raisons esthétiques et dont des fragments sont visibles en Sicile dans des temples à Agrigente, Sélinonte et Syracuse (Malacrino, 2010 ; Lazzarini et al., 2019) ainsi qu'en Afrique du Nord où des traces de stuc ont été identifiées sur des fragments de décors retrouvés à Utique (Ferchiou, 1995).

I.2.3. Dans l'architecture antique

À l'époque classique, les maisons grecques sont devenues de plus en plus luxueuses et recevaient également des revêtements soignés. Jusque-là, la majorité des maisons avaient des sols en terre battue et des murs en adobe, sans aucun enduit de finition (Guimier-Sorbets, 2021). Des enduits à base de chaux ont été utilisés pour la protection des sols et des faces intérieures des murs, principalement dans l'*andrôn* qui était la salle à manger destinée à recevoir les convives et qui devait être nettoyée à grande eau (Malacrino, 2010 ; Guimier-Sorbets, 2021). On observe des exemples de ce type d'enduit dans de nombreuses maisons à Olynthe, Pella et Vergina. De même, l'utilisation du mortier de tuileau, composé d'un liant à base de chaux comprenant de la poudre de céramique et des agrégats de terre cuite, s'est généralisé durant l'époque classique et s'est diffusé en Méditerranée occidentale. En effet, des revêtements de sol en *opus signinum* datant de cette époque, ont été signalés à Marseille (D'Ovidio et Bromblet, 2021), à Monte Iato et Sélinonte en Sicile, à Naples et Buccino (Vassal, 2016 ; Mège, 2021) ainsi que dans la cité punique de Kerkouane (Morel, 1969). Ces revêtements pouvaient avoir une apparence simple de la couleur du tuileau ou recevaient un décor composé de formes géométriques et des motifs apotropaïques, comme en témoigne le revêtement en *opus signinum* retrouvé à Kerkouane (Vassal, 2016).

À partir de l'époque hellénistique, des banquettes surélevées étaient couramment aménagées dans l'*andrôn* des maisons grecques. Elles étaient réalisées en mortier de chaux dans le but de protéger les lits en bois lorsque la salle à manger venait à être nettoyée à grande eau. Le mortier, avec lequel les banquettes ont été réalisées, est composé d'un liant à base de chaux comprenant une charge sableuse et parfois de petits agrégats de terre cuite (Guimier-Sorbets, 2021). Ce dernier repose sur une couche de mortier de préparation, de composition similaire, mais avec une plus grande quantité de fragments de terre cuite. S'agissant du traitement de finition, ces revêtements de sol sont composés d'un mortier de chaux fin, laissé nu ou qui était teinté avec des pigments de couleur rouge. Parfois, ils pouvaient également être associés à d'autres types de revêtements de décoration réalisés en *opus signinum*, en *opus tesselatum*, ou avec du *lavapesta*.

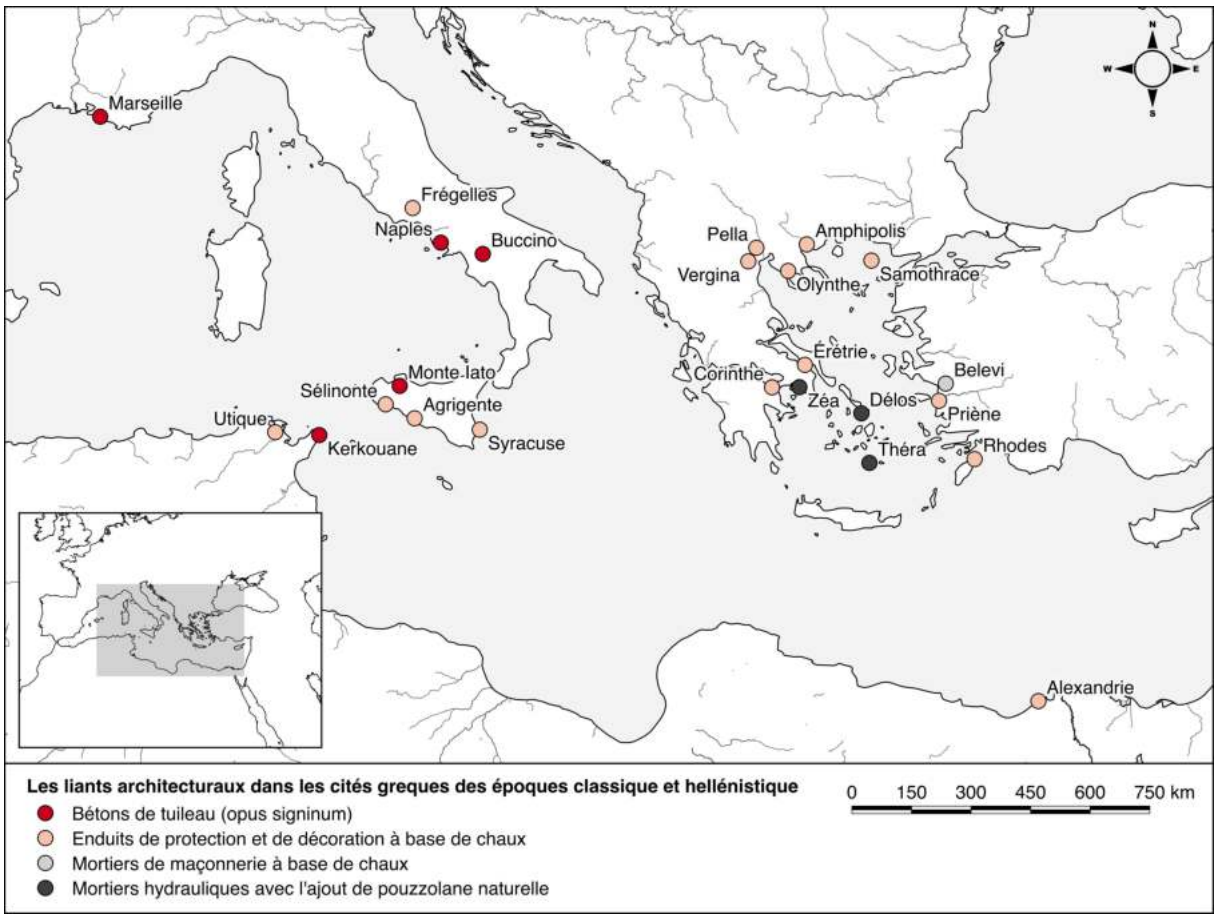

Figure 3 : Localisation des structures des époques classique et hellénistique présentant des enduits de stuc, des revêtements de sol et des mortiers hydrauliques (d'après Orlandos, 1966 ; Morel, 1969 ; Ferchiou, 1995 ; Malacrino, 2010 ; Heinz, 2012 ; Vassal, 2016 ; Lazzarini et al., 2019 ; D'Ovidio et Bromblet, 2021 ; Guimier-Sorbets, 2021)

Des exemples de ces revêtements de sol, sont visibles dans des maisons à travers toute l'étendue du territoire grec de l'époque hellénistique (fig. 3), notamment à Olynthe, Corinthe, Délos, Érétrie, Priène, Rhodes ou encore à Alexandrie[5] et à Frégelles dans le Latium (Malacrino, 2010 ; Guimier-Sorbets, 2021). En plus de l'architecture domestique, on observe dans l'architecture religieuse et funéraire, l'emploi d'enduits de sol colorés réalisés à base de chaux, comme dans le Hiéron et le *Hall of Votive Gifts* à Samothrace. Certains enduits présentent également des décors composés de formes géométriques, comme c'est le cas pour les revêtements des tombes macédoniennes à Amphipolis (Guimier-Sorbets, 2021). En ce qui concerne les ouvrages hydrauliques de l'époque hellénistique, l'utilisation du mortier de chaux contenant de la pouzzolane est signalée au niveau des bassins du port de Zéa, des citernes de Théra ainsi que dans les installations portuaires de Délos (Orlandos, 1966). Ces mortiers sont composés d'un liant à base de chaux, d'une charge sableuse et de sable volcanique.

[5] En plus des liants à base de plâtre, l'emploi de la chaux comme liant s'est généralisé dans l'architecture égyptienne à partir de l'époque hellénistique, sous la dynastie des Lagides (Goyon et al., 2004).

On considère qu'aux époques classique et hellénistique, le mortier de chaux était utilisé principalement pour la réalisation des revêtements de sol et muraux, des enduits peints et des enduits de stuc. Les maçonneries des programmes monumentaux de ces époques étaient généralement, assemblées à joints vifs, avec des scellements horizontaux et verticaux en métal et quelquefois en bois (Adam, 2011). Ceci, à l'exception de la tombe royale de Belevi qui date de l'époque hellénistique et qui présente des maçonneries à liaison mixte : avec des scellements horizontaux et verticaux à l'aide de crampons et de goujons métalliques, renforcés par l'utilisation d'un mortier de jointoiement à base de chaux (Heinz, 2012). De plus, Heinz rapporte que du mortier de chaux a été coulé pour combler les vides à l'intérieur du socle formé par un noyau rocheux, ainsi que sous les tuiles pour sceller les éléments de maçonnerie en pierre composant le plafond à caissons.

En Méditerranée occidentale, l'utilisation du mortier de chaux par les bâtisseurs romains était fréquente, tant à Rome que dans les territoires conquis pendant la République et l'Empire. Ce matériau n'était plus seulement employé comme enduit de décoration et de protection des parois, mais également comme élément structurel dans les fondations, les murs et les couvertures de l'architecture monumentale de cette époque (Dilaria et Secco, 2022). En effet, l'invention et la vulgarisation de l'*opus caementicium* ont révolutionné la construction romaine dès les deux derniers siècles de la République (Furlan et Bissegger, 1975), en produisant un matériau solide, facile à mettre en œuvre et peu coûteux. L'*opus caementicium*, également connu sous l'appellation « béton romain », était produit à partir d'un mélange de chaux et d'agrégats appelés « *caementa* ». Ces agrégats pouvaient être des galets, des fragments de terre cuite, de roches calcaires (tuf) ou de roches volcaniques (tuf volcanique et ponces), dont les dimensions varient entre 10 à 30 cm (Lancaster, 2015). La particularité de la mise en œuvre de ce matériau par coulage, a permis aux bâtisseurs romains de développer de nouvelles techniques de construction monumentale, comme les larges voûtes hémisphériques autoportantes à oculus du « Temple de Mercure » dans les thermes de Baïes (*Baiae*) et du Panthéon de Rome, ainsi que les plafonds voûtés du temple de Minerve Medica, des thermes de Trajan et de Caracalla et ceux de l'espace central « Grande Aula » des marchés de Trajan (Lancaster et al., 2011). Les agrégats choisis pour la réalisation des voûtes monumentales sont généralement des fragments de roches volcaniques comme le tuf ou les ponces, qui présentent des masses volumiques légères et ayant des propriétés chimiques leur permettant de réagir avec le liant à base de chaux pour produire des réactions pouzzolaniques. On retrouve également, l'emploi de ces matériaux dans plusieurs installations portuaires de l'Empire romain, notamment à *Ostia Antica*, *Chersonasus*, *Alexandria* ou encore à *Caesarea Palestinae* (Jackson et al., 2012).

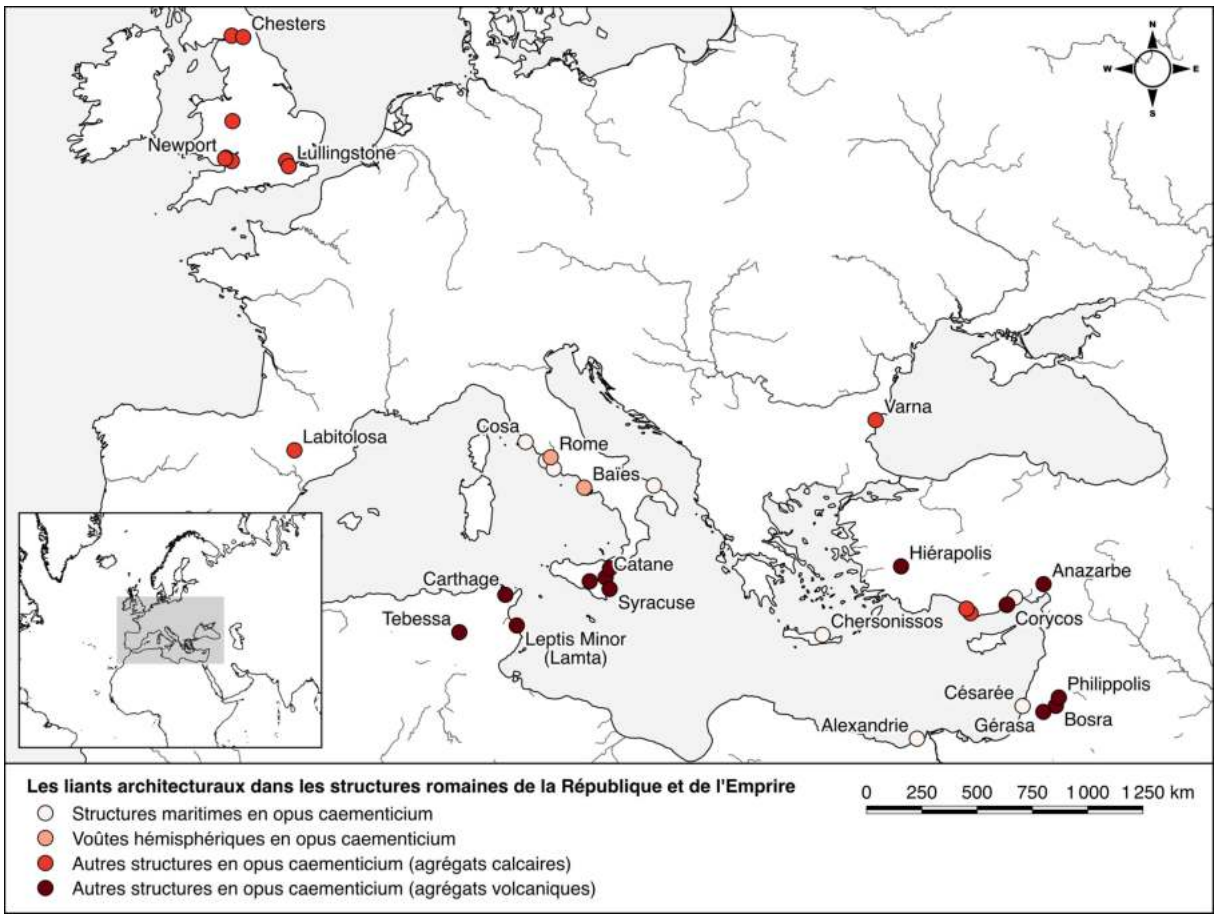

Figure 4 : Localisation des structures et des installations portuaires où l'on observe l'utilisation de l'opus caementicium et des mortiers hydrauliques durant les périodes romaines de la République et de l'Empire (d'après Lancaster et al., 2011 ; Jackson et al., 2012 ; Lancaster, 2015)

Avec son expansion rapide, l'Empire romain a porté la technique du mortier de chaux à un haut degré de perfection, en l'utilisant pour les revêtements simples aussi bien que pour la réalisation de structures monumentales. Ainsi, les Romains ont permis la diffusion des techniques liées à la production et à la mise en œuvre du mortier de chaux et ont généralisé son utilisation (fig. 4) aussi bien en Europe, qu'en Asie Mineure et en Afrique du Nord (Coutelas et Büttner, 2009a ; Van Balen et al., 2015).

I.2.4. Dans l'architecture médiévale

Après le déclin puis l'éclatement de l'Empire romain, l'utilisation du mortier à base de chaux a perduré durant tout le Moyen Âge, notamment dans les régions sous l'influence romaine (Coutelas et Büttner, 2009a). Toutefois, il semble qu'il n'y ait eu aucun progrès technique notable, dans la production du mortier de chaux pendant cette période. Certains auteurs, dont l'architecte français Viollet-Le-Duc, ont même, noté une perte du savoir-faire romain dans l'architecture médiévale en Italie (Furlan et Bissegger, 1975), en qualifiant les mortiers de cette période de friables, peu homogènes et de qualité médiocre. En effet, des

exemples de mortiers médiévaux de mauvaise qualité peuvent être observés en Italie dans les cathédrales de Laon, Troyes, Châlons-en-Champagne et Sées, qui reflètent les restrictions économiques imposées aux constructeurs durant cette époque (Furlan et Bissegger, 1975). De plus, les mortiers hydrauliques caractérisés par l'ajout de pouzzolanes naturelles ou artificielles sont rarement retrouvés en Italie (Coutelas et Büttner, 2009a), bien que ce type de mortier ait subsisté dans l'architecture byzantine et soit encore observable dans la ville médiévale de Rhodes (Moropoulou et al., 2000). La cité médiévale de Cymé en Turquie, est un autre exemple qui s'inscrit dans le même contexte géographique. Les mortiers hydrauliques, mis en œuvre dans cette cité, présentent un liant à base d'un mélange de chaux et d'argile. Mais, malgré l'ajout de pouzzolanes d'origine volcanique, ils sont évalués comme étant les plus friables en comparaison avec les mortiers des structures romaines et proto-byzantines du même site (Miriello et al., 2011).

La diminution de la qualité des mortiers de l'architecture médiévale peut être expliquée par les conditions socio-économiques du Moyen Âge, qui imposaient des restrictions financières et techniques aux constructeurs (Büttner et Coutelas, 2011). Dans certains cas, les ressources géologiques limitées de certains territoires ont conduit les bâtisseurs à recourir au pillage et à la calcination des marbres des sites antiques pour éviter les coûts élevés de transport et de production de la chaux (Van Balen et al., 2015). À la fin du Moyen Âge, les constructions en pierres maçonnées n'étaient plus restreintes aux architectures religieuse et militaire (Furlan et Bissegger, 1975). Elles se sont généralisées dans l'habitat avec le développement des agglomérations urbaines et l'imposition de mesures visant à limiter l'utilisation des matériaux inflammables dans les constructions d'habitations.

On observe, durant la Renaissance, un intérêt renouvelé pour l'architecture et les techniques de construction romaines. Cet intérêt, pour l'architecture antique, a conduit à la rédaction de nombreux traités, dont *De re aedificatoria* d'Alberti, « Le Premier tome de l'architecture » de Delorme ou encore *I quattro libri dell'architettura* de Palladio. Certains de ces traités sont basés sur des textes antiques de Caton l'Ancien, Vitruve et Pline l'Ancien, tandis que d'autres sont le fruit des recherches et des observations sur des structures antiques encore existantes (Prigent, 2009 ; Van Balen et al., 2015).

I.2.5. Dans l'architecture moderne

Un nouveau regain d'intérêt s'est produit pour les mortiers anciens et particulièrement le mortier de tuileau, avec l'avènement des Encyclopédies (Coutelas et Büttner, 2009a) et la révolution chimique. En effet, les recherches et les expérimentations menées successivement,

par Smeaton, Vicat, Aspdin puis Johnson, ont conduit à l'invention du ciment Portland artificiel. Contrairement aux mortiers anciens, ce matériau est produit, suivant un processus plus complexe, par la calcination à des températures très élevées (environ 1 450 °C) d'un mélange composé de calcaire, d'argile, de gypse et de laitier de haut fourneau (Van Balen et al., 2015). Plus tard, le ciment Portland artificiel a été popularisé lors de l'Exposition universelle de 1851 (Furlan et Bissegger, 1975) et son introduction dans la formulation du « béton moderne » a constitué une révolution dans l'architecture de l'époque moderne, conduisant progressivement à l'abandon de la chaux dans la construction.

I.3. Les prescriptions des auteurs anciens

On retrouve dans les traités rédigés durant la Renaissance, des recommandations techniques pour le choix des matières premières et la mise en œuvre des mortiers notamment, dans les textes d'Alberti et de Palladio. Ces auteurs ont repris les prescriptions qui se trouvent dans les textes de Columelle, Pline l'Ancien et Palladius, qui eux-mêmes s'appuient fortement, sur des sources textuelles remontant à l'Antiquité comme Théophraste, Caton l'Ancien et surtout Vitruve (Prigent, 2009). En effet, l'œuvre *De architectura* de Vitruve, dédiée à l'empereur Auguste, reste une référence de grande importance pour la compréhension des techniques de construction dans l'Antiquité (Büttner et Prigent, 2007). Il y présente des connaissances théoriques et pratiques sur la construction, des principes de conception architecturale, des considérations techniques pour l'amélioration de l'acoustique, ainsi que des recommandations pour la planification urbaine. S'agissant du mortier de chaux, on retrouve dans *De architectura*, des informations détaillées sur les origines des matières premières à utiliser en tant que charge, ainsi que les roches calcaires à sélectionner pour la production de la chaux. En outre, Vitruve fournit les détails techniques pour la mise en œuvre du mortier de chaux afin de réaliser des maçonneries et des enduits de protection et de décoration, en précisant les quantités des matières premières nécessaires dans chaque type de mélange. D'après lui, la durabilité des constructions dépend fortement, des matériaux de construction choisis ainsi que de la manière dont ils sont mis en œuvre (*De architectura*, I, 5, 8 ; traduit par Fleury) :

> Quant au mur lui-même, on ne doit pas définir d'avance les matériaux avec lesquels il sera élevé et terminé parce que nous ne pouvons avoir en tout lieu les ressources que nous souhaitons. Là où il y a de la pierre de taille, du silex, du moellon, de la brique cuite ou crue, il faudra s'en servir. […] il n'est pas vrai que toutes les régions, ou les ressources propres de l'endroit, puissent procurer des facilités de ce genre aussi précieuses, de sorte qu'en puisant

> dans ces approvisionnements tout prêts on puisse avoir un rempart sans défaut construit pour l'éternité.

Il explique, dans ce même chapitre consacré à la construction des murailles, que chaque région dispose de ses propres matériaux ayant chacun ses caractéristiques. En utilisant ces matériaux de la manière la plus appropriée, il est possible de réaliser des constructions qui dureront « éternellement ». Il préconise, alors, de sélectionner des matières premières disponibles localement et de les associer, en fonction des propriétés intrinsèques à chaque matériau, pour produire des liants architecturaux dont la durabilité dépendra des choix portés par les artisans romains.

I.3.1. Pour la sélection de la charge

Ainsi, dans son chapitre sur les sables, Vitruve indique les caractéristiques qui permettent de distinguer le sable de carrière qu'il appelle sable « fossile » et qu'il préconise pour la préparation de mortier de blocage en *opus caementicium* (*De architectura*, II, 4, 1 ; traduit par Callebat) :

> Dans les structures en blocage, on s'occupera d'abord du sable : il doit pouvoir se prêter au corroyage du mortier et ne pas être mêlé de terre. Les différents types de sable fossile sont les suivants : le noir, le gris blanchâtre, le rouge, le carboncle. Parmi ces sables, le meilleur est celui qui crisse quand on le frotte dans la main ; celui, en revanche, qui est terreux n'accrochera pas. Si l'on jette par ailleurs du sable sur une toile blanche que l'on secoue ensuite pour le chasser, et si ce sable ne la tache pas et n'y laisse pas de terre, il sera d'un bon usage.

Ce sable doit produire un bruit de crissement lorsqu'on le frotte entre les mains et ne doit pas être mélangé à de la terre ou de la poussière. Pour s'en assurer, Vitruve recommande de déposer et de secouer le sable sur un vêtement blanc, ce dernier ne doit y laisser aucune trace de terre.
Il donne également une indication sur les colorations possibles de ce type de sable : noir, blanc, rouge et *carbunculus*. Ces couleurs de sables correspondent bien, aux sables observés dans les carrières des régions de la Toscane (Étrurie), du Latium et de Campanie (D'Ambrosio et al., 2015) ; la géologie volcanique de ces régions est composée de dépôts quaternaires, qui sont principalement des téphras. S'il n'est pas possible d'exploiter du sable de carrière localement, Vitruve propose, comme alternatives, d'utiliser du sable de rivière ou, en dernier recours, du sable marin, tout en insistant sur la nécessité de laver le sable de rivière pour en enlever les impuretés (*De architectura*, II, 4, 2 ; traduit par Callebat) :

> Si cependant il n'y a pas de carrière d'où le sable puisse être extrait, on le tirera des fleuves ou du gravier, en le passant au crible, voire aussi du bord de mer. Mais ce type de sable a, dans les maçonneries, les inconvénients suivants : il sèche difficilement et s'il n'y a pas de coupures

> et de pauses dans l'exécution, le mur ne supporte pas la charge d'une maçonnerie continue ; il ne peut pas non plus soutenir une voûte. Le sable marin présente en plus un autre inconvénient, à savoir que lorsqu'un enduit a été appliqué sur les murs, ceux-ci rejettent du sel et font ainsi s'effriter la couche d'enduit.

Ainsi, il privilégie ce type de sable pour la mise en œuvre des enduits, car selon lui, un mortier avec du sable de rivière « sèche » difficilement et ne permet pas de supporter la charge d'une maçonnerie continue (Coutelas et Büttner, 2009d), ce qui est, au contraire, apprécié dans un enduit pour permettre une prise lente qui empêcherait l'apparition de fissures (*De architectura*, II, 4, 3). Quant au sable marin, Vitruve met en garde contre son utilisation en raison des efflorescences salines qu'il engendre, susceptibles, selon lui, de provoquer la dégradation des couches d'enduit.

I.3.2. Pour la production de la chaux

Concernant la préparation du liant à base de chaux, Théophraste, un auteur grec de la fin de l'époque classique, en parle dans *De lapidibus*, son traité sur les pierres traduit du grec ancien *Περὶ λίθων*. Bien qu'il utilise le terme *gypsos* (*γύψος*) pour qualifier le liant, sa description de la consistance et de la forte réaction exothermique (*De lapidibus*, IX, 65-66) que produit la roche calcaire calcinée lorsqu'elle est immergée dans l'eau, confirme qu'il s'agit plutôt de la chaux. Il témoigne également, de la connaissance du processus de production de ce liant dans la Méditerranée et le Proche-Orient, en mentionnant certains lieux où elle était produite à cette époque, comme à Thourioï, Tymphée, Perrhébie ainsi qu'à Chypre, en Phénicie et en Syrie. En revanche, il ne spécifie pas quelles autres roches calcaires étaient employées pour produire la chaux, hormis le marbre (*De lapidibus*, IX, 67-69).

Dans son chapitre sur la chaux, Vitruve fait, quant à lui, la distinction entre ces roches calcaires, en se basant sur des critères d'aspect visuel (Frizot, 1975) tout en privilégiant les roches calcaires les plus blanches possibles (*De architectura*, II, 5, 1 ; traduit par Callebat) :

> Une fois traitée la question des différents sables que l'on trouve, on s'intéressera plus particulièrement aussi à la chaux : celle-ci doit être obtenue par calcination de pierre blanche ou de roche solide ; celle qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure conviendra pour la maçonnerie, celle qui sera faite avec une pierre poreuse, pour les enduits.

Il préconise alors la calcination de roches calcaires dures et compactes, pour produire une chaux idéale pour le mortier de maçonnerie, tandis que les roches calcaires légères et poreuses seront destinées à produire de la chaux pour les enduits. On retrouve cette même recommandation dans le traité *De re rustica* de Caton l'Ancien dans lequel il décrit des pierres calcaires très blanches et sans marbrures. De plus, il donne des détails précis pour la construction d'un four

à chaux de formes conique, à un ou deux foyers (*De re rustica*, XLIV, 1-4 ; traduit par Goujard) :

> Faites le four à chaux large de dix pieds, haut de vingt ; au sommet, réduisez la largeur à trois pieds. Si vous cuisez avec une seule bouche, ménagez une grande cavité à l'intérieur suffisante pour contenir la cendre, de façon qu'il n'y ait pas à la sortir, et construisez bien le four ; faites en sorte que la sole occupe toute l'étendue inférieure du four. […] Voici ce qui indiquera quand la chaux sera cuite : il faudra que les pierres du haut soient cuites ; de plus, les pierres du bas, cuites, s'affaisseront, et la flamme donnera moins de fumée.

En effet, le four doit être haut de vingt pieds avec une largeur de dix pieds à sa base et de trois pieds à son sommet. La masse rocheuse est chargée par taille décroissante, de telle sorte, que les plus grandes pierres formant la voûte soient disposées au plus près du foyer et les plus petites pierres se retrouvent au sommet (Suméra, 2009). Le feu doit être surveillé en permanence et constamment alimenté pour assurer une production sans interruption de la chaux. La calcination complète de la masse rocheuse chargée dans le four, est constatée par l'état de calcination des fragments de calcaires disposés au sommet du four.

L'étude des fours à chaux de la cité romaine de *Tipasa* (Baradez, 1957 ; Dix, 1982), a permis d'établir la durée nécessaire pour un cycle de production de chaux, qui s'élève à environ douze jours, dont deux jours sont nécessaires au chargement de la masse rocheuse, entre trois et quatre jours sont indispensables pour la calcination, quatre jours sont nécessaires pour le refroidissement du calcaire calciné et enfin, deux jours sont requis pour le déchargement de la chaux vive. Quant à la durée de l'extinction de la chaux, elle est mentionnée par Pline l'Ancien, dans son chapitre sur les défauts dans la construction, où il fait état de malfaçons dans des édifices de son époque à Rome. Il parle notamment, de la détérioration des enduits et il explique cela par le non-respect, par les entrepreneurs, de la durée minimale requise pour l'extinction de la chaux qui devait être de trois ans (*Naturalis historia*, XXXVI, 55 ; traduit par Bloch) :

> L'effondrement des édifices à Rome vient essentiellement de ce que, par suite du vol de la chaux, les moellons sont disposés sans la substance qui les soude. Le mortier est d'autant meilleur qu'il est plus ancien. Parmi les lois réglant autrefois la construction des édifices, l'on en trouve une interdisant à l'entrepreneur d'utiliser une chaux de moins de trois ans. C'est pourquoi aucune fente n'a enlaidi leurs enduits.

En effet, il est essentiel de veiller à ce que la chaux soit entièrement hydratée avant son utilisation dans le mortier, afin d'éviter la présence de résidus de chaux vive dans le mélange. Le foisonnement de ces résidus pourrait persister et provoquer des gonflements et des fissurations une fois que l'enduit est mis en œuvre, comme l'indique Vitruve dans son chapitre

sur la préparation de la chaux pour faire le stuc (*De architectura*, VII, 2, 1 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> Lorsqu'on en aura fini avec les pavements, il faut aborder alors la question des revêtements muraux. Le travail se fera bien si l'on met à détremper, longtemps avant l'emploi, des morceaux d'une chaux d'excellente qualité. […] Car si l'on prend de la chaux qui n'a pas été détrempée à fond, et qui est encore trop fraîche, et qu'elle entre dans la composition d'un enduit alors qu'elle recèle des nodules incuits, elle provoque des soufflures. Et ces nodules, continuant leur trempage lors même qu'ils sont noyés dans la construction, désagrègent et détruisent les couches de finition de l'enduit.

En revanche, les études menées sur l'extinction de la chaux ne présentent pas de corrélation réellement établie entre l'âge de la chaux et sa qualité (Coutelas, 2003), bien que la durée recommandée par les différents auteurs soit d'au moins trois mois pour une hydratation complète (Suméra, 2009). Une fois hydratée, la chaux éteinte peut faire l'objet d'une conservation pendant plusieurs années dans des fosses recouvertes de sable ou de terre (Adam, 2011 ; Coutelas, 2003).

I.3.3. Pour le choix des inclusions

L'utilisation d'agrégats réactifs dans la préparation du mortier pour améliorer ses performances était une pratique déjà connue des Grecs et des Phéniciens, comme nous avons pu le voir dans l'évolution historique des liants architecturaux. Les bâtisseurs romains ont longtemps reproduit cette technique dont les auteurs anciens fournissent les détails, notamment sur le choix des inclusions et leurs provenances.

I.3.3.1. La pouzzolane naturelle

Dans son chapitre consacré à la pouzzolane, Vitruve recommande l'ajout de cendre volcanique au mortier de chaux, en raison de sa capacité à rendre les constructions solides et sa propriété qui permet la prise du mortier même sous l'eau (*De architectura*, II, 6, 1 ; traduit par Callebat) :

> Il y a aussi un genre de poudre qui a, par nature, des propriétés remarquables. Elle se forme dans la région de Baies et sur le territoire des municipes qui sont aux alentours du Vésuve. Mêlée à la chaux et aux moellons, non seulement elle assure la solidité des différentes constructions, mais, plus particulièrement aussi, elle fait s'affermir sous l'eau la maçonnerie des digues de mer. […] Lorsque donc trois matières constituées, suivant un principe identique, par la puissance du feu se retrouvent dans un même mélange, la pénétration brutale de

> l'humidité les fait s'unir les uns aux autres et, durcis par l'humidité, ils forment rapidement un bloc que ni les vagues ni la force de l'eau ne peuvent désagréger.

Il communique également, des informations géographiques sur la provenance de la pouzzolane naturelle, laquelle se trouve à Baïes ainsi que dans les zones qui entourent le mont Vésuve. Plus loin, il indique de nouveau les lieux de provenance que sont Cumes (*Cumae*) et Baïes (*Baiae*) dans la baie de Naples et décrit ces pouzzolanes comme étant des pierres « spongieuses » ou ponces qui résultent directement de l'activité volcanique du Vésuve (*De architectura*, II, 6, 2 ; traduit par Callebat) :

> Qu'il y ait en ces lieux des sources puissantes de chaleur peut être mis en évidence par le fait que, dans les montagnes de la région de Baies, sur le territoire de Cumes, on a creusé des étuves où une vapeur brûlante, issue des profondeurs, s'ouvre là, sous l'effet de la violence du feu, une voie dans la terre à travers laquelle elle se répand : s'élevant dans ces lieux, elle y offre ainsi un moyen excellent de sudation. […] C'est ainsi que les pierres poreuses, dites aussi « pierres ponces de Pompéi », tirent semble-t-il d'un autre type de pierre, calciné, leurs propriétés caractéristiques.

Enfin, il donne une description de la réaction pouzzolanique qui se produit lorsque la chaux est mélangée à ces fragments pyroclastiques (*De architectura*, II, 6, 4 ; traduit par Callebat) :

> Quand donc des matières différentes et hétérogènes sont ainsi saisies et unies en une même masse, le phénomène d'effervescence produit par la brusque saturation en eau de ces matières brûlantes desséchées […] les fait s'agréger fermement, en prenant rapidement les propriétés homogènes d'un corps solide.

Ces derniers, tout comme la chaux, auraient acquis leurs propriétés réactives grâce à l'action du feu, et une fois mélangés, ils confèrent à leur tour, une grande solidité au mortier de chaux. Plus tard, Pline l'Ancien mentionne la pouzzolane dans son chapitre sur les variétés de terres et précise l'origine de ce matériau comme provenant des environs de Pouzzoles (*Puteoli*), d'où il tient son appellation (*Naturalis historia*, XXXV, 47, 1 ; traduit par Croisille) :

> Mais la terre elle-même fournit d'autres ressources. Qui en effet pourrait assez s'étonner de voir la partie la plus vile de la terre, appelée pour cette raison poussière, et que l'on trouve sur les collines de Pouzzoles, former barrière aux flots de la mer et devenir, dès l'immersion, un bloc de pierre massif, inattaquable aux eaux et durcissant de jour en jour, surtout si on le mêle à de la pierraille de Cumes […]

Il explique qu'une fois en contact avec l'eau de mer, la pouzzolane se solidifie pour former un bloc monolithique qui devient de plus en plus solide en fil du temps. En revanche, Pline l'Ancien ne mentionne pas le mélange de la pouzzolane à la chaux, qui est indispensable pour obtenir la réaction chimique qu'il décrit.

I.3.3.2. La pouzzolane artificielle

La pouzzolane artificielle regroupe les produits anthropiques qu'ils soient d'origine minérale ou organique, qui contiennent une quantité suffisante de silice soluble pour réagir avec la chaux, de la même manière que la pouzzolane naturelle. La réaction chimique produit des silicates et des aluminates de calcium hydratés, qui confèrent au mortier de chaux, une résistance élevée ainsi que la capacité de durcir lorsqu'il est en contact avec l'eau (Lancaster, 2019). Dans cette catégorie, on retrouve les fragments de céramique pilée ou concassée, également appelés « tuileau » et dont l'utilisation est recommandée par Vitruve pour servir d'améliorant dans le mortier de maçonnerie à base de chaux et de sable de rivière (*De architectura*, II, 5, 1). Il préconise également l'ajout du tuileau dans les couches de préparation destinées à la pose de pavements (*De architectura*, VII, 1, 3 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> […] on étendra une forme au tuileau dont le mélange comportera pour trois parties de tuileau une partie de chaux […] Sur la forme, on posera le pavement […] qu'il s'agisse d'un dallage en découpe ou de tesselles.

Le tuileau est dans ce cas, utilisé dans le mortier pour réagir avec la chaux et rendre ainsi, étanches les couches de préparation que sont les *rudus* et *nucleus* (*De architectura*, VII, 1, 7). Dans son chapitre sur les revêtements dans les lieux humides, on retrouve la recommandation de cette technique pour l'étanchéification des parois des citernes (*De architectura*, VIII, 6, 14), ainsi que les pièces humides, en appliquant un enduit étanche à la base des murs avec une hauteur minimale de trois pieds à partir du sol (*De architectura*, VII, 4, 1 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> […] pour les pièces qui sont à rez-de-chaussée, dans le bas des murs, au-dessus du pavement, sur une hauteur de trois pieds environ, on emploiera pour le gobetage et les couches dressées un mortier de tuileau au lieu de mortier de sable afin que cette partie des enduits ne soit pas gâtée par l'humidité.

S'agissant des pouzzolanes artificielles de nature organique, on citera l'emploi de cendres issues de la combustion de végétaux et de restes d'animaux pour la réalisation des enduits d'étanchéité des citernes dans certaines cités romaines, notamment en Afrique du Nord, au Proche-Orient et dans le sud de l'Europe (Lancaster, 2019). Bien que les auteurs anciens ne mentionnent pas l'emploi de ce type de rajout dans les mortiers, on observe l'utilisation des cendres d'origine organique principalement dans les cités aux influences puniques, où cette pratique a persisté et a été perpétuée pendant deux siècles par les Romains (Secco et al., 2020).

I.3.4. Pour la mise en œuvre du mortier

En plus de donner des recommandations pour le choix des composants pour les divers types de liants architecturaux, les auteurs anciens fournissent des prescriptions relatives aux proportions nécessaires pour chacun des ingrédients que sont la chaux, le sable et les pouzzolanes naturelles et artificielles, tout en décrivant les méthodes à appliquer pour leurs mises en œuvre.

I.3.4.1. Mise en œuvre du mortier de maçonnerie

Pour le mortier de maçonnerie, Vitruve recommande d'utiliser un mélange composé d'un volume de chaux pour trois volumes de sable s'il s'agit d'un sable de carrière, ou d'un volume de chaux pour deux volumes de sable s'il s'agit d'un sable de rivière ou de sable marin (*De architectura*, II, 5, 1 ; traduit par Callebat) :

> Quand la chaux sera éteinte, on gâchera le mortier en y versant trois parts de sable pour une de chaux, s'il s'agit de sable fossile ; mais si le sable est de rivière ou de mer, on mélangera deux parts de sable à une de chaux. […] Si, comme troisième part, on ajoute au sable de rivière ou de mer des tuileaux broyés et tamisés, on obtiendra par ce dosage un mortier de meilleur usage.

Dans le second cas de figure, il préconise de rajouter un volume supplémentaire de céramique concassée pour améliorer les performances du mortier. S'agissant de la maçonnerie dite « concrète » en *opus caementicium* dans les ouvrages hydrauliques comme les structures portuaires, Vitruve recommande d'utiliser un volume de chaux pour deux volumes de pouzzolane naturelle (*De architectura*, V, 12, 2 ; traduit par Saliou) :

> Quant aux maçonneries qui doivent être immergées, voici comment il paraît nécessaire de les faire : on apportera de cette poudre que l'on trouve dans les régions qui s'étendent des abords de Cumes au promontoire de Minerve, et on la mélangera à proportion de deux pour un dans l'auge à mortier.

Il indique la provenance de la pouzzolane naturelle depuis la baie de Naples, entre Cumes et le promontoire de Minerve. Dans *Geographica*, traduit du grec ancien *Γεωγραφικά*, Strabon mentionne l'origine de la pouzzolane, qu'il nomme *Phlegra*, qui provient de la région campanienne (*Geographica*, V, 4, 6 ; traduit par Lasserre) :

> Dicéarchia a été autrefois un très grand port de commerce, possédant des bassins d'ancrage que la nature particulièrement favorable du sable a permis de creuser de main d'homme : il est constitué, en effet, dans la proportion qui convient à la chaux et acquiert une compacité et une dureté à toute épreuve.

Bien qu'il spécifie des composants du mortier de blocage utilisé pour la construction du port de Dicéarchia[6], qui sont identiques à ceux préconisés par Vitruve, il n'en précise pas les proportions exactes, mais parle seulement, d'une proportion « convenable » de chaux.

I.3.4.2. Mise en œuvre des revêtements de sol

La réalisation des sols (en rez-de-chaussée) avec du mortier de chaux est documentée de manière approfondie par Vitruve dans son chapitre portant sur les revêtements de sol (*De architectura*, VII, 1). Il recommande de superposer trois couches de préparation (tab. 1) en commençant par le *statumen* qui est la couche de fondation, puis le *rudus* qui est la couche intermédiaire et enfin le *nucleus* qui correspond à la dernière couche destinée à recevoir un revêtement. S'agissant de la mise en œuvre, Vitruve préconise d'abord de veiller à ce que le sol en terre soit bien compact. Dans le cas contraire, s'il est fait d'un remblai, il conseille de le damer afin de l'aplanir et de le rendre plus compact (*De architectura*, VII, 1, 1 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> Je commencerai par le bétonnage qui tient la première place parmi les travaux de revêtement […] S'il faut bétonner à rez-de-chaussée, on vérifiera si le sol est partout ferme, et dans ce cas on le nivellera, et on étendra le béton avec son hérisson. Si en revanche le terrain est en tout ou en partie constitué de remblai, on le damera bien soigneusement pour le rendre ferme.

Par la suite, il précise les composants nécessaires à la réalisation des couches de préparation ainsi que la proportion de chaque composant, tout en indiquant l'épaisseur minimale, requise pour chaque couche (*De architectura*, VII, 1, 3 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> […] on posera un hérisson fait de pierres qui soient au moins assez grosses pour emplir la main ; quant au béton que l'on étend sur ces hérissons, si l'agrégat est frais, à trois volumes on en mélangera un de chaux ; s'il s'agit de remploi, le mélange se fera dans la proportion de cinq pour deux. […] et le tout une fois bien damé aura une épaisseur d'au moins trois quarts de pied. Par-dessus, on étendra une forme au tuileau dont le mélange comportera pour trois parties de tuileau une partie de chaux, l'épaisseur de cette couche ne devant pas être inférieure à six doigts. Sur la forme, on posera le pavement […] qu'il s'agisse d'un dallage en découpe ou de tesselles.

En effet, la couche du *statumen* est constituée de cailloux de la dimension de la paume de la main (environ 8 cm) qui doivent être posés sans liant. La couche du *rudus* doit être composée du mélange d'un volume de chaux et de deux volumes de fragments de roches s'ils proviennent

[6] Strabon mentionne Dicéarchia comme le toponyme antérieur à *Puetoli*, qui est maintenant connue sous le nom de Pouzzoles. Il explique que le changement du nom de la cité portuaire a été décidé par les Romains lorsqu'ils l'ont occupée pendant la guerre contre Hannibal (*Geographica*, V, 4, 6).

des chutes de la taille de pierre ou de deux volumes de chaux et de cinq volumes de fragments de roches s'ils proviennent des gravats issus de la démolition. Toutefois, si le sol est prévu pour un espace extérieur et humide, un volume de tuileau doit y être ajouté pour assurer son étanchéité. Une fois le mélange répandu sur le sol, il doit être battu par des hommes « armés de leviers de bois » pour le rendre parfaitement compact. Enfin, cette couche doit avoir au minimum 23 cm d'épaisseur.

Ordre	**Couche**	**Composition**	**Épaisseur**
3	*Nucleus*	1 volume de chaux 3 volumes de tuileau	L'épaisseur doit être supérieure à 6 doigts (environ 11 cm)
2	*Rudus*	1 volume de chaux 3 volumes de granulat « neuf »	L'épaisseur doit être de 9 pouces au minimum (environ 23 cm)
	Rudus	2 volumes de chaux 5 volumes de granulat « recyclé »	
	Rudus (étanche)	1 volume de chaux 3 volumes de granulat 1 volume de tuileau	
1	*Statumen*	Lit de cailloux posés à sec	La dimension des cailloux doit être au minimum de la paume de la main

Tableau 1 : Composition et épaisseurs des couches de préparation pour les revêtements de sol selon les recommandations faites par Vitruve (De architectura, VII, 1)

Quant à la dernière couche de préparation qui correspond au *nucleus*, elle doit être épaisse d'au moins 11 cm et constituée du mélange d'un volume de chaux et de trois volumes de tuileau. Elle peut éventuellement, recevoir un revêtement en *opus tessellatum*, en *opus sectile*, voire une finition à base d'un mélange de chaux, de sable et de fragments de marbre (Coutelas et Büttner, 2009i).

I.3.4.3. Mise en œuvre des enduits d'étanchéité

L'étanchéité du mortier de chaux est atteinte grâce aux réactions pouzzolaniques qui se produisent entre le liant à base de chaux et les fragments pyroclastiques dans le cas de la pouzzolane naturelle ou la céramique pilée ou concassée[7] lorsqu'il s'agit de pouzzolane artificielle. Ces réactions ont pour effet de produire des aluminosilicates de calcium hydratés, qui contribuent à accroître l'indice d'hydraulicité du mortier de chaux (Elsen et al., 2012) et par conséquent à améliorer sa capacité de protéger les parois contre l'infiltration de l'eau. Parmi les revêtements à base de mortier de chaux, destinés à assurer l'étanchéité dans les ouvrages

[7] La distinction entre la céramique « pilée » et « concassée » réside dans la surface spécifique de l'agrégat réactif qui entre en contact avec l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$) présent dans la chaux (Uğurlu Sağın et al., 2021). En d'autres termes, plus la céramique est finement pilée, plus grande sera la surface spécifique de la pouzzolane, ce qui entraînera une plus grande hydraulicité du mortier. Ainsi, la résistance du mortier en est considérablement augmentée.

hydrauliques, on retrouve l'*opus signinum* dont l'utilisation est recommandée par Vitruve pour étanchéifier les citernes (*De architectura*, VIII, 6, 14 ; traduit par Callebat) :

> […] voici comment on doit procéder pour ces maçonneries de Signia : il faut, tout d'abord, avoir du sable très pur et très rude, puis fragmenter dans la pierre des éclats qui ne pèsent pas plus d'une livre, et faire le mortier en ajoutant la chaux […] dans la proportion de cinq parts de sable pour deux de chaux. Avec des pilons de bois armés de fer, on damera ce mortier dans la tranchée jusqu'au niveau de hauteur prévu.

Bien qu'il ne mentionne pas clairement l'*opus signinum*, il recommande d'utiliser un mélange composé de deux volumes de chaux et de cinq volumes d'agrégats et de compacter ce mélange à l'aide de pilons en bois armés de fer. La composition et la mise en œuvre de cette couche correspondent à celles du *rudus* (tab. 1). Cette couche de préparation est donc, censée recevoir un revêtement en *opus signinum* (Gros, 2006) composé d'un volume de chaux et de trois volumes de tuileau, au même titre que la couche du *nucleus* décrite dans le chapitre qui traite des revêtements de sol (*De architectura*, VII, 1). Un autre revêtement à base de mortier de tuileau, est préconisé par Vitruve pour les murs dans les espaces humides se trouvant en rez-de-chaussée (*De architectura*, VII, 4, 1 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> […] pour les pièces qui sont à rez-de-chaussée, dans le bas des murs, au-dessus du pavement, sur une hauteur de trois pieds environ, on emploiera pour le gobetage et les couches dressées un mortier de tuileau au lieu de mortier de sable, afin que cette partie des enduits ne soit pas gâtée par l'humidité.

Sans préciser les proportions de la chaux et du tuileau qui rentrent dans sa composition, Vitruve détaille la mise en œuvre de l'enduit d'étanchéité : celui-ci doit être appliqué à la base des murs pour les protéger de l'humidité et doit couvrir au moins trois pieds de la hauteur des murs en partant du sol. Dans le cas d'une exposition importante à l'humidité, il recommande d'installer des *tegulae* pour une meilleure isolation des murs (*De architectura*, VII, 4, 2-3). Enfin, il insiste à ce qu'un lait de chaux soit appliqué sur les *tegulae* pour permettre une meilleure adhérence de l'enduit de tuileau qui devra les recouvrir.

I.3.4.4. Mise en œuvre des enduits peints

Concernant la réalisation des enduits peints, Vitruve préconise d'appliquer au minimum sept couches de mortier de chaux, car il considère que la solidité et la durabilité d'un enduit sont étroitement liées au nombre de couches appliquées. Parmi celles-ci, il recommande d'appliquer au moins trois couches de préparation, constituées d'un mélange de chaux et de sable, avec une granularité décroissante à mesure que l'on s'éloigne du mur (*De architectura*, VII, 3, 5 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> […] on jettera sur les murs, à la truelle, un gobetis aussi rugueux que possible […] Cette couche séchant, on en étendra une deuxième, puis une troisième ; ainsi, plus ce support réglé au mortier de sable aura de consistance, plus l'enduit sera solide et résistera au temps.

Les couches suivantes sont décrites au nombre de trois et doivent être composées d'un mélange de chaux et de poudre de marbre (*De architectura*, VII, 3, 6 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> Lorsque, en plus du gobetis, on aura façonné au moins trois couches de mortier de sable, alors il faut dresser des cueillies au mortier de marbre concassé […] Quand on en aura étendu une couche épaisse et qu'elle commencera à sécher, on en appliquera une deuxième d'épaisseur moyenne ; lorsque celle-ci aura été dressée et bien talochée, on en étendra une autre plus fine. Ainsi lorsque les murs auront été renforcés par trois couches de mortier de sable et autant de mortier de marbre, ils ne pourront ni se fissurer ni subir aucun autre dommage.

Bien que Vitruve ne précise pas l'épaisseur recommandée pour chaque couche, comme il le fait pour la réalisation du revêtement de sol, il préconise de réduire progressivement l'épaisseur des couches de finition. L'avant-dernière couche doit être battue et lissée avant d'appliquer la dernière couche qui est la plus fine et qui doit recevoir la couche picturale (*De architectura*, VII, 3, 7 ; traduit par Liou et Zuinghedau) :

> […] lorsque leur solidité, assurée en profondeur par la pression des taloches, aura de surcroît acquis par le lissage la blancheur éclatante et durable du marbre, les murs, grâce aux couleurs étendues avec la couche de finition, jetteront un brillant éclat. Lorsqu'elles ont été soigneusement étendues sur l'enduit encore humide, les couleurs, par ce fait même, ne se ternissent pas, mais tiennent indéfiniment […]

Dans ce passage, Vitruve insiste sur la nécessité d'utiliser une charge composée de poudre de marbre, qui donne à l'enduit l'éclat, la brillance et la blancheur du marbre. Il préconise également, l'application des pigments lorsque l'enduit est encore humide pour leur assurer une meilleure fixation dans la couche picturale. Celle-ci s'explique par l'emprisonnement des pigments entre les cristaux de carbonate de calcium ($CaCO_3$) qui se forment lors de la carbonatation de l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$), au contact du CO_2 présent dans l'air (Coutelas et Palazzo-Bertholon, 2009).

Pline l'Ancien mentionne une technique identique pour la mise en œuvre des enduits peints (*Naturalis historia*, XXXVI, 55), à l'exception du nombre de couches limité à cinq : trois couches de préparation composées d'un mélange de chaux et de sable, suivies de deux couches de finition composées d'un mélange de chaux et de poudre de marbre. Cependant, les deux auteurs ne fournissent aucune indication sur les proportions de chaux, de sable et de poudre de marbre qu'ils recommandent d'utiliser.

I.3.4.5. Mise en œuvre des enduits de stuc

La réalisation des décors architecturaux en relief est mentionnée par Vitruve au même titre que les enduits peints. Il donne des recommandations similaires à savoir, une couche de préparation composée de chaux et de sable, suivie de trois couches de finition composées de chaux et de poudre de marbre. La charge de la couche de préparation doit être, de préférence, constituée d'un sable de rivière (*De architectura*, II, 4, 3) que Vitruve juge plus adapté aux enduits, car il « sèche » lentement et permet d'éviter l'apparition de fissures. La charge dans les couches de finition doit être élaborée méthodiquement : Vitruve suggère de récupérer de la poudre de marbre près des carrières (comme Éphèse ou Magnésie du Méandre) ou de broyer des éclats qui résultent du taillage de blocs de marbre (*De architectura*, VII, 6, 1 ; Liou et Zuinghedau) :

> […] en certains endroits, il se présente sous forme de blocs qui ont des grains translucides comme ceux du sel ; pilés ou broyés, ils se prêtent à l'utilisation dans les travaux de revêtement. Dans les lieux qui en sont dépourvus, ce sont les éclats de marbre, ou, comme l'on dit, les recoupes, que les marbriers abattent en travaillant, qui sont pilées et broyées ; et cette poudre de marbre une fois tamisée, on s'en sert dans les travaux de revêtement. En d'autres régions, par exemple entre Magnésie et Éphèse, il y a des endroits où l'on extrait une poudre toute prête, qu'il n'est besoin ni de broyer ni de passer au crible : elle est aussi fine que celle qu'on a pilée et tamisée à la main.

Ainsi, la poudre de marbre obtenue doit être tamisée trois fois afin d'obtenir trois niveaux de finesse correspondant aux différentes couches de finition. La poudre de marbre la plus fine est spécialement recommandée pour être utilisée dans la dernière couche des enduits de stuc.

Conclusion

Le mortier de chaux a joué un rôle crucial, tout au long de l'histoire de la construction, tant par son utilité dans la liaison des éléments de maçonnerie que par ses propriétés spécifiques dans les revêtements de protection et de décoration. Son utilisation et ses caractéristiques ont évolué au fil du temps, témoignant de son importance et de sa capacité à s'adapter aux besoins des constructeurs des différentes civilisations méditerranéennes. Nous retenons des définitions présentées au début du chapitre, les aspects anthropique et composite du mortier de chaux ainsi que ses caractéristiques similaires aux roches sédimentaires, composées d'agrégats cimentés par un liant minéral. Cette analogie avec les roches sédimentaires est déterminante pour la suite de notre travail de recherche, car elle nous permet de considérer le mortier comme une « roche artificielle » et ainsi, de définir les protocoles appropriés pour l'étude des échantillons d'enduits

et de mortiers collectés. S'agissant du contexte historique de la chaux et du mortier de chaux, l'étude de la littérature scientifique nous permet de situer l'avènement de la chaux chez les sociétés préhistoriques du Proche-Orient. Quant aux premières utilisations de la chaux dans l'architecture, elles remontent à l'Épipaléolithique, dans la culture archéologique du Natoufien et s'intensifient durant le Néolithique dans les sites protohistoriques du Proche-Orient et des Balkans (fig. 1). Ceci témoigne de l'existence d'une véritable industrie de la chaux dans les sociétés primitives du Néolithique, ainsi que de leur maîtrise de la pyrotechnologie et du processus complexe du cycle de la chaux.

La transmission de ce savoir-faire se poursuit chez les civilisations minoenne et mycénienne. Les nombreux exemples d'enduits de décoration et de protection, dont des enduits hydrauliques (fig. 2), témoignent de la connaissance, par les sociétés égéennes, des propriétés réactives des pouzzolanes lorsqu'elles entrent en contact avec la chaux, et ce, dès l'époque archaïque. Mais ce n'est qu'à partir de l'époque classique, puis hellénistique, que le mortier de chaux connait son développement le plus important avec l'émergence de nouveaux types d'usages pour répondre à de nouvelles exigences architecturales, comme les revêtements de sol en *opus signinum* et en *opus tesselatum* qui sont de plus en plus présents dans les cités grecques et puniques (fig. 3). Plus tard, les Romains ont su exploiter la facilité de mise en œuvre du mortier de chaux pour la réalisation de structures innovantes comme les voûtes coulées sur coffrage et les dômes autoportants à oculus. En outre, l'invention du béton romain ou *opus caementicium* leur a permis de construire plus vite et moins cher pour suivre l'expansion de l'Empire en Europe, en Asie Mineure et en Afrique du Nord. Les Romains ont également su maîtriser les techniques liées à la mise en œuvre du mortier de chaux, comme en témoignent les traités des auteurs anciens tels que Vitruve et Pline l'Ancien. Ces derniers donnent des descriptions précises des matières premières et de leurs quantités, ainsi que les méthodes de mise en œuvre pour réaliser des bétons romains, des mortiers de maçonnerie et les divers revêtements à base de mortier de chaux. Parmi ses prescriptions, Vitruve privilégie l'utilisation d'une pierre calcaire très pure (*De architectura*, II, 5, 1) pour produire la chaux aérienne et préconise de rajouter du tuileau ou de la cendre volcanique aux mortiers pour les rendre hydrauliques. Cette recommandation nous amène à penser que les Romains avaient une préférence pour la chaux aérienne, qui était plus facile à mélanger et à mettre en œuvre, contrairement à la chaux hydraulique. Puis, ils contrôlaient l'indice d'hydraulicité du mortier souhaité en ajoutant de la pouzzolane naturelle ou artificielle au mélange. Par ailleurs, il est intéressant de noter que les « recettes » des auteurs anciens ne sont pas toujours retrouvées dans les structures anciennes (Frizot, 1975 ; Coutelas et Palazzo-Bertholon, 2009). Cela suggère que

les constructeurs romains auraient adapté leurs mélanges en fonction des ressources géologiques et des traditions locales. Cette pratique est attestée par les proportions très variables de chaux et de charges retrouvées lors des analyses de mortiers de maçonnerie (Coutelas et Büttner, 2009h), ainsi que par l'utilisation de cendres organiques dans les mortiers romains découverts dans les régions où les influences puniques ont persisté (Secco et al., 2020) et dont Vitruve ne fait pas la mention.

Enfin, il apparaît que les aspects historiques et techniques des mortiers anciens n'ont pas arrêté de susciter l'intérêt de nombreux chercheurs, notamment dans le but de reconstituer les savoir-faire des bâtisseurs anciens, de retracer les origines des matières premières utilisées, ou encore dans le cadre d'études stratigraphiques en archéologie du bâti pour attribuer une datation précise aux structures anciennes.

Chapitre II : Dynamique des recherches sur le mortier romain

Introduction

Les remarquables durabilité et résistance des ouvrages romains construits avec du mortier de chaux ont, depuis longtemps, suscité l'admiration et la curiosité de nombreux chercheurs (Vicat, 1818 ; Wallace, 1865 ; Choisy, 1873 ; Viollet-le-Duc, 1875 ; Dibbin, 1901). De même, la grande diversité de mortiers et d'enduits produits à travers toute l'étendue de l'Empire romain soulève des questions sur les savoir-faire et les technologies employées par les artisans de cet empire (Bouffier, 2019). L'intérêt particulier pour l'étude des mortiers romains s'est développé depuis le siècle des Lumières, avec l'avènement des Encyclopédies et la révolution chimique (Coutelas et Büttner, 2009a). Durant cette période, la pensée scientifique a réalisé une avancée remarquable dans la compréhension des phénomènes chimiques qui interviennent dans la prise du mortier de tuileau, ainsi que des réactions pouzzolaniques de manière plus générale (Büttner, 2020a). On retrouve parmi ces premières études scientifiques, la caractérisation de quelques mortiers romains[8] du Midi de la France (Vicat, 1818), qui a joué un rôle majeur dans le développement de la chaux hydraulique artificielle puis du ciment Portland artificiel. Plus tard, l'une des premières analyses physico-chimiques portant sur des mortiers anciens[9], est publiée dans *Chemical News and Journal of Industrial Science* (Wallace, 1865), dans laquelle les résultats des analyses chimiques sont mis en relation avec les caractéristiques mécaniques des échantillons de mortier. À partir des années 1950, l'émergence de l'archéométrie a permis le développement de nouvelles problématiques de recherche autour des matériaux du patrimoine (Stern, 2001). Plus tard, les travaux de l'ICOMOS et de l'ICCROM ont mis en place des démarches légales et méthodologiques pour encadrer l'étude des mortiers historiques (Válek et al., 2012). Ainsi, l'adoption de la Charte de Venise en 1964, puis la tenue du congrès sur les « Mortiers, ciments et coulis utilisés dans la conservation des

[8] Cette étude, menée par Vicat (1818), a porté sur des bétons, des mortiers de maçonnerie et des enduits de tuileau prélevés à partir d'édifices divers (théâtres, thermes et temples) ainsi qu'à partir d'ouvrages d'art (aqueducs et canaux) gallo-romains. Les échantillons ont été collectés sur les sites antiques de Vesunna, Cahors, Nîmes, le Gard, Vienne, Sarlat et *Uxellodunum*.

[9] L'étude réalisée par Wallace (1865) a porté sur une dizaine d'échantillons de mortiers et d'enduits, prélevés dans divers monuments historiques, tels que la pyramide de Khéops (Gizeh), la Pnyx (Athènes), un temple près de Larnaca (Chypre), la villa d'Hadrien, les thermes de Caracalla, ainsi qu'une structure d'habitation à Herculanum.

bâtiments historiques » en 1981, ont impulsé une nouvelle vague de recherches sur les mortiers romains, en associant les aspects culturels et historiques à des données scientifiques « quantifiables ».

Ainsi, à travers ce deuxième chapitre, on vise à établir un état des recherches sur les mortiers romains, en mettant en avant les problématiques qui émergent le plus de ces recherches. Parmi ces problématiques, on retrouve la question sur le savoir-faire romain, ainsi que la recherche des sources d'approvisionnement en matières premières. En outre, au-delà de savoir-faire romain, nous examinons dans ce chapitre les différentes méthodes qui permettent la datation des mortiers anciens et qui peuvent faciliter la datation des structures anciennes.

II.1. La question du savoir-faire romain

Le mortier de chaux romain est à la fois le résultat concret et la mémoire du travail antique (Coutelas, 2012). Il préserve non seulement des traces de la vie du chantier et des éléments qu'il a contribué à lier, mais il contient également des informations sur les origines de ses composants et les méthodes de sa mise en œuvre (Miriello et al., 2015).

II.1.1. Dans la production de la chaux

Parmi les premières recherches menées sur la chaîne opératoire liée à la production de la chaux par les Romains, on retrouve l'étude des fours à chaux découverts dans la cité antique de *Tipasa*, en Algérie (Baradez, 1957). En s'interrogeant sur la construction du rempart long de 2 100 m qui entoure la cité, Baradez a cherché à expliquer la production de l'importante quantité de chaux nécessaire (qu'il estime entre 4 000 et 7 000 m^3) pour édifier cette fortification militaire et ses ouvrages annexes, et ce, de manière rapide et ininterrompue, entre 146 et 147 apr. J.-C. Ainsi, les fouilles qu'il a conduites l'ont amené à découvrir six fours à chaux, dont un se trouvant dans la partie orientale de la cité, à proximité du rempart, ainsi qu'un groupe composé de cinq fours, implanté à mi-chemin entre la porte secondaire de l'est du rempart et le petit port antique (à environ 300 m). En calculant le volume de chaux nécessaire à la construction de l'enceinte et la durée de l'exécution des travaux, Baradez présente une description de la chaîne opératoire de la production de la chaux et donne une estimation de la durée de chaque phase du cycle de la chaux.

Selon lui, les artisans romains s'approvisionnaient en pierre à chaux à proximité, depuis le massif calcaire du cap Chenoua, distant de *Tipasa* de 6 km en ligne droite par la mer. Le transport des blocs calcaires et du combustible, provenant lui aussi du massif forestier qui

couvre le cap montagneux, se faisait par bateau ou par radeau, tandis que le déchargement de la cargaison se faisait au niveau du petit port antique ou à défaut, au niveau d'une crique protégée se trouvant à proximité. S'agissant des fours à chaux, Baradez (1957) indique que ceux de la partie orientale qu'il a étudiés sont creusés dans la roche : le premier four « F1 » est de forme cylindrique, avec un diamètre de 3,80 m et une profondeur de 2,35 m (hauteur de chargement non comprise). Le second four « F2 » est de plus grande capacité et présente des dimensions d'environ 5,70 m de diamètre et 6 m de profondeur[10]. Les deux fours sont à foyer simple, avec une cavité aménagée au milieu de la sole et creusée dans la roche, qui devait servir de cendrier. Des briques réfractaires ont été retrouvées par Baradez, dont il justifie l'utilisation comme parement pour limiter la cuisson des parois rocheuses exposées aux températures élevées du foyer. Des aires de chargement sont aménagées devant chaque four et sont également taillées dans la roche. Elles sont de dimensions proportionnelles aux capacités des fours à chaux : l'aire de chargement du four « F1 » a une longueur de 5,70 m et une largeur de 5,50 m, tandis que l'aire de chargement du four « F2 » est carrée et mesure 12 m de côté. La durée de fonctionnement des fours à chaux de *Tipasa* est évaluée, d'après Baradez entre 18 et 24 mois sans discontinuité. Ainsi, il estime qu'un cycle de fonctionnement intensif se reproduit tous les douze jours, durant lesquels deux jours sont nécessaires au chargement des blocs de calcaire dans le four, trois jours sont nécessaires à la cuisson, quatre jours sont consacrés au refroidissement des blocs et enfin, deux jours sont nécessaires pour le déchargement des blocs de chaux vive.

En somme, cette étude a permis une avancée significative dans la compréhension du processus de production de la chaux par les artisans romains. Cependant, bien qu'elle soit contemporaine au développement de l'archéométrie, les traces de chaux retrouvées dans les deux fours n'ont pas fait l'objet de caractérisation archéométrique afin d'identifier avec certitude l'origine de la roche calcaire proposée par Baradez.

II.1.2. Dans l'extinction de la chaux

Durant les années 1980, l'étude des cuves à chaux gallo-romaines découvertes dans le Haut-Limousin (Loustaud, 1983) a apporté un nouvel éclairage sur l'extinction de la chaux. En effet, ce processus du cycle de la chaux est quasiment absent des textes des auteurs anciens

[10] Les dimensions des fours à chaux « F1 » et « F2 » sont supérieures aux dimensions recommandées par Caton l'Ancien (*De re rustica*, XLIV, 1-4) qui sont de dix pieds romains pour le diamètre (environ 2,95 m) et de vingt pieds pour la hauteur (environ 5,89 m). Ces différences de tailles peuvent être expliquées par la quantité de chaux qu'il a fallu produire en un court délai (entre 18 et 24 mois), pour la construction du rempart. En effet, il n'est pas rare de trouver des fours à chaux avec des dimensions exceptionnelles, en rapport avec la taille de l'ouvrage et la durée de la construction (Adam, 2011).

comme Caton l'Ancien ou Vitruve et ce, à l'exception de Pline l'Ancien qui en fait brièvement la mention, en rappelant une ancienne loi romaine qui interdisait aux entrepreneurs d'utiliser une chaux qui aurait été éteinte depuis moins de trois ans (*Naturalis historia*, XXXVI, 55).

Ainsi, Loustaud (1983) fait une analyse détaillée des sept cuves à chaux découvertes entre 1969 et 1982 lors des fouilles de structures d'habitation[11] de l'époque romaine. Les cuves retrouvées ont des profondeurs similaires (de 0,36 à 0,46 m) et sont généralement associées par deux. Les plus grandes font entre 1,00 et 2,38 m de longueur et entre 0,50 à 1,43 m de largeur, tandis que les plus petites font entre 0,52 et 1,31 m de longueur et entre 0,40 à 1,08 m de largeur (tab. 2). Toutes les cuves présentent l'aspect de caissons de faibles volumes encastrés dans le sol, avec des parois en *tegulae* et un fond en chape de mortier hydraulique. On retrouve dans certaines cuves une croûte de chaux carbonatée, avec une épaisseur qui varie entre 1 et 5 cm.

Localisation	**Grande cuve**			**Petite cuve**		
	Longueur	**Largeur**	**Profondeur**	**Longueur**	**Largeur**	**Profondeur**
Domus du boulevard Gambetta	1,06 m	0,66 m	0,36 m	0,52 m	0,46 m	0,36 m
Quartier de la Croix-Mandonnaud	1,00 m	0,50 m	-	-	-	-
Jardins de l'Évêché	-	-	-	0,80 m	0,40 m	-
Avenue Baudin	-	-	-	-	-	-
Villa rurale de Brachaud	2,38 m	1,43 m	0,46 m	1,31 m	1,08 m	0,41 m

Tableau 2 : Dimensions des cuves à chaux gallo-romaines retrouvées pendant les fouilles dans l'agglomération de Limoges (d'après Loustaud, 1983)

Toujours d'après Loustaud, les grandes cuves servent à l'extinction, en faisant abondamment détremper les blocs de chaux vive dans l'eau. Le mélange obtenu y était énergiquement brassé pour que « l'extinction et la fragmentation soient les plus complètes possible » (Loustaud, 1983). Ensuite, la chaux éteinte était transvasée dans les petites cuves, qui servaient, quant à elles, à affiner l'hydratation de la chaux. La mixture y était vigoureusement brassée jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, qui était stockée dans des récipients étanches[12] pour être livrée sur les chantiers. Un autre exemple provient du site gallo-romain de Molesme « Sur-les-Creux » (Coutelas, 2005), où la cuve découverte présente un fond rendu étanche à l'aide de planches de sapin et où les traces de chaux cristallisée (calcite et portlandite) témoignent des usages multiples de cette cuve pour l'extinction de la chaux vive, l'affinage de la chaux éteinte et le stockage temporaire de la pâte de chaux.

[11] Il s'agit des fouilles des structures gallo-romaines de la *domus* du boulevard Gambetta (1969), du quartier de la Croix-Mandonnaud (1972), des jardins de l'Evêché (1974), de l'avenue Baudin (1982) et de la villa rurale de Brachaud (de 1976 à 1982).

[12] Les récipients devaient obligatoirement être étanches pour éviter la carbonatation de la chaux éteinte par contact avec le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air ambiant. Il s'agissait généralement d'amphores, qui facilitaient le transport de la chaux sur les chantiers tout en protégeant les artisans de son effet caustique (DeLaine, 2021).

II.1.3. Dans la mise en œuvre du mortier

Durant les années 1970, de nombreux chercheurs francophones ont étudié des questions qui concernent la mise en œuvre des mortiers et des enduits romains (Frizot, 1974 ; Furlan et Bissegger, 1975 ; Frizot, 1977) en adoptant de nouvelles approches « archéométriques » et en mobilisant des méthodes d'analyses scientifiques issues, entre autres de la physique, de la chimie et de la géologie. Ainsi, la publication « Mortiers et enduits peints antiques : étude technique et archéologique » (Frizot, 1975) constitue une avancée majeure dans la recherche sur les mortiers romains. Pour l'étude des mortiers gallo-romains, Frizot a adopté une approche « par groupes » similaire à l'étude de la céramique sigillée et des monnaies anciennes, en considérant des critères discriminants comme les composantes minéralogiques ou la granulométrie de la charge, pour faire apparaître les analogies et établir des recoupements entre les différents échantillons. En considérant le mortier romain comme « un produit chimique et géologique », Frizot a appliqué, de manière systématique, des méthodes d'analyses physico-chimiques (spectrométrie d'absorption atomique et fluorescence X) et pétrographiques (observation au microscope des lames minces) sur des échantillons de mortier provenant de 18 sites archéologiques gallo-romains.

Il ressort de cette étude que la mise en œuvre des mortiers de maçonnerie par les artisans gallo-romains était, en réalité, différente de la technique « idéale » préconisée par les auteurs de l'Antiquité, comme Vitruve et Pline l'Ancien. En effet, Frizot conclut qu'au contraire, les artisans gallo-romains faisaient preuve d'empirisme dans la composition du mortier, en adaptant les « recettes » en fonction des ressources géologiques locales et des caractéristiques des matières premières employées. Par ailleurs, Frizot indique que malgré la variation observée dans la composition des enduits peints gallo-romains, leur mise en œuvre correspond aux recommandations données par Vitruve (*De architectura*, VII, 3, 5), du moins en ce qui concerne la nécessité de superposer les multiples couches de préparation et de finition pour obtenir des enduits durables.

Plus tard, les travaux de la *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages* (RILEM) ont permis de rassembler les nombreux chercheurs autour du sujet des mortiers historiques pour mettre en place de nouvelles approches d'analyses archéométriques (Válek et al., 2012). Ainsi, la démocratisation de l'accès aux nouveaux instruments d'analyses physico-chimiques et leur facilité d'utilisation (Bellot-Gurlet et Dillmann, 2019) ont conduit, depuis les années 2000, à l'émergence d'une multitude de travaux de recherche sur la question du savoir-faire lié aux mortiers archéologiques. En plus du recours à la pétrographie, à la cathodoluminescence (CL) et à l'examen des échantillons de

mortier au microscope électronique à balayage (MEB-EDS), Büttner et Coutelas ont suivi une approche ethnoarchéologique. En effet, ils considèrent le mortier comme « le témoin d'un patrimoine technique » (Coutelas, 2003) et « la représentation d'une culture et d'un environnement que l'homme a su et pu exploiter » (Büttner, 2003).

Selon Büttner (2003), les caractéristiques intrinsèques des mortiers archéologiques sont le reflet de deux types de facteurs. D'une part, les facteurs environnementaux qui influencent les matières premières provenant des ressources géologiques locales. D'autre part, les facteurs purement anthropiques qui sont liés aux aspects culturels, techniques et historiques propres aux artisans. Ainsi, dans le contexte de l'archéologie du bâti, ces deux facteurs permettent de répondre à des problématiques liées au déroulement et à la chronologie du chantier archéologique. Enfin, d'après Coutelas (2003), l'interprétation des données minéralogiques et pétrographiques des composants du mortier, permet de déterminer « les séquences opératoires » menées par les artisans romains. La connaissance de ces chaînes opératoires conduit ainsi, à la déduction de la part de l'héritage culturel et des considérations techniques et économiques, dont relèvent les choix des artisans romains pour la mise en œuvre de leurs mortiers.

II.1.4. Dans la durabilité et la résistance du mortier

Il a été démontré que les propriétés liées à la résistance mécanique et la durabilité du mortier romain sont le résultat des réactions chimiques qui se produisent pendant de la prise du mortier, entre la chaux hydratée et les agrégats réactifs riches en silice et en alumine comme les inclusions de cendre volcanique, de cendre organique ou de tuileau (Jackson et al., 2014 ; Lancaster, 2019 ; Secco et al., 2020, 2022). L'étude de la technique romaine de pose des décors en marbre (Cinzia et al., 2011) montre que l'ajout d'agrégats réactifs permet au mortier de chaux une prise plus rapide grâce aux réactions pouzzolaniques, contrairement au mortier à base de chaux aérienne, dont la prise dépend de la carbonatation du liant par contact avec le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air. Les recherches menées sur les réactions pouzzolaniques dans les mortiers romains ont permis de comprendre les mécanismes d'interaction entre le liant à base de chaux et les agrégats réactifs (Jackson et al., 2013). En utilisant des techniques d'imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB-EDS) et de caractérisation par diffraction des rayons X (DRX) et par micro-tomographie par rayons X, il a été possible d'identifier les phases minérales qui résultent de la réaction entre la chaux hydratée (portlandite) et les aluminosilicates qui entrent dans la composition des pouzzolanes, dont les minéraux de la famille des zéolites (phillipsite et chabazite) ainsi que l'halloysite.

Les aluminosilicates présents dans la matrice vitreuse des agrégats réactifs se dissolvent lorsqu'ils entrent en contact avec la chaux hydratée[13]. Cela libère des ions de calcium, de silicium, d'aluminium, de sodium et de potassium, entraînant une surcharge de la solution aqueuse en ces éléments (Jackson et al., 2014). Ainsi, de nouvelles phases minérales hydratées se forment par nucléation, puis par cristallisation des différents éléments contenus dans la solution saturée. La lente croissance par enchevêtrement des cristaux d'aluminosilicates de calcium hydratés (C-A-S-H), forme une matrice fibreuse (Vanorio et Kanitpanyacharoen, 2015) qui se développe progressivement, au niveau des interfaces de contact entre le liant et les agrégats réactifs, ainsi qu'à l'intérieur des pores et des interstices capillaires de la matrice cimentaire. Les cristaux de C-A-S-H prennent la forme de plaques lorsqu'il s'agit de strätlingite, ou se développent sous la forme d'agrégats fibreux dans le cas de l'Al-tobermorite (Jackson et al., 2017). Ces résultats prouvent que la formation de nouvelles phases minérales d'aluminosilicates de calcium hydratés dans la matrice cimentaire joue un rôle essentiel à la fois, dans la résistance mécanique et la durabilité du mortier romain, ainsi que dans son caractère hydraulique. Ces nouvelles phases minérales cristallisent à l'intérieur des vides et remplissent les interstices de la matrice du liant, ce qui confère au mortier hydraulique son imperméabilité à l'eau (Jackson et al., 2018 ; Seymour et al., 2022).

Plus récemment, de nouvelles recherches ont permis d'établir le lien entre la forte présence de nodules de chaux dans le mortier romain et sa remarquable durabilité. En effet, les nodules résiduels de chaux, retrouvés fréquemment dans les mortiers romains, forment des « grumeaux » blanchâtres dans la matrice cimentaire et sont couramment considérés comme le résultat de malfaçons intervenues durant la chaîne opératoire, du fait d'une mauvaise hydratation de la chaux, préalable à la prise (Büttner, 2002 ; Coutelas, 2003). Or, les résultats de l'étude des mortiers romains du site archéologique de *Privernum* (Seymour et al., 2023) présentent un nouvel éclairage sur la fonction de ces nodules. En effet, l'analyse des nodules de chaux résiduels par des techniques d'imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB-EDS), de caractérisation par diffraction des rayons X (DRX) et par spectroscopie Raman montre que la surface externe des nodules est composée de chaux carbonatée ($CaCO_3$), tandis que le cœur est constitué de chaux vive (CaO). Ceci indique que la chaux vive était rajoutée intentionnellement par les artisans romains, lors de la mise en œuvre du mortier, pour encapsuler l'oxyde de calcium (CaO) et le rendre disponible à l'intérieur de la matrice cimentaire après la prise du mortier (Seymour et al., 2023).

[13] La dissolution des aluminosilicates (phillipsite, chabazite, halloysite, etc…) qui composent les pouzzolanes naturelles et artificielles intervient en milieu alcalin, au contact de l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$) ou « portlandite », qui favorise l'élévation du pH (entre 12 et 14) de la solution interstitielle (Jackson et al., 2013).

L'équipe de chercheurs explique que lorsque de l'eau s'infiltre dans le réseau capillaire du mortier de chaux, l'oxyde de calcium permet de surcharger la solution aqueuse avec des ions de calcium, qui forment du carbonate de calcium ($CaCO_3$) par cristallisation au contact de dioxyde de carbone (CO_2). D'une part, ceci permet le remplissage des interstices et des vides[14] par des cristaux de calcite néoformés, donnant au mortier la propriété d'un matériau auto-cicatrisant. D'autre part, en l'absence de dioxyde de carbone, l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$) joue un rôle essentiel en augmentant le pH de la solution aqueuse. Ainsi, la solution basique active de nouvelles réactions pouzzolaniques lorsque la portlandite entre en contact, à nouveau, avec les agrégats réactifs, conduisant à une amélioration des performances mécaniques et de la durabilité du mortier romain au fil du temps.

II.2. La question de la provenance des matières premières

S'agissant de la provenance des matières premières qui composent le mortier romain, les recherches sur l'origine de la pouzzolane naturelle menées par le groupe de recherche *The Roman Maritime Concrete Study* (ROMACONS) entre 2001 et 2009 (Oleson et al., 2004 ; Jackson et al., 2012) constituent une contribution importante dans la reconstitution de la chaîne opératoire mise en place par les artisans romains. Le but était de rechercher dans quelle mesure, était appliquée la recette recommandée par Vitruve, pour la mise en œuvre des mortiers hydrauliques en Italie et dans le reste du monde méditerranéen pendant les époques de la République et de l'Empire. L'étude a porté sur des mortiers hydrauliques prélevés depuis des structures maritimes, avec des dates de construction connues et situées dans les provinces romaines du sud de l'Europe et de la Méditerranée orientale (fig. 5). Il s'agit du port de *Cosa*, des jetées romaines à Santa Liberata, des ports de *Claudius* et *Traianus* à Ostie (*Ostia Antica*), du port de *Nero* à Anzio (*Antium*), des structures portuaires de Baïes (*Baiae*), ainsi que des installations portuaires des cités d'Egnazia (*Egnatia*), de Césarée (*Caesarea Palestinae*), de Chersónissos (*Chersonasus*), de Soles (*Soli-Pompeiopolis*) et d'Alexandrie (*Alexandria*).

[14] Les vides dans les mortiers peuvent être des pores de formes sphériques qui résultent de l'évaporation de l'eau de gâchage, des pores de formes oblongues qui résultent du brassage du mortier lors de sa mise en œuvre, ou encore des microfissures qui peuvent se produire pendant la prise (par le retrait du mortier ou le tassement lent et progressif de la maçonnerie).

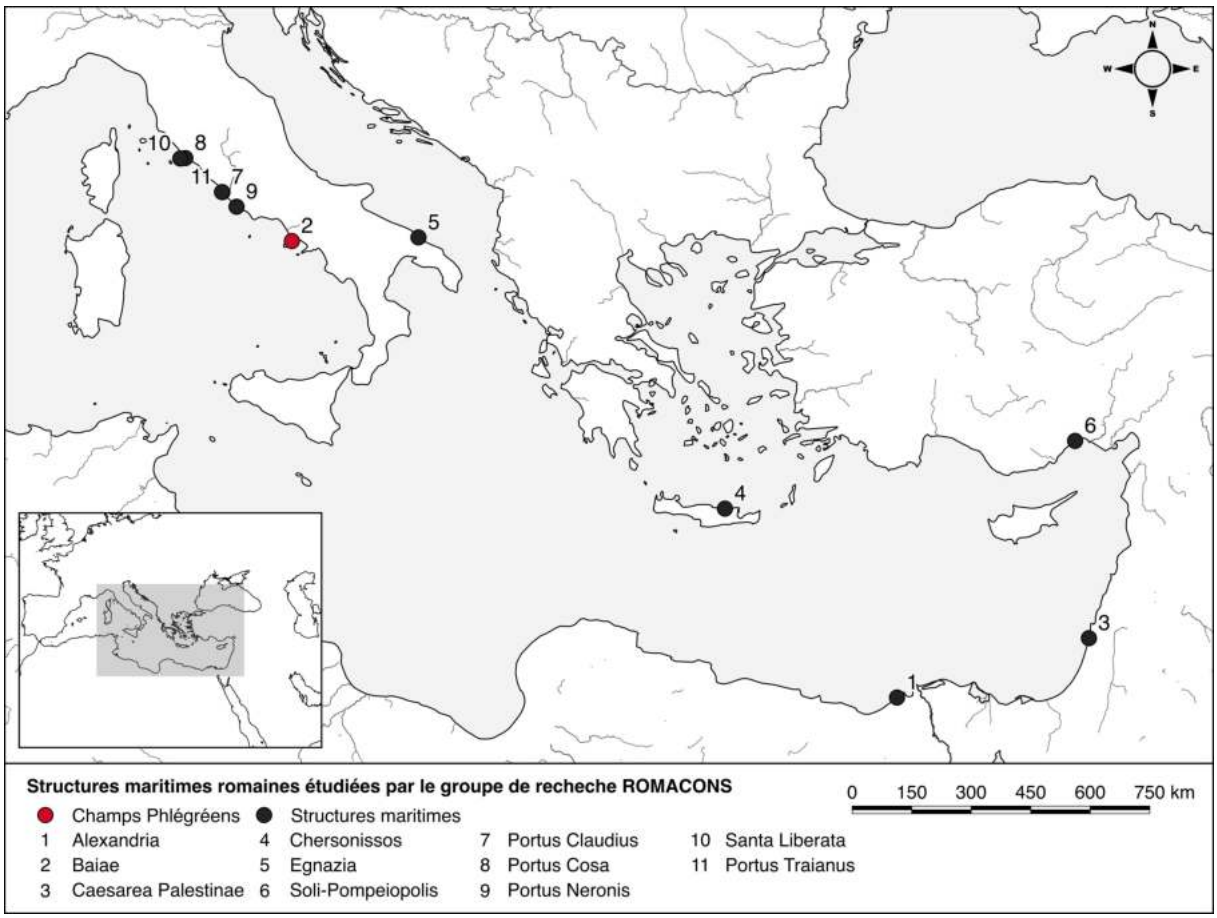

Figure 5 : Localisation des structures maritimes romaines dont les mortiers hydrauliques ont été étudiés par le groupe de recherche ROMACONS (d'après Jackson et al., 2012)

Plusieurs techniques d'analyse ont été utilisées pour caractériser les agrégats réactifs présents dans les mortiers. D'une part, l'analyse pétrographique des lames minces au microscope optique polarisant a permis de caractériser la composition minéralogique et l'apparence des agrégats réactifs, complétée par l'examen de leur microstructure à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB). D'autre part, la recherche des phases minérales des agrégats réactifs, ainsi que celles résultant des réactions pouzzolaniques, a été réalisée par les techniques de diffraction des rayons X (DRX) et de résonance magnétique nucléaire (RMN). Enfin, les données géochimiques des agrégats ont été obtenues à l'aide du spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) pour les éléments majeurs et par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) pour les éléments-traces. L'étude pétrographique des échantillons a permis de déterminer la nature volcanique des agrégats réactifs utilisés dans les mortiers hydrauliques de ces installations portuaires. En effet, la plupart des fragments pyroclastiques présentent une matrice vitreuse (texture vitrophyrique) avec des inclusions de cristaux de feldspath et de clinopyroxène, ainsi que des phénocristaux de sanidine (Jackson et al., 2013). L'observation des agrégats au microscope électronique à balayage a révélé une très forte microporosité dans

la matrice vitreuse, avec des pores variant de formes sphériques à allongées, indiquant qu'il s'agit de fragments de ponces et de tufs volcaniques, produits lors d'éruptions explosives.

L'analyse des éléments majeurs des fragments pyroclastiques retrouvés dans les bétons et mortiers hydrauliques des ports de *Cosa*, *Portus* (*Claudius* et *Traianus* à *Ostia Antica*) et *Nero* (*Antium*), indique une composition riche en alcalins (une concentration de Na_2O + K_2O qui varie entre 10,16 et 11,52 % pds) avec une concentration intermédiaire en silice (la teneur en SiO_2 varie entre 57,35 et 59,63 % pds). Les valeurs obtenues ont permis d'identifier la provenance de la pouzzolane depuis la baie de Pouzzoles, qui fait partie de la région volcanique de la baie de Naples (Oleson et al., 2004). L'analyse pétrographique du béton hydraulique utilisé dans les brise-lames de Santa Liberata, située sur la même côte de la mer Tyrrhénienne, a révélé la présence d'inclusions de ponces et de fragments de tuf volcanique dans le mélange (Vola et al., 2011). En comparant les observations pétrographiques de ces inclusions avec les dépôts pyroclastiques prélevés à Bacoli, dans la périphérie de Pouzzoles, il a été possible d'établir un lien entre la pouzzolane utilisée pour la construction des brise-lames de Santa Liberata et les téphras qui se trouvent dans les champs Phlégréens (*Campi Flegrei*), en périphérie de Pouzzoles (fig. 5). En effet, les ponces et le tuf volcanique présentent tous, une texture porphyrique avec une matrice microcristalline et des phénocristaux de sanidine et de clinopyroxène. La concentration en minéraux alcalins (Na_2O + K_2O) est d'environ 13,40 % pds, avec une concentration intermédiaire en silice (SiO_2) qui varie entre 51,70 et 52,50 % pds. Ces teneurs correspondent aux concentrations retrouvées dans les dépôts pyroclastiques du *Neapolitan Yellow Tuff* (NYT) de Bacoli, qui sont d'environ 11,20 % pds pour les minéraux alcalins et d'environ 52,50 % pds pour la silice (Vola et al., 2011).

L'étude pétrographique des mortiers hydrauliques provenant des structures portuaires de Baïes (*Bainus Sinus*, *Portus Baianus* et *Portus Iulius*), montre l'utilisation d'agrégats pouzzolaniques de faciès similaire. Les fragments pyroclastiques présentent une matrice vitreuse microporeuse, avec des inclusions de phénocristaux de sanidine et de clinopyroxène, ainsi que des phases minérales authigénétiques comme l'analcime, la phillipsite, la chabazite et la calcite (Jackson et al., 2013). L'analyse de la composition chimique des ponces, présente des teneurs élevées en minéraux alcalins (Na_2O + K_2O), variant entre 8,61 et 11,33 % pds et une concentration en silice (SiO_2) estimée entre 40,90 et 50,99 % pds. La teneur en silice, inférieure à 60 % pds, s'explique par deux facteurs principaux. D'une part, sa dissolution lors de la réaction pouzzolanique en présence d'hydroxyde de calcium, conduisant à la formation de nouvelles phases minérales d'aluminosilicates de calcium hydratés. D'autre part, la silice subit une altération naturelle dans l'environnement marin dans lequel est immergé le béton romain

(Jackson et al., 2013). En outre, les éléments-trace mesurés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) présentent des ratios de zirconium/yttrium (Zr/Y) et niobium/yttrium (Nb/Y) qui sont similaires dans tous les fragments pyroclastiques analysés. La comparaison de ces ratios a permis au groupe de recherche ROMACONS d'identifier avec précision, la signature chimique de l'éruption volcanique à l'origine des agrégats pouzzolaniques utilisés. Les ratios de Zr/Y se situent entre 12,91 et 15,09 tandis que les ratios de Nb/Y varient entre 1,94 et 2,03. Ces résultats correspondent à la composition chimique des téphras des champs Phlégréens et particulièrement, ceux observés dans le dépôt de roches pyroclastiques du cratère volcanique du lac d'Averne, qui se situe à environ 4,5 km au nord-ouest de Pouzzoles (Jackson et al., 2013).

En Crète, les fragments de ponces retrouvés dans les mortiers hydrauliques du port romain de *Chersonasus* présentent une composition chimique similaire, riche en minéraux alcalins (une concentration de Na_2O + K_2O supérieure à 10 % pds) avec une concentration intermédiaire en silice (environ 60 % pds de SiO_2). Ces valeurs ont permis d'écarter l'hypothèse de la provenance de la cendre volcanique depuis l'île voisine de Santorin, dont la géochimie des téphras présente une faible teneur en K_2O (inférieure à 3 % pds) et une concentration en Na_2O + K_2O inférieure à 8 % pds (Brandon et al., 2005). D'après le même groupe de chercheurs, bien que la géochimie des fragments de ponces présente des similarités avec la composition chimique des dépôts pyroclastiques de l'île volcanique de Kos ou du sud-ouest de la Turquie, il est fort probable que la pouzzolane provienne des dépôts pyroclastiques des champs Phlégréens. Plus loin, en Cilicie, le mortier hydraulique des structures portuaires de *Soli-Pompeiopolis* (près de Mesrin) présente une composition homogène avec des inclusions de pouzzolane naturelle. Celle-ci est principalement constituée de ponces et de fragments de tuf volcanique (Brandon et al., 2010). L'étude pétrographique des fragments pyroclastiques montre une matrice vitreuse et microporeuse, avec des inclusions de phénocristaux de sanidine, de feldspath plagioclase et de clinopyroxène (Stanislao et al., 2011). L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) indique la présence des phases minérales authigénétiques comme la chabazite, l'analcime et la phillipsite ainsi que des phases minérales d'altération comme la calcite, l'ettringite et la tobermorite.

D'après le groupe de recherche ROMACONS, la composition chimique des fragments pyroclastiques confirme le lien entre la pouzzolane utilisée à *Soli-Pompeiopolis* et les sédiments volcanoclastiques de la région volcanique des champs Phlégréens. L'association des phases minérales authigénétiques de la phillipsite, la chabazite et l'analcime ainsi que la présence de phénocristaux de sanidine et de pyroxène, correspondent à l'éruption du *Neapolitan Yellow Tuff*

(NYT) datant de 15000 AP, ainsi qu'à l'éruption de *Baia-Fondi di Baia* qui remonte à 9600 AP (Stanislao et al., 2011). En Méditerranée orientale, les résultats de l'étude des mortiers hydrauliques du port de *Caesarea Palestinae*, construit entre 23 et 15 av. J.-C. sous le règne du roi Hérode le Grand, démontrent que la composition chimique des inclusions de pouzzolane est identique à celle des fragments pyroclastiques présents dans les mortiers hydrauliques des structures portuaires de la mer Tyrrhénienne et de *Soli-Pompeiopolis*. De plus, elle présente des similarités avec la composition chimique des sédiments volcanoclastiques des champs Phlégréens, en particulier ceux de Pouzzoles (Votruba, 2007). L'analyse minéralogique indique la présence de sanidine et de clinopyroxène dans les fragments pyroclastiques associés aux phases minérales de l'analcime, la chabazite et la phillipsite, ce qui correspond à la minéralogie du *Neapolitan Yellow Tuff* des champs Phlégréens (Vola et al., 2011 ; Secco et al., 2022).

Le port de *Caesarea Palestinae* fait partie des plus grandes entreprises de l'époque romaine, construit sous le règne de l'empereur Auguste. D'après Votruba (2007), pour la construction du port, le roi Hérode le Grand aurait passé commande auprès de Marcus Agrippa, qui était le général en chef et l'un des proches conseillers d'Auguste. En effet, Marcus Agrippa aurait été l'un des principaux protagonistes dans la logistique d'acheminement de la pouzzolane depuis les champs Phlégréens jusqu'en Judée ainsi que dans le déploiement des ouvriers romains expérimentés dans la construction avec du mortier hydraulique. Marcus Agrippa aurait acquis une expérience notable dans la construction de structures navales dans la baie de Naples, notamment à travers le complexe portuaire *Portus Julius*. De plus, sa proximité avec des architectes et des techniciens romains tels que Vitruve (McEwen, 2003) lui a vraisemblablement conféré une compréhension approfondie des propriétés réactives des cendres volcaniques entrant dans la composition du mortier hydraulique. Les calculs réalisés par Votruba (2007) permettent de mesurer l'ampleur du projet de construction du port de *Caesarea Palestinae* : il estime le volume des structures en béton hydraulique à 78 000 m^3. À partir des observations faites sur les échantillons, il évalue la quantité de *caementa* en kurkar (calcarénite) d'origine locale à 80 % du volume, soit 62 400 m^3 et la quantité de mortier hydraulique à 20 % du volume, soit 15 600 m^3. Compte tenu de la diminution d'un tiers du volume des matières premières pendant le gâchage et la mise en œuvre du mortier, il considère que le volume initial des composants était de 23 400 m^3. En analysant les échantillons de mortier hydraulique, il a été possible de déterminer la proportion recommandée par Vitruve (*De architectura*, V, 12, 2), c.-à-d. deux volumes de pouzzolane pour un volume de chaux. Sur cette base, Votruba a estimé le volume de chaux à 7 800 m^3 et le volume de pouzzolane naturelle à 15 600 m^3. Il a également, ajouté un volume supplémentaire de 10 % pour compenser les

pertes lors du transport des matières premières et la mise en œuvre du béton hydraulique, ce qui porte le volume total de pouzzolane importée à 17 300 m^3. S'agissant de son acheminement jusqu'à *Caesarea Palestinae*, Votruba (2007) évalue à environ deux mois la durée d'un voyage pour parcourir la distance de 1 000 miles nautiques qui sépare *Puteoli* de *Caesarea Palestinae*. Ainsi, pour transporter le volume de 17 300 m^3 de pouzzolane, il aurait fallu au moins, 44 cargaisons complètes, chaque cargaison ayant une capacité de 400 tonnes. Ces cargaisons étaient chargées à bord de navires céréaliers qui repartaient vides de Pouzzoles vers Alexandrie. Les chargements de pouzzolane devaient alors servir de ballast pour stabiliser les navires pendant leur acheminement à *Caesarea Palestinae* (Votruba, 2007).

Durant les cinq dernières années, de nouvelles recherches sur l'origine de la pouzzolane naturelle utilisée dans les constructions romaines confirment la majorité de sa provenance depuis la région volcanique de la baie Naples. Parmi ces recherches, on retrouve les études menées sur les mortiers romains de deux mausolées de la nécropole de Cumes (*Cumae*) que sont le mausolée D46b et le mausolée A63, connu sous le nom de « Mausolée du Sphinx ». L'analyse pétrographique des échantillons de mortier des deux mausolées confirme la présence d'agrégats pyroclastiques, composés d'une matrice vitreuse avec des inclusions de phénocristaux de sanidine, de feldspath plagioclase et de clinopyroxène. Les phases minérales caractéristiques du *Neapolitan Yellow Tuff* (NYT) que sont la phillipsite, la chabazite et l'analcime ont été identifiées dans la composition des fragments de ponces et du tuf volcanique utilisés comme pouzzolane dans les mortiers des deux mausolées. En revanche, ces téphras présentent deux compositions chimiques distinctes. La première série présente une concentration intermédiaire en silice et riche en minéraux alcalins avec des teneurs en $Na_2O + K_2O$ entre 12,4 et 14,0 % pds et des teneurs en SiO_2 entre 59,6 et 64,0 % pds (Di Benedetto et al., 2018 ; Graziano et al., 2018). Cette série correspond à des fragments pyroclastiques de natures trachytiques à phonolitiques dont la géochimie est similaire à celle des dépôts du *Neapolitan Yellow Tuff* (NYT). La seconde série présente une concentration plus faible en SiO_2 variant de 56,2 à 58,4 % pds et des teneurs en $Na_2O + K_2O$ comprises entre 11,0 et 12,7 % pds. Elle correspond aux dépôts volcanoclastiques de l'éruption ignimbritique de Campanie (CI) qui fait également partie des champs Phlégréens (Graziano et al., 2018).

En outre, les études récentes portant sur le mortier romain employé dans les villas telles que la *villa dei Quintili* à Rome, la *villa Bonanno* à Palerme, la *villa del Pezzolo* et la *villa del Capo* à Sorrente, révèlent que les artisans romains pouvaient se fournir en pouzzolane naturelle non seulement, depuis les champs Phlégréens, mais également, à partir des dépôts volcanoclastiques des monts Albains dans la région du Latium et du complexe Somma-Vésuve

en Campanie. En effet, les mortiers romains de la résidence impériale *villa dei Quintili* présentent des inclusions de pouzzolane naturelle avec trois faciès pétrographiques différents, identifiés comme *Pozzolana Rossa* de couleur rouge, *Pozzolana Nera* de couleur noire et *Pozzolanella* de couleur grise.

Les fragments pyroclastiques de *Pozzolana Rossa* présentent une texture oligophyrique avec une matrice vitreuse de couleur marron foncé, avec quelques phénocristaux de leucite et de clinopyroxène. La composition chimique de ces lithoclastes, présente des teneurs en SiO_2 entre 47,82 et 55,54 % pds et des concentrations en Na_2O + K_2O entre 1,54 et 8,13 % pds (Belfiore et al., 2015). Les fragments de *Pozzolana Nera* présentent une texture porphyrique avec une matrice vitreuse microlithique et des inclusions de phénocristaux, de clinopyroxène, de leucite et de biotite. La composition chimique des lithoclastes de *Pozzolana Nera* présente des teneurs en SiO_2 entre 52,11 et 58,07 % pds et des concentrations en Na_2O + K_2O entre 3,50 et 10,87 % pds. Les agrégats de *Pozzolanella* présentent, quant à eux, une texture et une minéralogie similaire à ceux de *Pozzolana Nera* avec une présence plus importante de phases minérales mafiques. La composition chimique des fragments pyroclastiques de *Pozzolanella* présente des teneurs en SiO_2 entre 51,26 et 62,47 % pds et des concentrations en Na_2O + K_2O entre 0,71 et 9,37 % pds. Les compositions minéralogiques des trois types de pouzzolane naturelle, à savoir la *Pozzolana Rossa*, la *Pozzolana Nera* et la *Pozzolanella*, ainsi que les concentrations en éléments majeurs et en éléments-trace dans les matrices des fragments pyroclastiques et des phénocristaux de clinopyroxène, ont permis de déterminer l'origine de ces agrégats. En effet, ces téphras proviennent essentiellement des dépôts volcanoclastiques de la carrière de la *Tenuta di Tor Marancia* (Belfiore et al., 2015), située dans les monts Albains dans la région du Latium.

S'agissant de la *villa Bonanno*, l'observation pétrographique des couches de mortiers de préparation de la mosaïque du *frigidarium*, révèle la présence d'inclusions de pouzzolane naturelle présentant des textures microlithiques avec des inclusions de sanidine, de clinopyroxène et de feldspath plagioclase. L'analyse de la composition chimique de ces agrégats a permis d'identifier des concentrations en silice et en minéraux alcalins caractéristiques des dépôts pyroclastiques des champs Phlégréens (Montana et al., 2018). À Sorrente, les recherches sur les mortiers romains de la *villa del Pezzolo* (Rispoli et al., 2019) et de la *villa del Capo* (Rispoli et al., 2021) révèlent la présence d'inclusions de pouzzolane dont les origines diffèrent suivant les phases de construction. Dans les phases les plus anciennes, les mortiers présentent des ponces et des fragments de tuf volcanique avec des matrices vitreuses riches en feldspaths ainsi que des phénocristaux de sanidine, de feldspath plagioclase et de

clinopyroxène. Les phases minérales associées comme la phillipsite, la chabazite et l'analcime suggèrent comme source de provenance les champs Phlégréens et particulièrement les dépôts volcanoclastiques de l'éruption ignimbritique de Campanie (CI). Quant aux phases de construction postérieures, les agrégats réactifs identifiés dans les mortiers présentent des matrices vitreuses avec des inclusions de cristaux de sanidine, de grenat, de biotite et de clinopyroxène. Les phases minérales associées comme l'analcime, la leucite et l'hématite sont similaires à celles des dépôts volcanoclastiques du complexe Somma-Vésuve (Rispoli et al., 2019, 2021).

Enfin, l'ensemble des recherches présentées ainsi que les études plus récentes portant sur l'origine de la pouzzolane (Dilaria et al., 2022 ; Montesano et al., 2022 ; Secco et al., 2022 ; Dilaria, Secco, et al., 2023) permettent d'identifier avec précision les carrières de pouzzolane naturelle privilégiées par les Romains, telles que le *Neapolitan Yellow Tuff* (NYT), les téphras issus de l'éruption ignimbritique de Campanie (CI), ainsi que les dépôts volcanoclastiques du complexe Somma-Vésuve en Campanie et des monts Albains dans le Latium.

II.3. La question de la chronologie des structures anciennes

La datation des structures anciennes revêt une importance capitale dans la démarche visant à comprendre l'histoire et l'origine d'une construction ancienne. Elle permet de déterminer l'époque de construction de la structure ainsi que ses différentes phases d'occupation et de modification au fil du temps. Outre les éléments de décors architecturaux, les matériaux de construction peuvent fournir des données utiles à l'archéologie du bâti, offrant des possibilités de datation plus ou moins fiables, en fonction de leur mise en œuvre, de leur possible remploi, ainsi que de la méthode de datation utilisée. Ainsi, contrairement aux matériaux de construction tels que la pierre ou la brique (Nikolić et al., 2023), le mortier de chaux présente l'avantage d'être un matériau très rarement remployé[15] dans les anciennes constructions. Sa datation correspond donc à la chronologie du contexte archéologique dans lequel il est découvert. De plus, la datation des matériaux comme la brique en terre cuite est relative à leur fabrication et non à l'édification de la maçonnerie (Urbanová, 2015), tandis que le mortier de chaux est produit sur site, en même temps que l'édification de la structure. Il

[15] Bien qu'il soit théoriquement possible de réutiliser le mortier de chaux en le calcinant pour obtenir à nouveau de la chaux vive, il est tentant de penser qu'il aurait pu être remployé de la même manière que la brique ou la pierre, voire recyclé comme pierre à chaux. Quelques exemples provenant de Pompéi font état de remplois du mortier de chaux par les artisans romains, notamment comme remblai pour le nivellement du sol ou du terrain (Zanella, 2017), ou encore comme matériau de remplissage dans l'*opus caementicium* et comme tout-venant dans les murs tripartites (Coutelas et Vauxion, 2017). Cependant, selon Coutelas et Vauxion, aucun témoignage archéologique, connu à ce jour, ne confirme le recyclage de mortiers et d'enduits en tant que pierre à chaux.

constitue, ainsi, un marqueur temporel fiable pour déterminer la chronologie relative d'une structure archéologique.

II.3.1. La méthode de datation relative

La chronologie relative consiste à déterminer l'âge d'un objet archéologique, en fonction des éléments présents dans la même unité stratigraphique tels que des inscriptions, de la céramique ou d'autres artéfacts dont les caractéristiques permettent de connaître l'époque de leur fabrication. Dans le cadre de l'étude de mortiers romains, la méthode de datation relative revêt un double intérêt. D'une part, en tant que liant architectural, l'âge du mortier peut être déterminé à partir du contexte architectural auquel il appartient. Les styles et les décors architecturaux ainsi que les méthodes de construction employées constituent des marqueurs temporels pour dater le mortier associé à ce contexte (Feneuille et al., 2016). D'autre part, le mortier peut servir de repère chronologique pour dater, à son tour, le contexte architectural (Morricone et al., 2013). En effet, les connaissances actuelles sur les mortiers anciens permettent de déterminer l'époque à laquelle un type de mortier est associé, en observant ses composants et la technique de sa réalisation (Perez-Rodriguez et al., 2023). Ainsi, en étudiant le mortier utilisé, il est possible de déterminer l'époque correspondante au contexte architectural.

Cependant, la méthode de datation relative des mortiers historiques présente des limites. Elle permet d'établir un ordre chronologique relatif des éléments étudiés, sans fournir d'estimation précise de l'âge en années. En outre, cette méthode peut donner des résultats erronés s'il s'agit de mortiers mis en œuvre dans le cadre de travaux de restauration, en particulier pour les mortiers de jointoiement et les enduits (Feneuille et al., 2016) qui peuvent se détériorer plus rapidement que la structure principale, voire être appliqués durant une occupation postérieure à la construction initiale de l'ouvrage. Ainsi, elle nécessite souvent d'être complétée par des méthodes de datation absolue pour obtenir des dates numériques spécifiques.

II.3.2. Les méthodes de datation absolue

Les techniques de datation directe des mortiers offrent des résultats chiffrés exprimés en années, contrairement à la méthode de datation relative. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées pour les mortiers romains, on trouve la datation au radiocarbone (^{14}C), la thermoluminescence (TL) et la luminescence optiquement stimulée (OSL).

II.3.2.1. Datation par radiocarbone (^{14}C)

Initiée à la fin des années 1940 par le chercheur américain Libby, la datation par radiocarbone a permis de déterminer, avec succès, l'âge de nombreux artefacts en matière organique, principalement des vestiges funéraires en bois des dynasties égyptiennes (Libby, 1980). Cette méthode de datation repose sur la mesure de la proportion de l'isotope ^{14}C par rapport à la quantité totale de carbone présente dans la matière organique des objets archéologiques. L'isotope ^{14}C, qui est instable, se forme dans la haute atmosphère grâce à l'interaction des atomes d'azote avec les rayonnements cosmiques. Il s'oxyde ensuite en se combinant au dioxygène pour former du $^{14}CO_2$, qui est absorbé par les plantes lors de la photosynthèse. Les animaux, à leur tour, absorbent du ^{14}C en se nourrissant de ces plantes. Ainsi, les tissus des végétaux et des animaux vivants conservent une concentration de radiocarbone en équilibre avec celle de l'atmosphère, qui se renouvelle constamment (Hale et al., 2003). À leur mort, la quantité de l'isotope radioactif ^{14}C commence à diminuer suivant une décroissance exponentielle, qui réduit de moitié la quantité initiale de ^{14}C tous les 5730 ans. Par conséquent, en mesurant l'activité du radiocarbone, il est possible de déterminer l'âge d'une matière organique à partir de la mort de l'organisme duquel elle provient. Durant les années 1960, des chercheurs français ont réussi à appliquer cette méthode de datation à des matériaux inorganiques comme les mortiers antiques (Delibrias et Labeyrie, 1963).

Pendant le processus de carbonatation de la chaux hydratée, le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du carbonate de calcium ($CaCO_3$), incorporant ainsi du carbone contenant l'isotope ^{14}C dans le mortier de chaux (Weiner, 2010). Après la prise du mortier, l'activité du radiocarbone diminue progressivement, de manière similaire à celle d'un échantillon organique, sans qu'il y ait d'échange ultérieur avec le carbone atmosphérique. En théorie, cela permet de déterminer l'âge du mortier de chaux à partir de la fin de sa prise, avec une précision de ± 150 ans (Frizot, 1975).

Cependant, de nombreux problèmes peuvent constituer des limites pour l'application de la méthode de datation par radiocarbone aux échantillons de mortier de chaux. Parmi ceux-ci, figure la lente prise du mortier de chaux lorsque le dioxyde de carbone n'arrive pas à pénétrer en profondeur dans le liant, ce qui a pour conséquence de ralentir sa carbonatation et de fausser l'âge du mortier (Furlan et Bissegger, 1975). La présence de certains composants peut entraîner des erreurs de datation par radiocarbone, notamment lorsqu'une charge calcaire est utilisée (Daugbjerg et al., 2022), apportant ainsi une quantité de ^{14}C plus ancienne qui affecte l'âge estimé du mortier de chaux. De plus, l'utilisation d'une chaux hydraulique ou d'agrégats pouzzolaniques a pour effet la formation d'aluminosilicates de calcium hydratés qui limitent

fortement le processus de carbonatation du liant (Coutelas et al., 2009). Enfin, la présence de nodules de chaux dans le liant peut également affecter les résultats de la datation par radiocarbone (Lindroos et al., 2018). En effet, l'hydratation de la chaux vive contenue dans ces nodules et sa cristallisation ultérieure, après la prise du mortier, peut altérer la concentration initiale du ^{14}C, ce qui rend son interprétation impossible pour la datation (Urbanová et al., 2020). Par ailleurs, il est possible de trouver dans le mortier des fragments de bois ou de charbon de bois provenant de la contamination lors de la production de la chaux. Ces fragments peuvent être utiles pour la datation indirecte du mortier de chaux au radiocarbone (Coutelas et al., 2009). Toutefois, il convient de noter que l'âge obtenu sera celui du bois ayant servi de combustible et non celui du mortier de chaux lui-même.

II.3.2.2. Datation par thermoluminescence (TL)

Contrairement à la méthode de datation par radiocarbone, la méthode de datation par thermoluminescence se base sur la capacité de la structure cristalline des minéraux à accumuler de l'énergie provenant des rayonnements cosmiques ou terrestres, en jouant le rôle de piège à photons. Au cours d'un échauffement à environ 500 °C, les cristaux restituent sous forme de lumière, l'énergie accumulée depuis la dernière exposition à une forte chaleur (Goedicke et al., 1981 ; Wintle et Huntley, 1982). L'intensité lumineuse libérée est proportionnelle à l'accumulation d'énergie depuis la dernière exposition aux rayonnements ionisants. Ainsi, en mesurant la luminescence produite par l'énergie totale accumulée (dose archéologique ou paléodose) et en tenant compte de la quantité d'énergie emmagasinée chaque année (dose annuelle) dans le lieu de la découverte archéologique (Blain et al., 2011), il est possible de déterminer le temps écoulé depuis la dernière exposition des minéraux à des rayonnements provenant d'une forte source de chaleur. Dans le cas du mortier de chaux, la méthode de datation par thermoluminescence est applicable aux minéraux carbonatés tels que les cristaux de calcite résiduels, qui ont été partiellement calcinés et qui peuvent être présents dans le liant. En théorie, lors de la cuisson de la chaux, ces cristaux sont exposés à une forte chaleur, ce qui entraîne la libération de toute l'énergie accumulée dans leur réseau cristallin, réinitialisant ainsi leur « compteur à photons » (Furlan et Bissegger, 1975). Après cette réinitialisation, les cristaux de calcite présents dans le mortier de chaux recommencent à accumuler de l'énergie provenant de leur environnement, comme l'énergie provenant de la radioactivité du sol et des éléments radioactifs présents dans les composants du mortier. Cependant, deux limites de cette méthode sont à prendre en compte. L'âge obtenu commence à partir de la calcination de la pierre à chaux, ce qui peut entraîner une estimation erronée si la chaux a été produite longtemps avant la mise

en œuvre du mortier, comme le mentionne Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXVI, 55). Aussi, une autre difficulté réside dans la distinction entre les minéraux carbonatés présents dans la chaux et ceux présents dans le sable, notamment si la charge utilisée est calcaire ou silico-calcaire. Les carbonates présents dans le sable, n'ayant pas été exposés à la même source de chaleur, conservent l'énergie accumulée depuis des temps géologiques, ce qui conduit à une moyenne erronée de l'âge estimé du mortier de chaux (Furlan et Bissegger, 1975).

II.3.2.3. Datation par luminescence optiquement stimulée (OSL)

Durant les années 2000, les recherches sur la datation par luminescence optiquement stimulée (OSL) ont permis de démontrer l'efficacité de cette méthode pour la détermination de l'âge de mortiers archéologiques (Bøtter-Jensen et al., 2000 ; Zacharias et al., 2002 ; Goedicke, 2003). En suivant le même principe que la thermoluminescence, la méthode de datation par OSL repose sur les propriétés dosimétriques des minéraux, principalement les quartz et les feldspaths, en datant leur dernière exposition à la lumière (Urbanová et Guibert, 2017a). Les éléments constitutifs du mortier, tels que le liant et les agrégats, contiennent naturellement des isotopes radioactifs comme le potassium, l'uranium et le thorium qui émettent des rayonnements ionisants. Ces rayonnements induisent un transfert d'électrons dans les minéraux présents dans la charge du mortier. Les électrons déplacés se retrouvent ensuite piégés et s'accumulent dans les défauts cristallins des minéraux, en particulier dans le quartz. Par conséquent, le nombre d'électrons piégés est proportionnel à la durée d'exposition des cristaux de quartz à la radioactivité naturelle qui les entoure. Selon Urbanová et Guibert (2017a), en utilisant ce principe, il est possible de dater le mortier à partir de l'instant de sa mise en œuvre. Lorsque les cristaux de quartz sont exposés à la lumière, ils subissent un phénomène de « blanchiment » qui libère tous les électrons accumulés. Pendant les étapes d'extraction, de tamisage ou de mélange de la charge siliceuse avec la chaux, les grains de quartz sont exposés à la lumière. Quelques dizaines de secondes d'exposition au soleil sont suffisantes pour blanchir complètement les grains de quartz, ramenant ainsi les électrons à leur état fondamental avant l'irradiation. Après la pose du mortier, les cristaux de quartz présents dans la charge sont incorporés dans la matrice et protégés de la lumière naturelle, ce qui permet au processus cumulatif de piégeage des électrons de recommencer. Ainsi, le calcul de l'âge du mortier suit le même principe que celui de la thermoluminescence. Il implique la mesure de la quantité d'électrons libérés sous forme de luminescence et la prise en compte des rayonnements ionisants auxquels les cristaux de quartz sont exposés chaque année à proximité du lieu de prélèvement de l'échantillon de mortier (Urbanová et al., 2020).

En utilisant ces mesures, il est possible de déterminer le temps écoulé depuis la dernière exposition des cristaux de quartz à la lumière, ce qui permet de calculer l'âge du mortier depuis l'instant de sa mise en œuvre. Parmi les limites de cette méthode de datation, on retrouve l'exigence d'une obscurité totale durant toutes les étapes de prélèvement, de transport et de la préparation des échantillons de mortier au laboratoire, afin d'éviter le blanchiment accidentel des grains de quartz qui risque de libérer les électrons accumulés depuis la mise en œuvre du mortier. Un autre problème de la méthode OSL réside dans la précision de la datation obtenue, qui varie en fonction de la technique d'analyse des cristaux de quartz par la méthode à grains multiples (MG-OSL) ou à grain unique (SG-OSL). Dans la méthode MG-OSL, plusieurs cristaux de quartz sont collectés pour former un échantillon composite. Lors de l'analyse, ces cristaux sont exposés à la lumière pour libérer l'énergie accumulée, puis l'énergie émise est mesurée, permettant d'obtenir une estimation de l'âge en calculant la dose d'irradiation moyenne des cristaux dans l'échantillon composite.

Cependant, certains cristaux de quartz peuvent ne pas avoir été suffisamment blanchis pendant la mise en œuvre du mortier, ce qui peut influer sur le calcul de la valeur moyenne de la dose archéologique (Urbanová et al., 2020). En revanche, les recherches récentes sur la méthode de datation par luminescence optiquement stimulée à grain unique (Urbanová, 2015 ; Urbanová et al., 2016 ; Urbanová et Guibert, 2017b ; Urbanová et al., 2018) démontrent que celle-ci permet d'obtenir une datation avec une meilleure précision qu'en MG-OSL. Elle implique l'isolement et l'analyse individuelle d'environ 4 000 cristaux de quartz. Chaque grain est traité séparément et son propre signal de luminescence est mesuré, permettant ainsi d'évaluer la dose d'irradiation spécifique à chaque grain. Cependant, entre 1 et 7 % des cristaux correctement blanchis émettent une luminescence suffisante pour la datation (Urbanová et Guibert, 2017a). Ainsi, l'âge est déterminé en utilisant la distribution des doses mesurées pour chaque grain, en excluant les signaux faibles provenant des cristaux insuffisamment blanchis. Cette approche permet alors d'obtenir une meilleure précision de l'âge du mortier en comparaison aux méthodes de datation par radiocarbone (^{14}C) et par thermoluminescence.

Conclusion

Les nombreuses recherches menées sur la production de la chaux, les techniques de mise en œuvre du mortier de chaux et l'origine des matières premières ont considérablement enrichi notre compréhension des connaissances et des compétences des artisans romains. Ces compétences leur ont permis de créer des mortiers non seulement remarquablement résistants, mais aussi durables à travers les âges. Les fouilles archéologiques ont permis de mieux

comprendre les séquences de la chaîne opératoire relative à la production de la chaux, dont les mentions sont quasiment absentes des textes de Vitruve et Pline l'Ancien. Ainsi, la découverte de fours à chaux à *Tipasa* a révélé les détails des installations techniques utilisées par les artisans romains pour produire de grandes quantités de chaux rapidement et de manière continue. Les importantes dimensions de ces fours et de leurs aires de chargement témoignent de la possibilité d'adaptation de ces installations en fonction de l'ampleur du chantier antique et de la durée des travaux. En outre, les découvertes des cuves à chaux dans de nombreux sites gallo-romains ont apporté un nouvel éclairage sur les étapes d'extinction, d'hydratation et d'affinage de la chaux.

Grâce aux études archéométriques, il a été possible d'identifier les divers éléments constitutifs du mortier romain et d'expliquer les phénomènes chimiques qui lui confèrent ses propriétés de résistance et de durabilité. Ainsi, l'application des méthodes d'analyse physico-chimique s'est révélée pertinente par la découverte de phases minérales d'aluminosilicates de calcium hydratés qui se forment lors des réactions pouzzolaniques. Il a été démontré que ces phases minérales néoformées contribuent à la propriété hydraulique et à la résistance mécanique du mortier romain. De plus, l'étude des nodules de chaux a permis d'expliquer leur présence « intentionnelle » par le besoin de renforcer progressivement les performances du mortier romain après sa mise en œuvre. D'une part, la chaux vive encapsulée dans les nodules produit des dépôts secondaires de calcite qui comblent les espaces interstitiels et les microfissures par mécanisme d'autocicatrisation. D'autre part, la libération progressive de l'hydroxyde de calcium permet la continuité des réactions pouzzolaniques au contact des agrégats réactifs, contribuant ainsi à améliorer la résistance et la durabilité du mortier romain au fil du temps. Nous retenons également des recherches pétroarchéologiques et ethnoarchéologiques l'importance des facteurs environnementaux et anthropiques dans la composition et la mise en œuvre des mortiers romains. La nature et les proportions des composants des mortiers et des enduits pouvant varier en fonction des ressources géologiques locales, ainsi que des aspects culturels, techniques et historiques spécifiques aux artisans romains.

S'agissant des recherches sur les méthodes de datation des mortiers romains, celles-ci mettent en évidence l'importance de l'étude du mortier en tant que donnée archéologique permettant d'établir la chronologie des structures anciennes. Les mortiers offrent des possibilités de datation relativement fiables en raison de leur production sur site, en même temps que l'édification des structures et du fait qu'ils soient très rarement remployés par les artisans romains. Face à la datation par radiocarbone (^{14}C) et par thermoluminescence (TL), la méthode de datation par luminescence optiquement stimulée (OSL) présente le plus de fiabilité dans la datation des mortiers, notamment avec la technique à grain unique (SG-OSL).

Enfin, les recherches sur l'origine des matières premières ont permis d'identifier la provenance de la pouzzolane naturelle depuis au moins trois districts volcaniques d'Italie, situés dans le Latium (monts Albains) et en Campanie (champs Phlégréens et complexe volcanique du Somma-Vésuve). Les agrégats réactifs retrouvés dans les mortiers de structures anciennes à Rome que sont la *Pozzolana Rossa*, la *Pozzolana Nera* et la *Pozzolanella* proviennent d'une carrière à proximité, située dans les monts Albains. Ces trois variantes de pouzzolane correspondraient aux natures de sable fossile recommandées par Vitruve dans le passage « *Genera autem harenae fossiciae sunt haec : nigra, cana, rubra, carbunculus.* » (*De architectura*, II, 4, 1). Les agrégats pyroclastiques retrouvés dans les mortiers de structures romaines à Sorrente proviennent, en partie, des dépôts volcanoclastiques du complexe Somma-Vésuve qui se trouve à proximité. Quant aux agrégats réactifs retrouvés dans les bétons hydrauliques des structures maritimes de l'Empire (fig. 5), ils sont principalement composés de ponces et de tuf volcanique provenant des dépôts volcaniques des champs Phlégréens (*Neapolitan Yellow Tuff* et éruption ignimbritique de Campanie).

Ainsi, par leur proximité au port antique de Pouzzoles (*Puteoli*), les carrières des champs Phlégréens semblent avoir été privilégiées par les Romains pour l'export de la pouzzolane vers les chantiers de l'Empire, tandis que les carrières qui se trouvent à l'intérieur du pays servaient plutôt à l'approvisionnement des constructeurs locaux[16]. Par ailleurs, il ressort de ce chapitre que la majorité des recherches archéométriques sur les mortiers ont été menées sur des sites archéologiques situés dans les provinces romaines du sud de l'Europe et de la Méditerranée orientale. Pour enrichir et compléter nos connaissances sur ce matériau, il nous paraît pertinent de réaliser de nouvelles études archéométriques sur les mortiers romains en Afrique romaine, notamment en Afrique proconsulaire (*Africa proconsularis*). Jusqu'à présent, la seule étude complète réalisée dans cette région du monde romain concerne les fouilles des fours à chaux romains à *Tipasa*, dans la province de Maurétanie césarienne.

[16] Les études réalisées sur les structures anciennes à Rome (Jackson et Marra, 2006 ; Marra et al., 2013 ; D'Ambrosio et al., 2015 ; Belfiore et al., 2015), ont révélé l'emploi de pouzzolanes naturelles dans les mortiers romains provenant principalement des carrières locales, situées dans les monts Albains et les monts Sabatins.

Chapitre III : État des connaissances sur la cité d'Hippone (*Hippo Regius*)

Introduction

Hippo Regius, ancienne cité romaine de la province d'Afrique proconsulaire, compte parmi les cités les plus importantes et les plus anciennes de l'Afrique du Nord antique (Marec, 1954 ; Cote et Camps, 1988 ; Manfredi et al., 2019). Cette ville royale acquiert son importance de plusieurs aspects. Tout d'abord, sa position stratégique qui en fait un carrefour majeur reliant l'Empire romain aux autres régions de Numidie par de multiples voies terrestres et maritimes. De plus, sa renommée est étroitement liée à la présence influente de saint Augustin. Cet éminent philosophe et théologien chrétien a été l'évêque de cette cité pendant les trente-cinq dernières années de domination romaine jusqu'à sa mort, pendant le siège d'Hippone par les Vandales.

Le site archéologique d'Hippone (*Hippo Regius*) se situe à environ deux kilomètres de la ville d'Annaba, dans le nord-est de l'Algérie. Les premières recherches archéologiques qui y ont été menées avaient principalement pour objectif de retrouver la ville de saint Augustin (Delestre, 2005b). Les fouilles se sont principalement concentrées sur le centre urbain de la cité d'Hippone (Amraoui, 2018), comprenant ses édifices religieux et son quartier résidentiel, en adoptant une approche d'« archéologie chrétienne » qui négligeait les périodes antérieures et postérieures à l'occupation romaine de la cité. En outre, la plupart des publications portant sur Hippone (Gsell, 1903, 1928d ; Marec, 1950, 1954, 1958) mettent principalement l'accent sur son histoire et sa relation avec la religion chrétienne. Des publications plus récentes ont exploré d'autres aspects d'Hippone, tels que l'artisanat et l'architecture de ses monuments (Delestre, 2005c ; Thébert, 2003 ; Amraoui, 2017 ; Lamare, 2019), sans proposer d'études détaillées sur les techniques et les matériaux employés dans les nombreuses structures romaines de la cité.

Ainsi, dans ce troisième chapitre, nous mettons l'accent sur l'historique des fouilles archéologiques et les principales découvertes architecturales avec pour objectif de dresser un bilan des connaissances sur le site archéologique d'Hippone. En outre, nous examinons les publications scientifiques les plus récentes qui se sont intéressées à l'architecture monumentale du site archéologique d'Hippone.

III.1. Le contexte d'implantation et l'histoire de la cité

Les premières traces d'occupation humaine dans la région où se trouve la cité d'Hippone remontent à la période préhistorique. En effet, des outils en silex taillé datant du Paléolithique inférieur ont été découverts dans l'Edough, près de Guerbès ainsi qu'aux abords du lac Fetzara, témoignant d'une présence humaine « assez dense » à cette époque (Marec, 1950). De plus, des artefacts lithiques datant du Paléolithique moyen et supérieur ont été identifiés au cap de Garde. Les collines du Bou Hamra et de l'Edough, situées à proximité du site archéologique d'Hippone, ont également révélé des artefacts datant du Mésolithique et du Néolithique, attribués à la civilisation capsienne (Dahmani, 1973, 1983). Lors de fouilles archéologiques dans cette région, d'autres éléments mégalithiques ont été découverts en plus des artefacts lithiques. Parmi eux, on compte les dolmens de la nécropole néolithique de Roknia, située à environ 50 km d'Annaba ainsi que ceux de la « plus grande nécropole mégalithique d'Afrique du Nord » près du village de Bou Nouara, à environ 30 km au sud-est de Constantine (A. Bertrand, 1868 ; Camps, 1991). Ainsi, ces découvertes témoignent, à la fois, de la maîtrise de la lithologie et d'une forme d'architecture primitive à cette époque. Elles soulignent également, la présence d'une population qui s'est peu à peu sédentarisée dans cette région[17]. Cette dernière forma progressivement, à partir du Ier millénaire av. J.-C., le royaume de Numidie orientale (Dahmani, 1983).

Le royaume numide des Massyles, qui comprenait une population d'agriculteurs sédentaires au nord et de Gétules partiellement nomades au sud, était probablement structuré sous une forme tribale (Ghaki et al., 2012). Bien que les sources classiques[18] ne mentionnent aucun roi régnant sur les territoires numides à cette époque, l'expansion de certaines tribus a probablement donné naissance à un pouvoir royal. L'archéologie confirme l'existence d'un roi numide, encore inconnu à ce jour, mais suffisamment riche et puissant pour ordonner la construction de l'imposant mausolée royal de Médracen[19] entre la fin du IVe et le début du IIIe siècle av. J.-C (Camps, 1973 ; Ghaki et al., 2012). En outre, l'architecture numide de ce

[17] L'estimation de la sédentarisation de la population numide dans la région correspondant à l'actuel nord-est de l'Algérie est réalisée en analysant la répartition des inscriptions libyques découvertes dans les grandes nécropoles, concentrées autour des cités numides les plus fortement peuplées (Camps et al., 1996).

[18] Les territoires numides font leur apparition dans les sources classiques à partir de la Première Guerre punique (de 264 à 241 av. J.-C.), lorsque les auteurs anciens ont commencé à s'intéresser aux « affaires africaines » (Ghaki et al., 2012), en particulier aux relations entre Rome et Carthage.

[19] Situé à Batna, en Algérie, le Medracen est un monument funéraire de type bazina à degrés, construit en utilisant des blocs de pierre sèche. Il a un diamètre d'environ 59 mètres et une hauteur de 18,5 mètres (Camps, 1973). Il incarne l'architecture numide avec des influences hellénistiques, combinant des corniches « égypto-phéniciennes » avec une colonnade engagée comportant des chapiteaux d'ordre dorique (Gsell, 1903).

monument funéraire et les éléments de décors d'influence hellénistique mettent en évidence, durant cette période, les premiers contacts grecs et puniques[20] avec les royaumes de Numidie.

III.1.1. La fondation phénico-punique (XIIe au IIIe siècle av. J.-C.)

La date exacte de l'établissement de l'*emporium* phénicien à Hippone et par extension, sa date de fondation, reste difficile à déterminer. Toutefois, la forme primitive du nom de la cité « *Hippo* » indique la présence d'une « colonie sémite » (Holmes Van Mater, 1970). En effet, le toponyme « *Hippo* » serait un dérivé des mots syriaques *ubo* ou *ubbo* et du terme phénicien *ubbon* qui désignent un golf, une baie ou un lac (Della Cella, 1840). Par ailleurs, le terme *ubbon* est de la même racine sémitique que les termes arabes *'ub* (عب) et *'ubâb* (عباب) qui désignent « l'eau abondante » (Dahmani, 1983). On observe que le toponyme « *Hippo* » a été attribué par les Phéniciens, à deux cités distinctes d'Afrique du Nord (Holmes Van Mater, 1970), à savoir : *Hippo Regius* et *Hippo Diarrhytus* (à proximité de la ville de Bizerte, en Tunisie).

Ce choix toponymique est ainsi cohérent avec leurs situations géographiques au sein de baies tout autant qu'avec leurs proximités avec la rivière de La Seybouse pour *Hippo Regius* et le lac de Bizerte pour *Hippo Diarrhytus*. Parmi les occurrences d'*Hippo* dans la littérature antique, on retrouve la mention de « *Hippo Akrè* » dans un fragment altéré du logographe Hécatée de Milet qui correspond à Hippone, ainsi que la mention de « *Hippou Akra* » dans le Périple du Pseudo-Scylax, dont la description de l'environnement géographique correspond plutôt à la cité d'*Hippo Diarrhytus* (Desanges, 1978). Salluste évoque également, la création d'Hippone par les Phéniciens, qui cherchaient à établir de nouvelles colonies le long des côtes africaines (*Jugurtha*, XIX, 1 ; traduit par Ernout) :

> Plus tard les Phéniciens, les uns pour décharger leur pays d'un excès de population, d'autres par esprit de conquête, rangeant de leur côté la plèbe et les gens avides d'aventures, allèrent fonder sur la côte Hippone, Hadrumète, Leptis, d'autres villes encore, et celles-ci, bientôt prospères, devinrent l'appui ou la gloire de leurs métropoles. […]

Ainsi, de nombreux historiens conviennent que la fondation d'Hippone est attribuable aux Phéniciens (Bouyac, 1891 ; Gsell, 1903 ; Dahmani, 1983). Ils estiment que sa création, comme celle des autres établissements phéniciens[21] se trouvant sur le littoral algérien, a eu lieu entre le début du XIIe siècle et le milieu du XIe siècle av. J.-C.

---

[20] Les influences culturelles hellénistiques se manifestent à la fois dans l'architecture numide ainsi que dans la représentation des effigies monétaires royales, où Syphax, puis Massinissa, ont été représentés selon « une forme idéale hellénisée » (Ghaki et al., 2012).

[21] Il s'agit des établissements phéniciens d'*Hippo*, de *Rusicade*, de *Rusuccuru*, de *Rusguniae* et de *Cartennae* qui, selon Gsell (1903), auraient gardé leurs toponymes sémitiques jusqu'à leur abandon ou leur destruction.

D'après Gsell (1903), les Phéniciens auraient installé sur la route de retour du pays de Tartessos (sud de la péninsule ibérique), le long de la côte algérienne[22], des escales servant de refuges et de points de ravitaillement en eau. Plus tard, ces stations ont été transformées en de véritables comptoirs commerciaux, associés probablement à une industrie minière (Manfredi et al., 2019) et abritant les galères phéniciennes des négociants de Sidon et de Tyr (Gsell, 1903) qui venaient enlever les produits[23] apportés par les tribus autochtones de Numidie (Bouyac, 1891). Cependant, la prospérité des établissements commerciaux phéniciens s'est rapidement heurtée aux convoitises des tribus autochtones et à l'expansion rapide de la colonisation grecque en Méditerranée occidentale (Gsell, 1924).

À partir du IXe siècle av. J.-C. et à la suite de dissensions politiques et de désaccords avec son frère Pygmalion, la princesse tyrienne Didon part s'exiler sur la côte nord de l'actuelle Tunisie. En compagnie d'une partie de l'aristocratie de Tyr, elle choisit de s'établir sur la colline de Byrsa, où se trouvait auparavant une petite colonie phénicienne installée par Karkédon (Bouyac, 1891), pour fonder la cité de Carthage. Ainsi, ce nouveau pouvoir en place offre sa protection aux colonies phéniciennes établies dans la région du Maghreb, menacées par l'expansion de la colonisation grecque. En échange de cette garantie de sécurité, Carthage impose sa suzeraineté à ces cités, établit des relations de vassalité avec les princes africains et recrute une considérable proportion de ses mercenaires parmi les Maures et les Numides (Gsell, 1903). Progressivement, Carthage parvient à assujettir les établissements phéniciens situés en Afrique, en les soumettant au même régime que les cités qu'elle gouverne et où les affaires internes étaient gérées par un conseil de dignitaires, connus sous le nom de suffètes.

Ainsi, Hippone est absorbée dans l'ensemble punique, probablement dès le VIe siècle av. J.-C., adoptant ses modes de vie, ses traditions, ses croyances et sa langue. La cité aurait joué un rôle essentiel dans le commerce en Méditerranée, où les produits agricoles de la région étaient acheminés en abondance pour être expédiés vers les contrées de l'ouest et de l'est de la Méditerranée (Dahmani, 1983). À cette époque, la population de la cité était divisée en deux catégories sociales : une première catégorie, composée d'autochtones numides en tant que groupe fondamental et une seconde catégorie, constituée des dignitaires puniques. Ces derniers étaient dirigés par deux suffètes élus chaque année, assistés par un Conseil des anciens (Marec,

[22] Lancel (1994), dresse une carte des liaisons maritimes par cabotage tout le long de la côte algérienne, à intervalles quasi réguliers. Ces escales représentaient, pour les navigateurs phéniciens et puniques, des « relais indispensables » pour la navigation d'un bout à l'autre de la façade maritime du Maghreb antique.

[23] D'après Gsell (1903), les Phéniciens emportaient certainement de cette région des produits tels que des laines, des peaux, de l'ivoire, des plumes d'autruche, voire du bétail et très probablement des esclaves. En retour, ils offraient probablement aux tribus autochtones de Numidie des étoffes, des objets en verre, des poteries, des armes et du vin.

1954 ; Holmes Van Mater, 1970). À la fin du VIe siècle av. J.-C., la domination du pouvoir punique sur les échanges commerciaux en Méditerranée arrivant à son apogée (Bouyac, 1891), Carthage se trouve confrontée à une série de conflits militaires impliquant d'abord Agathocle de Syracuse, puis la puissance naissante de la République romaine qui, pendant ce temps, étend son emprise sur l'Italie. Lors de la première expédition punitive contre Carthage, organisée en 310 av. J.-C. par Agathocle et conduite par son lieutenant Eumachus, de nombreuses cités sous la domination de Carthage subissent une invasion dans le but d'affaiblir le pouvoir punique (Gsell, 1928a). Parmi les cités envahies figure Hippone, que Diodore de Sicile appelle « la forteresse […] dite du Cheval » dans son récit sur l'expédition militaire d'Agathocle en Afrique (*Bibliotheca historica*, XX, 57, 6 ; traduit par Durvye) :

> En troisième lieu il prit Meschela, une très grande cité fondée autrefois par les Grecs à leur retour de Troie — nous en avons parlé dans notre troisième livre —, la forteresse voisine dite du Cheval, homonyme de celle qu'avait prise d'assaut Agathocle, et enfin la cité indépendante que l'on appelait Acris qu'il donna à piller à ses soldats après en avoir asservi la population.

Diodore nous apprend également que simultanément, la cité d'*Hippo Diarrhytus* est conquise par Agathocle au cours de son opération militaire (Cote et Camps, 1988), ainsi que de nombreuses cités de la côte orientale de Tunisie, telles que Nabeul (*Neapolis*) et Sousse (*Hadrumetum*). Ainsi, le fait que la cité d'Hippone soit touchée, au même titre que les cités puniques, par l'expédition punitive dirigée contre Carthage, confirme l'existence d'une étroite relation entre les dirigeants de cette cité et le pouvoir punique.

Cependant, les données archéologiques connues à ce jour restent modestes et ne permettent pas d'attester avec certitude de la présence phénicienne et punique à Hippone (Lepelley, 2005). Les rares artefacts retrouvés, qui pourraient être associés à cette époque, sont un disque en bronze repoussé sur lequel figure un mufle de lion, trois statuettes en céramique égyptienne, des lampes à becs évasés, ainsi qu'un « mur d'enceinte » en grand appareil en pierres à bossages (Gsell, 1901). Le disque au mufle de lion est, selon Gsell, semblable aux masques en bronze retrouvés en Phénicie, qui servaient à décorer des cercueils en bois. Il ajoute également que l'utilisation de la décoration, représentant des mufles de lion, semble avoir été largement répandue chez les Phéniciens. Les statuettes funéraires, en céramique égyptienne, présentent des glaçures de couleurs vertes et bleues. Toujours d'après Gsell, elles seraient datées de l'époque saïte (VIIe au VIe siècle av. J.-C.) et représentent des serviteurs funéraires (*oushebtis*) qui devaient remplacer le défunt dans les travaux des champs de l'au-delà. Les lampes à becs évasés, à ailerons latéraux, seraient semblables à celles découvertes dans les nécropoles puniques de *Vaga* et de *Bulla Regia*, qui sont datées du IIe siècle av. J.-C. (Cagnat, 1887 ; Gsell, 1901). Quant aux murs en appareil cyclopéen, que Gsell date de l'époque

punique, les sondages effectués par Morel indiquent qu'il s'agit de structures construites entre la première moitié du IIe siècle av. J.-C. et le milieu du Ier siècle av. J.-C. (Cote et Camps, 1988). Ces structures seraient en réalité, de solides brise-lames, érigés le long du front de mer pour protéger la cité d'Hippone des tempêtes et de l'érosion causée par La Seybouse (Lepelley, 2005), contredisant l'explication selon laquelle il s'agirait des vestiges d'un *emporium* punique (Marec, 1954).

Enfin, un des sermons de saint Augustin (*Sermons*, CLXVII, 4) indique qu'au Ve siècle apr. J.-C., la langue punique était toujours employée dans les campagnes de la région d'Hippone (Gsell, 1903 ; Lepelley, 2005), ce qui témoigne du rapport entretenu pendant plusieurs siècles entre Hippone et le monde punique, ainsi que de la diffusion et l'ancrage de la culture punique parmi les Numides.

III.1.2. La dualité numido-punique (IIIe au Ier siècle av. J.-C.)

La protection assurée par Carthage et l'abondance des échanges commerciaux qui traversaient la cité avaient garanti à Hippone une longue période de prospérité. Toutefois, cette période faste commença, peu à peu, à s'estomper dès la fin IVe siècle av. J.-C. en raison, d'une part, des attaques extérieures visant le pouvoir carthaginois de plus en plus présent autour de la Méditerranée à travers ses multiples colonies, et d'autre part, de l'émergence d'une puissance numide autochtone aspirant à davantage d'indépendance. En effet, l'entreprise militaire dirigée par Agathocle de Syracuse dans le but d'isoler le pouvoir de Carthage a abouti à l'assassinat d'Ailymas, roi des Numides orientaux qui s'était établi à Dougga (*Thugga*) (Camps, 1986), en conséquence de sa trahison[24] envers le tyran Agathocle.

À partir du IIIe siècle av. J.-C., la République romaine gagne des territoires en Italie et étend sa puissance en Méditerranée occidentale pour faire face au pouvoir punique. Les deux puissances influentes s'affrontent en Sicile, durant la Première Guerre punique qui eut lieu entre 264 av. J.-C. et 241 av. J.-C. et à l'issue de laquelle, le général carthaginois Hamilcar Barca subit une défaite en Sicile et un traité de paix défavorable à la cité punique est signé avec les Romains. Ainsi, Carthage perd son emprise sur les territoires siciliens qui sont, en partie, repris par la République romaine pour en faire sa première province (Gsell, 1928a). Pendant cette période d'affrontements qui occupa les Carthaginois, le roi des Massyles, Gaïa, aurait saisi

[24] Ailymas aurait conclu une alliance avec Agathocle (Gsell, 1928a) pour épargner les terres intérieures numides et leurs exploitations agricoles du pillage par les troupes du tyran. Cette alliance témoigne d'une volonté des Massyles de se détacher, dès la fin IVe siècle av. J.-C., du pouvoir exercé par Carthage sur leurs territoires.

l'occasion pour récupérer une partie du territoire sous la domination de Carthage et faire d'Hippone la capitale de son domaine royal (Bouyac, 1891).

Cherchant à prendre sa revanche et asseoir son influence après sa défaite contre Rome, Hamiclar Barca, accompagné de son fils Hannibal et de son gendre Hasdrubal, entreprend d'étendre la domination du pouvoir punique en péninsule ibérique. Entre 221 et 220 av. J.-C., Hannibal lance une offensive en assiégeant la cité ibérique de Sagonte (*Saguntum*), laquelle sollicite sa protection auprès de la République romaine (Gsell, 1928a). Il entreprend ensuite d'envahir Rome par voie terrestre, en traversant le sud de la Gaule et en franchissant les Alpes. Cependant, d'après Gsell, Hannibal aurait tenté d'assiéger Rome durant plusieurs mois, sans succès, en raison de ses remparts qui nécessitaient un nombre important de troupes ainsi que des matériaux indispensables pour ériger des engins de siège et que Hannibal n'a pas réussi à rassembler. Entre 218 av. J.-C. et 201 av. J.-C., la Méditerranée est le champ de bataille de la Deuxième Guerre punique, qui oppose à nouveau et en représailles, le pouvoir romain à Carthage. Sous la conduite de Scipion l'Africain, les batailles se déroulent initialement en péninsule ibérique puis se déplacent vers Syracuse, dernière alliée de Carthage en Sicile, pour enfin, culminer en Afrique du Nord (Gsell, 1928a). Les répercussions de la Deuxième Guerre punique touchent Hippone, entraînant le pillage de la cité par les troupes romaines sous le commandement du général Caius Laelius vers l'an 205 av. J.-C. (Dahmani, 1983), comme en témoigne Tite-Live (*Histoire romaine*, XXIX, 3, 2 ; traduit par François) :

> […] Caius Laelius, après un accostage nocturne près d'Hippo Regius, mena dès l'aube au pillage de son territoire soldats et matelots en formation régulière. Comme en temps de paix, l'insouciance était générale chez les habitants, qui subirent de grandes pertes ; des messagers alarmés terrifièrent tout Carthage en annonçant l'arrivée d'une flotte romaine commandée par Scipion (le bruit avait déjà couru de son passage en Sicile). […]

À cette même époque, la cité d'Hippone gagne l'épithète « *Regius* », probablement en raison de son statut de « Résidence royale » qui relève de l'État numide créé par Massinissa (Cote et Camps, 1988 ; Lepelley, 2005). Ce dernier ayant pris parti avec Rome dans l'affrontement contre le pouvoir carthaginois d'Hannibal, il dirigea la cavalerie numide lors de la bataille de Zama qui a conduit à la défaite de Carthage et à la signature d'un traité de paix avec Scipion (Gsell, 1928a). Peu après cette bataille et après avoir unifié les deux entités des Massaesyles et des Massyles (Ghaki et al., 2012), Massinissa aurait profité de la faveur de Rome et de l'isolement de Carthage pour annexer des territoires puniques dans le nouveau royaume de Numidie, sous prétexte qu'ils faisaient partie des territoires numides auparavant (Gsell, 1928a). Se trouvant provoqués et lésés par le roi Massinissa, les Carthaginois prennent alors la décision de riposter contre lui sous la conduite du général Hasdrubal le Boétharque (Gsell, 1928a). Cette

confrontation se solde par une victoire des Numides qui parviennent à défaire les forces carthaginoises. Les suites de cet affrontement incluent l'annexion de nouvelles terres carthaginoises par Massinissa et la rupture du traité de paix entre Rome et Carthage.

Plus tard, Caton l'Ancien est dépêché en mission à Carthage, où il observe l'état florissant de la cité punique et de ses campagnes environnantes. Rome craint alors que la cité punique soit convoitée par Massinissa au vu de ses désirs expansionnistes et qu'il finisse par se retourner contre le pouvoir romain. À son retour à Rome, Caton l'Ancien annonce devant le Sénat romain qu'il est impératif de « détruire Carthage » pour empêcher Massinissa[25] d'en prendre le contrôle (Gsell, 1928a). Ce prétexte entraîne, à partir de 149 av. J.-C., un dernier épisode d'affrontements militaires entre les deux puissances, à savoir la Troisième Guerre punique. Après trois années de siège, la cité punique est détruite en 146 av. J.-C. et la totalité du territoire sous l'autorité de Carthage est annexée par la République romaine pour en faire sa *provincia Africa* (Gsell, 1928c). Ainsi, cette nouvelle province romaine d'Afrique a pour capitale la cité d'Utique (*Geographica*, XVII, 3, 13) et s'étend de la côte orientale de la Tunisie jusqu'à la *fossa regia*[26], qui trace la frontière avec la Numidie (Ghaki et al., 2012).

À la suite de l'implantation romaine en Afrique du Nord et au décès de Massinissa, la cité d'Hippone demeure associée à la Numidie de Micipsa, l'unique fils de Massinissa ayant survécu aux conflits. Et bien que Cirta ait été désignée comme la capitale de la Numidie, ce dernier passait, une partie de l'année, à *Hippo Regius* (Bouyac, 1891) qui a conservé son statut de résidence royale, comme le rapporte Strabon (*Geographica*, XVII, 3, 13 ; traduit par Laudenbach) :

> Après le Tréton, donc, commencent le territoire des Massyles et celui, analogue, des Carthaginois, avec Cirta située à l'intérieur des terres — résidence royale de Masanassès et de ses successeurs — une ville bien fortifiée et bien pourvue en toutes sortes d'équipements, surtout sous le règne de Mikipsa […] Il y a donc la Cirta et les deux Hippones, dont l'une est voisine d'Utique tandis que l'autre est plus éloignée, davantage vers le Tréton, toutes deux résidences royales. […]

Après le décès de Micipsa en 118 av. J.-C., le royaume numide fut initialement divisé par Scipion en trois entités distinctes entre Adherbal, Hiempsal et Jugurtha, le neveu de Micipsa

[25] Caton l'Ancien et ses compagnons avaient estimé que Massinissa était proche d'assouvir sa tentation de prendre Carthage, en considérant que les Carthaginois n'étaient plus en mesure d'assurer pendant longtemps la défense de leur cité contre les Numides (Gsell, 1928a). D'après Gsell, les Romains souhaitaient maintenir la Numidie en tant qu'État secondaire et étaient inquiets à l'idée que Massinissa puisse faire de la cité carthaginoise, qui était à la fois riche et densément peuplée, la capitale de son royaume.

[26] La *fossa regia* correspond au fossé que Scipion a fait creuser pour délimiter la frontière entre la Numidie et la province romaine d'Afrique. Il s'étendait de l'embouchure du fleuve *Tusca*, l'actuel Oued el Kebir près de Tabarka, jusqu'à *Thaenoe*, l'actuelle Henchir Tina, au sud de Sfax (Gsell, 1928c).

qu'il avait adopté avant sa mort. Adherbal a fait de la cité d'Hippone sa résidence et la capitale de la partie orientale de la Numidie dont il a hérité (Bouyac, 1891). Plus tard, Jugurtha a réussi à consolider son emprise sur les trois provinces numides, en éliminant ses deux cousins Hiempsal et Adherbal (Ghaki et al., 2012). Ce dernier, après avoir trouvé refuge à Cirta, a été torturé puis assassiné, à l'issue d'un siège qui a duré plusieurs mois et qui a laissé de nombreuses victimes, aussi bien des Italiens que des Numides, qui avaient pris la défense d'Adherbal (Gsell, 1928c). La rébellion de Jugurtha ainsi que le massacre des Italiens de Cirta ont déclenché la colère du Sénat romain qui s'est empressé d'envoyer ses soldats pour lui faire la guerre à partir de 112 av. J.-C. (Gsell, 1928c). Ainsi, la guerre contre Jugurtha s'est étendue sur une période de sept ans et s'est achevée par la défaite et le décès du roi numide en 105 av. J.-C., ainsi que par l'annexion, par la République romaine, de la portion orientale de la Numidie dont faisait partie la cité d'*Hippo Regius* (Bouyac, 1891). Le contrôle du reste du territoire numide a été confié à Juba Ier, sous le régime de protectorat romain (Lepelley, 2005).

III.1.3. L'annexion romaine (Ier siècle av. J.-C. au Ve siècle apr. J.-C.)

Au cours du conflit entre Jules César et son adversaire républicain Pompée, qui a déclenché la guerre civile romaine de 49 av. J.-C., le roi numide Juba Ier a pris parti avec son allié Pompée et s'est engagé à mettre à sa disposition ses soldats numides pour vaincre César et ses légions (Gsell, 1928b). Après avoir réussi à dominer l'Italie, Jules César aurait compris, selon Gsell, qu'il devait priver son rival Pompée et ses partisans du contrôle des provinces productrices de blé, telles que la Sicile, la Sardaigne et l'Afrique, afin de les empêcher de faire souffrir Rome de famine. Après trois années d'affrontements entre les deux camps, César et ses alliés remportent la bataille de *Thapsus* en 46 av. J.-C. Ainsi, Jules César s'était encore plus rapproché du pouvoir absolu. Il renomme l'ancienne province romaine en *Africa vetus* et fait de la Numidie la nouvelle province romaine d'*Africa nova* (Lepelley, 2005), administrée par le proconsul Salluste (Bouyac, 1891).

D'après Dahmani (1973) et Lepelley (2005), la cité d'*Hippo Regius* a été à ce moment le théâtre d'une grande tragédie : pour échapper aux troupes de César, le dernier roi numide Juba Ier se donne la mort. En même temps, alors qu'il tente de fuir vers l'Italie, le chef de l'armée républicaine, Q. Metellus Scipio, se poignarde et se jette par-dessus bord de son navire, au large de la côte d'*Hippo Regius*, pour échapper à Sittius, l'aventurier campanien et allié de César, ainsi qu'à ses mercenaires. Le trophée en bronze, actuellement conservé au musée d'Hippone et qui, selon C. Lepelley, daterait de l'époque de César, demeure l'unique témoignage matériel de cet épisode dramatique et symbolise la victoire de César, qui donna la

Numidie à Rome (Leschi, 1952). En tombant sous l'administration romaine, la cité d'*Hippo Regius* profite de près de cinq siècles de calme et de prospérité qui lui permettent un rapide et prodigieux essor (Marec, 1954). Ainsi, le premier empereur romain Auguste réunit, en 27 av. J.-C., les deux provinces *Africa vetus* et *Africa nova* pour créer la province d'Afrique proconsulaire (Lepelley, 2005), administrée depuis la colonie romaine de Carthage par un proconsul délégué par le Sénat romain. La cité d'*Hippo Regius* est alors élevée, dès le début de l'Empire romain, au statut spécial de municipe[27] (Kotula, 1967) qui permettait à la cité d'adopter des institutions et des mœurs romaines[28]. D'après Lepelley (2005), la rareté de l'octroi de ce statut à une cité située en dehors de l'Italie, comme *Hippo Regius*, sous le règne de l'empereur Auguste, témoigne du « prestige de la cité » et des « bonnes dispositions » de l'État impérial à son égard. Toutefois, il reste incertain si la cité avait obtenu le statut de municipe romain, accordant la citoyenneté romaine à tous les habitants libres ou s'il s'agissait d'un municipe latin où seule la lignée des magistrats municipaux et leurs descendants devenaient citoyens romains.

Plus tard, la cité d'*Hippo Regius* a été élevée au rang de colonie, durant la période des Flaviens (entre 69 et 96 apr. J.-C.), vraisemblablement entre la fin du règne de l'empereur Vespasien et celui de Domitien. Ce nouveau statut a permis une complète romanisation des institutions et l'octroi de la citoyenneté romaine à tous les habitants autochtones de la cité, sans introduction de colons étrangers (Lepelley, 2005). *Hippo Regius* est considérée, d'après Lepelley, comme la plus ancienne des « colonies honoraires » et l'une des plus grandes cités d'Afrique romaine. Son territoire municipal occupait, à l'époque impériale, une aire d'environ 104 km^2 (Holmes Van Mater, 1970). Les inscriptions latines des bornes-limites documentées par Gsell (1922) permettent de restituer l'emprise du territoire municipal d'*Hippo Regius* (fig. 6) : la borne numérotée 109 découverte à environ 40 km à l'est, vers le cap Rosa, marque la limite du territoire municipal avec la cité romaine de *Thabraca*. Cette région du territoire englobait non seulement les plaines fertiles d'Hippone, mais aussi les régions montagneuses et boisées où étaient établis les *castella*, des agglomérations villageoises regroupant la population rurale, sous le contrôle des magistrats d'*Hippo Regius* (Lepelley, 2005). Environ à 25 km vers l'ouest, la limite avec le territoire de *Cirta* est délimitée par la borne numérotée 134. Cette borne

[27] D'après l'inscription numérotée 109 « *MUNIC(ipium) AUG(ustum) HIPP(oniensium) REG(iorum)* » qui figure sur la face d'une borne-limite découverte vers le cap Rosa, à environ 4 km au nord de Bouteldja. Sur la face opposée de la borne figure la seconde inscription « *COL(onia) V. P. IUL(ia) THABRACENORUM* » mentionnant la cité romaine de Tabarka qui est, quant à elle, qualifiée de colonie (Gsell, 1922).

[28] Les inscriptions numérotées 95 et 96 qui figurent sur deux bases de statues retrouvées entre 1862 et 1864 et documentées par Gsell (1922), témoignent des combats de gladiateurs qui avaient lieu à *Hippo Regius*. Les statues étaient probablement érigées dans un espace public de la cité romanisée.

territoriale, située à Aïn Barbar et Chetaïbi (*Tacatua*), aurait, très probablement, marqué la séparation entre la Numidie occidentale et la Numidie orientale (Baylet, 1962). Enfin, la limite territoriale de la cité est balisée au sud-ouest par la borne numérotée 132 qui a été découverte à proximité d'*Ascurrus*, à environ 40 km à vol d'oiseau d'*Hippo Regius*. Elle marque non seulement, la limite civile avec l'*ager publicus* de *Calama*, mais également, la limite ecclésiastique du « *territorium Hipponiense* » du temps de saint Augustin (Lancel, 1984).

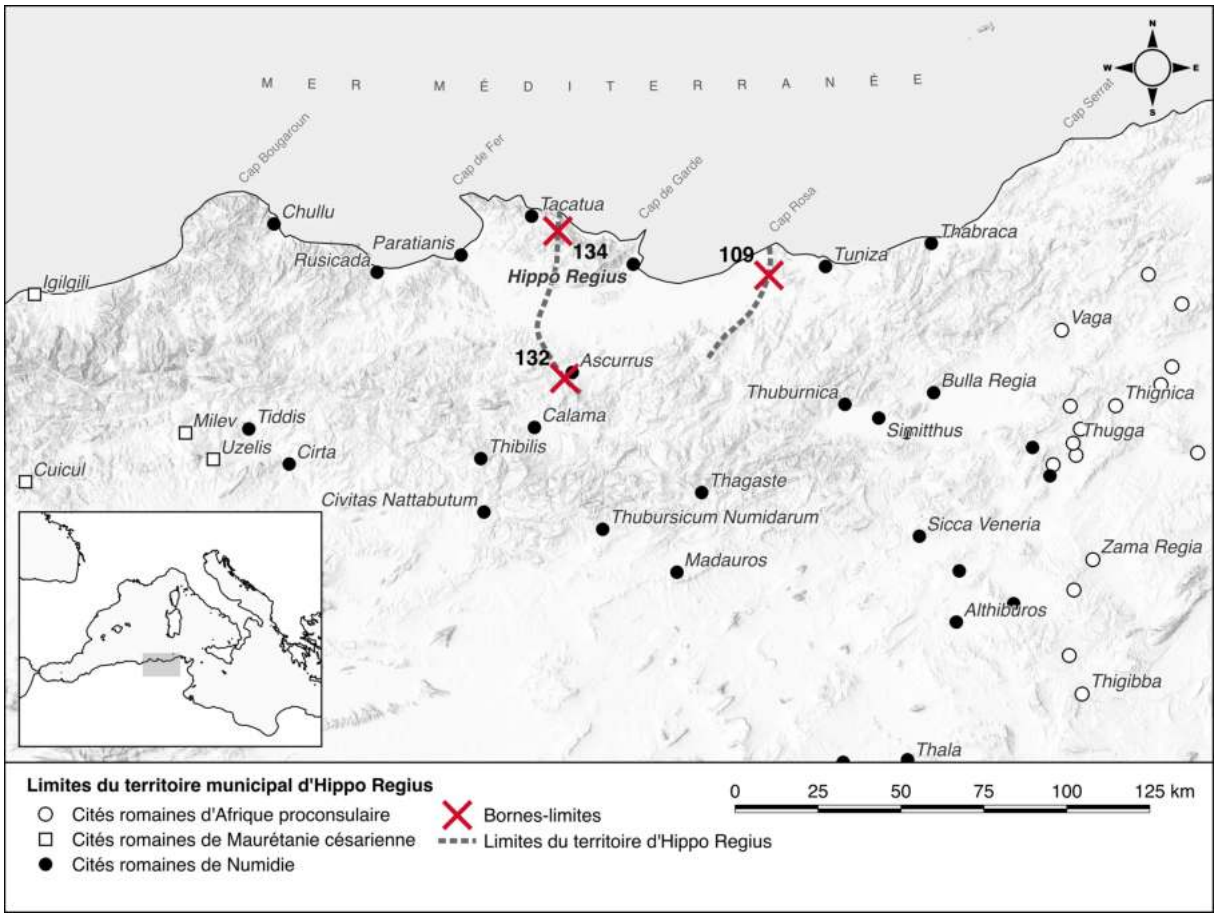

Figure 6 : Localisation des bornes-limites numérotées 109, 132 et 134 dans « Inscriptions latines de l'Algérie » et limites du territoire municipal d'Hippo Regius (d'après Gsell, 1922 ; Lancel, 1984)

L'essor de la cité d'*Hippo Regius* et sa croissance urbaine se manifestent à travers la construction de nombreux édifices, tels que le forum, le théâtre, le *macellum* et le Sanctuaire dédié aux *Dii Consentes* (Dahmani, 1983). La prospérité de la cité, qui a culminé entre le IIe et le IIIe siècle apr. J.-C., ainsi que l'éloignement de l'Afrique romaine vis-à-vis de la crise majeure qui a secoué l'Empire romain au IIIe siècle apr. J.-C. (Alföldi, 1938) ont favorisé l'expansion de la « parure monumentale » d'*Hippo Regius* par de nombreuses structures telles que : les thermes du sud, les grands thermes du nord, ainsi que les *villae* du front de mer (Lepelley, 2005). De plus, la monumentalité du *macellum* et la présence de greniers impériaux

(*horrea sacra*) témoignent de l'ampleur des échanges commerciaux qui se produisaient dans la cité (Marec, 1954 ; Dahmani, 1983).

L'importance de la cité se manifeste également à travers l'important maillage de voies romaines (fig. 7) qui relient *Hippo Regius* aux cités romaines de Numidie, de Maurétanie césarienne et d'Afrique proconsulaire (Holmes Van Mater, 1970).

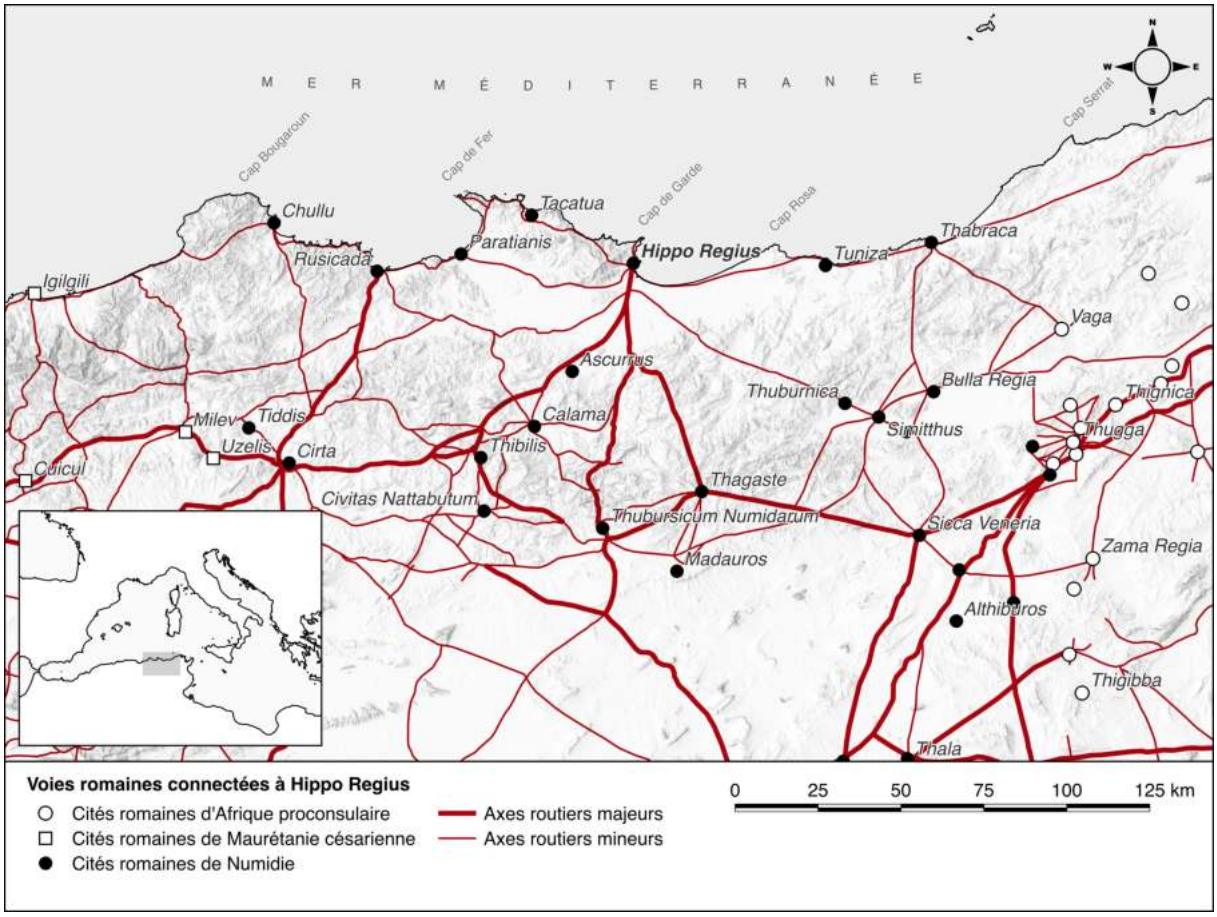

Figure 7 : Réseau des voies terrestres majeures et mineures reliant Hippo Regius aux cités voisines de l'Afrique romaine (d'après Talbert et Bagnall, 2000 ; McCormick et al., 2013)

D'après Holmes Van Mater (1970), au moins sept voies principales reliaient la cité d'*Hippo Regius* aux cités côtières et intérieures voisines, dont deux routes en direction de *Rusicade* vers l'ouest. L'une longeait la côte en passant par *Tacatua*, tandis que l'autre empruntait un itinéraire intérieur plus court. Deux autres routes se dirigeaient vers l'est, en direction de Carthage. La première, plus courte, traversait *Tuniza*, *Thabraca*, *Hippo Diarrhytus* et Utique, tandis que la seconde, plus longue, passait par *Simitthus*, *Bulla Regia* et *Thuburbo Minus*. Trois routes supplémentaires pénétraient dans les terres. L'une d'elles se dirigeait au sud-ouest jusqu'à *Cirta*, tandis que les deux autres s'étiraient vers le sud-est en direction de *Sicca Veneria*. L'une de ces routes passait par *Thacora*, tandis que l'autre suivait un chemin par *Thagaste*. Enfin, selon Gsell (1911), une huitième route s'étendait vers l'ouest pour

rejoindre la route du littoral à Guerbès (*Paratianis*), en passant par la vallée des Kharéza et le nord du lac Fetzara.

À l'ère de la chrétienté, la cité d'*Hippo Regius* se transforme en un « foyer de lumière et de civilisation » (Bouyac, 1891). En effet, le christianisme progressant rapidement en Afrique romaine, les premiers évêques sont apparus à *Hippo Regius*, dès 240 apr. J.-C. Parmi eux figuraient des personnages tels que : Théogène, Fidentius et Léontius. Cependant, ils ont tous, successivement, succombé lors des persécutions menées par Dioclétien (Monceaux, 1913). Par la suite, les persécutions religieuses ont changé de nature, abandonnant leur caractère violent pour se transformer en de simples « luttes oratoires » (Bouyac, 1891). Ces débats étaient orchestrés par les évêques de l'Afrique chrétienne, avec saint Augustin comme figure centrale au sein de ces rassemblements. Ainsi, dès 391 apr. J.-C., saint Augustin devient prêtre à *Hippo Regius*, puis, en 395 apr. J.-C., il accède à l'épiscopat de la cité et joue un rôle essentiel dans le développement de nombreuses idées théologiques comme la préservation de la foi chrétienne et la lutte contre le donatisme (Dahmani, 1983). Aussi, à travers ses œuvres, saint Augustin a grandement contribué au rayonnement d'*Hippo Regius* et à sa renommée dans le monde romain au cours du Bas-Empire. La grandeur de la basilique, l'importance du complexe baptismal et de ses dépendances, ainsi que la structuration du « quartier chrétien » attestent de l'importance qui était accordée à la foi chrétienne au sein de la cité.

III.1.4. L'invasion vandale (V^{e} au VIe siècle apr. J.-C.)

Pendant que l'Europe était en proie aux grandes invasions germaniques depuis 406 apr. J.-C., la situation en Afrique du Nord est restée relativement paisible. Cependant, en 429 apr. J.-C., les Vandales ont réussi à envahir l'ouest du Maghreb en traversant le détroit de Gibraltar (Le Bohec, 2018). Ils se sont dirigés vers l'est de l'Afrique romaine, avec une violence croissante, « en semant la mort sur leur passage » et en s'emparant de nombreuses cités dont *Hippo Regius* (Laporte, 2005a). En effet, la cité de saint Augustin était une cible trop attrayante pour que les Vandales ne la considèrent pas et la laissent de côté (Bouyac, 1891). Toutefois, la prise de la cité n'a pas été aussi simple que comme l'avaient espéré les Vandales. Le comte Boniface, gouverneur du diocèse d'Afrique, s'était rapidement mobilisé pour défendre *Hippo Regius*. Bénéficiant du soutien d'Aspar, ils ont positionné des défenseurs le long des remparts entourant la cité. Les Vandales ont alors entrepris un siège qui a duré environ quatorze mois, entre juin 430 et août 431 apr. J.-C. soit jusqu'à près d'un an après la mort de saint Augustin survenue le 28 août 430 apr. J.-C. (Laporte, 2005a).

L'issue du siège d'*Hippo Regius* demeure ambiguë d'après les différents récits qui relatent cet évènement (Dennis, 1925). En effet, dans son œuvre sur *La vie de saint Augustin*, Possidius, l'évêque de *Calama*, rapporte que les Vandales avaient complètement détruit la cité (*Vita Aug.*, 28, 5), perpétrant divers massacres et actes de torture et incendiant tout ce qu'ils rencontraient sur leur passage, réduisant ainsi toute la cité en cendres. Toutefois, ce témoignage est contredit par le récit sur *La Guerre contre les Vandales*, de Procope de Césarée (*Bell. Vand.*, I, 3, 34 ; traduit par Roques) :

> Le siège dura longtemps, mais comme les Vandales se voyaient incapables de réduire Hipponérégion à leur merci, que ce fût par la force ou par la négociation, et qu'ils étaient par ailleurs accablés par la famine, ils levèrent le siège.

À l'inverse de Possidius, Procope soutient que les forces vandales n'ont pas réussi à conquérir la cité d'Hippo Regius après un siège prolongé de plusieurs mois. Au lieu de cela, ils ont été repoussés lors d'une bataille contre les renforts envoyés par l'Empire romain d'Orient et l'Empire romain d'Occident pour défendre la cité (*Bell. Vand.*, I, 3, 35 ; traduit par Roques) :

> Peu de temps après, Boniface et les Romains de Libye, soutenus maintenant par une puissante armée venue à leur secours de Rome et de Byzance sous la conduite du général Aspar, voulurent reprendre le combat. Une violente bataille eut lieu, à l'occasion de laquelle l'ennemi infligea aux Romains une cuisante défaite et les obligea, chacun, à fuir dans toutes les directions possibles.

De plus, selon Laporte (2005a), aucune preuve archéologique n'a été découverte à *Hippo Regius* pour appuyer le récit d'un « incendie massif » ou d'une « destruction brutale » de la cité. Plus tard, un premier traité de paix a été conclu entre Genséric, le roi des Vandales, et Valentinien III, empereur de l'Empire romain d'Occident, qui concède une partie du territoire de l'Afrique romaine aux Vandales et désigne la cité d'*Hippo Regius* comme capitale du royaume vandale à partir de 436 apr. J.-C. (Laporte, 2005a). Cependant, il n'a pas fallu longtemps pour que les Vandales rompent ce traité. Dès l'automne de 439 apr. J.-C., ils ont repris les hostilités en se dirigeant vers l'est pour s'emparer de Carthage, une cité qu'ils avaient convoitée depuis leur arrivée en Afrique (Modéran, 1999). Face à cette nouvelle agression de Genséric et à la faiblesse du gouvernement de Valentinien III, un second traité de paix a été signé en 442 apr. J.-C. Cet accord a permis d'établir un véritable plan de partage de l'Afrique du Nord entre l'empereur et le roi vandale, cédant une grande partie des provinces orientales[29] de l'Empire romain en Afrique du Nord et faisant des Vandales des *foederati* (Vössing, 2014).

[29] D'après Modéran (1999) et Laporte (2005a), les territoires occupés par le royaume vandale, entre 439 et 455 apr. J.-C., correspondent aux territoires romains (après la réforme de Dioclétien) de la Maurétanie sitifienne, la Numidie, la Proconsulaire, la Byzacène et la Tripolitaine.

Enfin, s'agissant des traces de la présence vandale dans la cité d'*Hippo Regius*, aucune construction nouvelle pouvant être attribuée à cette époque n'a été mise en évidence. Les seules preuves de cette occupation sont perceptibles à travers des transformations architecturales observées dans quelques *villae* et édifices publics (Cote et Camps, 1988), ainsi qu'à travers quelques épitaphes[30] qui témoignent de la présence physique des Vandales au sein de la cité (Marec, 1954 ; Laporte, 2005b).

III.1.5. La reconquête byzantine (VIe au VIIe siècle apr. J.-C.)

Après plus d'un siècle de domination en Afrique du Nord, les Vandales ont vu leur règne prendre fin avec le débarquement de l'armée byzantine envoyée par l'empereur romain d'Orient Justinien. Selon Vössing (2014), la chute des Vandales est en grande partie due aux changements politiques de l'avant-dernier roi Hildéric, petit fils de Génséric qui s'est écarté des « principes antérieurs d'autonomie et d'autarcie », que ce soit d'un point de vue politique, religieux ou culturel, en prônant une politique pro-byzantine et en décidant un rapprochement avec l'empereur Justinien. Cette politique ayant rencontré une forte résistance de la part de la noblesse vandale ainsi que de celle de Gélimer, ce dernier opère un coup d'État pour renverser son cousin Hildéric et ainsi, reprendre le trône. La prise de pouvoir par Gélimer a déclenché l'intervention de Justinien qui se positionnait en tant que protecteur d'Hildéric. Il a ordonné la prise de Carthage qui a eu lieu le 15 septembre 533 apr. J.-C., suivie de la récupération de l'ensemble du royaume vandale sous le commandement de Bélisaire (Laporte, 2005a). La reconquête des anciens territoires romains par les Byzantins a eu pour effet un retour de la prospérité à *Hippo Regius* qui a retrouvé son statut de cité épiscopale (Dahmani, 1973).

Par ailleurs, il est incontestable que la cité n'était plus sous l'égide de l'Empire romain. Les liens fragiles qui la reliaient aux traditions romaine et chrétienne n'ont pas survécu à la tyrannie vandale qui a réussi à délatiniser et déchristianiser une grande partie des habitants d'*Hippo Regius* (Marec, 1954). Selon Laporte (2005a), peu de données matérielles témoignent de la période byzantine de la cité, hormis une vingtaine d'inscriptions funéraires retrouvées à proximité de la villa dite « du Procurateur », ainsi que des mosaïques ornementales attribuées à cette période (Guérout, 1963 ; Cote et Camps, 1988).

[30] Parmi les épitaphes vandales, on retrouve dans la grande basilique une inscription funéraire, datée de septembre 474 apr. J.-C. et dédiée à une femme nommée Hermengon, épouse du Vandale Ingomar, confirme, d'une part, la présence continue des Vandales à *Hippo Regius* à cette époque, vraisemblablement sous forme d'une garnison (Cote et Camps, 1988). D'autre part, cette inscription suggère que la basilique avait été confisquée par les Vandales pendant leur occupation de la cité (Laporte, 2005a).

III.1.6. L'expansion de l'Islam (à partir du VIIe siècle apr. J.-C.)

Durant la conquête musulmane de l'Afrique du Nord, il semble que la cité d'Hippone n'ait pas été le théâtre de combats militaires, en raison de son éloignement par rapport l'axe de pénétration islamique (Dahmani, 2005). Elle aurait, au contraire, offert refuge à des populations fuyant les combats à Carthage et Bizerte, entre 692 et 695 apr. J.-C., alors que la ville était encore sous le contrôle des Byzantins. Plus tard, la cité d'Hippone est intégrée à l'État fatimide, prenant le toponyme de « *Bûna* » (بونة), qui dérive de l'arabisation d'*Hippo*. D'après Dahmani (1983), la cité avait un statut particulier : elle constituait une « sorte de principauté » avec, à sa tête, un gouverneur autonome, appuyé par une armée de Berbères. Les voyageurs et géographes arabes comme Ibn Hawqal et Al-Maqdisi ont décrit Bûna entre 934 et 988 apr. J.-C., comme une cité paisible, favorable à un essor économique qui rappelait la prospérité du passé. Cependant, la cité de *Bûna* aurait été abandonnée entre la fin du Xe siècle et le début du XIe siècle apr. J.-C., sous les dynasties ziride et hammadite (Khelifa, 2005). La population s'étant déplacée vers la ville nouvelle située à environ 3 km de l'ancienne, sur les hauteurs de l'actuel centre-ville d'Annaba, avec pour toponyme *Bûna Al-Haditha* (بونة الحديثة).

Selon Dahmani (1983), le géographe Al-Bakri rapporte que la cité antique avait été abandonnée pour des motifs sanitaires. Les fréquentes inondations causées par les débordements de La Seybouse et sa proximité avec la cité antique avaient créé des eaux stagnantes dans l'embouchure de la rivière, provoquant la propagation du paludisme[31] parmi les habitants. Ainsi, la décision d'établir *Bûna Al-Haditha* sur une colline, marquant la fin du « chapitre historique » d'*Hippo Regius*, avait été dictée, à la fois, par la nécessité de se protéger contre les inondations mais aussi par la volonté de choisir un emplacement facilement défendable par rapport à la cité antique. Par ailleurs, bien que la cité antique d'*Hippo Regius* ait été désertée après le déplacement de ses résidents vers *Bûna Al-Haditha*, elle a continué à servir de carrière pendant l'édification de la nouvelle ville. En effet, des artisans y avaient prélevé des éléments décoratifs provenant d'édifices romains pour les remployer comme matériaux de construction (Amara, 2018). Parmi ces exemples de *spolia*, on observe une série de chapiteaux et de fûts de colonnes en marbre, remployés dans la mosquée d'Abu Marwan, qui a été fondée en 1033 apr. J.-C. (Marec, 1969 ; Delestre, 2005h), ainsi que de nombreux éléments de de support et des décors qui ont été remployés dans les diverses maisons à patio de la ville nouvelle.

[31] Le récit d'Al-Bakri semble concorder avec les observations de Gsell (1903), qui s'appuie sur des inscriptions latines. Il apparaît en effet qu'à l'époque de saint Augustin, l'air d'*Hippo Regius* était qualifié d'assez « malsain » durant l'été.

III.2. Les recherches archéologiques

Les fouilles et les recherches archéologiques réalisées à *Hippo Regius* ont révélé une superficie assez importante de structures anciennes, qui témoigne de l'importance historique de la cité dans la région (Dahmani, 1983). Cependant, le site archéologique demeure partiellement fouillé et relativement peu documenté (de Vos, 2003). Les recherches qui se sont étalées depuis la redécouverte du site, de 1833 jusqu'aux dernières fouilles menées en 1964, ont été irrégulières (Amraoui, 2017), principalement, en raison des nombreux épisodes de guerre qui ont affecté l'Algérie (Marec, 1962b).

III.2.1. La redécouverte d'Hippone (1833 - 1895)

D'après Delestre (2005d), le « dossier archéologique » d'*Hippo Regius* s'ouvre en 1833 lors de la découverte d'une série d'épitaphes chrétiennes, dont celle d'Arpilia Fidelis datée de l'époque byzantine, probablement vers 557 apr. J.-C. (Toulotte, 1894). Plus tard, pendant la conquête de l'Algérie par les troupes françaises, Quesnoy (1850) rapporte qu'« À chaque pas, dans la subdivision de Bône, on foule des ruines romaines […] ». De plus, il semble qu'au début de l'occupation française, l'emplacement du site archéologique d'*Hippo Regius* n'était pas encore connu, en dehors des textes anciens. Seules des structures imposantes, telles que les citernes romaines, émergeaient du sol à cette époque :

> Les ruines que l'on trouve aujourd'hui sur l'emplacement d'Hippône sont trop disséminées pour que l'on puisse établir, même approximativement, la disposition de la ville ; la partie la mieux conservée n'offre que des citernes d'une dimension considérable dont la hauteur est de six à sept mètres sur quarante de longueur et vingt-cinq de largeur. Elles sont construites en moëllons et en briques liés au moyen d'un ciment dont la dureté est celle de la pierre.

À la même période, l'Académie des Inscriptions et des Belles-Lettres a apporté son appui pour la conduite de fouilles archéologiques à l'emplacement supposé de la cité antique. Mais ce n'est qu'à partir de 1839 que des structures romaines[32] sont mises au jour, lors de travaux effectués par les militaires sur la colline qui domine le site (Delestre, 2005d). En 1887, deux décrets présidentiels concernant les citernes romaines d'Hippone ont été promulgués. Le premier, daté du 30 mars 1887, a accordé le statut de « monuments historiques » aux citernes, tandis que le second, daté du 9 septembre 1887, a autorisé la ville de Bône à entreprendre des travaux de restauration des citernes romaines en vue de leur réutilisation comme réservoirs (Papier, 1888).

[32] Ces structures romaines, en grande partie détruites pendant l'écrêtement de la colline d'Hippone par les militaires français, ont été interprétées comme les restes d'un temple consacré au dieu Baal-Saturne qui aurait été initialement fondé par les Phéniciens, puis aménagé par les Romains (Leroy, 1912).

III.2.2. Les fouilles archéologiques (1895 - 1964)

Les premières fouilles archéologiques ont, en réalité, débuté lorsque Chevillot a entrepris de mettre au jour une série de mosaïques découvertes au sein de son terrain (Papier, 1901). Par la suite, les recherches réalisées entre 1895 et 1900, dans la propriété de Chevillot, ont permis d'identifier le complexe des « *villae* du front de mer » (Amraoui, 2017), dans lequel on distingue, d'après les relevés réalisés par de Pachtère, cinq phases d'occupation (Delestre, 2005d). La découverte de cette structure ainsi que la mise au jour de nombreux objets archéologiques, datant des périodes antérieures à l'époque romaine (Gsell, 1901), ont permis aux archéologues de l'époque d'affirmer avec certitude que ce secteur abritait les vestiges de la cité antique d'Hippone. Ces premières découvertes ont conduit au rachat du terrain de Chevillot par l'État en 1908, ce qui a permis de sécuriser le secteur fouillé (Lavergne, 2005a). Plus tard, une série de comptes rendus et de plaidoyers a été publiée dans le *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, incitant à élargir le secteur des fouilles pour retrouver la cité antique d'Hippone et ses monuments chrétiens (Leroy, 1912 ; Maitrot, 1912 ; L. Bertrand, 1921).

En 1925, Marec (1927a) rapporte que grâce à l'appui engagé un an plus tôt par de nombreux historiens et archéologues, dont Bertrand, Albertini et Gsell, le Préfet de Constantine avait décidé d'instaurer une servitude archéologique, en exécution de la loi du 14 mars 1919, autour du site archéologique d'Hippone afin de le protéger de l'expansion rapide du faubourg industriel de la ville. En 1926, il rapporte que l'État avait réussi à racheter définitivement les propriétés de Chevillot et de Dufour, permettant de récupérer environ douze hectares de terrains, sous lesquels la cité d'Hippone restait en grande partie enfouie (Marec, 1927b). Ainsi, les sondages archéologiques réalisés entre 1924 et 1930 sous la direction de Marec, ont permis de mettre au jour plusieurs monuments de la cité d'Hippone, dont les grands thermes du nord (Marec, 1927a), le quartier chrétien avec sa basilique, son baptistère et ses dépendances (Marec, 1927b ; Bizot, 2005), ainsi que les secteurs du théâtre et du forum (Carcopino, 1942 ; Amraoui, 2017). Au cours de la décennie qui a suivi, les opérations archéologiques se sont intensifiées et élargies sous la direction de Choupaut. Cela a permis l'excavation du théâtre (Bélorgey, 1935a), d'une partie de l'angle nord-est du forum, ainsi que de deux fontaines monumentales, dont une ornée d'une tête de Gorgone (Choupaut, 1935).

Entre 1947 et 1963, les recherches archéologiques ont été relancées et conduites principalement sous la direction de Marec (Lassus, 1970). Le rythme des fouilles s'étant intensifié après la Seconde Guerre mondiale, l'acquisition par l'État de la propriété de Dubourg, qui limitait l'expansion du secteur de fouilles, a ouvert la voie à des découvertes supplémentaires (Marec, 1962a). Le dégagement d'une grande partie du forum a permis la

découverte du trophée en bronze commémorant la victoire de César en 46 av. J.-C. (Leschi, 1952), ainsi que d'une large inscription gravée sur les dalles du forum, mentionnant le proconsul C. Paccius Africanus (Marec, 1948). En 1951, Marec a fait la découverte d'une villa à étage dans le secteur sud d'Hippone, dont la grande superficie et la richesse des décors l'ont laissé penser qu'elle avait dû servir de « résidence aux Procurateurs impériaux » (Marec, 1969). Les fouilles réalisées en 1954, toujours sous la direction de Marec, ont permis le dégagement progressif des rues, faisant réunir entre eux les différents quartiers d'*Hippo Regius*. Au cours de cette même année, des travaux ont été entrepris dans les grands thermes du nord afin de consolider les voûtes du couloir de service. Ces travaux en sous-sol ont été accompagnés par la découverte des installations de chauffage qui équipaient ces thermes, dont les *praefurnia* et les cheminées d'évacuation (Leglay, 1955). Les années suivantes ont vu la poursuite des fouilles dans le secteur des *villae* du front de mer, ainsi que dans le secteur sud où ont été mis au jour les thermes du sud et le sanctuaire dédié aux *Dii Constentes* (Lassus, 1956). L'achèvement des fouilles au sein du quartier chrétien a révélé la présence d'un « établissement industriel[33] », à proximité de la grande basilique. Les recherches au nord de ce secteur ont également livré de nombreux éléments de décor dont des fragments d'une architrave et de caissons de soffite, sans pouvoir identifier le monument d'où ces *disjecti membra* proviennent (Lassus, 1957). Le programme de fouilles de l'année 1957 a abouti à la mise au jour de la majeure partie des thermes du sud et du sanctuaire des *Dii Consentes*, ainsi qu'à la découverte d'un nouvel édifice monumental à proximité de l'*insula* du quartier chrétien. Cet édifice a été identifié comme « *macellum* » grâce aux trois fragments épigraphiques trouvés à l'intérieur. Au cours de cette décennie, marquée par de nombreuses découvertes archéologiques, Marec a publié un guide de visite méthodique qui retrace l'histoire d'*Hippo Regius*, agrémenté de plans et d'illustrations des monuments de la cité (Marec, 1954), ainsi que d'une étude portant sur l'ensemble ecclésiastique et l'organisation de la communauté chrétienne d'Hippone (Marec, 1958). Enfin, les sondages réalisés à *Hippo Regius* au cours des deux premières années suivant l'indépendance de l'Algérie ont révélé une grande diversité de céramiques, dont des Campaniennes, des présigillées et des sigillées claires africaines. Morel (1965) a noté que la céramique « campanienne A » était de loin la plus abondante dans les couches anciennes de la cité. Cette céramique a permis d'établir un *terminus post quem* pour les échanges commerciaux

[33] Les structures adjacentes à la grande basilique ont été initialement considérées par Marec comme un « établissement industriel », spécialisé dans la teinturerie de la pourpre, tandis que Dahmani les a interprétées comme un atelier de salaison de poisson en raison des nombreux bassins et cuves ovales présents au sein des structures. Cependant, selon Amraoui (2017), il semble que ces structures étaient en réalité des thermes publics « munis de différentes pièces décorées ».

entre la République romaine et *Hippo Regius*, aux environs de 200 av. J.-C. En outre, selon Morel (1965), la présence de ces céramiques témoigne de « l'activité d'une cité maritime […] ouverte aux influences et aux produits venus d'Italie ». La série de sondages a également mis en évidence la présence de moellons en roche calcaire, portant des traces de feu et qui seraient probablement des « rebuts de fours à chaux » (Morel, 1968).

III.2.3. Les activités scientifiques récentes (1969 - 2020)

Au cours de prospections archéologiques menées entre 1969 et 1972, dans le cadre d'une mission conjointe entre l'Algérie et l'Italie, de nouvelles inscriptions libyques ont été mises au jour dans les environs d'Hippone. De plus, une série de points fortifiés a été identifiée le long des vallées de La Seybouse et de l'oued Mellah. L'examen des plans des édifices et de leurs techniques de construction a révélé des similarités avec les sites fortifiés de l'époque punique qui se trouvent en Tunisie et en Sardaigne (Bouchenaki, 1980). En 1973, Dahmani a proposé une nouvelle lecture historique du site archéologique dans son ouvrage « *Hippo Regius* à travers les siècles » (Dahmani, 1973) où il expose une synthèse des découvertes réalisées tout au long des fouilles archéologiques. Par la suite, une mission conjointe entre l'Algérie et la France a été entreprise de 2002 à 2005, dans le but de préserver et de valoriser le site archéologique d'Hippone. Ce projet archéologique a permis la constitution d'un dossier documentaire compilant les données de fouilles issues de publications et d'archives ainsi que la réalisation d'un relevé général pour évaluer l'état de conservation des structures anciennes (Delestre, 2011). En outre, cette mission a conduit une campagne de consolidation des mosaïques conservées *in situ*, ainsi qu'une mise en place d'un plan de gestion de l'eau et de la végétation visant à protéger les structures exposées aux fréquentes inondations.

Quelques années plus tard, le site archéologique d'Hippone a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment des études archéométriques portant sur l'exploitation de la carrière de marbre « *greco scritto* » (Antonelli et al., 2009) et sa diffusion dans le monde romain (Herrmann, Attanasio, et Tykot, 2012 ; Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012b), ou encore de l'étude sur l'artisanat dans les cités antiques de l'Algérie (Amraoui, 2017), qui a notamment permis de lever l'ambiguïté sur les structures décrites par Marec comme un « établissement industriel ». Plus récemment, le site archéologique d'Hippone a fait l'objet d'un arrêté ministériel en date du 14 juillet 2020, qui établit un plan de protection et de mise en valeur du site archéologique d'Hippone, ainsi que de sa zone de protection (PPMVSA). Ainsi, la cité antique d'*Hippo Regius* s'est vu doter d'un nouvel instrument juridique visant à garantir sa préservation à long terme et à ouvrir la voie à de nouvelles prospections archéologiques.

Figure 8 : Plan du site archéologique d'Hippo Regius montrant l'étendue des secteurs fouillés entre 1895 et 1964, ainsi que les structures monumentales et les habitations de la cité datant de l'occupation romaine (d'après Marec, 1954 ; Stawski, 1957 ; Delestre, 2005c)

III.3. Les principales découvertes architecturales

Après plus d'un demi-siècle de fouilles archéologiques, près de sept hectares de la cité antique d'Hippone ont été mis au jour, révélant une trame urbaine irrégulière qui laisse transparaître la longue évolution de la cité (Suméra, 2005b). Toutefois, même si l'infrastructure générale de la cité ne s'aligne pas sur le modèle hippodaméen, l'agencement interne des *insulae* tend à adopter une disposition plus orthogonale. En ce qui concerne l'habitat, Suméra (2005b) remarque[34] que les *domus* les plus vastes se trouvent dans le quartier chrétien ainsi que dans celui des « *villae* du front de mer ». En revanche, les abords est du forum sont occupés par des boutiques, des échoppes et de modestes habitations. S'agissant des structures monumentales toujours conservées, elles remontent toutes, à l'époque impériale et sont réparties sur l'ensemble du site (fig. 8), couvrant divers secteurs, tels que : le front de mer, le quartier chrétien, le forum, ainsi que les secteurs nord et sud de la cité.

III.3.1. Les *villae* du front de mer

Les *villae* du front de mer présentent une superposition de constructions attribuées à trois phases d'occupation. Ces édifices sont caractérisés par leurs pièces d'apparat luxueuses, dotées de mosaïques élaborées, de systèmes de chauffage par hypocauste, d'un péristyle orné de bassins et de fontaines revêtues de marbre (Blanchard-Lemée, 2003). Les mosaïques, elles-mêmes, dépeignent une variété de motifs, allant des géométriques aux scènes mythologiques en passant par des représentations de la vie quotidienne et des éléments de culte. Certaines de ces résidences abritaient également des thermes privés et des piscines alimentées par des citernes (Lavergne, 2005a). Ces structures reflètent la richesse et la sophistication de la société d'*Hippo Regius* à cette époque, fournissant un aperçu de sa vie culturelle, sociale et religieuse. Les phases d'occupation des *villae* du front de mer peuvent être résumées en trois périodes distinctes (Blanchard-Lemée, 2005).

La première phase, identifiée comme l'état initial dans la partie sud-est, date d'environ 210 à 260 apr. J.-C. La deuxième phase correspond aux mosaïques du grand péristyle à *viridarium* datées entre 280 et 330 apr. J.-C. (Morel, 1968), privilégiant la fin de cette période, vers 310 - 330 apr. J.-C. Enfin, la troisième phase, caractérisée par une mosaïque ornée de symboles évoquant une vision du temps cyclique, de l'harmonie et de la jeunesse éternelle du

[34] Suméra (2005b) se fonde sur la distribution et le nombre de seuils de portes pour étayer son observation. Il avance que les *insulae* comportant le plus grand nombre de seuils donnant sur la rue se trouvent à proximité du forum, tandis que leur nombre diminue à mesure que l'on s'éloigne de ce secteur.

monde, ainsi que par un tapis géométrique, se situe à la fin du IVe ou au début du Ve siècle apr. J.-C. (Blanchard-Lemée, 2005).

III.3.2. Le quartier chrétien

Le quartier chrétien forme un polygone à cinq côtés, délimité par la *via* du Concile à l'ouest, la *via* de l'Évêché au sud, la *via* de la Basilique à l'est, et la *via* des Foulons au nord (Dahmani, 1973). Les structures présentes dans ce quartier datent principalement du IVe siècle apr. J.-C. et des périodes postérieures. Cependant, Dahmani (1973) rapporte que les structures chrétiennes ont été construites sur des édifices antérieurs qui remontent probablement au Ier siècle apr. J.-C. En outre, ce quartier semble avoir joué un rôle central dans la vie de la communauté chrétienne d'Hippone, abritant des monuments importants tels que la grande basilique et ses annexes, la « chapelle tréflée » ou encore le complexe baptismal.

III.3.2.1. La grande basilique

La grande basilique se démarque comme étant la structure la plus monumentale au sein du quartier chrétien. Elle est composée de trois nefs et mesure 18,5 m de large et 37,5 m de long. La nef centrale se prolonge par une abside large de 8,5 m et profonde de 7 m, ornée d'une banquette en maçonnerie servant de siège pour les clercs et qui abrite en son centre l'emplacement de la chaire épiscopale (Dahmani, 1973). D'après les premières observations rapportées par Marec (1958), le mur au fond de l'abside devait servir de dossier à la banquette. Il était constitué de panneaux mesurant 0,50 m de hauteur, délimités en haut par une fine moulure. Ces panneaux présentent, selon Marec, des traces de peinture *a fresco* où « des zigzags bleus et verts tendent à imiter les veinules du marbre » (Marec, 1958).

Le sol de l'abside, qui abritait le *presbyterium*, est constitué d'un béton de tuileau et est surélevé de 0,55 m par rapport au *quadratum populi* (Marec, 1954). Le sol de la grande basilique est entièrement revêtu de pavements ornementaux, caractérisés par des couleurs vives et des motifs élaborés. De plus, on retrouve des sépultures à épitaphes ornées de mosaïques à différents endroits de la basilique, surtout dans les deux collatéraux (Dahmani, 1983). Les caractéristiques stylistiques de ces panneaux de mosaïques permettent d'identifier quatre états d'occupation de la grande basilique (Marrou, 1960). Les principales périodes d'occupation s'étalent d'un *terminus post quem* à la deuxième moitié du IVe siècle apr. J.-C. jusqu'à un *terminus ante quem* à la toute fin de la présence byzantine au VIIe siècle apr. J.-C. (Bizot, 2005). À l'est se trouve la « chapelle à abside » qui pourrait être le *consignatorium* associé à la grande basilique (Marec, 1954). Elle s'ouvre en diagonale vers le collatéral droit, à une distance de

10 m environ depuis l'angle inférieur du *quadratum populi*. Cette chapelle mesure 18 m de long, et du côté droit de son abside, elle donne accès à une petite salle semi-circulaire qui abrite le baptistère.

III.3.2.2. Le baptistère

Le baptistère est un petit édifice de forme rectangulaire mesurant 3 m de longueur et 2 m de largeur (Dahmani, 1973). La cuve baptismale est enduite d'un mortier hydraulique avec des inclusions de tuileau (Bizot, 2005). Elle est entourée aux quatre coins par des dés carrés qui soutiennent des colonnes, formant un *ciborium* (Marrou, 1960). D'après les caractéristiques stylistiques des pavements de mosaïques, il est probable que le complexe baptismal ait été construit dans la seconde moitié du IVe siècle apr. J.-C., « en remployant […] murs et pavements de mosaïques antérieurs » (Bizot, 2005). Ce lieu aurait ensuite été utilisé durant une période étendue, englobant les Ve et VIe siècles apr. J.-C.

III.3.3. Le *macellum*

Selon Dahmani (1973), le *macellum* d'*Hippo Regius* « parait être le plus important » de ceux découverts en Afrique du Nord. Sa structure comprend deux parties : une première cour rectangulaire revêtue d'une mosaïque géométrique et entourée de portiques, suivie d'une seconde cour carrée recouverte de dalles en marbre avec, en son centre, une rotonde ou *tholos* (Lassus, 1958). La cour rectangulaire devait mesurer environ 37 m de long sur 10,50 m de large, avec des portiques mesurant environ 5 m de large. La cour carrée mesure quant à elle, 30 m de côté, tandis que la rotonde est dotée d'un diamètre de 9,70 m. Elle était entourée de trois marches en marbre blanc et surmontée d'une colonnade. La cour était également encadrée par une série de colonnes et un portique d'une largeur de 5,74 m, avec un ensemble de boutiques alignées le long de ses trois côtés nord, ouest et sud.

Lors des fouilles menées par Marec dans le *macellum*, la découverte de nombreux poids et balances (Lassus, 1958) ainsi que trois inscriptions s'est révélée cruciale pour l'identification et la datation de cette structure (Marrou, 1960). En plus du fragment d'inscription portant le mot « *macello* », une dédicace découverte à l'entrée principale du *macellum* atteste des « importantes restaurations » réalisées entre 364 et 367 apr. J.-C., sous le règne des co-empereurs Valentinien et Valens (Delestre, 2005f). Selon Marrou (1960), il est possible que cette structure ait été édifiée dès le Ier siècle apr. J.-C.

III.3.4. Le forum et ses abords

Le forum d'*Hippo Regius*, qualifié d'après Marec (1954) comme étant « le plus vaste et le plus ancien […] en Afrique du Nord », présente un parfait alignement nord-sud dans son axe longitudinal. Les dimensions de ce forum sont remarquablement vastes[35], mesurant 76 m de long sur 43 m de large. Son *area* était entourée d'une colonnade formant un péristyle, surélevé de deux marches et accompagné d'un caniveau, s'étendant sur toute la longueur des côtés ouest, nord et est du forum (Marec, 1954). La dédicace au proconsul C. Paccius Africanus, figurant sur les dalles qui recouvrent l'*area*, permet de situer la mise en place de ce revêtement autour des années 78-79 apr. J.-C. (Suméra, 2005a).

Aux abords du forum, on retrouve deux fontaines monumentales. La première est située immédiatement au nord du forum, tandis que la seconde, connue sous l'appellation de « fontaine à la Gorgone », se trouve à l'intersection des *decumanus* et *cardo minor*, à l'est du forum. D'après Lamare (2019), la fontaine située au nord du forum peut être attribuée à l'époque antonine en se basant sur ses caractéristiques stylistiques, en particulier son ordre composite, indiquant ainsi un *terminus post quem*, vers la fin du Ier siècle ou le début du IIe siècle apr. J.-C. En ce qui concerne la fontaine à la Gorgone, il est peu probable qu'elle ait été construite avant la fin du Ier siècle apr. J.-C. (Lamare, 2019).

III.3.5. Le théâtre

Situé à l'ouest de la cité antique, le théâtre d'*Hippo Regius* est adossé au flanc oriental de la colline de saint Augustin. D'après la description faite par Marec (1954), la structure d'ensemble du théâtre couvrait une largeur totale d'environ 100 m, avec une *cavea* au diamètre d'environ 55 m. Cette dernière était composée de deux étages de gradins en calcaire métamorphique, séparés par des paliers intermédiaires, dont seulement sept gradins de l'étage inférieur sont encore visibles aujourd'hui.

L'*orchestra*, avec un diamètre d'environ 16 m, arbore un revêtement de sol en marbre, tandis que le *proscenium*, richement décoré de panneaux de marbre, s'étendait sur une largeur de 40 m et une profondeur de 14 m. En outre, Marec (1954) rapporte qu'au moment de la découverte du théâtre, le *proscenii pulpitum*, un mur haut de 1,50 m marquant le devant de la scène était orné d'une plinthe de marbre, avec des moulures à son sommet et à sa base, ainsi que de panneaux de marbre saillants et rentrants. Certains de ces panneaux arboraient des

[35] Marec établit une comparaison en montrant que les dimensions du forum d'*Hippo Regius* dépassent celles du forum de *Thamugadi*, qui, lui, atteint seulement 50 m dans sa dimension la plus longue.

emblèmes symboliques, notamment un gouvernail et une corne d'abondance qui étaient associés à la fortune. D'autres panneaux, de dimensions plus généreuses, exhibaient des motifs géométriques finement ciselés. À l'arrière de la scène se trouvaient deux pièces rectangulaires qui, d'après Marec (1954), étaient destinées à être des « foyers luxueux ». Ces pièces avaient des dimensions de 13 m de long sur 14 m de large et étaient prolongées à l'extérieur par une abside de chaque côté. Ainsi, les caractéristiques stylistiques des éléments décoratifs ont permis de situer un *terminus post quem* pour la construction du théâtre d'*Hippo Regius* au Ier siècle apr. J.-C. (Bizot et al., 2005).

III.3.6. Les grands thermes du nord

Le secteur de fouille des grands thermes du nord occupe, au nord d'*Hippo Regius*, un espace rectangulaire d'environ 75 m de long sur 60 m de large, soit une superficie d'environ 4 500 m^2 (Dahmani, 1973). Ces thermes présentent une disposition asymétrique des salles. Elles sont, d'après Thébert (2003), de taille moyenne et occupent environ 2 000 m^2, avec des espaces annexes importants, dont au moins une palestre. Le *frigidarium* est particulièrement spacieux, couvrant plus de 400 m^2, sans prendre en compte les piscines. Les salles chaudes sont agencées suivant une disposition circulaire et incluent des *alvei* ainsi qu'une *calida piscina*.

Le *frigidarium* constituait la salle la plus vaste et opulente parmi les thermes (Dahmani, 1973). De forme rectangulaire, il mesure au moins 30 m de longueur sur 15 m de largeur, sans compter les absides en hémicycles situées au niveau de chaque côté. Parmi ces absides, trois étaient aménagées en piscines froides, accessibles par des escaliers. L'ensemble de la pièce était décoré de placage de marbre, avec des sols en marbre blanc ou gris.

Le grand *caldarium* se présente sous la forme d'une grande salle rectangulaire, flanquée sur ses côtés nord et sud de deux piscines chaudes (*alvei*) de formes rectangulaires. À l'extrémité ouest de la salle se trouve une abside qui abrite le *laconicum* équipé, selon Marec, d'un *labrum* (Thébert, 2003), tandis qu'à l'est, un couloir conduit à deux autres salles chaudes (*caldaria*). La première, au nord, est dotée un bassin profond et est reliée au *frigidarium*. La seconde, au sud, est semblable au grand *caldarium*. Toutes les salles chaudes étaient chauffées par des hypocaustes qui sont en grande partie conservés. L'hypocauste du *caldarium* est plus profond, particulièrement sous les piscines et le *laconicum*. L'ensemble des piscines chaudes et froids, ainsi que les parois des salles, avaient des revêtements en placage de marbre qui permettaient de recouvrir les conduits de chauffage provenant des hypocaustes. Au sud de la seconde salle chaude se trouve le *tepidarium* qui présente une forme rectangulaire de 17 m sur 12 m. Cette salle ne disposait pas de doubles parois et seul le plancher était chauffé par

hypocauste. Le *tepidarium* était voûté et décoré de fresques représentant des personnages, dont quelques fragments ont été retrouvés durant les fouilles (Dahmani, 1973). Les foyers sous les salles chaudes étaient alimentés au travers de *praefurnia*, desservis par un couloir de service longeant le côté long du *tepidarium*. Enfin, la découverte de nombreux fragments d'inscriptions lors des fouilles des grands thermes du nord a permis d'estimer la période de construction sous le règne de Caracalla, soit entre 211 et 217 apr. J.-C. (Delestre, 2005g). Les inscriptions ont également permis d'apprendre que ces thermes avaient été construits aux frais de la cité et dédiés à l'empereur Septime Sévère (Marec, 1927a).

III.3.7. Les thermes du sud

Les thermes du sud présentent, d'après Thébert (2003), un plan symétrique et des dimensions moyennes d'environ 55 m de long sur 22 m de large, bien que la superficie exacte soit difficile à déterminer en raison de l'état actuel des fouilles qui demeurent incomplètes. Toutefois, la superficie de l'ensemble peut être estimée entre 1 500 et 2 000 m^2. Dahmani (1973) rapporte que la partie nord des thermes présente une dalle de *suspensura* en béton de tuileau qui était recouverte de marbre. On y trouve un réseau de canalisations relativement bien conservé qui alimentait, entre autres, une piscine froide de forme rectangulaire, mesurant 3,90 m sur 3,25 m et qui présente un revêtement en placage de marbre (Dahmani, 1973). La partie restante des thermes est occupée par des salles chaudes. À certains endroits, on observe des pilettes d'hypocauste en briques qui soutiennent encore une partie du sol en marbre.

Parmi les inscriptions découvertes dans les thermes du sud, on retrouve une dédicace à Julia Domna, épouse de Septime Sévère et mère de Caracalla, ainsi qu'à Aurelius Honoratus (Marec, 1956). Ces dédicaces suggèrent que la date de construction remonterait à 198 apr. J.-C., à moins qu'il ne s'agissait que d'une campagne de restauration dont ont bénéficié ces thermes sous le règne de Caracalla (Delestre, 2005g).

III.4. Les matériaux de construction employés

Les techniques de construction à *Hipp Regius* sont communes aux techniques observées dans les provinces romaines d'Afrique. En effet, en dehors des murs du front de mer d'apparence cyclopéenne qui servaient de brise-lames (Morel, 1968), la technique de construction en *opus africanum* reste la plus observée sur les murs de la cité (Delestre, 2005h). Les orthostates en roches calcaires sont disposés avec des espacements compris entre 2 et 2,5 m, tandis que les remplissages sont réalisés avec des moellons de roches calcaires, de roches

métamorphiques ou de briques. Delestre (2005h) rapporte que l'utilisation de différentes variétés de roches a pu être observée sur le site archéologique d'*Hippone*. Parmi les matériaux de construction d'origine naturelle, on retrouve le gneiss, le marbre, le calcaire gris à grain fin et le grès dunaire. Quant au marbre, il était réservé aux ouvrages prestigieux. On observe son utilisation pour les dallages du théâtre, des thermes et du *macellum*, ainsi que pour le placage recouvrant les piscines. Le grès dunaire était, quant à lui, utilisé pour les élévations des murs qui n'étaient pas visibles du public ou qui devaient être recouverts de placage de marbre. Les éléments structurels et ornementaux, tels que les colonnes, les chapiteaux, les frises et les corniches, sont principalement en marbre local de la variété « *greco scritto* », provenant des carrières de marbre du cap de Garde et du mont de Filfila (Antonelli et al., 2009 ; Herrmann et al., 2015). Des blocs de gneiss, servant de revêtement pour les canalisations d'égouts (Delestre, 2005a), sont également observables le long des voies de circulation de la cité. En ce qui concerne les matériaux de construction anthropiques, on observe l'utilisation de la brique en terre cuite dans les *villae* du front de mer, le théâtre et les grands thermes du nord. Dans ces derniers, de vastes parois sont édifiées en *opus testaceum*, et parfois des maçonneries de blocage sont réalisées en *opus caementicium*, avec des largeurs importantes pour soutenir le poids des voûtes qui les recouvraient (Delestre, 2005h).

S'agissant des enduits et mortiers employés à *Hippo Regius*, Quesnoy (1850) mentionnait, lors de sa description des citernes romaines, que celles-ci étaient « […] construites en moëllons et en briques liés au moyen d'un ciment dont la dureté est celle de la pierre ». En effet, on observe l'utilisation du mortier de maçonnerie à base de chaux dans de nombreuses structures romaines de la cité, comme la grande basilique, les *villae* du front de mer, les deux structures thermales et le théâtre. Les sols intérieurs des structures privées sont en béton de tuileau ou *opus signinum* et, dans les pièces luxueuses, en *opus tessellatum*. Certains sols sont composés de tessons d'amphores liés au mortier de chaux ou sont réalisés en *opus spicatum*, comme on peut l'observer au niveau de la fontaine à la Gorgone. On retrouve également l'utilisation d'enduits hydrauliques à base de chaux dans les structures liées à l'eau, comme les *alvei*, les citernes ou encore les supports de placage en marbre des piscines dans les grands thermes du nord. Quant au décor mural, seuls quelques fragments d'enduits peints ont été découverts, notamment lors des fouilles de la grande basilique (Marec, 1958), ainsi que des corniches et des placages en stuc rehaussés de peinture, découverts pendant les fouilles des grands thermes nord (Delestre, 2005h).

Conclusion

En réalisant un état des recherches sur *Hippo Regius*, nous avons pu consolider et approfondir notre compréhension de l'évolution de cette cité antique, mettant ainsi en lumière son importance dans le cadre de notre thèse. En outre, l'examen attentif des sources anciennes, des rapports de fouilles et des publications récentes nous offre un aperçu global sur l'historique des fouilles archéologiques et des principales découvertes architecturales, incluant les techniques de construction et les types de matériaux employés. Sur le plan historique, *Hippo Regius* apparaît comme un microcosme de l'histoire complexe de l'Afrique du Nord. Elle a été façonnée et transformée par des influences culturelles, politiques et environnementales variées à travers les siècles.

Fondée vraisemblablement par les Phéniciens, la cité a traversé durant l'Antiquité classique de nombreuses périodes de prospérité et de déclin, sous l'influence des deux puissances carthaginoise et romaine, ainsi que celle des royaumes numides. La période punique de la cité a été marquée par une prospérité, assurée par la dynamique des échanges commerciaux et la protection de Carthage. Cependant, cette prospérité a été mise en péril par des conflits internes et externes, notamment entre la Numidie et Rome. Sous l'administration romaine pendant près de cinq siècles, *Hippo Regius* a été élevée aux rangs particuliers de municipe puis de colonie honoraire. Au cours de cette longue période, la cité a connu un essor économique, culturel et cultuel considérable. Les nombreux édifices, tant publics que privés, ainsi que l'important réseau de routes terrestres et maritimes, témoignent de sa croissance, de sa prospérité et de sa position stratégique au sein de l'Empire romain. Le déclin d'*Hippo Regius* a été initié par l'arrivée des Vandales, que l'on estime marquée par une destruction violente de la cité, bien que les preuves archéologiques relatives à cet évènement soient manquantes. Plus tard, la conquête musulmane de l'Afrique du Nord a été suivie par l'abandon d'*Hippo Regius* au profit de *Bûna Al-Haditha*, où les matériaux de la cité antique ont été remployés[36] dans de nombreux édifices et structures d'habitation de la ville nouvelle.

Dès l'identification des terrains abritant les ruines d'Hippone en 1833, des fouilles archéologiques ont permis la reconnaissance sporadique de quelques structures romaines. Les efforts se sont multipliés et se sont institutionnalisés, notamment avec le soutien de l'Académie des Inscriptions et des Belles-Lettres, permettant la découverte des premières structures romaines à partir de 1839. Les recherches systématiques menées de 1895 à 1964 ont permis de

[36] En plus de leur remploi en tant que matériaux de construction ou éléments de décor, les *spolia* composés de calcaire et de marbre pouvaient également servir à la production de la chaux. Cette pratique étant vraisemblablement courante durant le Moyen Âge (Büttner, 2020b).

réaliser d'importantes découvertes archéologiques, en particulier sous la direction de Marec, même si ses motivations étaient plus historiques et religieuses que scientifiques. Plus tard, les sondages réalisés par Morel (1965) ont mis au jour l'abondance de la céramique dite « Campanienne A » dans les strates archéologiques les plus anciennes d'*Hippo Regius*. De plus, la présence de rebuts de fours à chaux dans les couches stratigraphiques des périodes punique et numide indique que les artisans locaux maîtrisaient déjà le processus de production de la chaux à ces époques. Ainsi, ces résultats mettent en évidence la perméabilité d'*Hippo Regius* aux influences et aux produits en provenance d'Italie, surtout de Campanie, ainsi que la maîtrise technologique des artisans locaux avant même la romanisation de la cité. Les découvertes archéologiques, telles que les *villae*, le *macellum*, les établissements thermaux et les édifices du quartier chrétien, fournissent une abondance d'informations sur les techniques de construction et le choix des matériaux utilisés. Ces structures d'époque impériale constituent des exemples particulièrement fournis en vestiges présentant des enduits et de mortiers romains à base de chaux, qui sont relativement bien conservés.

En conclusion, il apparaît à travers ce chapitre que le site archéologique d'Hippone constitue un cas d'étude pertinent, tant pour son riche passé historique, marqué par des influences puniques, numides et romaines qui ont façonné son paysage culturel et urbain, que du point de vue architectural et archéologique. Les nombreuses structures romaines, relativement bien conservées, témoignent de l'expertise technique[37] et du savoir-faire des artisans locaux en matière de production d'enduits et de mortiers à base de chaux, résistants à l'épreuve du temps.

[37] L'expertise technique des artisans se manifeste dans la connaissances des qualités intrinsèques des matériaux d'origine locale (Delestre, 2005h). En effet, le choix de matériaux tels que le calcaire gris à grains fins ou le gneiss pour les revêtements de sol était dicté par leur très grande résistance à l'usure, tandis que le grès dunaire était exclusivement employé par les artisans romains pour le remplissage des murs, en raison de sa légèreté et de sa faible résistance qui le rend plus facile à extraire et à tailler.

Partie 2 :
Archéométrie du mortier de chaux

Chapitre IV : Matériel archéologique et protocoles de l'étude archéométrique

Introduction

Les fouilles archéologiques réalisées entre 1924 et 1963 à *Hippo Regius* ont mis au jour un ensemble de structures romaines qui représentent un grand intérêt pour notre travail de recherche. En effet, bien que les recherches conduites par Marec s'apparentent à de l'archéologie chrétienne, les excavations ont néanmoins révélé des structures romaines qui présentent l'utilisation de divers types de mortiers à base de chaux. Les *villae* du front de mer révèlent l'emploi d'une variété de mortiers romains, dont des mortiers de maçonnerie, des mortiers de pose de placages en marbre et de mosaïques, ainsi que des enduits hydrauliques pour assurer l'étanchéité des citernes et des nombreux bassins. La grande basilique et l'ensemble baptismal présentent l'utilisation d'enduits peints, de mortiers hydrauliques et de mortiers de pose de mosaïques, tandis que le *macellum* et le théâtre présentent des mortiers et bétons utilisés pour la pose de dallages en marbre. Une importante variété de mortiers romains, dotés de propriétés hydrauliques, ont été utilisés dans les thermes du sud ainsi que dans les grands thermes du nord, dont l'édification avait été financée par la cité d'*Hippo Regius*, en hommage à l'empereur Caracalla. En outre, compte tenu de ses aspects anthropique et composite, le mortier de chaux peut être assimilé à une roche sédimentaire « artificielle », composée d'agrégats solidifiés par un liant minéral. Cette analogie nous permet d'adopter, dans le cadre de notre étude de ce matériau, des méthodes et des protocoles de préparation propres aux roches sédimentaires. À cet effet, dans le cas des mortiers romains d'*Hippo Regius*, les protocoles de recherche employés sont similaires à ceux utilisés en lithologie.

Ainsi, dans ce quatrième chapitre, nous abordons le protocole de prélèvement des échantillons de mortier de chaux depuis les structures romaines d'*Hippo Regius* et nous détaillons le protocole de leur préparation. Nous abordons également les protocoles de caractérisations multi-échelles que nous avons mis en place, à savoir la caractérisation macroscopique des échantillons, puis leur caractérisation microscopique à travers les observations pétrographiques. En outre, nous examinons les méthodes d'analyses physico-chimiques qui ont été employées, y compris les observations en cathodoluminescence (CL), au

microscope électronique à balayage (MEB), ainsi que la mesure des concentrations en éléments majeurs dans certains composants pouzzolaniques, grâce à la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS). En dernier lieu, nous abordons les paramètres qui ont été pris en considération pour l'interprétation des résultats que nous avons obtenus.

IV.1. Le protocole de prélèvement des échantillons

La pertinence des résultats de caractérisation des mortiers archéologiques dépend fortement de la qualité des prélèvements réalisés en amont de l'étude (Büttner, 2002). Cependant, compte tenu de la valeur patrimoniale des structures anciennes d'*Hippo Regius* et de l'action destructive des prélèvements, les échantillons de mortier de chaux ont été réduits au minimum représentatif de l'ensemble auquel ils appartiennent (Palazzo-Bertholon, 2000 ; Dagrain, 2012). Ainsi, des quantités minimales, d'environ la moitié du volume du poing (Coutelas et Büttner, 2009b), ont été prélevées à partir de fragments de mortier, considérés comme les plus représentatifs et les mieux conservés, parmi les variétés de mortier romain sur le site d'Hippone (*cf.* chapitre III). Lors des prélèvements dans le quartier chrétien et les grands thermes du nord, un soin particulier a été pris pour éviter les parties qui avaient pu être contaminées par les campagnes de consolidation initiées par Marec entre 1951 et 1954 (Leglay, 1955 ; Delestre, 2005d), ainsi que par les travaux de consolidation des mosaïques des *villae* du front de mer, réalisés entre 2002 et 2005 (Delestre, 2005[e]). Enfin, bien que les fouilles du sanctuaire des *Dii Consentes* demeurent inachevées (Lavergne, 2005b), les recherches sur cette structure ont mis en évidence une imposante citerne. Celle-ci est recouverte d'un béton de tuileau qui est relativement bien conservé et dont les caractéristiques présentent un intérêt pour notre travail de recherche.

Identifiant	Type	Fonction	Localisation	Structure	Datation
BDX22378	Mortier	Maçonnerie	Pièce B15	*Villae* du front de mer	280 à 330 apr. J.-C.
BDX22379	Enduit	Étanchéité à l'eau	Péristyle B16	*Villae* du front de mer	280 à 330 apr. J.-C.
BDX22380	Mortier	Support de placage	Pièce B3	*Villae* du front de mer	280 à 330 apr. J.-C.
BDX22381	Mortier	Support de placage	Piscine froide	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22382	Béton	Revêtement de sol	Pièce B4	*Villae* du front de mer	280 à 330 apr. J.-C.
BDX22383	Mortier	Maçonnerie	Pièce B4	*Villae* du front de mer	280 à 330 apr. J.-C.
BDX22384	Enduit	Étanchéité à l'eau	Citerne C6	*Villae* du front de mer	IVe au Ve s. apr. J.-C.
BDX22385	Mortier	Support de mosaïque	Pièce C1	*Villae* du front de mer	IVe au Ve s. apr. J.-C.
BDX22386	Mortier	Support de mosaïque	Pièce B7	*Villae* du front de mer	280 à 330 apr. J.-C.
BDX22387	Enduit	Étanchéité à l'eau	*Gymnasium*	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22388	Mortier	Maçonnerie	*Praefurnium*	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22389	Mortier	Maçonnerie	Hypocauste	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22390	Enduit	Protection au feu	*Praefurnium*	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.

BDX22391	Mortier	Maçonnerie	*Praefurnium*	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22392	Enduit	Protection au feu	*Praefurnium*	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22393	Mortier	Maçonnerie	*Praefurnium*	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22394	Béton	Support de dallage	Piscine chaude	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22395	Mortier	Joint de carreaux	Hypocauste	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22396	Mortier	Bourrelet d'étancheité	Piscine chaude	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22397	Enduit	Étanchéité à l'eau	Piscine chaude	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22398	Mortier	Bourrelet d'étancheité	Piscine froide	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22399	Mortier	Support de dallage	Piscine froide	Grands thermes du nord	211 à 217 apr. J.-C.
BDX22400	Enduit	Décoration (fresque)	*Presbyterium*	Grande basilique	IVe siècle apr. J.-C.
BDX22401	Mortier	Support de mosaïque	Salle D1	Ensemble baptismal	IVe siècle apr. J.-C.
BDX22402	Enduit	Étanchéité à l'eau	Baptistère	Ensemble baptismal	IVe siècle apr. J.-C.
BDX22403	Mortier	Support de mosaïque	Salle C	Ensemble baptismal	IVe siècle apr. J.-C.
BDX22404	Béton	Étanchéité à l'eau	Salle e3	Habitation (Groupe E)	IIe siècle apr. J.-C.
BDX22405	Béton	Revêtement de sol	Salle e4	Habitation (Groupe E)	IIe siècle apr. J.-C.
BDX22406	Mortier	Joint de carreaux	Hypocauste	Thermes (Groupe F)	IIe siècle apr. J.-C.
BDX22407	Béton	Support de dallage	*Tholos*	*Macellum*	Ier siècle apr. J.-C.
BDX22408	Mortier	Maçonnerie	Soubassement	Fontaine à la Gorgone	Ier siècle apr. J.-C.
BDX22409	Béton	Étanchéité à l'eau	Citerne	Sanct. *Dii Consentes*	164 à 167 apr. J.-C.
BDX22410	Mortier	Maçonnerie	Mur extérieur	Thermes du sud	198 apr. J.-C.
BDX22411	Mortier	Joint de carreaux	Hypocauste	Thermes du sud	198 apr. J.-C.

Tableau 3 : Liste des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les structures romaines les plus représentatives du site archéologique d'Hippone

Ainsi, dans le cadre de notre thèse, trente-quatre échantillons de mortier ont été collectés manuellement à l'aide d'un marteau et d'un burin depuis les structures romaines qui présentent les fragments d'enduits et de mortiers romains les plus représentatifs (fig. 418). Tout au long de ce processus, un soin particulier a été pris pour préserver l'intégrité des restes archéologiques. Par la suite, les échantillons ont été enregistrés en utilisant le préfixe BDX, suivi d'un identifiant qui leur a été attribué (tab. 3), en suivant l'ordre d'enregistrement dans le registre du laboratoire Archéosciences Bordeaux (UMR 6034). Ce système d'enregistrement permet d'assurer une traçabilité et une organisation précises de chaque échantillon, facilitant ainsi les analyses et les recherches qui pourraient intervenir ultérieurement. Enfin, nous tenons à signaler que les prélèvements ont été réalisés après l'obtention de l'autorisation ministérielle n° 502/SM/MC du 30 août 2018, délivrée par le ministère algérien de la Culture, et ce, conformément aux dispositions des articles 60 et 62 de la loi n° 98-04 du 15 juin 1998.

IV.2. Le protocole de préparation des échantillons

Le mortier de chaux archéologique, considéré comme une « roche polygénique reconstituée » (Coutelas et Büttner, 2009c), suit un protocole de préparation analogue à celui utilisé pour les roches sédimentaires. Toutefois, en raison de leurs compositions hétérogènes,

les échantillons ont dû recevoir un traitement particulier au début du processus de préparation. En effet, nous les avons consolidés par induration dans une résine époxy transparente, afin de prévenir leur désintégration pendant les manipulations. Ensuite, les trente-quatre échantillons ont été pré-découpés et placés dans des contenants en aluminium. Nous les avons entreposés dans une étuve chauffée à 50 °C, pendant une durée s'étalant entre 24 et 48 heures, afin de permettre l'élimination maximale de l'humidité contenue à l'intérieur de chaque échantillon.

Une fois séchés, nous avons repositionné les échantillons dans des contenants lubrifiés avec du silicone, pour en simplifier le démoulage, dans lesquels nous avons coulé un mélange de résine et de durcisseur jusqu'à ce qu'ils soient entièrement recouverts. Ces derniers ont ensuite été placés dans une chambre à vide, réglée à une pression de 0,8 bar, pendant environ 15 minutes pour en éliminer l'air au maximum et permettre à la résine de pénétrer à l'intérieur des pores du mortier (Spiteri, 2019). Une fois la polymérisation de la résine terminée, l'excédent a été enlevé à la scie, laissant des blocs de la taille d'un sucre (environ 30 × 45 mm). Ces derniers devant servir à la préparation des lames minces et des sections polies.

IV.2.1. Préparation des lames minces

Pour la préparation des lames minces, nous avons commencé par l'élimination des traces de sciage sur les échantillons indurés, en utilisant un plateau de dressage en diamant de 75 micromètres (µm), puis des papiers abrasifs à grains P400 et P600. Les échantillons ont ensuite été placés dans une étuve pendant 24 heures pour en éliminer l'humidité au maximum. Une fois séchés, nous les avons collés sur des lames de verre dépoli, de dimensions 30 × 45 mm ou 45 × 60 mm, à l'aide une résine époxy transparente, ayant le même indice de réfraction que le verre, tout en minimisant la présence de bulles d'air. Ils ont ensuite été posés sur un banc de collage chauffant réglé à 50 °C et recouverts de poids, pour évacuer les bulles d'air résiduelles (Spiteri, 2019). Environ 12 heures plus tard et après la polymérisation de la résine, nous avons procédé à l'arasement des échantillons en utilisant une scie diamantée, montée sur la machine PRESI Geotome Dual, pour ne laisser que 0,6 mm d'épaisseur d'échantillon sur chaque lame. Nous avons réduit cette épaisseur jusqu'à 80 µm à l'aide d'une rectifieuse équipée d'une meule diamantée, montée sur la même machine. Cette épaisseur a été manuellement réduite à 30 µm en utilisant une poudre abrasive au carbure de silicium de granulométrie F600 (9 µm).

Nous nous sommes aidés d'un microscope optique polarisant pour vérifier l'épaisseur des lames minces, au fur et à mesure de l'abrasion, en nous basant sur les teintes de biréfringence des minéraux. Enfin, nous avons procédé au polissage des lames minces par lots de six, avec la polisseuse automatique PRESI Mecatech 334. Celles-ci ont été placées dans des

supports métalliques et posées sur un drap de polissage lubrifié, en utilisant successivement des solutions diamantées de granulométries 6 µm, 3 µm, puis 1 µm. Cette dernière étape de polissage permet une observation confortable des lames minces sans la nécessité de les couvrir.

IV.2.2. Préparation des sections polies

Une fois la préparation des lames minces terminée, les parties arasées des échantillons ont été conservées pour préparer des sections polies. En effet, la partie arasée de chaque échantillon de mortier correspond au reflet quasi identique de la partie présente sur la lame mince. Pour réaliser les sections polies, nous avons découpé des « talons » d'échantillons pour obtenir des « sucres » d'une épaisseur d'environ 5 à 10 mm. Les traces de sciage sur les surfaces à examiner ont d'abord été éliminées à l'aide d'un plateau de dressage en diamant de 75 µm, puis par polissage avec des papiers abrasifs à grains P400 et P600. Les sections ont ensuite été polies de la même manière que les lames minces, par lots de six à l'aide de la polisseuse automatique PRESI Mecatech 334, avec des solutions diamantées de granulométries 6 µm, 3 µm, puis 1 µm. Ainsi, les lames minces des échantillons de mortier permettent de réaliser des observations aux microscopes optique et électronique, tandis que les sections polies sont indispensables aux techniques de caractérisation complémentaires telles que la cathodoluminescence (CL) et la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS).

IV.3. Les méthodes de caractérisation archéométrique

Pour apporter des éléments de réponse à notre problématique de recherche sur les mortiers romains utilisés à *Hippo Regius*, nous avons retenu des méthodes de caractérisation avec plusieurs échelles d'observation. Pour ce faire, nous avons sélectionné une série de critères morphologiques, minéralogiques, physiques et chimiques. D'une part, ces critères sont considérés comme « discriminants », permettant d'analyser les échantillons dans leur ensemble afin d'aboutir à l'établissement d'une typologie (Coutelas, 2003). D'autre part, lorsque chaque échantillon est examiné individuellement, ces critères sont jugés « déterminants », permettant d'identifier les caractéristiques pétrographiques de chaque spécimen (Büttner, 2002). Toutefois, compte tenu de l'hétérogénéité des échantillons prélevés et de leur caractère patrimonial, nous n'avons pas retenu de méthodes de caractérisation conventionnelle des mortiers, comme les essais mécaniques, la porosimétrie ou la granulométrie (Frizot, 1975). D'une part, l'application de ces méthodes exige des éprouvettes de dimensions normalisées, qui sont impossibles à réaliser avec des matériaux du patrimoine. D'autre part, l'examen de la distribution

granulométrique nécessite la réalisation d'attaques acides (HCl) sur les mortiers de chaux afin de dissoudre la matrice carbonatée et isoler la charge. Celle-ci pouvant être de type calcaire ou silico-calcaire, une attaque acide provoquerait dans ces deux cas la dissolution partielle du granulat et induirait des résultats incorrects (Feneuille et al., 2016). Ainsi, dans le cadre de notre étude, nous nous sommes limités, dans un premier temps à l'identification des caractéristiques morphologiques observables à l'œil nu sur les fragments de mortier bruts, puis dans un second temps, nous avons étudié en laboratoire les caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques des composants, à partir des lames minces et des sections polies.

IV.3.1. La caractérisation macroscopique

Cette première échelle de caractérisation s'appuie sur des observations préliminaires à l'œil nu ainsi qu'à l'aide d'une loupe grossissante (Gilles et Quenee, 1999). Elle nous a permis de déterminer le faciès de chaque échantillon de mortier de chaux, en estimant les différents paramètres tels que la couleur, la résistance apparente et la texture granulométrique (Büttner, 2002). En outre, lorsqu'il s'agit d'enduits, cette échelle d'observation permet d'identifier les multiples couches de préparation et de finition de l'échantillon et de déterminer la couleur et l'épaisseur de chacune des couches (Feneuille et al., 2016). La caractérisation macroscopique nous a également permis d'identifier la présence d'inclusions telles que les pouzzolanes, qu'elles soient naturelles ou artificielles, ainsi que la présence de certains éléments tels que le charbon de bois ou les coquilles de mollusques et de brachiopodes, qui sont facilement reconnaissables à l'œil nu (Büttner, 2002). Pour établir les fiches archéométriques des échantillons, nous avons capturé des photographies de chaque fragment de mortier, en utilisant un appareil photo numérique Nikon D750, équipé d'un objectif AF Micro-Nikkor 60 mm f/2.8D, sous une lumière artificielle[38]. Enfin, nous avons suivi la méthodologie proposée par Frizot puis Coutelas pour l'étude des échantillons composés de plusieurs couches. En effet, que ce soit pour les échantillons de supports de placages et de mosaïques ou pour les enduits (de protection, d'étanchéité ou de décoration), nous avons considéré chaque couche comme un spécimen individuel (Frizot, 1975), compte tenu des caractéristiques intrinsèques propres à chaque couche de préparation et de finition. La description des couches a été réalisée selon un ordre stratigraphique, c.-à-d. dans l'ordre inverse de leur application, la première étant la couche de finition et la dernière, la couche de préparation (Coutelas, 2003).

[38] Nous avons opté pour une lumière artificielle lors de la prise des photographies pour assurer une exposition et une température d'éclairage uniformes à tous les échantillons, permettant une comparaison fiable des couleurs entre les différents fragments d'enduits et de mortiers.

IV.3.2. La caractérisation microscopique

La deuxième échelle de caractérisation a été réalisée en laboratoire et a requis l'utilisation de moyens techniques et technologiques plus avancés, permettant d'obtenir davantage d'informations. Cette approche implique l'étude de la pétrographie des échantillons de mortier de chaux pour identifier les composants minéralogiques de la charge, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques de la matrice et des ajouts éventuels. Pour cette échelle de caractérisation, nous avons employé des méthodes d'analyses pétrographiques et physico-chimiques afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques des mortiers étudiés.

IV.3.2.1. La caractérisation pétrographique

L'efficacité de l'analyse pétrographique pour la caractérisation du mortier de chaux romain est solidement établie depuis de nombreuses années (Frizot, 1975 ; Coutelas, 2003 ; Pavía et Caro, 2008 ; Vola et al., 2011 ; Ahmad Bany Yaseen et al., 2013 ; Marra et al., 2016 ; Weber et al., 2019 ; Secco et al., 2020). Cette méthode de référence permet d'obtenir de précieuses informations sur les composants du liant, de la charge et des inclusions, en se basant sur des observations réalisées à l'aide d'un microscope optique équipé de deux filtres polarisants. Le microscope émettant une lumière ordinaire, le champ électrique de cette lumière oscille dans plusieurs directions. Avec un microscope polarisant, la lumière traverse un premier filtre « polariseur » qui ne laisse passer qu'un champ de lumière vibrant dans une seule direction. L'échantillon placé sur la platine du microscope est ainsi éclairé par une lumière dite polarisée. En raison du phénomène de biréfringence, la structure cristalline de chaque minéral présent dans l'échantillon change la direction de polarisation de la lumière et sa fréquence d'oscillation (Feneuille et al., 2016). Au-dessus des échantillons, un second filtre « analyseur » est placé perpendiculairement au filtre polariseur. Selon la nature et l'épaisseur des minéraux, ils apparaissent plus ou moins lumineux et présentent différentes couleurs. À l'observation, cela permet de distinguer et d'identifier les divers minéraux, ainsi que d'étudier les structures internes des cristaux. Pour notre étude des mortiers romains d'*Hippo Regius*, nous avons procédé à l'observation des lames minces à l'aide d'un microscope Leica DM2500 P en lumière polarisée non analysée (LPNA) et en lumière polarisée analysée (LPA). L'acquisition des images et la mesure de la taille des constituants ont été réalisées à l'aide d'un capteur CCD Leica DFC420 et du logiciel Leica LAS EZ.

IV.3.2.2. La caractérisation physico-chimique

En complément des caractérisations macroscopique et pétrographique, nous avons fait appel à des techniques d'observation et d'analyse physico-chimique pour identifier les caractéristiques des composants de nos échantillons de mortier de chaux.

IV.3.2.2.1. La cathodoluminescence (CL)

L'une de ces techniques est la microscopie optique à cathodoluminescence (CL). Elle offre la capacité de discerner visuellement certains minéraux qui composent la charge et qui peuvent paraître similaires en pétrographie, comme les quartz et les feldspaths (Fabre et al., 2002). En outre, la cathodoluminescence permet de localiser les phases minérales (C-S-H) qui se forment lors des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les granulats réactifs (Coutelas et al., 2004). Cette technique consiste à exciter, par bombardement électronique, les phases minérales cristallisées présentes dans les mortiers. En réaction à cette excitation, les impuretés, les terres rares et les éléments de transition, représentant des anomalies dans le réseau cristallin, libèrent des photons avec une longueur d'onde spécifique (Götze et al., 2013). Les ions des métaux de transition, comme le manganèse (Mn^{2+}), sont particulièrement réactifs à cette excitation. Dans la calcite, composée de carbonate de calcium ($CaCO_3$), le Mn^{2+}, s'étant substitué au Ca^{2+}, produit une luminescence de couleur rouge orangé avec une longueur d'onde d'environ 620 nm (Coutelas, 2003). À titre d'exemples, les quartz émettent généralement une luminescence de couleur mauve pâle (420 à 435 nm) activée par des défauts intrinsèques (Götze, 2012), tandis que les feldspaths alcalins produisent une luminescence de couleur bleu clair (450 à 480 nm) activée par les ions Ti^{4+}, alors que les feldspaths plagioclases émettent une luminescence de couleur vert-jaune (570 nm) qui est induite par les ions Fe^{2+} (Götze et al., 2001 ; Boggs et Krinsley, 2006 ; Kayama et al., 2009).

Pour la caractérisation de nos échantillons, nous avons procédé à l'observation des sections polies à l'aide d'un microscope Leica M125 en cathodoluminescence, avec une tension d'accélération réglée entre 10 et 15 kV et une intensité de courant fixée entre 190 et 220 µA. Le canon à électrons a été réglé pour produire un faisceau avec un angle d'incidence à 30°. L'acquisition des images en cathodoluminescence a été réalisée à l'aide d'un capteur CCD Leica DFC420 avec une durée d'exposition réglée à ± 7 secondes.

IV.3.2.2.2. La microscopie électronique à balayage (MEB)

Dans le cadre de notre travail de recherche, nous avons également fait appel à l'analyse par microscope électronique à balayage (MEB). D'une part, cet instrument permet, avec un potentiel de grossissement théorique jusqu'à × 600 000, d'observer des composants très fins au

sein de la matrice et de la charge des échantillons de mortier, ainsi que les interfaces de réaction entourant les granulats réactifs (Secco et al., 2020 ; Dilaria et al., 2022). D'autre part, grâce à l'imagerie par électrons radiodiffusés qui offre un contraste chimique, il est possible d'analyser la texture et la microstructure des constituants présentant des phases minérales vitreuses, qui ne peuvent pas être identifiées par leurs paramètres optiques au microscope polarisant (Piochi et al., 2008 ; Weber et al., 2019). Ainsi, pour analyser nos échantillons de mortier de chaux, nous avons utilisé le microscope électronique à balayage JEOL JSM-IT500HR. Ce dispositif nous a permis d'examiner les lames minces et les sections polies en mode basse pression (jusqu'à 30 Pa) avec une tension d'accélération réglée à 20 kV.

IV.3.2.2.3. La spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS)

Couplées au microscope JEOL JSM-IT500HR, les sondes de spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) offrent la possibilité de procéder à des analyses élémentaires, afin de déterminer la composition chimique de divers composants, comme le liant, les nodules de chaux et les inclusions de nature pouzzolanique. En effet, la microanalyse EDS se révèle être un outil d'analyse efficace pour la caractérisation chimique des inclusions dans les mortiers romains (Mahmoud et al., 2012 ; Vaschalde et al., 2016 ; Graziano et al., 2018 ; Germinario et al., 2022 ; Dilaria, Secco, et al., 2023 ; Mociu et al., 2023). Pour ce faire, nous avons procédé à l'analyse élémentaire de certains constituants de nos échantillons de mortier de chaux à l'aide des deux sondes Oxford UltimMax 100, en utilisant une tension d'accélération réglée à 20 kV et une durée d'acquisition réglée à 30 secondes (avec un taux de comptage d'environ 175 600 cps). Les données issues des mesures quantitatives ont été traitées à l'aide du logiciel Aztec (Oxford Instruments). Les résultats, exprimés en pourcentages massiques d'éléments, ont été convertis en pourcentages massiques d'oxydes (% pds) et standardisés à 100 %, afin de faciliter leur comparaison avec les données géochimiques que l'on retrouve dans la littérature scientifique.

IV.4. La méthode d'interprétation des résultats

Les analyses multi-échelles réalisées sur nos échantillons de mortier de chaux nous ont permis de mettre en évidence les différentes caractéristiques relatives à l'état global de chaque échantillon, ainsi que celles relatives aux éléments constitutifs du liant, de la charge et des inclusions. Selon leur interprétation, ces caractéristiques apportent des renseignements sur les techniques de mise en œuvre employées par les artisans romains, ainsi que sur le choix et la provenance des matières premières utilisées.

IV.4.1. Les caractéristiques générales

Parmi les caractéristiques générales des échantillons de mortier de chaux, on retrouve la résistance apparente, la couleur de la matrice, ainsi que la texture granulométrique. Afin de limiter la subjectivité dans notre analyse, nous avons sélectionné des critères prédéfinis, puisés dans la littérature scientifique pour l'évaluation de chacune des caractéristiques.

IV.4.1.1. La résistance apparente

L'évaluation de la résistance apparente correspond au degré de solidité et de cohésion de chaque échantillon de mortier de chaux. Elle est caractérisée selon une « échelle empirique » (Coutelas et Büttner, 2009c). Nous avons employé le terme descriptif « élevée » lorsqu'il était difficile de briser le fragment de mortier manuellement, le terme « moyenne » lorsqu'il nous était possible de le faire et « faible » lorsque la manipulation de l'échantillon a nécessité des précautions pour éviter qu'il ne se désagrège. S'agissant de son interprétation, selon Büttner (2002), la résistance apparente reflète le niveau de liaisons physiques existant entre les particules du liant et entre ces dernières et les composants de la charge.

IV.4.1.2. La couleur de la matrice

L'évaluation de la couleur de la matrice a été réalisée sur tous les échantillons de mortier de chaux avec des conditions d'éclairage et d'humidité identiques, étant donné qu'un niveau d'humidité élevé dans l'échantillon tend à assombrir les couleurs véritables de la matrice (Coutelas et Büttner, 2009c). Les différentes couleurs que nous avons observées comme le gris, le beige, qu'il soit clair ou foncé, et le marron, fournissent des renseignements sur la nature de la pierre à chaux calcinée et sur la pureté du sable employé pour la charge. Les nuances proches du beige ou de l'ocre indiquent la présence potentielle d'impuretés argileuses dans les constituants. En outre, l'observation d'une matrice de couleur rose témoigne de la présence de tuileau concassé dans l'échantillon de mortier. La quantité et la finesse de la poudre de tuileau sont interprétées selon l'intensité de la coloration de la matrice. En effet, la surface spécifique de l'agrégat réactif est inversement proportionnelle à la finesse de ses particules, lesquelles réagissent avec le liant en produisant une réaction pouzzolanique. Enfin, la présence de matrices de couleurs différentes dans un même échantillon de mortier ou d'enduit témoigne de la présence de différentes couches de préparation et de finition.

IV.4.1.3. La texture granulométrique

La texture granulométrique de chaque échantillon a été examinée par l'observation à la loupe binoculaire et de la même manière que la résistance apparente, elle a été évaluée suivant un référentiel empirique. Nous l'avons décrite comme « limoneuse » lorsque les dimensions des grains étaient inférieures à 0,1 mm. Pour des grains de dimensions comprises entre 0,1 et 2 mm, la texture a été qualifiée de « sableuse », tandis que pour des grains de dimensions supérieures à 2 mm, la texture a été qualifiée de « granuleuse ». Concernant les granulométries mixtes, la texture a été qualifiée de « limono-sableuse » pour des grains de tailles inférieures à 0,1 mm et allant jusqu'à 2 mm. Pour les échantillons de mortier ayant des grains de tailles de 0,1 mm et dépassant 2 mm, la texture a été décrite comme « sablo-granuleuse ». Selon Büttner (2002), cette évaluation fournit une première indication relative quant à la quantité de sable incorporée dans le mélange. Une moindre proportion de sable dans le mélange se traduisant par une texture plus fine du mortier.

IV.4.2. Les caractéristiques du liant

L'examen des lames minces au microscope optique polarisant nous a permis de mettre en évidence de nombreuses informations concernant la matrice des échantillons de mortier de chaux étudiés. Pour l'interprétation de ces informations, nous avons retenu les descriptions figurant dans la littérature. En effet, une matrice homogène, formée de calcite cristallisée à texture micritique, représente le ciment carbonaté du liant. Cette matrice carbonatée apparaît en LPNA avec un pléochroïsme de relief très marqué, alors qu'en LPA, elle présente une forte biréfringence révélant des teintes soit brunes et sombres, soit lumineuses et jaunâtres, et occasionnellement bleues ou grisâtres (Coutelas et Büttner, 2009c). En outre, les dépôts qui peuvent être observés à l'intérieur des pores en LPA, avec une biréfringence très élevée et une texture sparitique, correspondent à des cristallisations secondaires de calcite (Cantisani et al., 2021).

IV.4.2.1. Les nodules de chaux

Les agglomérats blanchâtres qui apparaissent dans la matrice carbonatée du liant sont interprétés comme étant des nodules de chaux. Les nodules « non mélangés » sont constitués de chaux en poudre partiellement carbonatée et ont une texture microcristalline qui présente une coloration sombre en LPNA et grisâtre en LPA. Selon Büttner (2002), leur présence serait le résultat de malfaçons survenues durant la chaîne opératoire, telle qu'une mauvaise hydratation de la chaux vive. Néanmoins, nous avons retenu l'interprétation récente (Seymour

et al., 2023) qui attribue leur présence à une action délibérée de la part des artisans romains, dans le but de rendre le mortier plus durable et résistant. En effet, il est suggéré que la chaux vive était ajoutée intentionnellement lors de la préparation du mortier, dans le but d'encapsuler cette chaux vive et de la rendre disponible à l'intérieur de la matrice cimentaire après la prise du mortier de chaux. Le second type de nodule de chaux consiste en des fragments de roches calcaires incuits ou « partiellement calcinés ». Ces derniers contiennent le plus souvent des bioclastes tels que des rhodophycées, des foraminifères, des échinodermes, *etc*. Ces restes d'organismes fossiles présentent des textures micritiques ou sparitiques avec une biréfringence très élevée. Les bioclastes, du fait de leur calcination incomplète, peuvent servir de marqueurs pour identifier la formation géologique à partir de laquelle a été extraite la pierre à chaux (Coutelas, 2008 ; Cantisani et al., 2021).

IV.4.2.2. La porosité apparente

Nous avons retenu deux formes géométriques pour qualifier l'apparence de la porosité observée dans nos échantillons de mortier : « sphérique » et « oblongue ». Ces formes témoignent des techniques de mise en œuvre employées par les artisans romains. Ainsi, les pores de forme sphérique nous renseignent sur la quantité d'eau incorporée lors du gâchage. Leur teneur est proportionnelle à la quantité d'eau utilisée (Pineda et al., 2022). En s'évaporant pendant la prise du mortier de chaux, l'eau laisse des vides de formes sphériques dans la matrice cimentaire. S'agissant des pores de formes oblongues et allongées, ils constituent des « vides de remplissage » et témoignent de l'intensité du brassage au moment du gâchage. Leur teneur est inversement proportionnelle au brassage du mortier (Büttner, 2002). En outre, lorsque les pores de forme allongée sont concentrés dans une couche d'enduit et sont orientés parallèlement à sa surface, ceux-ci témoignent de l'action de lissage réalisée par les artisans (Coutelas, 2003).

En outre, les fissures observées fréquemment dans les mortiers sont principalement causées par le retrait de ce dernier pendant la prise. Elles sont interprétées comme un indicateur de malfaçons intervenues durant la mise en œuvre, comme l'emploi d'un sable de faible granulométrie ou l'utilisation d'une importante quantité d'eau de gâchage (Pineda et al., 2022). Enfin, pour déterminer la teneur en pores dans nos échantillons de mortier de chaux, nous avons fondé nos analyses quantitatives sur les observations pétrographiques, en employant des chartes visuelles (fig. 9). L'utilisation d'outils comme les chartes visuelles et les logiciels d'analyses d'images pétrographiques étant solidement établie pour la caractérisation des mortiers archéologiques (Werner et Lange, 1999 ; Büttner, 2002 ; Coutelas, 2003 ; Miriello et al., 2010 ; Pineda et al., 2022 ; Piovesan et al., 2023 ; Dilaria, Secco, et al., 2023).

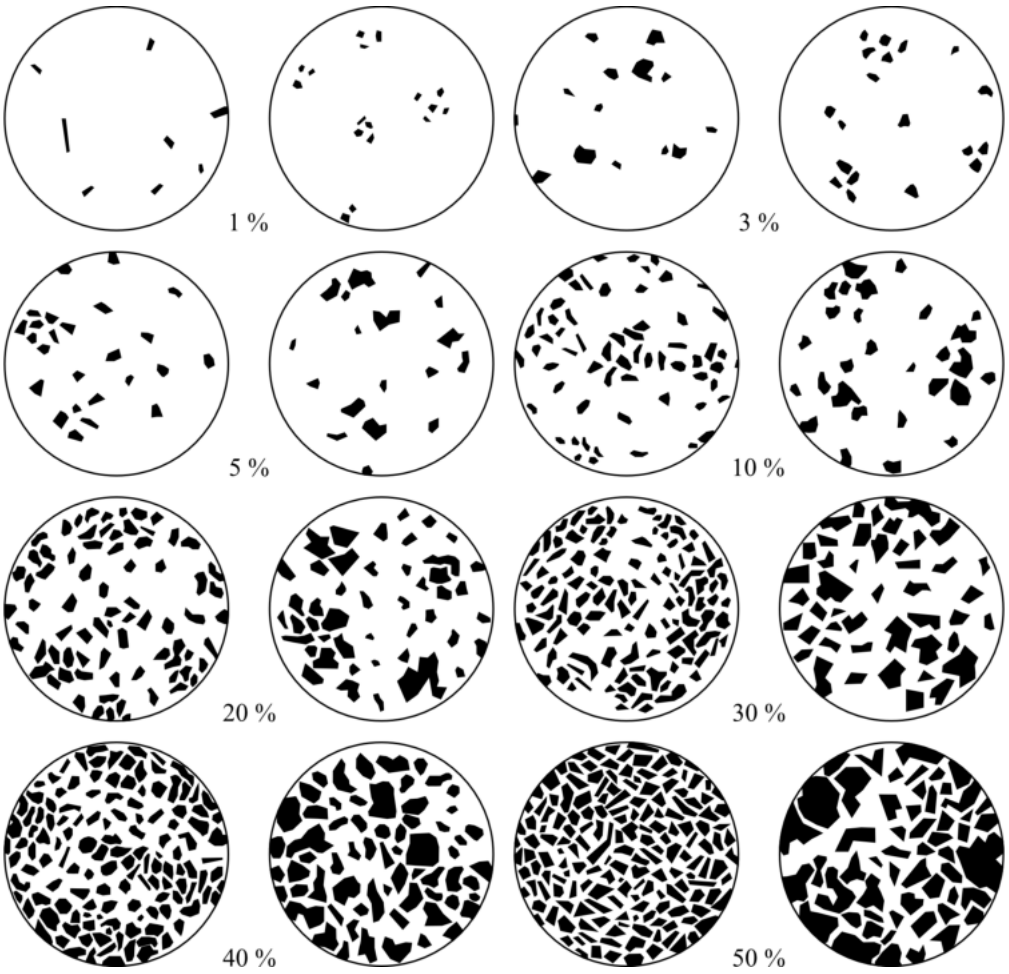

Figure 9 : Charte visuelle utilisée pour l'estimation du pourcentage de grains à partir de l'observation sur une lame mince (d'après Terry et Chilingar, 1955)

IV.4.3. Les caractéristiques de la charge

La caractérisation pétrographique des éléments lithiques et minéralogiques de la charge nous a été déterminante pour identifier les variétés et les origines des sables utilisés par les artisans romains. En effet, l'observation des caractéristiques des fragments lithiques comme la texture, la schistosité ou la foliation offrent une première indication sur l'origine de la formation géologique du sable : qu'elle soit sédimentaire, métamorphique ou ignée. Cette observation a été complétée par l'identification des minéraux qui forment la charge. La combinaison des deux paramètres que sont la nature des minéraux et leur teneur permet de déterminer la nature du sable employé. Ainsi, des minéraux tels que le quartz, les feldspaths (tectosilicates) et les micas (phyllosilicates), révèlent une nature siliceuse, alors qu'une présence prédominante de cristaux de calcite et de bioclastes (carbonates) témoigne d'une nature calcaire. Enfin, une composition mixte est interprétée comme étant de nature silico-calcaire.

La forme des grains constitue également un paramètre déterminant pour remonter à la source qui a été exploitée pour l'extraction du sable employé. Nous avons utilisé des chartes visuelles (fig. 10) pour déterminer les catégories d'émoussés des grains. Ainsi, les éléments lithiques et minéralogiques avec des formes émoussées à très émoussées témoignent du transport des grains sur de longues distances. On parlera dans ce cas de sables d'alluvions ou éoliens[39]. Au contraire, les constituants avec des formes angulaires à très angulaires sont caractéristiques des sables de carrières (ou d'altération). En outre, les sables obtenus par le concassage de fragments de roche et leur réduction en poudre sont également caractérisés par des grains de formes angulaires à très angulaires.

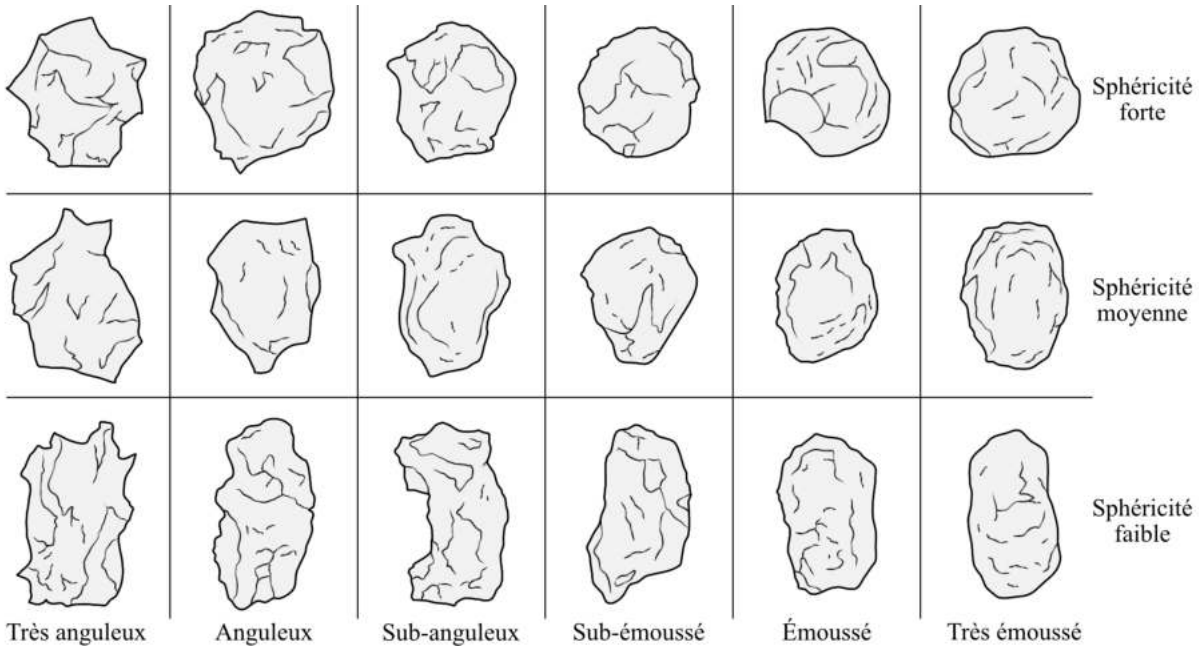

Figure 10 : Représentation schématique des catégories d'émoussés en fonction de la faible, moyenne et forte sphéricité des grains (d'après Powers, 1953 ; Pettijohn et al., 1987)

Enfin, la taille des grains constitue un autre paramètre déterminant pour la compréhension de la chaîne opératoire et du savoir-faire des artisans romains. La présence de grains de dimensions similaires dans la charge résulte généralement du tamisage du sable effectué par l'artisan, dans le but d'obtenir une charge à granulométrie uniforme. Cette uniformité étant essentielle pour des fonctions architecturales spécifiques, que ce soit dans la mise en œuvre de mortiers ou d'enduits (DeLaine, 2021).

[39] Les grains qui constituent les sables alluvionnaires et éoliens, présentant des formes arrondies à très arrondies. Ils sont difficiles à différencier par l'observation sur lames minces en raison du processus de fabrication des lames qui altère leurs aspects. En effet, les grains de sable alluvionnaire sont généralement luisants du fait de l'action de l'eau, tandis que les grains de sable éolien sont mats, dépolis par l'effet abrasif du vent (Ters, 1960).

IV.4.4. Les caractéristiques des inclusions

Les agrégats, que nous avons désignés comme « inclusions » correspondent aux agrégats réactifs qui ont été ajoutés délibérément par les artisans romains dans le but d'améliorer les performances du mortier de chaux. Les agrégats pouzzolaniques, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, possèdent des caractéristiques morphologiques et géochimiques qui peuvent nous permettre de déterminer leur provenance.

IV.4.4.1. La pouzzolane naturelle

Les textures des agrégats présentant une matrice vitreuse avec des inclusions de microlithes et de phénocristaux, sont caractéristiques des roches volcaniques. L'examen au microscope optique polarisant et en cathodoluminescence nous a permis de caractériser des agrégats pouzzolaniques d'origine naturelle présents dans nos échantillons de mortier. Ainsi, nous avons retenu des paramètres comme la forme, la texture, la composition et la porosité des agrégats pour déterminer leurs conditions de formation. En outre, nous avons utilisé des chartes visuelles (fig. 10) pour déterminer si l'aspect pulvérulent des agrégats est d'origine naturelle ou anthropique. Enfin, les données géochimiques ont été exploitées pour identifier avec précision leur origine géologique.

IV.4.4.2. La pouzzolane artificielle

La présence de fragments de cendre organique peut correspondre, selon leur teneur dans le mélange, à de la pouzzolane artificielle d'origine organique. Ce type d'inclusion peut être observé dans les mortiers hydrauliques produits dans les provinces romaines dans lesquelles subsistaient des influences puniques (Secco et al., 2020). Quant aux fragments de céramique, ils présentent généralement des formes angulaires à très angulaires qui témoignent du concassage préalable opéré par les artisans romains. Lorsqu'ils ne sont pas réduits en poudre, la détermination de leur origine reste difficile, du fait de la grande variété de fragments que l'on peut retrouver dans un seul échantillon.

Conclusion

Dans le cadre de notre étude, nous avons procédé au prélèvement manuel de trente-quatre échantillons de mortier de chaux à partir des structures romaines (fig. 418) du site archéologique d'Hippone. Les échantillons ont été prélevés de manière à englober la plus large variété de mortiers et d'enduits romains (tab. 3). En outre, nous avons porté une attention

particulière aux structures susceptibles d'avoir été contaminées lors des travaux de consolidation, notamment dans le quartier chrétien, les grands thermes du nord et les *villae* du front de mer.

Des méthodes de caractérisations multi-échelles ont été retenues pour apporter des éléments de réponse à notre problématique de recherche. Pour cela, les échantillons de mortier de chaux ont été soumis à une batterie d'analyses archéométriques, en mobilisant des instruments tels que le microscope optique polarisant et le microscope à cathodoluminescence (CL) pour déterminer les caractéristiques des constituants (le liant, la charge et les inclusions). De plus, nous avons retenu l'utilisation du microscope électronique à balayage (MEB) couplé à la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) pour déterminer la structure interne et la composition chimique de certains constituants comme les inclusions de nature pouzzolanique.

Par ailleurs, nous avons rencontré quelques limitations, notamment l'impossibilité de mener des essais mécaniques ou une analyse granulométrique, en raison de la forme irrégulière des échantillons, de leur hétérogénéité et de leur caractère patrimonial. Ainsi, les méthodes de caractérisation retenues nous ont permis de recueillir des données essentielles pour l'analyse de la composition des mortiers et la compréhension de la chaîne opératoire. En nous basant sur la littérature scientifique relative au mortier de chaux, nous avons retenu un ensemble de critères morphologiques, minéralogiques, physiques, et chimiques pour la caractérisation des échantillons. Chaque critère étant régi par une série de paramètres permettant une interprétation objective des résultats.

Enfin, les données caractérisant les échantillons de mortier de chaux ont a été enregistrées dans des fiches archéométriques qui constituent le second volume de la présente thèse. Chaque fiche archéométrique est organisée en trois sections : une première section qui regroupe les données du contexte archéologique relatif à chaque échantillon et ses caractéristiques macroscopiques ; une deuxième section qui présente les données pétrographiques accompagnées des microphotographies des constituants du liant, de la charge et des inclusions ; une troisième section qui expose les résultats des analyses physico-chimiques telles que les microphotographies en cathodoluminescence, les images en électrons rétrodiffusés ou encore les spectres des microanalyses EDS.

Chapitre V : Résultats de caractérisation et classification des échantillons

Introduction

Les méthodes de caractérisation archéométrique multi-échelles appliquées aux trente-quatre échantillons de mortier de chaux (tab. 3), prélevés depuis les structures romaines les plus représentatives du site archéologique d'Hippone (fig. 418), nous ont permis l'acquisition de nombreuses informations détaillées sur chaque échantillon. La première échelle de caractérisation nous a conduits à identifier des caractéristiques morphologiques de chaque échantillon ainsi que les différentes couches qui constituent les fragments composites. La seconde échelle de caractérisation nous a permis d'identifier les caractéristiques pétrographiques et physico-chimiques des constituants de chaque spécimen de mortier de chaux, à savoir : le liant, la charge et les inclusions. Ces caractéristiques étant indispensables pour la classification des spécimens de mortier, la recherche des sources d'approvisionnement en matières premières, ainsi que la reconstitution de la chaîne opératoire adoptée par les artisans de la cité d'*Hippo Regius*.

Ainsi, ce cinquième chapitre est consacré à l'exposé des résultats de caractérisation archéométrique de nos échantillons de mortier. À l'échelle macroscopique, nous abordons les caractéristiques morphologiques que nous avons retenues, à savoir : la résistance, la texture et la couleur de chaque échantillon de mortier de chaux. À l'échelle microscopique, nous explorons en détail les caractéristiques pétrographiques et physico-chimiques du liant, de la charge et des inclusions. Enfin, dans le dernier sous-chapitre, nous procédons à la classification des spécimens de mortier de chaux, en fonction de critères discriminants tels que la nature du sable, la forme des grains et les teneurs en pouzzolanes naturelle et artificielle.

V.1. Les observations macroscopiques

L'examen des trente-quatre échantillons de mortier de chaux, à l'œil nu et à l'aide de la loupe binoculaire, nous a permis de mettre en évidence deux catégories d'échantillons, distinguées en fonction de l'assemblage des échantillons. La première catégorie regroupe les échantillons composés d'une seule couche. Celle-ci comprend une variété d'échantillons,

notamment les mortiers de maçonnerie, les joints de carreaux de pilettes, les bourrelets d'étanchéité, les supports de placages (BDX22380) et de dallages (BDX22394, BDX22399 et BDX22407), les revêtements de sol (BDX22382 et BDX22405) ainsi que les bétons étanches à l'eau (BDX22404 et BDX22409). Quant à la seconde catégorie, elle regroupe les échantillons d'enduits et de mortiers composés de plusieurs couches, allant des couches de préparation aux couches de finition (tab. 4). On retrouve dans cette catégorie les enduits d'étanchéité à l'eau, les enduits de protection au feu, les supports de mosaïques, le support de placage (BDX22381), ainsi que l'échantillon d'enduit peint (BDX22400).

Identifiant	Résistance	Texture	Id. couche	Type de couche	Couleur	Épaisseur
BDX22378	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Beige foncé	30 mm
BDX22379	Élevée	Limono-sableuse	BDX22379a	Couche de finition	Rose	7 mm
			BDX22379b	Couche de préparation	Beige clair	34 mm
BDX22380	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose foncé	40 mm
BDX22381	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22381a	Couche de finition	Marron	12 mm
			BDX22381b	Couche intermédiaire	Rose foncé	5 mm
			BDX22381c	Couche de préparation	Beige foncé	20 mm
BDX22382	Élevée	Granuleuse	-	-	Rouge brique	40 mm
BDX22383	Élevée	Sableuse	-	-	Gris	23 mm
BDX22384	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22384a	Couche de finition	Rose clair	11 mm
			BDX22384b	Couche de préparation	Gris clair	20 mm
BDX22385	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22385a	Lit de pose des tesselles	Blanc	9 mm
			BDX22385b	Couche intermédiaire	Beige clair	7 mm
			BDX22385c	Couche de préparation	Beige clair	10 mm
BDX22386	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22386a	Joint de finition	Beige clair	2 mm
			BDX22386b	Lit de pose des tesselles	Blanc	6 mm
			BDX22386c	Couche intermédiaire	Beige clair	4 mm
			BDX22386d	Couche de préparation	Beige clair	15 mm
BDX22387	Élevée	Limono-sableuse	BDX22387a	Couche de finition	Rose foncé	8 mm
			BDX22387b	Couche de préparation	Beige clair	20 mm
BDX22388	Élevée	Sableuse	-	-	Beige foncé	13 mm
BDX22389	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Beige foncé	45 mm
BDX22390	Moyenne	Sablo-granuleuse	BDX22390a	Couche de finition	Rose foncé	9 mm
			BDX22390b	Couche de préparation	Beige foncé	12 mm
BDX22391	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Beige clair	35 mm
BDX22393	Moyenne	Limono-sableuse	BDX22392a	Couche de finition	Beige clair	11 mm
			BDX22392b	Couche de préparation	Rose foncé	7 mm
BDX22393	Élevée	Limono-sableuse	-	-	Rose clair	25 mm
BDX22394	Élevée	Granuleuse	-	-	Rouge brique	70 mm
BDX22395	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose clair	16 mm
BDX22396	Moyenne	Sablo-granuleuse	-	-	Rose clair	38 mm
BDX22397	Faible	Sablo-granuleuse	BDX22397a	Couche de finition	Rose clair	8 mm
			BDX22397b	Couche de préparation	Beige clair	22 mm
BDX22398	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose clair	29 mm
BDX22399	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose foncé	30 mm
BDX22400	Élevée	Limono-sableuse	BDX22400a	Couche d'épiderme	Beige foncé	1,6 mm

			BDX22400b	Couche de finition	Beige foncé	5,4 mm
			BDX22400c	Couche intermédiaire	Gris	7 mm
			BDX22400d	Couche de préparation	Beige clair	20 mm
BDX22401	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22401a	Lit de pose des tesselles	Gris clair	6 mm
			BDX22401b	Couche intermédiaire	Beige clair	8 mm
			BDX22401c	Couche de préparation	Rose clair	16 mm
BDX22402	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22402a	Couche de finition	Rose foncé	4 mm
			BDX22402b	Couche de préparation	Beige foncé	14 mm
BDX22403	Élevée	Sablo-granuleuse	BDX22403a	Lit de pose des tesselles	Gris clair	7 mm
			BDX22403b	Couche intermédiaire	Rose foncé	13 mm
			BDX22403c	Couche de préparation	Rose foncé	34 mm
BDX22404	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose foncé	35 mm
BDX22405	Élevée	Granuleuse	-	-	Rose foncé	62 mm
BDX22406	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose foncé	15 mm
BDX22407	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Rose foncé	26 mm
BDX22408	Élevée	Sablo-granuleuse	-	-	Beige foncé	23 mm
BDX22409	Élevée	Granuleuse	-	-	Rose foncé	55 mm
BDX22410	Élevée	Sableuse	-	-	Beige foncé	38 mm
BDX22411	Faible	Limono-sableuse	-	-	Marron	30 mm

Tableau 4 : Caractéristiques macroscopiques des cinquante-cinq spécimens identifiés dans les échantillons de mortier de chaux des structures présentes dans le site archéologique d'Hippone

En outre, on observe l'existence d'une corrélation entre la fonction des échantillons (tab. 3) et les couleurs de leurs matrices (tab. 4). En effet, les spécimens présentant des matrices de couleurs claires (beige, gris et blanc) appartiennent essentiellement aux mortiers de maçonnerie, aux couches préparatoires des enduits, ainsi qu'aux couches qui composent les supports de mosaïques (*rudus*, *nucleus* et lits de pose). Les spécimens qui présentent des colorations allant du rose clair au rouge brique appartiennent aux mortiers et enduits d'étanchéité avec des inclusions de céramique concassée et aux revêtements de sol en béton de tuileau (*opus signinum*). Pour ces spécimens, un rapport apparaît entre l'uniformité de la teinte de la matrice et la surface spécifique de la pouzzolane artificielle : une teinte rose uniforme indiquant la présence d'une poudre de céramique finement broyée. Par ailleurs, on observe que l'échantillon BDX22411 présente une matrice de couleur marron (fig. 407), bien que le fragment présente des inclusions de tuileau. Le liant de l'échantillon réagissant bien à l'attaque acide (HCl), la couleur brune peut être attribuée à la présence d'oxydes métalliques dans la charge (probablement des scories métallurgiques).

V.2. Les observations microscopiques

À l'aide de l'observation au microscope optique polarisant, nous avons été en mesure de déterminer les caractéristiques du liant, de la charge et des inclusions dans chacun des

cinquante-cinq spécimens analysés (tab. 4). Ces caractéristiques devant nous servir par la suite comme critères discriminants pour la classification de nos échantillons de mortier de chaux.

V.2.1. Les caractéristiques du liant

L'ensemble des échantillons de mortier étudiés présentent des liants à base de chaux. Les tests réalisés à l'acide chlorhydrique (HCl) ont démontré la présence de carbonate de calcium ($CaCO_3$) dans les trente-quatre échantillons. En outre, les rapports entre les volumes de chaux et les volumes de granulat dans les spécimens étudiés (tab. 5) se situent[40] principalement dans l'intervalle d'un volume de chaux pour trois volumes de granulat (1:3) et deux volumes de chaux pour trois volumes de granulat (2:3).

1:5	1:4	1:3	2:5	1:2	2:3	1:1	2:1
	BDX22386a	BDX22378	BDX22382	BDX22380	BDX22379a		BDX22385a
	BDX22400c	BDX22383	BDX22385c	BDX22386c	BDX22379b		BDX22386b
		BDX22384b	BDX22386d	BDX22387b	BDX22381a		BDX22400a
		BDX22385b	BDX22391	BDX22390b	BDX22381b		BDX22401a
		BDX22388	BDX22394	BDX22392b	BDX22381c		BDX22403a
		BDX22400d	BDX22401c		BDX22384a		
		BDX22401b	BDX22402b		BDX22387a		
		BDX22403b	BDX22404		BDX22389		
		BDX22403c	BDX22405		BDX22390a		
		BDX22410	BDX22407		BDX22392a		
			BDX22408		BDX22393		
			BDX22409		BDX22395		
					BDX22396		
					BDX22397a		
					BDX22397b		
					BDX22398		
					BDX22399		
					BDX22400b		
					BDX22402a		
					BDX22406		
					BDX22411		

Tableau 5 : Rapports entre les volumes de chaux et de granulat dans les spécimens de mortier de chaux prélevés depuis les structures romaines du site archéologique d'Hippone

Cette gamme de rapports [1:3 ; 2:3] s'apparente à celle considérée par Frizot (1975) comme étant de sens commun pour les mortiers et les enduits romains. Les spécimens présentant le rapport d'un volume de chaux pour quatre volumes de granulat (1:4) sont le joint de finition

[40] Nous avons évalué les rapports entre les volumes de chaux et de granulat en utilisant des chartes visuelles pour estimer le pourcentage de grains (fig. 9). Malgré la marge d'erreur d'environ 5 % que présente cette méthode (Coutelas, 2003), elle reste une approche bien établie pour déterminer le rapport chaux/granulat par l'observation au microscope optique (Pagano et al., 2022 ; Piovesan et al., 2023 ; Dilaria, Secco, et al., 2023).

d'une mosaïque (BDX22386a) et la couche intermédiaire (*arricio*) de l'enduit peint (BDX22400c). Quant aux spécimens présentant le rapport le moins commun, correspondant à deux volumes de chaux pour un volume de granulat (2:1), ce sont essentiellement les lits de pose de tesselles de mosaïques (BDX22385a, BDX22386b, BDX22401a et BDX22403a), ainsi que la couche d'épiderme (*intonachino*) de l'enduit peint (BDX22400a).

V.2.1.1. Les nodules de chaux

Les échantillons de mortier romain que nous avons étudiés présentent des nodules de chaux sous deux formes distinctes. La première forme correspond à des nodules non mélangés, formant des « grumeaux » de chaux vive. La seconde forme de nodules correspond aux fragments lithiques résiduels qui résultent d'une calcination incomplète de la pierre à chaux.

V.2.1.1.1. Les nodules non mélangés

Les nodules de chaux non mélangés sont présents dans plus de la moitié des spécimens analysés. En pétrographie, ces nodules présentent une matrice carbonatée avec une texture micritique et des teintes de biréfringence contrastant avec celle de la matrice du liant (fig. 11).

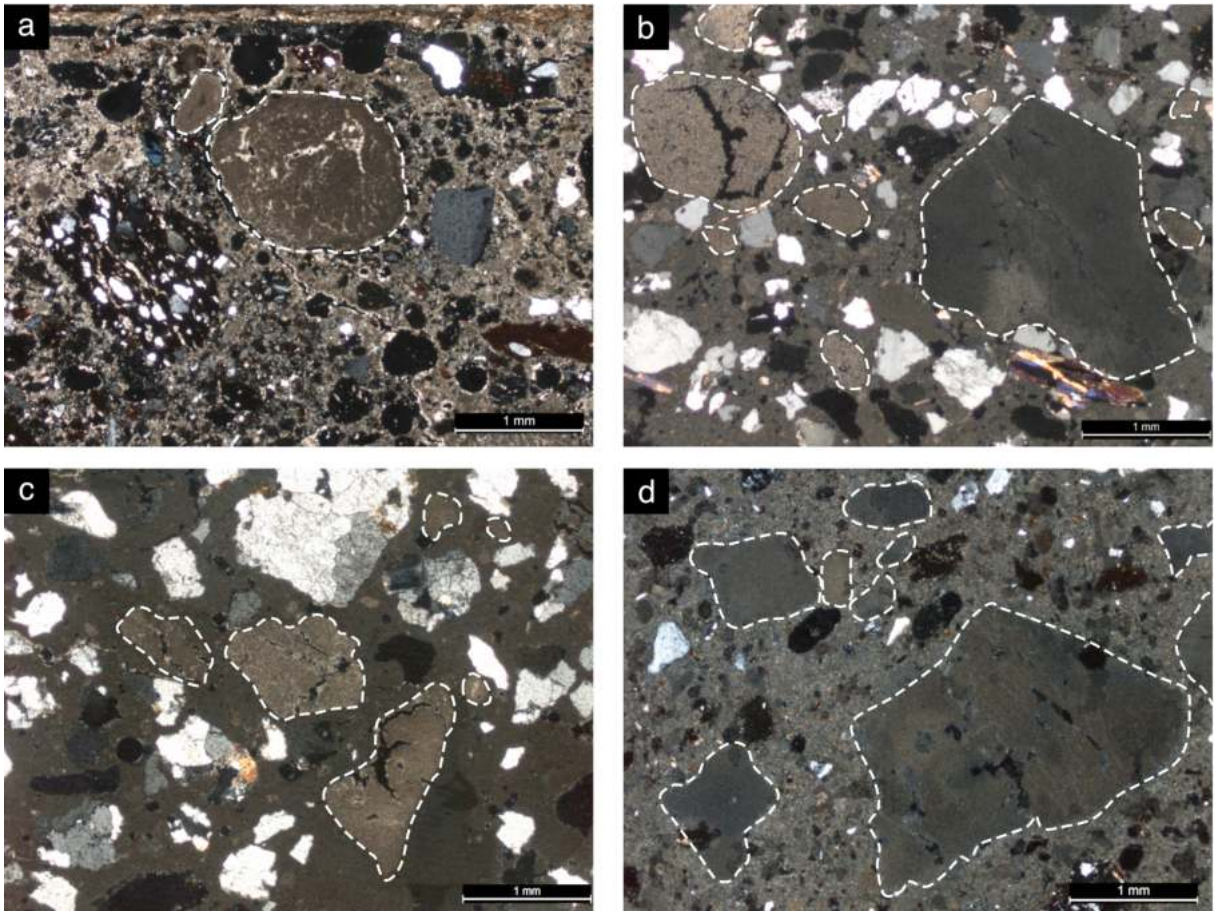

Figure 11 : Microphotographies en LPA montrant des nodules de chaux non mélangés dans les spécimens : (a) BDX22381b ; (b) BDX22383 ; (c) BDX22384b ; (d) BDX22389

En cathodoluminescence, les nodules de chaux non mélangés présentent une luminescence de couleur orange à rouge orangé (fig. 55, 104 et 196). On note que l'intensité de la luminescence émise par les nodules de chaux est plus importante que celle émise par la matrice carbonatée du liant. Ceci témoigne d'une teneur en ions calcium (Ca^{2+}) plus importante dans les nodules de chaux non mélangés. En outre, les analyses élémentaires des nodules de chaux présents dans l'échantillon BDX22383 (fig. 105 et 106), réalisées à l'aide de la microsonde EDS, révèlent des teneurs en oxyde de calcium (CaO) variant entre 86,40 et 93,96 % pds et des teneurs en oxyde de magnésium (MgO) se situant entre 0,52 et 0,53 % pds.

V.2.1.1.2. Les nodules partiellement calcinés

Les nodules de chaux partiellement calcinés sont présents dans la totalité des spécimens analysés. Il s'agit principalement des fossiles squelettiques (bioclastes) d'organismes marins carbonatés. En pétrographie, ces nodules présentent des formes et des textures variées (fig. 12).

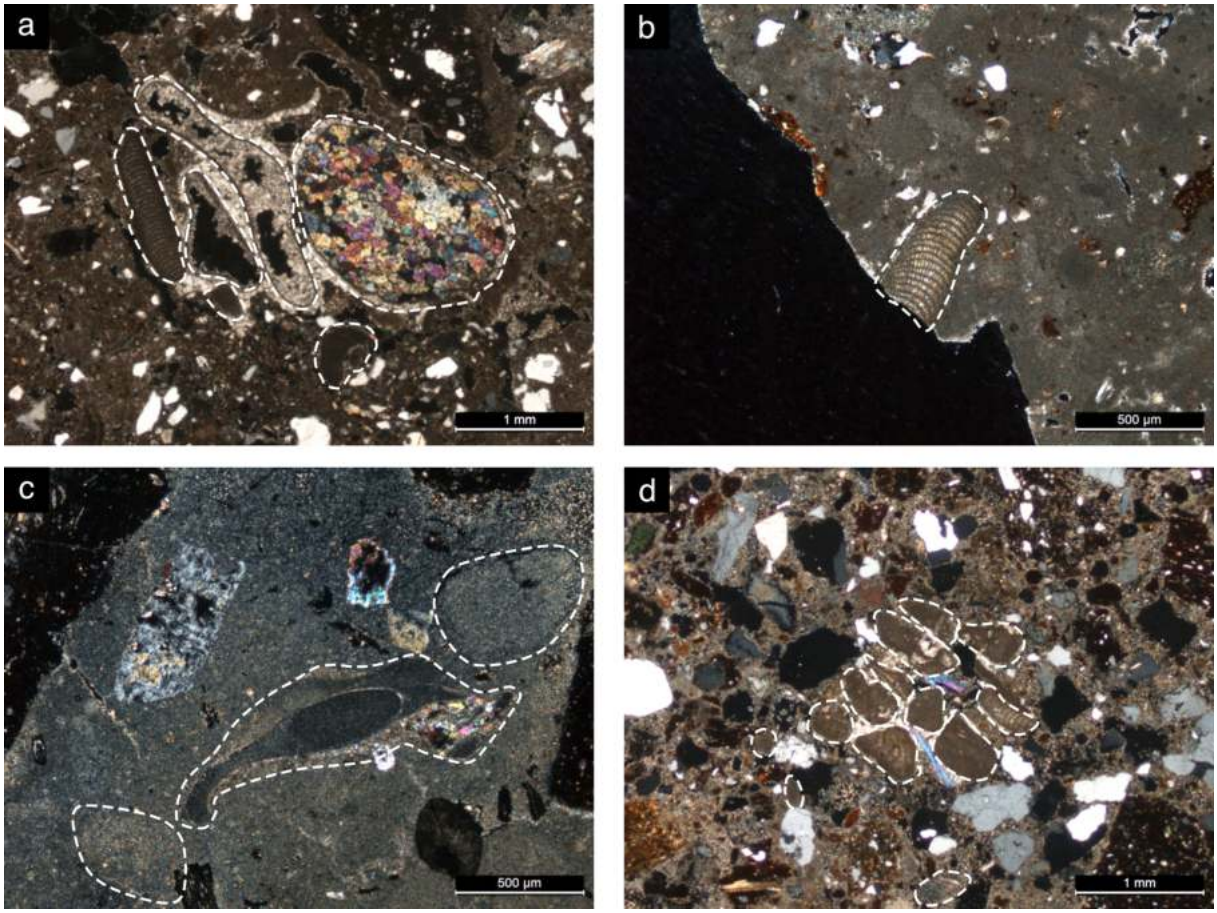

Figure 12 : Microphotographies en LPA montrant des nodules de chaux partiellement calcinés dans les spécimens : (a) BDX22381a ; (b) BDX22393 ; (c) BDX22394 ; (d) BDX22407

Les éléments bioclastiques présents dans les échantillons analysés se composent principalement de débris d'encroûtement d'algues rouges (Rhodophycées) et d'algues vertes (Codiacées), ainsi que de fragments squelettiques de divers mollusques (bivalves et lamellibranches), de

fragments de gastéropodes, et de tests d'échinodermes. En effet, on observe des bioclastes constitués de débris d'encroutement d'algues rhodophycées (fig. 140, 225 et 400) et d'algues codiacées (fig. 61), reconnaissables à leurs structures internes multicellulaires, apparaissant sous forme de plaques percées de pores. Ces éléments bioclastiques se présentent sous forme de débris de fossiles individuels (fig. 12b) qui sont dispersés dans le liant carbonaté des échantillons, ou encore sous la forme de calcarénite (fig. 12d), où les débris sont agglomérés par un ciment calcaire. Ainsi, on observe la présence de fragments lithiques de calcarénite dans les spécimens : BDX22381c (fig. 77), BDX22386c (fig. 140), BDX22405 (fig. 355) et BDX22407 (fig. 370).

En ce qui concerne les nodules de chaux partiellement calcinés constitués de fossiles squelettiques de mollusques, on observe la présence de coquilles de bivalves (ou lamellibranches) fossilisées dans les spécimens BDX22383 (fig. 101), BDX22385c (fig. 130), BDX22394 (fig. 232) et BDX22404 (fig. 349). Les fossiles de coquilles de bivalves sont reconnaissables à leur forme arquée et leurs structures calcitiques prismatiques ou fibro-lamellaires. En outre, on observe dans le spécimen BDX22381a (fig. 70) une coquille de gastéropode à loge colmatée par une sparite diagenétique, tandis que le liant du spécimen BDX22394 (fig. 232) présente la forme d'une coquille de gastéropode qui se confond avec la matrice carbonatée du liant. Les gastéropodes étant reconnaissables à leur enroulement hélicoïdal caractéristique. Les fossiles d'autres organismes sont également discernables parmi les nodules de chaux partiellement calcinés, tels que des foraminifères (*Orbitolina* et probablement *Trocholina*) dans le spécimen BDX22381a (fig. 70), ainsi que des tests d'échinodermes (*Echinoidea*) dans les spécimens BDX22381c (fig. 77) et BDX22383 (fig. 100). Les tests d'échinides étant reconnaissables à leur section de forme ronde et à leurs radiales rayonnantes.

V.2.1.2. La porosité

La porosité observée dans les échantillons de mortier romain que nous avons analysés résulte principalement de l'incorporation de l'air pendant la mise en œuvre et de l'évaporation de l'eau de gâchage pendant la prise. Les pores se manifestent sous deux formes distinctes : des pores sphériques et des pores oblongs (fig. 12).

V.2.1.2.1. Les pores de formes sphériques

Les pores de formes sphériques sont présents dans tous les spécimens étudiés, avec des teneurs variant principalement de 1 à 10 % et des tailles allant de 100 µm à 2 mm. Bien que ce type de porosité soit observé dans l'ensemble des spécimens, il est particulièrement prononcé

(avec une teneur de 10 %) dans les supports de placages, de dallages et de mosaïques, ainsi que dans les enduits de protection et d'étanchéité. Les échantillons de mortier de maçonnerie présentent également des pores de formes sphériques avec des teneurs élevées (de 5 à 10 %), tels que : BDX22383 (tab. 44), BDX22391 (tab. 102), BDX22393 (tab. 114) et BDX22410 (tab. 210). En revanche, les lits de pose des tesselles de mosaïques (tab. 55, 68, 159 et 176) ainsi que les couches constituant l'enduit peint de la grande basilique (tab. 146, 148, 152 et 155) présentent une porosité sphérique assez faible, avec des teneurs comprises entre 1 et 3 %.

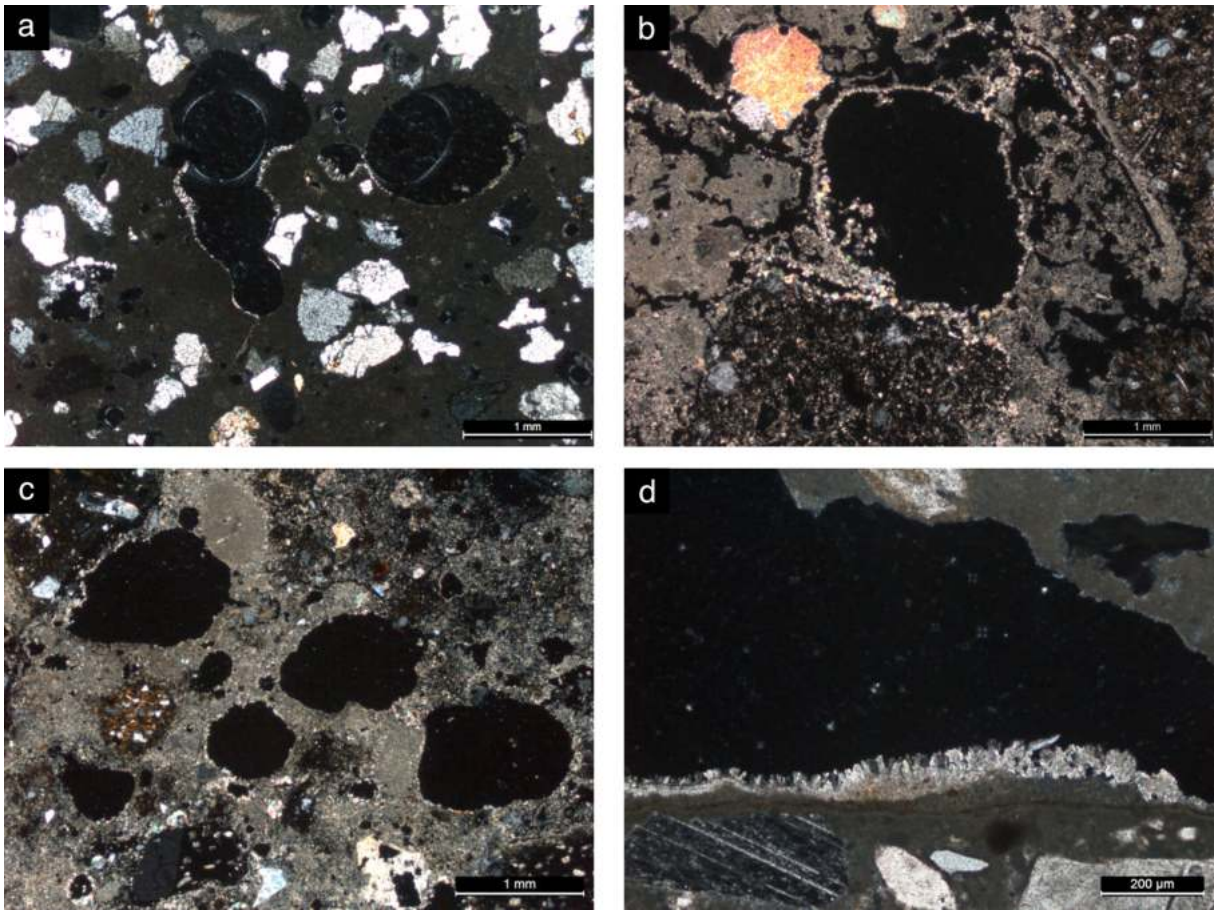

Figure 13 : Microphotographies en LPA montrant des pores de formes sphériques et oblongues dans les spécimens : (a) BDX22384b ; (b) BDX22397b ; (c) BDX22399 ; (d) BDX22400b

V.2.1.2.2. Les pores de formes oblongues

Les pores de formes oblongues (ou allongées) sont également présents dans la totalité des spécimens étudiés, avec des teneurs comprises entre 1 à 5 % et des tailles allant de 200 µm à 11 mm. Dans les échantillons composites, tels que les enduits, les supports de placages et de mosaïques, les pores se concentrent principalement le long des limites entre les couches, avec une orientation parallèle à ces limites (fig. 292). De plus, on note que les spécimens BDX22383 (tab. 44), BDX22401b (tab. 161) et BDX22403c (tab. 182) présentent des teneurs élevées en porosité avec des formes oblongues (de 10 à 20 %). Ces spécimens étant respectivement un

mortier de maçonnerie et des couches de préparation (*rudus*) et intermédiaire (*nucleus*) de supports de mosaïques. Par ailleurs, on observe la présence de dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores, quelle que soit leur forme (fig. 13a et 13d). En effet, ces vides constituant « le siège de la circulation de fluides » (Coutelas, 2003), des cristaux de calcite se forment au fil du temps à leur niveau, lorsqu'ils sont remplis par des fluides contenant des ions carbonate (CO_3^{2-}) et des ions calcium (Ca^{2+}). Ces ions proviennent essentiellement de sources riches en calcium comme les nodules de chaux qui constituent de véritables « réservoirs à calcium » à l'intérieur du mortier romain (Seymour et al., 2023).

V.2.2. Les caractéristiques de la charge

La charge représente la structure de base du mortier de chaux. Elle est généralement composée de granulats inertes, comme le sable, qui n'interagit que peu, voire pas du tout, avec le liant. En outre, le sable joue un rôle crucial en assurant la cohésion et en maintenant le volume du mortier lors de sa prise par carbonatation, tout en prévenant son retrait. L'examen pétrographique des cinquante-cinq spécimens nous a permis de différencier, en considérant des paramètres tels que la composition lithique, la minéralogie et la forme des grains, deux catégories de sables : un sable calcaire et un sable silico-calcaire. Ce dernier est divisé en trois sous-catégories : un sable silico-calcaire à grains anguleux, un sable silico-calcaire à grains sub-anguleux et un sable silico-calcaire à grains très émoussés.

V.2.2.1. Le sable calcaire

On observe la présence d'un sable calcaire dans deux spécimens. Le spécimen BDX22400a (*intonachino*) présente une charge caractérisée principalement par la présence de monocristaux de calcite, de tailles allant de 100 µm à 800 µm, présentant des formes angulaires, ainsi que par la présence de fragments de marbre, de tailles comprises entre 1 mm et 1,2 mm. Cette charge comprend quelques rares éléments siliceux, notamment des micas et des feldspaths alcalins (tab. 147). Les éléments siliceux présentent une teneur inférieure à 1 % et sont répartis de manière hétérogène dans le mélange, tandis que les cristaux de calcite sont répartis de manière homogène et présentent une teneur d'environ 5 % (fig. 14a), représentant ainsi l'essentiel de la charge. De plus, on observe dans le spécimen BDX22400c (*intonaco*) la présence d'un sable constitué en grande partie de cristaux de calcite de même calibre (200 µm à 500 µm), avec une teneur d'environ 30 % (tab. 154). En outre, la microscopie en cathodoluminescence met en évidence la prédominance de cristaux de calcite qui émettent une forte luminescence de couleur rouge orangé (fig. 308).

V.2.2.2. Le sable silico-calcaire

Dans les cinquante-trois autres spécimens, on observe la présence d'un sable silico-calcaire. Ce sable est caractérisé par deux composantes principales. D'une part, au niveau lithique, il comprend des fragments de roches plutoniques, en particulier du granite, ainsi que des fragments de roches métamorphiques tels que le micaschiste, le gneiss et le marbre. D'autre part, il est caractérisé par une composante minéralogique constituée d'éléments siliceux, dont du quartz, des feldspaths alcalins et plagioclases, et des micas (muscovite et biotite), ainsi que des éléments calcaires, principalement des monocristaux de calcite et des bioclastes. En outre, on retrouve dans quelques spécimens (BDX22379a, BDX22388, BDX22390a, *etc*.) des éléments lithiques provenant de roches sédimentaires, comme des fragments d'arénite quartzeuse, de siltite et de silex (fig. 171).

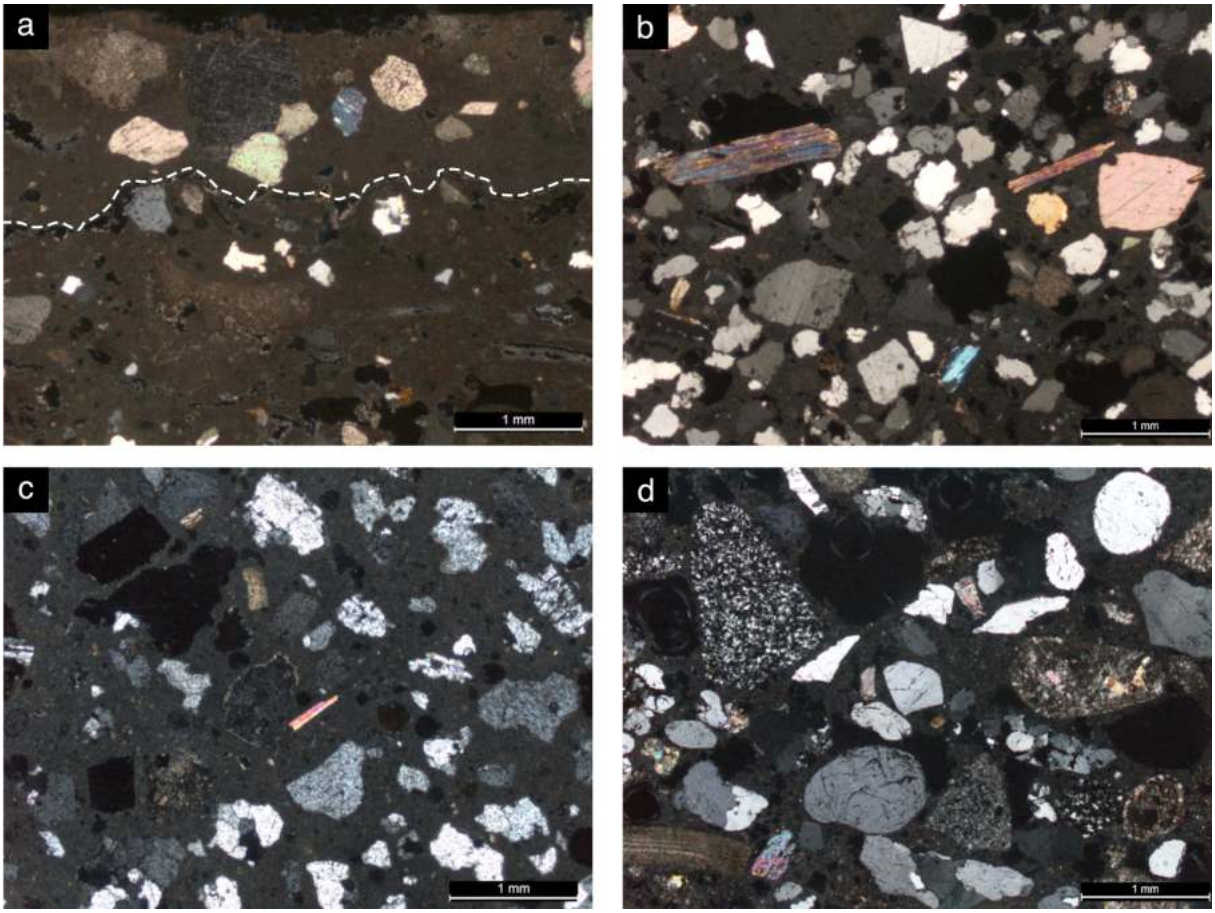

Figure 14 : Microphotographies en LPA montrant : (a) une charge calcaire avec des grains anguleux dans BDX22400a et une charge silico-calcaire avec (b) des grains anguleux dans BDX22383 ; (c) des grains sub-anguleux dans BDX22391 ; (d) des grains très émoussés dans BDX22388

En analysant la forme des grains à l'aide des chartes visuelles des catégories d'émoussés (fig. 10), on distingue trois sous-catégories de sables avec des grains anguleux (fig. 14b), sub-anguleux (fig. 14c) et très émoussés (fig. 14d).

V.2.2.2.1. Sable silico-calcaire avec des grains anguleux

On observe la présence de sable silico-calcaire caractérisé par des grains anguleux dans la charge de 28 % des spécimens analysés. Les échantillons contenant ce type de sable sont principalement des enduits d'étanchéité (BDX22384 et BDX22402) et de décoration (BDX22400), des mortiers de maçonnerie (BDX22383, BDX22389 et BDX22410) ainsi que des supports de mosaïque (BDX22385 et BDX22401). En outre, on constate que parmi ces échantillons, cinq spécimens (BDX22383, BDX22384b, BDX22401b, BDX22402b et BDX22410) présentent une charge constituée d'un sable silico-calcaire à grains anguleux avec une granularité homogène. La régularité des grains étant le témoin d'un tamisage du sable en amont de la mise en œuvre du mortier (Büttner, 2002).

V.2.2.2.2. Sable silico-calcaire avec des grains sub-anguleux

Le sable silico-calcaire qui est caractérisé par des grains sub-anguleux constitue la sous-catégorie de sable la plus représentée parmi les échantillons de mortier de chaux que nous avons étudiés. On le retrouve dans près de 70 % des spécimens analysés. Les minéraux siliceux tels que le quartz et les feldspaths alcalins et plagioclases constituent la plus grande fraction de ce sable, avec des teneurs allant jusqu'à 30 %. La partie calcaire de ce sable se compose principalement de fragments de marbre et de monocristaux de calcite, avec des teneurs entre 1 et 5 %. De plus, on observe la présence de minéraux associés tels que les cristaux de hornblende, de muscovite et de biotite, qui sont les principaux constituants des granites, des gneiss et des micaschistes. Par ailleurs, on note que seulement deux spécimens (BDX22391et BDX22386a) présentent une charge silico-calcaire à grains sub-anguleux avec une distribution granulométrique uniforme, témoignant d'un tamisage préalable du sable. Enfin, on observe dans l'échantillon BDX22411 un sable silico-calcaire à grains sub-anguleux de composition particulière. Il est caractérisé par la présence de micaschistes à grenats (fig. 411) ainsi que par des teneurs élevées en muscovite (jusqu'à 10 %) et en biotite (environ 3 %).

V.2.2.2.3. Sable silico-calcaire avec des grains très émoussés

On observe la présence d'un sable silico-calcaire caractérisé par des grains très émoussés dans seulement un échantillon, parmi ceux que nous avons étudiés. En effet, l'échantillon de mortier de maçonnerie BDX22388 (fig. 14d) est constitué d'une charge silico-calcaire présentant une distribution granulométrique uniforme et de composition différente de celles des précédents sables mentionnés. En effet, la composante lithique de ce sable est formée de fragments d'arénite quartzeuse (10 %), de siltite (5 %), de silex (3 %), ainsi que de lithoclastes granitiques (3 %) et de rares fragments de marbre (< 1 %). Quant à sa composante

minéralogique, elle est constituée principalement de cristaux de quartz très émoussés (30 %), de feldspaths alcalins (20 %) et d'éléments calcaires tels que des bioclastes (10 %) et des monocristaux de calcite (5 %) de formes très émoussées.

V.2.3. Les caractéristiques des inclusions

Les inclusions englobent tous les composants réactifs riches en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3), ajoutés lors de la préparation du mortier pour réagir chimiquement avec le liant à base de chaux. En effet, bien que ces additifs soient dépourvus de propriétés liantes, lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($Ca[OH]_2$) en présence d'eau, pour former des composés aux caractéristiques cimentaires (Cadix et James, 2022). Ainsi, les silicates et aluminosilicates de calcium hydratés (C-A-S-H) néoformés confèrent aux mortiers et aux enduits à base de chaux des propriétés hydrauliques ainsi qu'une meilleure résistance mécanique. Parmi ces inclusions, on distingue deux types de granulats réactifs, qui sont présents dans les échantillons de mortier que nous avons étudiés : des granulats d'origine naturelle comme les cendres volcaniques et ceux d'origine artificielle comme le tuileau ou les cendres obtenues par la combustion de produits organiques.

V.2.3.1. La pouzzolane naturelle

Les observations pétrographiques nous ont permis d'identifier la présence de la pouzzolane naturelle dans douze spécimens (tab. 6), soit environ 22 % des cinquante-cinq spécimens que nous avons analysés. On note que les granulats réactifs présentent le faciès caractéristique des roches volcaniques. En outre, ces fragments pyroclastiques présentent des formes sub-émoussées à émoussées, avec des dimensions allant de 300 µm et 15 mm.

Identifiant	Texture	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
BDX22378	Microlithique aphanitique	Émoussée	0,3 - 0,6	< 1	Hétérogène
BDX22381a	Microlithique porphyrique	Sub-émoussée	1,3 - 3,2	3	Homogène
BDX22381b	Microlithique porphyrique	Émoussée	0,5 - 2,2	5	Homogène
BDX22381c	Microlithique aphanitique	Sub-émoussée	0,4 - 1,2	5	Homogène
BDX22387a	Microlithique aphanitique	Émoussée	0,9 - 1,1	1	Homogène
BDX22387b	Microgrenue porphyrique	Émoussée	0,8 - 1,1	3	Homogène
BDX22389	Microgrenue porphyrique	Émoussée	0,5 - 1,4	5	Homogène
BDX22391	Microlithique aphanitique	Émoussée	0,7 - 5,5	3	Homogène
BDX22397a	Microlithique aphanitique	Sub-émoussée	2,2 - 2,5	1	Hétérogène
BDX22398	Microlithique porphyrique	Émoussée	0,9 - 4,9	5	Homogène
BDX22399	Microlithique aphanitique	Émoussée	1,4 - 10	3	Homogène
BDX22408	Microlithique porphyrique	Émoussée	0,8 - 15	20	Homogène

Tableau 6 : Caractéristiques pétrographiques des fragments pyroclastiques identifiés dans les échantillons de mortier de chaux qui ont été prélevés à Hippone

En observant l'arrangement des cristaux dans les matrices vitreuses des fragments pyroclastiques, on distingue trois textures pétrographiques : une texture microlithique aphanitique, une texture microlithique porphyrique et une texture microgrenue porphyrique.

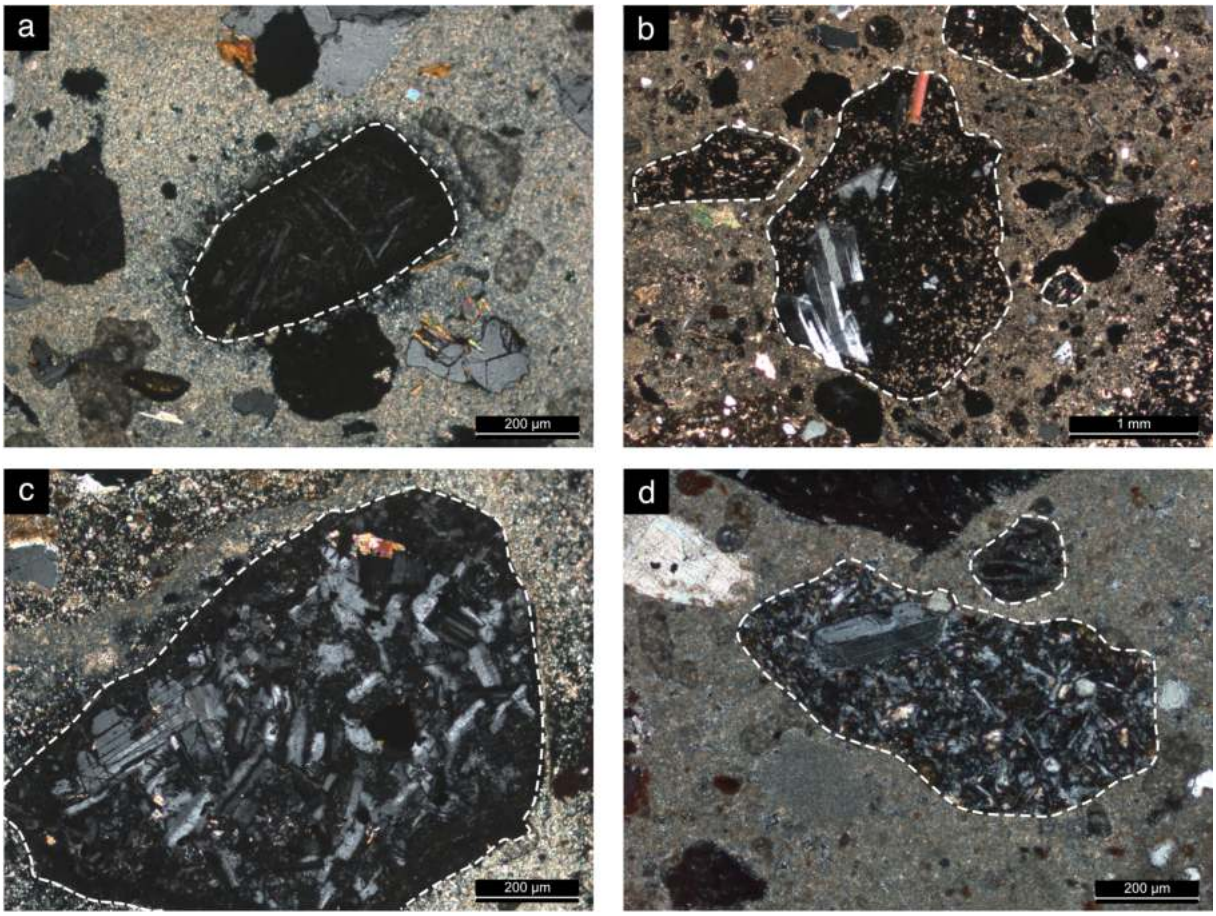

Figure 15 : Microphotographies en LPA montrant des fragments pyroclastiques avec : (a) une texture microlithique aphanitique dans BDX22378 ; (b) une texture microlithique porphyrique dans BDX22398 ; (c) une texture microgrenue porphyrique dans BDX22387b et (d) BDX22389

V.2.3.1.1. Pyroclastes à texture microlithique aphanitique

Les agrégats réactifs, identifiés dans les spécimens BDX22378, BDX22381c, BDX22387a, BDX22391, BDX22397a et BDX22399, présentent une texture microlithique aphanitique (fig. 15a). Celle-ci est caractérisée par une matrice vitreuse, dans laquelle flottent des microlithes de feldspaths alcalins. Ces cristaux en forme de bâtonnets (fig. 160 et 287) sont caractéristiques des téphras qui ont subi un refroidissement assez rapide du magma, empêchant la cristallisation complète des minéraux.

V.2.3.1.2. Pyroclastes à texture microlithique porphyrique

Les fragments pyroclastiques observés dans les spécimens BDX22381a, BDX22381b, BDX22398 et BDX22408 présentent, quant à eux, une texture microlithique porphyrique (fig. 15b). Cette texture est caractérisée par une matrice vitreuse présentant des inclusions de

phénocristaux. Parmi ces cristaux automorphes, on distingue principalement des phénocristaux de sanidine, reconnaissables en LPA par la macle caractéristique dite de Carlsbad (fig. 272). À la différence des autres minéraux appartenant au groupe des silicates, la sanidine se forme pendant le processus de cristallisation magmatique, à des températures très élevées (entre 600 et 900 °C), avant que le magma ne se solidifie en raison de la chute brutale de sa température lors de l'éruption volcanique (Haldar et Tišljar, 2014). En outre, on retrouve dans la masse vitreuse quelques cristaux occasionnels de biotite, de clinopyroxène et de feldspath plagioclase.

V.2.3.1.3. Pyroclastes à texture microgrenue porphyrique

S'agissant des fragments pyroclastiques observés dans les spécimens BDX22387b et BDX22389, ils présentent une texture microgrenue porphyrique. Cette texture est caractérisée par une matrice très finement grenue (fig. 15c), composée de grains de feldspaths alcalins cristallisés et non orientés, avec des inclusions de phénocristaux de sanidine (fig. 15d) ainsi que de rares cristaux de biotite et de clinopyroxène. Les observations réalisées à l'aide du microscope optique à cathodoluminescence (CL) confirment l'identification des caractéristiques pétrographiques et minéralogiques des fragments pyroclastiques.

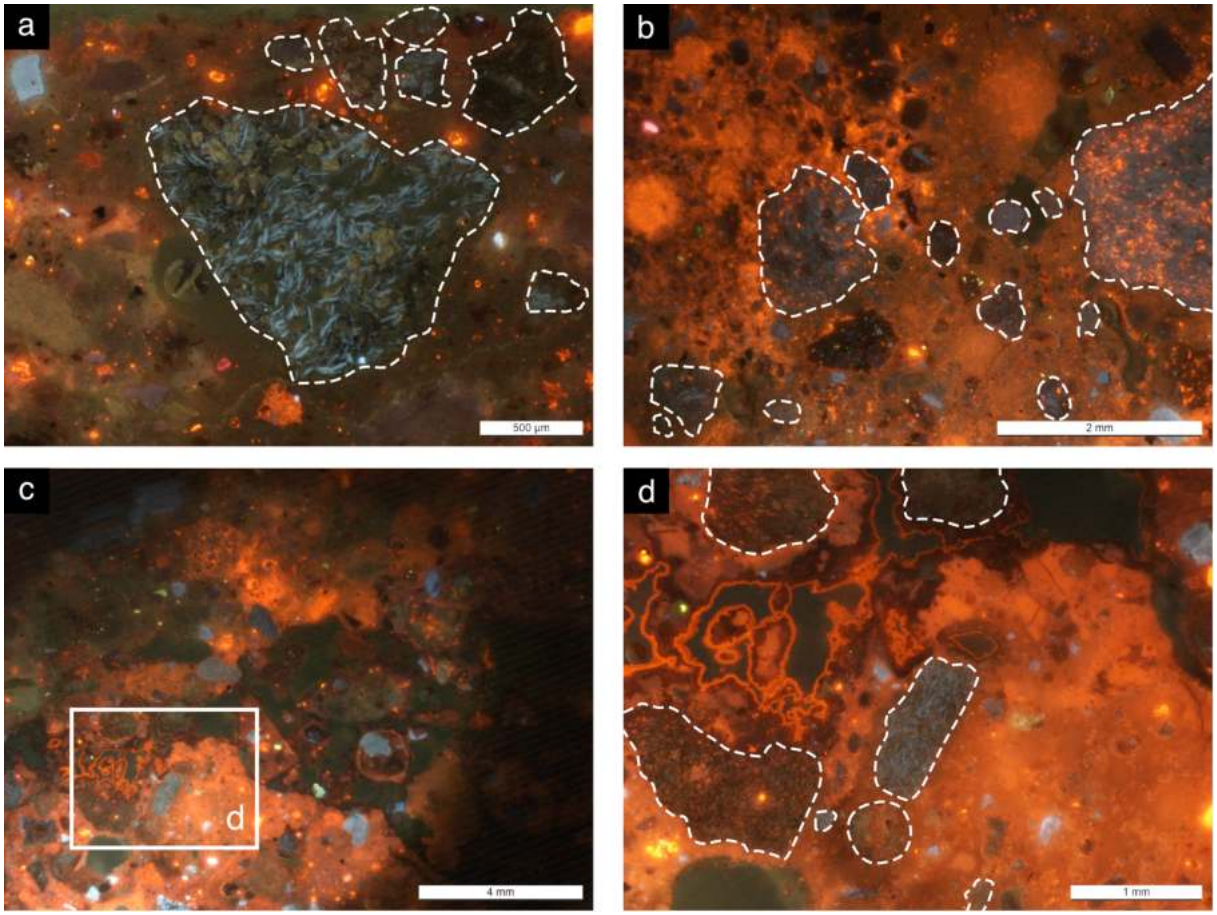

Figure 16 : Microphotographies en CL montrant des fragments pyroclastiques identifiés dans les spécimens : (a) BDX22387 ; (b) BDX22398 ; (c-d) BDX22399

En effet, ces pyroclastes présentent une luminescence de couleur bleu clair (fig. 16) émise par leurs matrices vitreuses. Cette luminescence est attribuable à la présence de phases minérales qui sont essentiellement des feldspaths alcalins.

À l'intérieur des agrégats volcaniques, on observe de rares cristaux de feldspath plagioclase qui émettent une luminescence vert-jaune (fig. 80). On distingue dans les pyroclastes présentant une texture microlithique aphanitique une quantité abondante de microlithes dispersés dans des matrices vitreuses (fig. 16a et 16d). Ces microlithes feldspathiques émettent une luminescence de couleur bleu clair et mesurent entre 40 à 110 µm de longueur. Quant aux phénocristaux de sanidine identifiés dans les granulats à textures porphyriques, ils émettent également une luminescence de couleur bleu clair (fig. 385) caractéristique des feldspaths alcalins (Scholonek et Augustsson, 2016). Enfin, on observe la présence de calcite recristallisée à l'intérieur de certains fragments pyroclastiques (fig. 16b et 16d), caractérisée en CL par une luminescence de couleur rouge orangé. Les dépôts secondaires de carbonate de calcium ($CaCO_3$), à l'intérieur des agrégats réactifs, témoignent de l'existence d'une porosité ouverte laissant pénétrer les fluides chargés en ions CO_3^{2-} et en ions Ca^{2+}.

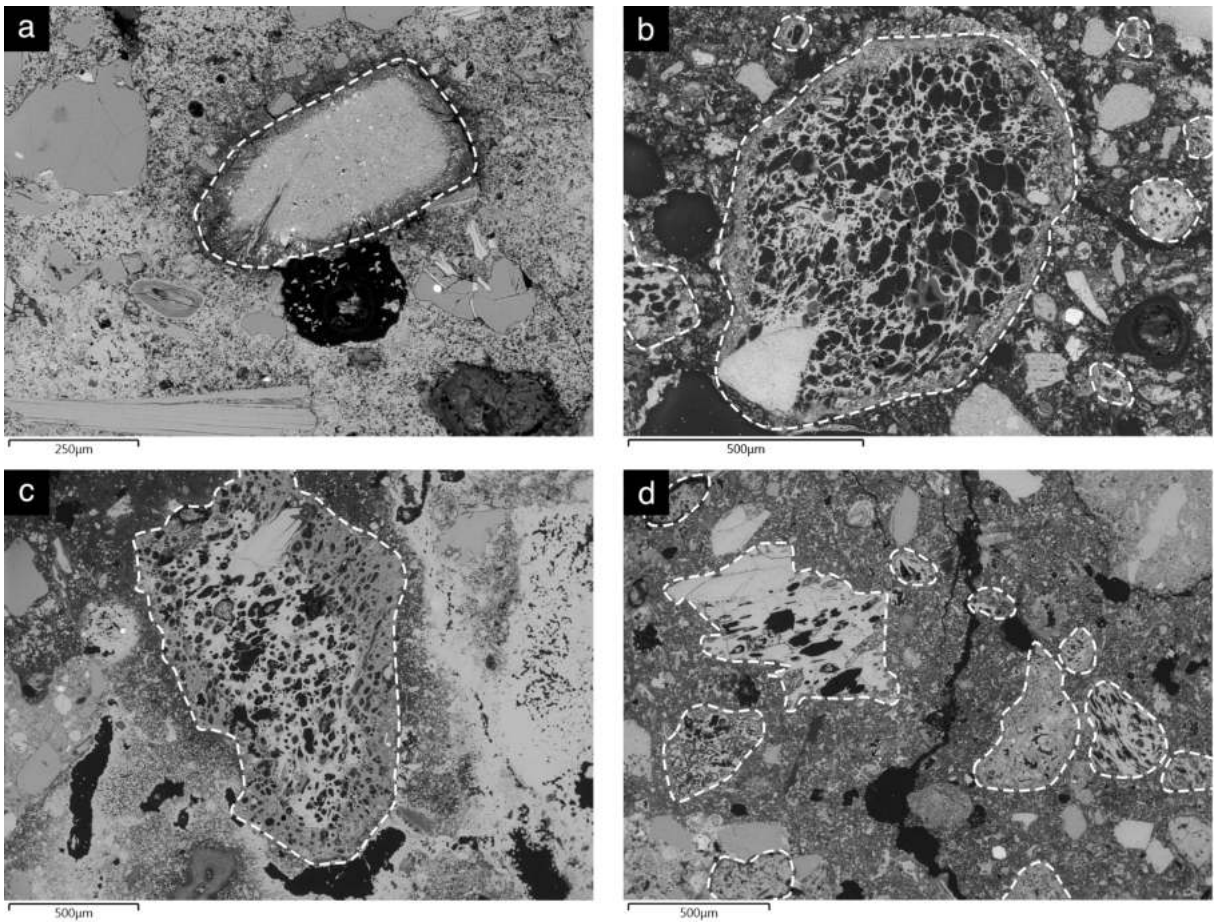

Figure 17 : Images en électrons radiodiffusés montrant des fragments pyroclastiques (ponces) identifiés dans les spécimens : (a) BDX22378 ; (b) BDX22381b ; (c) BDX22387a ; (d) BDX22398

En microscopie électronique à balayage (MEB), les fragments pyroclastiques (ponces) sont caractérisés par des matrices vitreuses apparaissant en gris clair, avec une microporosité élevée. En outre, on observe dans les spécimens BDX22378 (fig. 17a) et BDX22387a (fig. 17c) la présence d'interfaces de réactions pouzzolaniques, caractérisées par des bords qui apparaissent en gris sombre autour des fragments pyroclastiques, ainsi que la présence d'oxydes de Fe-Ti qui apparaissent sous forme de points blancs scintillants (fig. 41b).

Identifiant	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_{3T}	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Total
BDX22378	61,44	0,33	17,88	1,99	0,08	0,38	4,86	4,65	7,36	0,29	99,75
	63,09	0,15	18,67	1,29	0,09	0,33	3,75	6,49	5,76	0,16	99,83
BDX22381	60,62	0,42	18,45	3,13	0,13	0,59	2,73	4,77	8,16	0,08	99,31
	60,58	0,41	18,58	2,93	0,16	0,49	4,27	4,10	7,45	0,08	99,26
	60,18	0,37	18,79	2,81	0,13	0,56	3,52	4,84	7,84	0,09	99,32
	61,74	0,38	18,46	2,60	0,17	0,23	3,38	5,98	6,16	0,08	99,48
	60,36	0,44	18,44	3,02	0,12	0,49	3,14	4,55	8,31	0,05	99,21
BDX22387	61,68	0,46	17,01	3,22	0,22	0,36	7,61	4,24	4,57	-	99,82
	62,32	0,43	18,77	2,71	0,15	0,34	2,81	5,11	6,31	0,05	99,20
BDX22389	58,98	0,41	18,04	2,84	0,14	0,42	3,91	6,98	7,22	0,05	99,23
	61,43	0,33	18,15	2,51	0,16	0,33	2,74	6,62	6,73	-	99,26
BDX22391	61,62	0,40	17,72	2,84	0,19	0,29	2,01	4,25	9,70	-	99,22
	63,12	0,32	18,51	1,98	0,12	0,20	2,00	4,93	8,14	-	99,52
BDX22397	61,12	0,36	18,39	2,76	0,17	0,33	3,73	5,62	6,46	-	99,20
	61,56	0,38	18,44	2,86	0,17	0,34	2,77	5,86	6,62	0,06	99,33
BDX22398	65,48	0,26	18,92	1,34	-	0,17	1,12	6,26	6,19	-	99,95
	60,73	0,39	18,78	2,80	0,12	0,53	2,94	5,11	7,69	0,08	99,32
	60,79	0,47	17,74	3,34	0,21	0,38	2,99	5,66	7,26	0,04	99,16
	61,28	0,37	18,88	2,89	0,13	0,49	2,42	5,21	7,31	0,12	99,31
	62,19	0,31	18,69	2,35	0,14	0,29	2,99	6,35	5,91	0,06	99,50
	62,03	0,31	18,94	1,83	0,08	0,30	3,73	5,05	7,07	-	99,60
BDX22399	60,01	0,40	18,08	2,99	0,15	0,55	4,12	5,20	7,36	0,08	99,23
	59,89	0,42	18,31	2,80	0,13	0,62	4,37	5,24	7,18	0,06	99,26
	59,83	0,43	18,20	2,73	0,13	0,59	4,46	5,43	7,04	0,14	99,26
	61,14	0,40	18,71	2,90	0,12	0,51	2,96	4,66	7,83	0,08	99,49
	61,68	0,24	20,19	1,43	0,05	0,21	4,03	4,02	7,78	0,05	99,80
BDX22408	60,79	0,47	17,49	3,72	0,17	0,72	5,58	3,86	6,28	-	99,42
	64,44	0,32	17,94	2,21	0,08	0,52	2,68	6,00	5,51	0,09	99,88

Tableau 7 : Variation des teneurs en poids d'oxydes (% pds) des éléments majeurs dans les matrices des fragments pyroclastiques identifiés dans les échantillons de mortier prélevés à Hippone

La structure alvéolaire des matrices vitreuses qui est observée au MEB est liée à une exsolution et une décompression rapide des gaz contenus dans le magma. Ce phénomène est caractéristique des téphras produits lors d'éruptions volcaniques explosives (Houghton et Wilson, 1989). Ainsi, la microporosité présente des morphologies variées, allant des formes sphériques aux formes très allongées qui apparaissent en noir en raison du contraste chimique induit par la radiodiffusion des électrons. En outre, on observe une variation dans la densité des pyroclastes,

allant d'une densité élevée (fig. 41) à une très faible densité (fig. 83). La diversité des formes de pores et la variété de la densité des ponces sont liées aux variations de pression lors de la nucléation et de l'expansion des bulles de gaz, qui résultent des trajectoires variables des flux turbulents dans la colonne éruptive (Thomas et al., 1994).

L'analyse géochimique des fragments de ponces par spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) nous a permis de calculer la variation des teneurs en poids d'oxydes des éléments majeurs qui entrent dans la composition des matrices vitreuses. Ainsi, la composition chimique des vingt-huit pyroclastes (tab. 7) révèle des teneurs s'étendant de 58,98 à 65,48 % pds pour la silice (SiO_2), ainsi qu'une plage de variation allant de 8,81 à 14,20 % pds pour la somme des alcalins ($Na_2O + K_2O$).

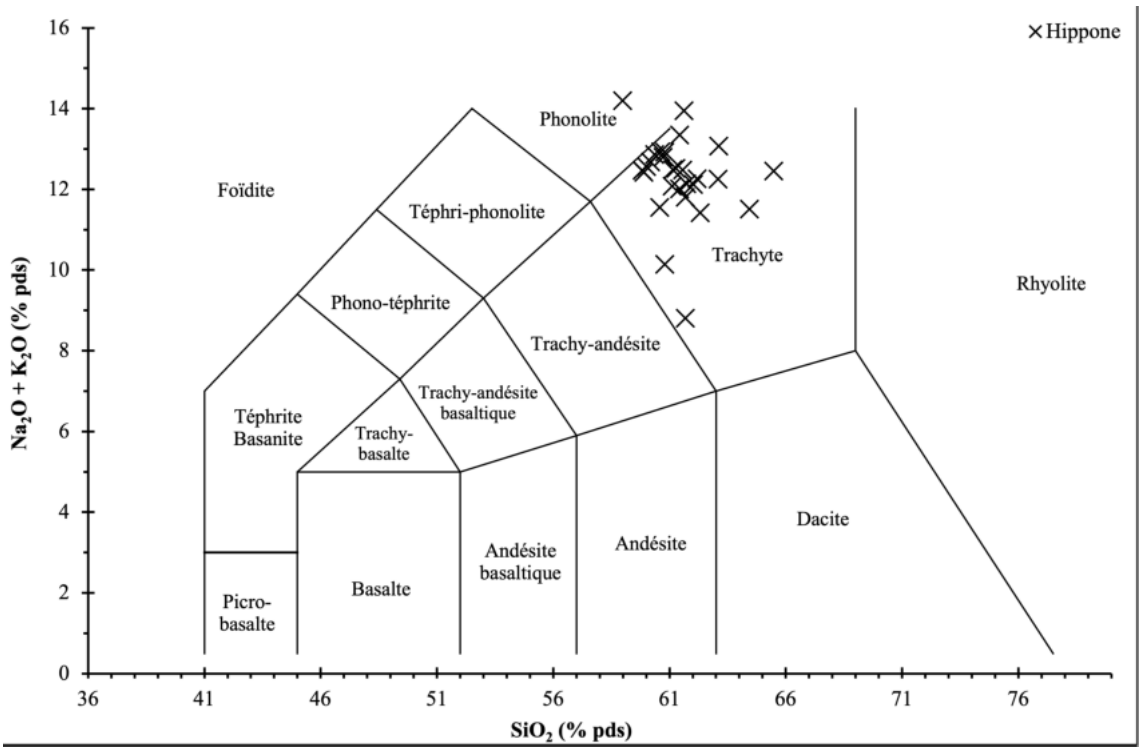

Figure 18 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant la répartition des fragments pyroclastiques en fonction de la corrélation chimique entre la silice (SiO_2) et la somme des alcalins ($Na_2O + K_2O$) et par rapport à la chimie des roches volcaniques (d'après Le Bas et al., 1986)

Les données de composition chimique des fragments pyroclastiques indiquent que nous sommes en présence de fragments de roches ignées de composition intermédiaire, caractérisées par une teneur en silice comprise entre 52 et 65 % pds (Parsons, 1989). En se référant au diagramme Total Alkali Silica (TAS), qui représente la corrélation entre la teneur en silice et la somme des alcalins (Le Bas et al., 1986), on constate que les vingt-huit pyroclastes se répartissent dans les domaines phono-trachytiques (fig. 18) et se positionnent essentiellement dans le domaine trachytique. Les deux fragments de ponces qui se situent en dehors du domaine trachytique correspondent aux échantillons BDX22389 et BDX22391, et sont, respectivement,

de compositions phonolitique et trachy-phonolitique. En outre, les compositions chimiques des matrices vitreuses des pyroclastes sont cohérentes et présentent un écart type de 1,36 % pds pour les teneurs en silice (SiO_2) et de 1,02 % pds pour les teneurs en alcalins (Na_2O + K_2O), suggérant que les fragments de ponces qui constituent la pouzzolane naturelle proviennent d'une source pyroclastique identique.

V.2.3.2. La pouzzolane artificielle

S'agissant de la pouzzolane artificielle, nous avons constaté la présence d'une variété de fragments de céramique dans quarante-quatre spécimens, soit dans 80 % des cinquante-cinq spécimens que nous avons analysés. De plus, nous avons identifié la présence de cendre volante d'origine organique dans l'échantillon BDX22381a.

V.2.3.2.1. La cendre volante

Des fragments de charbon de bois, reconnaissables à l'arrangement caractéristique des cellules végétales, sont présents de manière anecdotique dans le spécimen BDX22381a (fig. 72). Cependant, compte tenu de leur teneur d'environ 1 % et de leur répartition hétérogène dans la matrice du spécimen (tab. 32), nous considérons qu'il s'agit vraisemblablement d'une inclusion accidentelle. Celle-ci étant le résultat d'une contamination par la cendre volante générée par la combustion du bois pendant la calcination de la pierre à chaux. Il ne s'agirait donc pas d'un ajout délibéré de la part des artisans de la cité d'*Hippo Regius*.

V.2.3.2.2. Les fragments de céramique

On note la présence de fragments de céramique (ou tuileau) dans 80 % des spécimens analysés. La teneur de ces fragments de pouzzolane artificielle varie de moins de 1 % jusqu'à plus de 50 % dans certains spécimens (fig. 19c et 19d). En outre, ils présentent essentiellement des formes angulaires à très angulaires, avec des dimensions allant de 100 µm et 24 mm.

En pétrographie, on remarque une grande diversité dans la couleur des matrices des fragments de céramique présents dans les spécimens étudiés. En effet, au sein d'un seul échantillon, il est possible d'observer des variations de couleurs parmi les céramiques, avec des matrices argileuses de teintes variant principalement entre le rouge, l'orange, l'ocre et le brun clair (fig. 19b). Ces variations de couleurs résultent de la différence de composition des argiles utilisées pour la fabrication des artefacts en céramique, en particulier en raison de la teneur en oxydes de fer dans l'argile. Les observations effectuées au moyen du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent la présence de trois types de dégraissants, qui présentent des compositions minéralogiques distinctes. Le premier type est constitué de dégraissants

calcaires à la granularité très fine (fig. 55, 161 et 196). Le deuxième type consiste en des dégraissants silico-calcaires, principalement composés de cristaux de quartz, de feldspaths et de calcite, avec une granularité très fine dans les fragments de céramique (fig. 134, 234 et 350) et une granularité plus grossière dans les fragments de tuileau (fig. 93). Enfin, le troisième type est composé de dégraissants siliceux, essentiellement constitués de feldspaths plagioclases, présentant une granularité très fine dans les fragments de petit calibre (fig. 65, 249 et 365) et une granularité plus grossière dans les fragments de gros calibre (fig. 394).

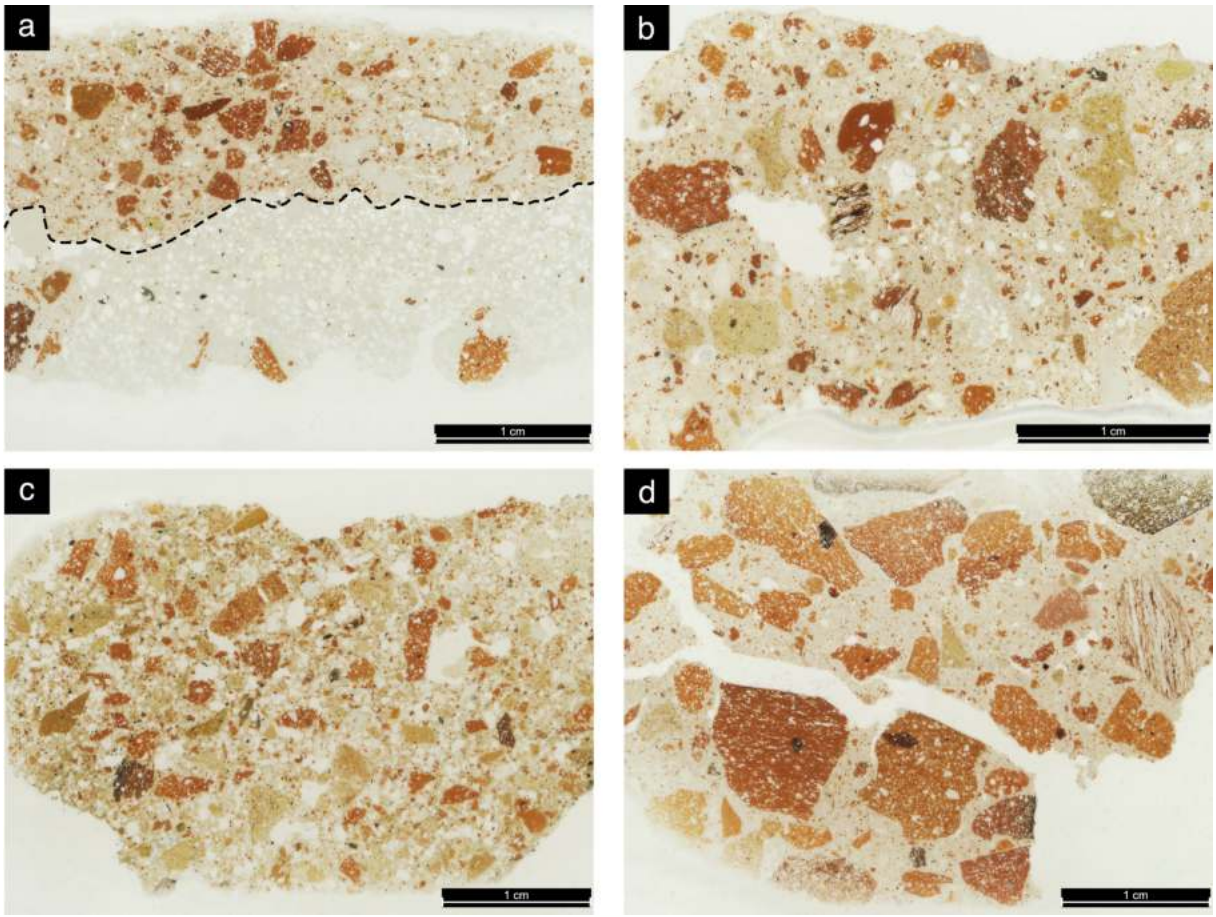

Figure 19 : Lames minces montrant des inclusions de pouzzolane artificielle avec des teneurs comprises entre 20 et 50 % dans : (a) BDX22384a ; (b) BDX22380 ; (c) BDX22407 ; (d) BDX22409

Ainsi, en tenant compte de la teneur et des dimensions des fragments dans les spécimens analysés, on distingue deux catégories de pouzzolane artificielle. La première catégorie regroupe les fragments de céramique de petit calibre (inférieur à 2 mm), avec une teneur allant de 1 à 40 %. On retrouve cette première catégorie dans la plupart des spécimens avec des inclusions de pouzzolane artificielle. La seconde catégorie rassemble les fragments de plus gros calibre (de 2 à 20 mm), avec une teneur supérieure à 50 %. On rencontre cette seconde catégorie dans les spécimens BDX22382, BDX22394, BDX22404, BDX22405, BDX22407 et BDX22409.

V.2.3.3. Les tesselles de mosaïques

Parmi les échantillons de mortier de chaux provenant des structures romaines d'*Hippo Regius* que nous avons examinés, on retrouve des supports de mosaïques (BDX22385, BDX22386, BDX22401 et BDX22403) avec des inclusions de tesselles qui possèdent des faciès pétrographiques variés. En effet, on observe des tesselles de couleur noire (fig. 120, 136 et 311), ainsi que des tesselles blanches, jaunes et rouges (fig. 335).

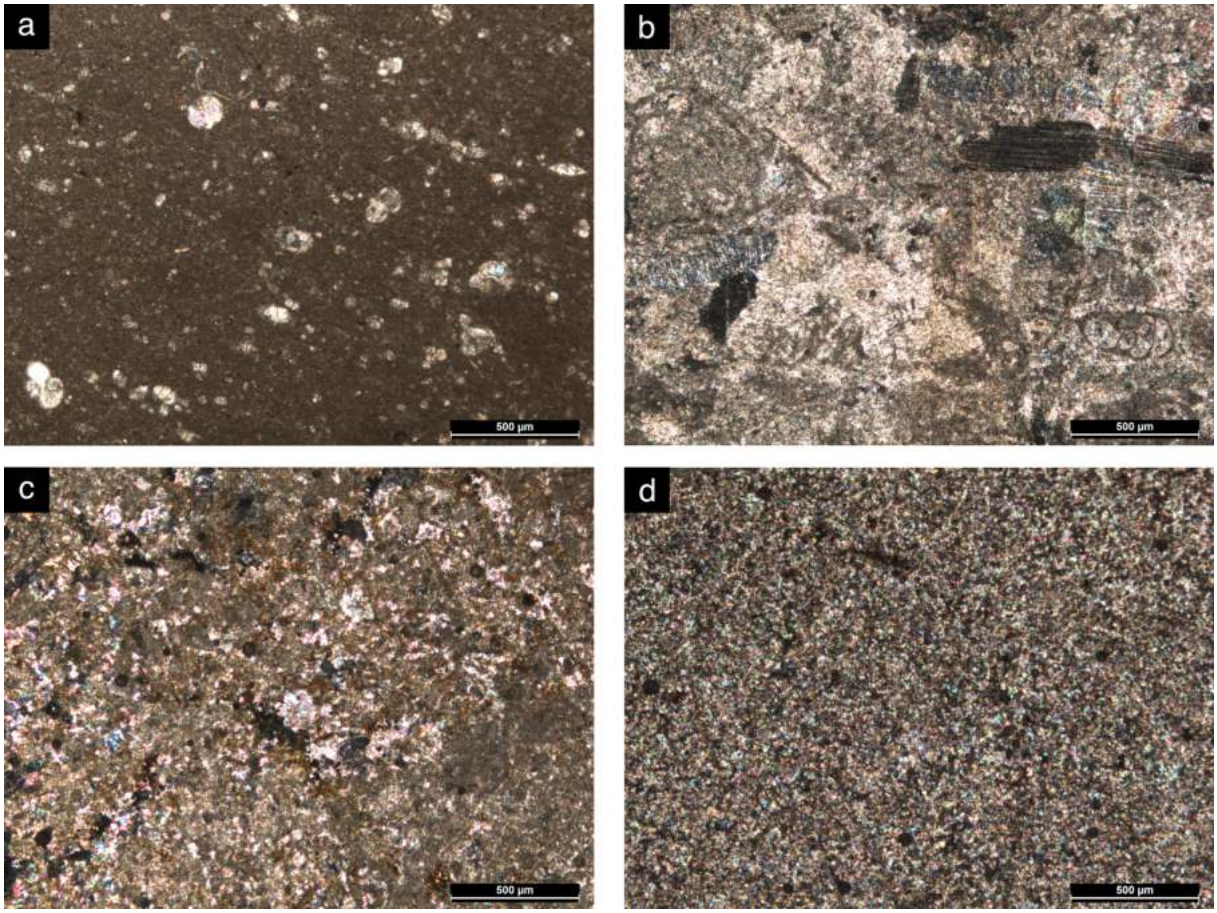

Figure 20 : Microphotographies en LPA montrant des tesselles de couleur : (a) noire dans BDX22401 ; (b) blanche dans BDX22403 ; (c) jaune dans BDX22403 ; (d) rouge dans BDX22403

Les observations réalisées à l'aide du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent que toutes les tesselles émettent une luminescence de couleur rouge orangé (fig. 147, 321 et 342), indiquant que celles-ci ont été produites à partir de roches calcaires. En pétrographie, les tesselles de couleur noire présentent des textures qui s'apparentent à du packstone (fig. 312), du wackstone (fig. 20a), voire du grainstone (fig. 121 et 138). Elles sont caractérisées par une boue carbonatée contenant des foraminifères planctoniques, principalement des *Globigerina*. En dépit de leur apparence macroscopique semblable à celle du marbre blanc, les tesselles de couleur blanche présentent, en réalité, le faciès pétrographique d'une biomicrite (Folk, 1959). Elles sont caractérisées par la présence d'une quantité abondante de bioclastes (fig. 20b) qui

sont consolidés par un ciment carbonaté (micrite). En ce qui concerne les tesselles de couleur jaune, elles sont caractérisées par une texture à grainstone (Dunham, 1962). En outre, elles présentent la particularité de contenir des agrégats de limonite (oxyde de fer hydraté) dispersés au sein d'une matrice calcitique (fig. 20c). Enfin, les tesselles de couleur rouge présentent le faciès d'une calcilutite avec une texture qui s'apparente à de la microsparite (Folk, 1959). Elles sont caractérisées par une matrice microsparitique (fig. 20d) contenant de rares bioclastes et de très fins agrégats d'hématite (oxyde de fer) répartis au sein de la masse carbonatée.

V.3. La classification des échantillons

Les résultats de la caractérisation fournissent de nombreux paramètres que nous pouvons utiliser pour la classification des cinquante-cinq spécimens étudiés. Parmi ces caractéristiques, certaines affichent une faible variabilité entre les différents échantillons analysés, telles que la porosité ou la présence quasi systématique de nodules de chaux dans l'ensemble des échantillons de mortier de chaux. En revanche, d'autres caractéristiques, telles que la charge et les inclusions, présentent une plus grande diversité au sein des spécimens.

V.3.1. Les critères discriminants

Afin de procéder à la classification des spécimens que nous avons examinés, nous avons choisi une approche en deux étapes. Dans un premier temps, nous avons sélectionné des critères discriminants liés à la charge, notamment la nature du sable et la morphologie de ses grains. Ensuite, dans un second temps, nous avons pris en compte des critères discriminants associés aux inclusions, en évaluant la présence ou l'absence de la pouzzolane naturelle, ainsi que la teneur de la pouzzolane artificielle dans chaque spécimen qui en contient.

V.3.2. Les groupes de spécimens

Ainsi, nous sommes en mesure de classer les cinquante-cinq spécimens en neuf groupes distincts (tab. 8), en prenant en considération la nature du sable employé (calcaire et silico-calcaire), la forme des grains (angulaire, sub-angulaire et très émoussée) ainsi que la nature et la teneur des agrégats réactifs qui ont été rajoutés par les artisans de la cité d'*Hippo Regius*.

V.3.2.1. Groupe 01

Le premier groupe représente un mortier de chaux constitué d'une charge calcaire à grains anguleux et exempt de pouzzolanes. Il regroupe les spécimens qui entrent dans la composition de l'échantillon d'enduit peint (BDX22400a et BDX22400c), prélevé depuis la face intérieure du chevet de la grande basilique.

V.3.2.2. Groupe 02

Le deuxième groupe correspond à un mortier de chaux élaboré avec une charge silico-calcaire composée de grains anguleux, sans incorporation de pouzzolane naturelle ou artificielle. Il inclut les spécimens BDX22383, BDX22385a, BDX22401a et BDX22401b.

V.3.2.3. Groupe 03

Le troisième groupe caractérise un mortier de chaux constitué d'une charge silico-calcaire à grains anguleux, comprenant des inclusions de pouzzolane naturelle avec une teneur de 5 % et des inclusions de pouzzolane artificielle avec une teneur de 10 %. Il est représenté par un échantillon de mortier de maçonnerie (BDX22389) qui provient du mur d'hypocauste des grands thermes du nord.

V.3.2.4. Groupe 04

Le quatrième groupe représente un mortier de chaux élaboré avec une charge silico-calcaire constituée de grains anguleux, avec l'incorporation de pouzzolane artificielle. La teneur en fragments de céramique est variable, allant de moins de 1 % jusqu'à 30 %. Ce groupe inclut des spécimens provenant d'enduits d'étanchéité (BDX22384a, BDX22384b, BDX22402a et BDX22402b), de couches composant l'échantillon d'enduit peint (BDX22400b et BDX22400d), de couches composant des mosaïques (BDX22385b, BDX22385c et BDX22401c), ainsi que d'un échantillon de mortier de maçonnerie (BDX22410).

V.3.2.5. Groupe 05

Le cinquième groupe caractérise un mortier de chaux composé d'une charge silico-calcaire avec des grains sub-anguleux, sans incorporation d'inclusions. Il regroupe les spécimens BDX22386a, BDX22386b et BDX22403a qui correspondent respectivement à un joint de finition et des lits de pose de tesselles de mosaïques.

V.3.2.6. Groupe 06

Le sixième groupe correspond à un mortier de chaux produit à partir d'une charge silico-calcaire constituée de grains sub-anguleux et comportant des inclusions de pouzzolane naturelle, dont la teneur varie de moins de 1 % à 20 %, ainsi que des inclusions de pouzzolane artificielle, dont la teneur se situe entre moins de 1 % et 20 %. Ce groupe inclut des spécimens qui proviennent principalement d'ouvrages liés à l'eau, tels que les *villae* du front de mer (BDX22378), les grands thermes du nord (BDX22381a, BDX22381b, BDX22381c, BDX22387a, BDX22387b, BDX22391, BDX22397a, BDX22398 et BDX22399), ainsi que la fontaine à la Gorgone (BDX22408).

V.3.2.7. Groupe 07

Le septième groupe représente un mortier de chaux élaboré avec une charge silico-calcaire constituée de grains sub-anguleux, avec l'incorporation de pouzzolane artificielle, principalement des fragments de céramique de petit calibre. La teneur en pouzzolane artificielle est variable, allant de 1 % jusqu'à 40 %. En outre, ce groupe inclut également l'échantillon de joint de carreaux de pilettes (BDX22411) qui présente les mêmes caractéristiques de charge et d'inclusions, même si son apparence diffère sensiblement de celle des spécimens appartenant à ce groupe.

V.3.2.8. Groupe 08

Le huitième groupe correspond à un béton de tuileau produit à partir d'une charge silico-calcaire avec des grains sub-anguleux et comportant des inclusions de pouzzolane artificielle, principalement du tuileau de gros calibre. Il regroupe les revêtements de sol (BDX22382 et BDX22405), les supports de dallage (BDX22394 et BDX22407) ainsi que les bétons destinés aux ouvrages hydrauliques (BDX22404 et BDX22409).

V.3.2.9. Groupe 09

Le neuvième groupe représente un mortier de chaux produit à partir d'une charge constituée d'un sable silico-calcaire avec des grains très émoussés, sans incorporation d'inclusions. Il correspond à l'échantillon de mortier de maçonnerie (BDX22388) qui provient du *praefurnium* des grands thermes du nord.

Groupe	Identifiant	Liant				Charge		Inclusions			
		Nodules de chaux		Porosité		Sable	Forme des grains	Pouzzolane naturelle	Taille (mm)	Pouzzolane artificielle	Taille (mm)
		Non mélangés	Partiellement calcinés	Sphérique	Oblongue						
G01	BDX22400a	< 1%	-	1%	< 1%	Calcaire	angulaire	-	-	-	-
	BDX22400c	-	< 1%	3%	5%	Calcaire	angulaire	-	-	-	-
G02	BDX22383	10%	5%	10%	10%	**Silico-calcaire**	angulaire	-	-	-	-
	BDX22385a	3%	< 1%	3%	5%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	-	-
	BDX22401a	5%	1%	3%	5%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	-	-
	BDX22401b	5%	< 1%	10%	20%	**Silico-calcaire**	angulaire	-	-	-	-
G03	BDX22389	10%	3%	5%	5%	Silico-calcaire	angulaire	5%	0.5 - 1.4	10%	0.2 - 2.5
G04	BDX22400d	-	1%	3%	1%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	< 1%	0.7 - 0.9
	BDX22410	5%	3%	10%	3%	**Silico-calcaire**	angulaire	-	-	< 1%	0.2 - 2.6
	BDX22384b	5%	3%	5%	3%	**Silico-calcaire**	angulaire	-	-	1%	0.7 - 4.5
	BDX22400b	1%	3%	3%	3%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	1%	1.0 - 5.0
	BDX22385c	-	1%	10%	3%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	5%	0.4 - 7.0
	BDX22401c	5%	1%	5%	5%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	5%	0.3 - 4.0
	BDX22385b	3%	1%	5%	3%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	10%	0.4 - 3.0
	BDX22402b	3%	1%	10%	5%	**Silico-calcaire**	angulaire	-	-	10%	0.6 - 7.0
	BDX22384a	3%	5%	10%	3%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	20%	0.1 - 5.2
	BDX22402a	3%	1%	10%	5%	Silico-calcaire	angulaire	-	-	30%	0.2 - 0.6
G05	BDX22386a	1%	< 1%	1%	< 1%	**Silico-calcaire**	sub-angulaire	-	-	-	-
	BDX22386b	< 1%	1%	1%	< 1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	-	-
	BDX22403a	10%	1%	1%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	-	-
G06	BDX22378	-	1%	3%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	< 1%	0.3 - 0.6	< 1%	9.0
	BDX22387a	< 1%	1%	5%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	< 1%	0.9 - 1.1	3%	0.5 - 2.2
	BDX22397a	-	5%	5%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	1%	2.2 - 2.5	20%	0.1 - 2.3
	BDX22381a	-	3%	5%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	3%	1.3 - 3.2	1%	0.6 - 4.5
	BDX22387b	3%	1%	10%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	3%	0.8 - 1.1	10%	0.9 - 10
	BDX22391	-	3%	10%	1%	**Silico-calcaire**	sub-angulaire	3%	0.7 - 5.5	-	-
	BDX22399	10%	-	10%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	3%	1.4 - 10	20%	0.2 - 4.0
	BDX22381b	-	5%	5%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	5%	0.5 - 2.2	3%	0.5 - 4.1
	BDX22381c	-	10%	10%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	5%	0.4 - 1.2	1%	0.9 - 3.8
	BDX22398	20%	3%	5%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	5%	0.9 - 4.9	10%	0.1 - 7.0
	BDX22408	-	3%	3%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	20%	0.8 - 15	< 1%	0.9 - 1.5
G07	BDX22386d	3%	1%	5%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	1%	0.5 - 4.2
	BDX22392a	-	5%	5%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	5%	0.2 - 1.6
	BDX22393	-	5%	10%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	5%	0.3 - 4.0
	BDX22379b	20%	1%	10%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	10%	0.4 - 9.0
	BDX22392b	-	5%	3%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	10%	0.3 - 2.4
	BDX22397b	-	5%	5%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	10%	0.5 - 11
	BDX22411	-	1%	1%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	10%	0.3 - 1.7
	BDX22379a	20%	3%	10%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	0.3 - 3.0
	BDX22380	1%	5%	3%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	0.3 - 8.5
	BDX22386c	-	3%	3%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	0.4 - 1.4
	BDX22390b	20%	3%	5%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	2.0 - 8.0
	BDX22395	-	10%	5%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	0.2 - 2.8
	BDX22396	-	3%	3%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	0.3 - 6.0
	BDX22403b	20%	1%	1%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	20%	0.3 - 2.3
	BDX22390a	20%	5%	10%	5%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	30%	0.2 - 2.6
	BDX22403c	20%	1%	5%	20%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	40%	0.4 - 7.0
	BDX22406	30%	5%	5%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	40%	0.2 - 3.8
G08	BDX22382	-	< 1%	-	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	> 50%	8.0 - 24
	BDX22394	-	3%	-	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	> 50%	0.3 - 24
	BDX22404	10%	3%	1%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	> 50%	0.2 - 8.0
	BDX22405	-	20%	1%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	> 50%	0.3 - 20
	BDX22407	-	5%	10%	3%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	> 50%	0.3 - 5.5
	BDX22409	3%	1%	5%	1%	Silico-calcaire	sub-angulaire	-	-	> 50%	0.1 - 11
G09	BDX22388	-	3%	5%	3%	**Silico-calcaire**	très émoussée	-	-	-	-

Tableau 8 : Classification des échantillons de mortier de chaux romain selon les critères discriminants retenus (les sables mis en évidence en gras correspondent à des sables tamisés)

Conclusion

La caractérisation archéométrique des échantillons de mortier prélevés depuis le site archéologique d'*Hippo Regius* nous a offert la possibilité de rassembler de nombreuses informations essentielles à notre étude. Grâce à ces données, nous sommes en mesure d'identifier les diverses « recettes » employées et de mieux appréhender le processus de mise en œuvre du mortier de chaux par les artisans de cette cité antique.

L'examen macroscopique des trente-quatre échantillons a abouti à la constitution d'un corpus de cinquante-cinq spécimens (tab. 4). L'analyse microscopique de ces spécimens nous a permis de saisir les caractéristiques de leurs constituants, notamment celles du liant, de la charge et des inclusions. Cela, en utilisant des méthodes et des instruments d'observation tels que la pétrographie, la microscopie optique à cathodoluminescence (CL), et la microscopie électronique à balayage (MEB) associée à la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS). L'analyse du rapport entre les volumes de chaux et de granulat utilisés dans les spécimens (tab. 5) montre que les ratios se situent entre 1:3 et 2:3 dans la plupart des mortiers de chaux prélevés à *Hippo Regius*. Ces ratios sont considérés comme étant « de sens commun » pour les mortiers et enduits romains (Frizot, 1975). Parmi les spécimens qui présentent des ratios en dehors de cet intervalle, on distingue deux spécimens (joint de tesselles de mosaïque et couche d'*arricio* de l'enduit peint) caractérisés par un rapport de 1:4, ainsi que cinq spécimens (lits de pose de tesselles de mosaïque et couche d'*intonachino* de l'enduit peint) qui révèlent un rapport de 2:1. En outre, les nodules de chaux non mélangés, observés dans plus de la moitié des spécimens, contiennent des teneurs en ions calcium supérieures à celles des matrices carbonatées du liant. Ceci conforte l'hypothèse de l'ajout délibéré de la chaux vive par les artisans romains, pendant la mise en œuvre, pour permettre l'auto-cicatrisation du mortier romain et ainsi améliorer sa durabilité (Seymour et al., 2023). Par ailleurs, l'analyse chimique réalisée sur certains de ces nodules (fig. 106) révèle des teneurs en oxyde de calcium variant entre 86,40 et 93,96 % pds, et des teneurs en oxyde de magnésium (MgO) se situant entre 0,52 et 0,53 % pds. Ces résultats témoignent de l'utilisation d'une chaux aérienne qui aurait été produite à partir de la calcination des calcaires « les plus purs ».

S'agissant des nodules de chaux partiellement calcinés, ils se manifestent principalement sous la forme d'éléments bioclastiques, à travers lesquels on peut discerner des débris d'encroûtements d'algues, des fragments de mollusques, ainsi que des tests d'échinodermes et de foraminifères. Ces éléments constituent des marqueurs nous permettant d'étudier les formations géologiques environnantes d'*Hippo Regius* qui auraient

potentiellement servi à l'extraction de la pierre à chaux. La caractérisation de la charge, dans les cinquante-cinq spécimens, nous a permis d'identifier quatre types distincts de sables utilisés par les artisans romains. Il convient de souligner que le sable silico-calcaire à grains sub-anguleux est observé dans plus de 67 % des spécimens analysés. En outre, le sable calcaire, composé de cristaux de calcite et de fragments de marbre, est exclusivement employé dans les couches de finition de l'enduit peint. Ceci correspond parfaitement à la prescription de Vitruve relative à la mise en œuvre des enduits peints (*De architectura*, VII, 3, 6).

En ce qui concerne la caractérisation des inclusions de pouzzolane naturelle, les caractéristiques pétrographiques et minéralogiques (c.-à.-d. les textures pyroclastiques, la présence de microlithes feldspathiques et de phénocristaux de sanidine), observées dans les agrégats réactifs, indiquent que ceux-ci proviennent de roches ignées à refroidissement très rapide (Best, 2003). En outre, les très fortes microporosités observées dans les matrices amorphes des fragments pyroclastiques sont caractéristiques des éjectas produits pendant des éruptions volcaniques explosives. On note également que tous les spécimens présentant des inclusions de pouzzolane naturelle (tab. 6) proviennent des structures liées à l'eau (grands thermes du nord, fontaine à la Gorgone, *etc.*). Cela témoigne de la compréhension par les artisans de la cité des propriétés hydrauliques conférées par les agrégats pyroclastiques lorsqu'ils interagissent avec un liant à base de chaux. Quant aux inclusions de pouzzolane artificielle, ce sont principalement des fragments de « tuileau » qui présentent des faciès pétrographiques et des compositions minéralogiques variés. On note que des fragments de céramique ont été employés pour les agrégats de petit calibre et des fragments de terres cuites architecturales l'ont été pour les agrégats de plus gros calibre. Ces derniers sont essentiellement présents dans les bétons de tuileau. Concernant les tesselles de mosaïques, on observe dans celles-ci le faciès des roches calcaires, avec des textures variées (packstone, wackstone, grainstone, *etc.*). De plus, la présence de foraminifères planctoniques et de bioclastes dans ces tesselles peut nous aider à formuler des hypothèses sur leur origine.

Enfin, la comparaison entre les spécimens et leur classification en fonction des critères discriminants tels que la nature du sable, la morphologie des grains ainsi que les teneurs en pouzzolane naturelle et artificielle, nous ont permis de former neuf groupes différents (tab. 8). Ces groupes révèlent une certaine corrélation entre les caractéristiques des composants utilisés et la fonction architecturale du mortier de chaux. La classification des spécimens nous permet également de rassembler des éléments de réflexion quant à l'origine de la pierre à chaux, des sables et des inclusions qui ont été employés par les artisans d'*Hippo Regius*.

Partie 3 :
Reconstitution du mortier de chaux

Chapitre VI : Réflexions sur la provenance des matières premières

Introduction

Les caractéristiques des nombreux composants qui ont été identifiés dans les mortiers romains d'*Hippo Regius* représentent des facteurs pouvant impulser des réflexions nouvelles sur les origines des matières premières sélectionnées par les artisans de la cité. En effet, la composition chimique des nodules de chaux non mélangés suggère que les artisans privilégiaient l'utilisation d'une chaux aérienne. De plus, les nodules de chaux partiellement calcinés que nous avons identifiés au sein des matrices carbonatées comportent des éléments bioclastiques qui constituent des marqueurs géologiques essentiels pour identifier les formations calcaires ayant fourni la pierre à chaux. En ce qui concerne la composition des sables, les propriétés minéralogiques et morphologiques de leurs composants nous permettent d'établir des comparaisons avec les dépôts détritiques de la région, dans le but de déterminer leurs sources d'approvisionnement. Quant aux inclusions, la forme et la composition chimique des fragments pyroclastiques qui constituent la pouzzolane naturelle, les caractéristiques des fragments de céramique qui composent la pouzzolane artificielle, ainsi que les faciès pétrographiques qui caractérisent les tesselles de mosaïques, forment un ensemble d'indices déterminants pour identifier leurs origines respectives.

En examinant le contexte géologique environnant de la cité d'Hippone, on constate que la région est caractérisée par une variété de formations rocheuses, comprenant des couches sédimentaires, des formations métamorphiques, ainsi que des roches intrusives et volcaniques (Joleaud, 1936). De plus, il est établi que les artisans romains de la cité d'*Hippo Regius* exploitaient habilement ces ressources géologiques locales, en utilisant le marbre, le gneiss, le calcaire ou encore le grès dunaire (de Vos, 2003 ; Delestre, 2005h ; Antonelli et al., 2009 ; Herrmann et al., 2015). Cela démontre leur compréhension et leur maîtrise des qualités intrinsèques des matériaux locaux.

Ainsi, dans ce sixième chapitre, nous abordons les différentes hypothèses relatives à la provenance des matières premières ayant servi à la production du mortier de chaux à *Hippo Regius*. D'abord, nous examinons le contexte géologique autour de la cité antique pour identifier les formations rocheuses susceptibles d'avoir été utilisées par les artisans romains.

Ensuite, nous effectuons une comparaison entre les caractéristiques des composants (liant, charge et inclusions) et les propriétés des ressources minérales locales. Si les caractéristiques de certains composants ne correspondent pas aux propriétés des ressources locales, nous cherchons des correspondances avec les ressources minérales décrites dans la littérature scientifique sur les mortiers romains afin d'identifier leur provenance.

VI.1. Aperçu du contexte géologique autour d'*Hippo Regius*

Situé du côté est de la chaîne alpine d'Afrique du Nord, le contexte géologique autour de la cité antique d'*Hippo Regius* présente une combinaison de formations géologiques avec à la fois des affleurements de terrains sédimentaires, de terrains métamorphiques et de roches intrusives et volcaniques tertiaires (Joleaud, 1936).

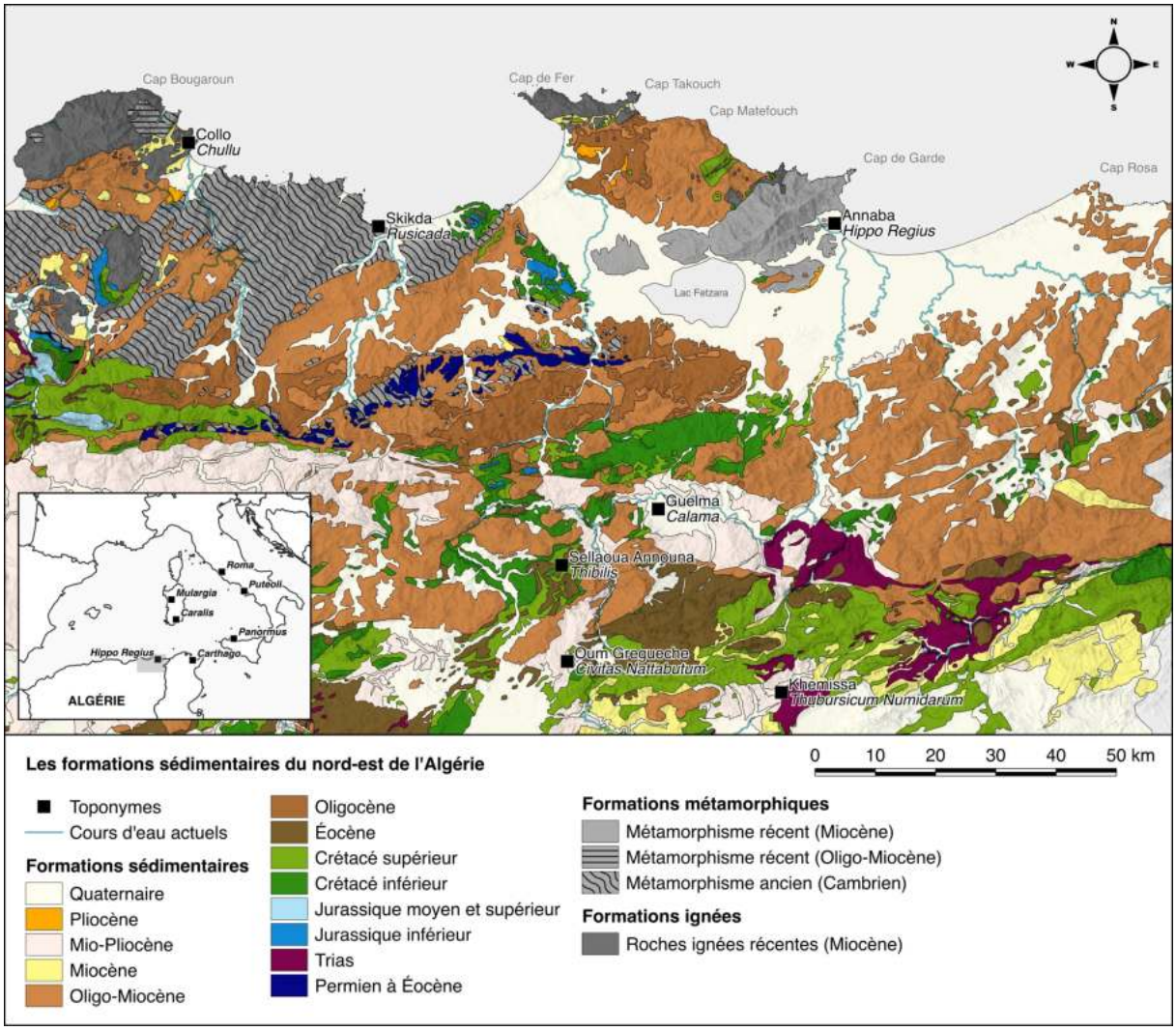

Figure 21 : Carte géologique schématique mettant en évidence les principales formations sédimentaires dans le nord-est de l'Algérie (d'après Vila, 1980)

VI.1.1. Les roches sédimentaires

Les terrains sédimentaires qui caractérisent le nord-est de l'Algérie (fig. 21) sont dominés par des nappes de flyschs maurétaniens de l'Oligocène, des séries de flyschs resédimentés et de grès numidiens de l'Oligo-Miocène, ainsi que par des dépôts détritiques du Plio-Quaternaire (Vila, 1980). Les nappes de flyschs présentent une stratification qui est principalement constituée de marnes argileuses, de calcaires marneux à silex et de marnes schisteuses. En outre, les terrains argilo-gréseux (grès de Numidie et argiles subordonnées) couvrent une large étendue de la région et se développent principalement dans les monts de la Cheffia et d'El Kala (Joleaud, 1936). Les régions proches de la frontière entre l'Algérie et la Tunisie sont principalement caractérisées par des affleurements de roches calcaires de l'Éocène moyen à supérieur. Du côté tunisien, Joleaud (1936) signale la présence de formations de calcaires sombres dans les secteurs d'Aïn Drahem et de Fernana, tandis que plus au nord, près de Babouch, on trouve des calcaires renfermant des bryozoaires. Du côté algérien, il signale la présence de calcaires massifs à Nummulites qui affleurent au sud de Hadjar Soud (wilaya de Skikda). Ces calcaires comprennent des couches d'argiles, parfois schisteuses, entrecoupées de bandes de calcaire, de brèches contenant de petits éléments, des fossiles de Nummulites, ainsi que des formations de grès.

En outre, d'autres affleurements de calcaires priaboniens à blocs apparaissent entre les secteurs de Bouhadjar et d'Aïn Kerma (wilaya d'El Tarf), à environ une dizaine de kilomètres de Zitouna (fig. 21). Ces calcaires présentent une variété de faciès pétrographiques, dont des dolomies jaunes, des calcaires massifs sombres riches en éléments bioclastiques, des biomicrites, ainsi que des pelsparites (Vila, 1980). Enfin, la présence d'affleurements de calcaires riches en oxydes de fer a été signalée par Joleaud (1936) au massif du Bou Hamra, qui se situe au sud du site archéologique d'Hippone. En ce qui concerne les formations détritiques du Plio-Quaternaire de la région, elles se caractérisent principalement par des dépôts de plages actuelles et des terrasses alluvionnaires. Selon Joleaud (1936), ces formations comprennent des mollasses calcaires d'origine marine et éolienne, des sables riches en grenats et en titanite, ou en grenats et en quartz, ainsi que des limons contenant des cailloux roulés.

VI.1.2. Les roches métamorphiques

Près de la côte, un ensemble métamorphique récent (fig. 22) s'est formé à la suite des collisions entre les plaques tectoniques africaine et européenne, au cours de l'Éocène et du Miocène, créant le complexe métamorphique de l'Edough. Ce socle cristallin se compose de

trois unités superposées : l'unité de gneiss de Seraïdi, principalement constituée de paragneiss ou de gneiss migmatitique ; l'unité intermédiaire, principalement composée de marbres, de micaschistes et d'amphibolites ; l'unité supérieure, qui se compose de métapélites avec de nombreuses intercalations de marbre et de quartzite feldspathique (Oularbi et Zeghiche, 2009 ; Marignac et al., 2016).

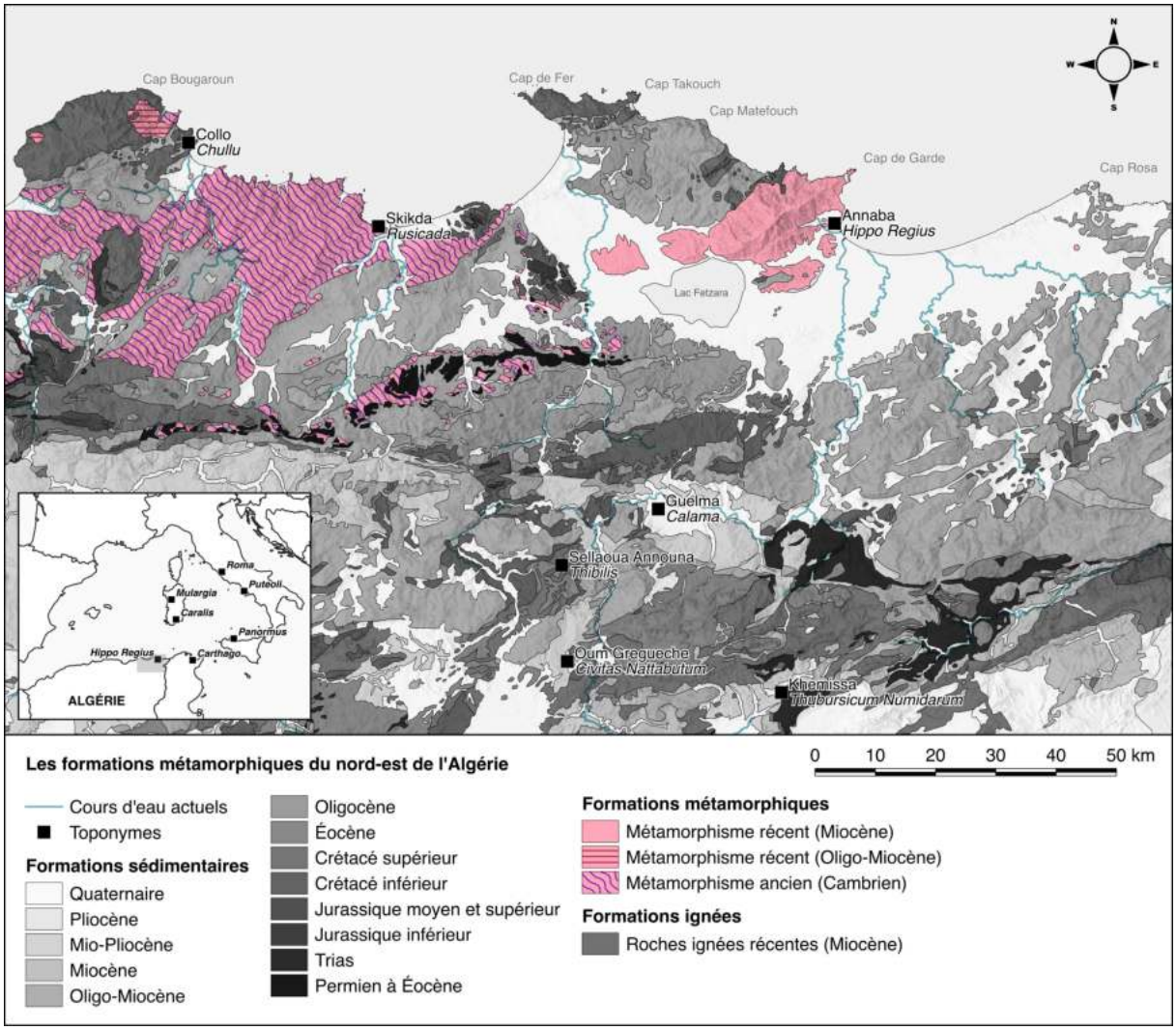

Figure 22 : Carte géologique schématique mettant en évidence les principales formations métamorphiques dans le nord-est de l'Algérie (d'après Vila, 1980)

La série cristallophyllienne des gneiss glanduleux forme le noyau axial du massif de l'Edough. Elle affleure dans le plateau de Bouzizi, à l'ouest-sud-ouest de Seraïdi. Ce noyau est immédiatement entouré par la série des gneiss schisteux, qui affleure dans la terminaison nord-est de l'Edough, au massif du Bou Hamra. De minces zones de micaschistes se présentent sous forme d'intercalations clairement distinctes au sein de cette série (Joleaud, 1936). En outre, il est bien établi que ce gneiss a été exploité dans l'Antiquité. En effet, les larges dalles qui recouvrent les égouts et qui sont employées comme revêtement des principales voies à

Hippo Regius, ont été fabriquées à partir de ce gneiss, tandis que le micaschiste a été utilisé pour les moellons qui constituent les murs en *opus africanum* de la cité (Delestre, 2005h). Les marbres à grains moyens et à gros grains de l'unité intermédiaire de l'Edough affleurent principalement au sud-ouest du cap de Garde (fig. 22). La carrière de marbre de type « *greco scritto* » a été exploitée près du cap de Garde pendant la période impériale romaine (de Vos, 2003 ; Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012b). L'utilisation de ce marbre est clairement établie non seulement à *Hippo Regiu*s, mais également dans les cités romaines de *Cuicul*, *Utica* et Carthage. Il servait aussi bien pour la réalisation des bases, des fûts et des chapiteaux de colonnes et de pilastres, que pour les incrustations de marbre (*crustae*) et les revêtements de sol (Antonelli et al., 2009). D'autres carrières de marbre, signalées à Djebel Filfila (wilaya de Skikda) et Djebel Mahouna (wilaya de Guelma), ont également été exploitées par les Romains dans la région. De la même manière que les ornements réalisés en *greco scritto*, les sculptures et les décors en marbre de Filfila ont été exportés vers de nombreuses cités d'Afrique romaine et d'Italie (Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012b). En revanche, les éléments en marbre de Mahouna ont principalement été destinés à un usage local (Herrmann, Attanasio, et Tykot, 2012). Le peu de diffusion de ce marbre étant probablement dû aux difficultés liées au transport terrestre, causées par le relief montagneux, contrairement aux carrières de marbre du cap de Garde et de Filfila qui se situent à proximité de la côte (fig. 29).

VI.1.3. Les roches ignées

Les formations ignées du nord-est de l'Algérie sont liées, en grande partie, à l'activité magmatique du Néogène (fig. 23). Elles se trouvent essentiellement entre le cap de Garde et le cap de Fer, ainsi que dans la région du cap Bougaroun (wilaya de Skikda). Ces formations comprennent des roches ultramafiques et mafiques, des roches de composition intermédiaire, ainsi que des roches felsiques (Abbassene et al., 2016).

Les roches ultramafiques, en grande partie constituées de péridotites et de kinzigites, sont visibles dans la zone s'étendant de la ville de Collo (*Chullu*) jusqu'au cap Bougaroun (Misseri, 1987). Les roches mafiques comprennent principalement des gabbros et des dolérites, et affleurent également dans la région volcanique du cap Bougaroun (Abbassene et al., 2016). Les roches ayant une composition intermédiaire sont principalement constituées de diorites, de granodiorites et de microdiorites. Leur présence est signalée à la fois dans le secteur magmatique du cap Bougaroun (Lakkaichi et Bouabsa, 2017) et dans la zone s'étendant du cap de Fer jusqu'à Aïn Barbar (Marignac et al., 2016). Quant aux roches felsiques, il s'agit essentiellement de microgranites, de granites et de rhyolites. Les microgranites et les granites

forment des roches intrusives qui affleurent au cap Bougaroun (Abbassene et al., 2016), au cap de Fer ainsi qu'au contact du massif de l'Edough, à l'est d'Aïn Barbar (Marignac et al., 2016). Les rhyolites forment des roches filoniennes et affleurent ponctuellement à Zitouna, Chetaïbi (*Tacuata*), Aïn Barbar (Daif et Toubal, 2015), Aïn Sedma (Lakkaichi et Bouabsa, 2017) et Kef Cheraïa (Abbassene et al., 2016).

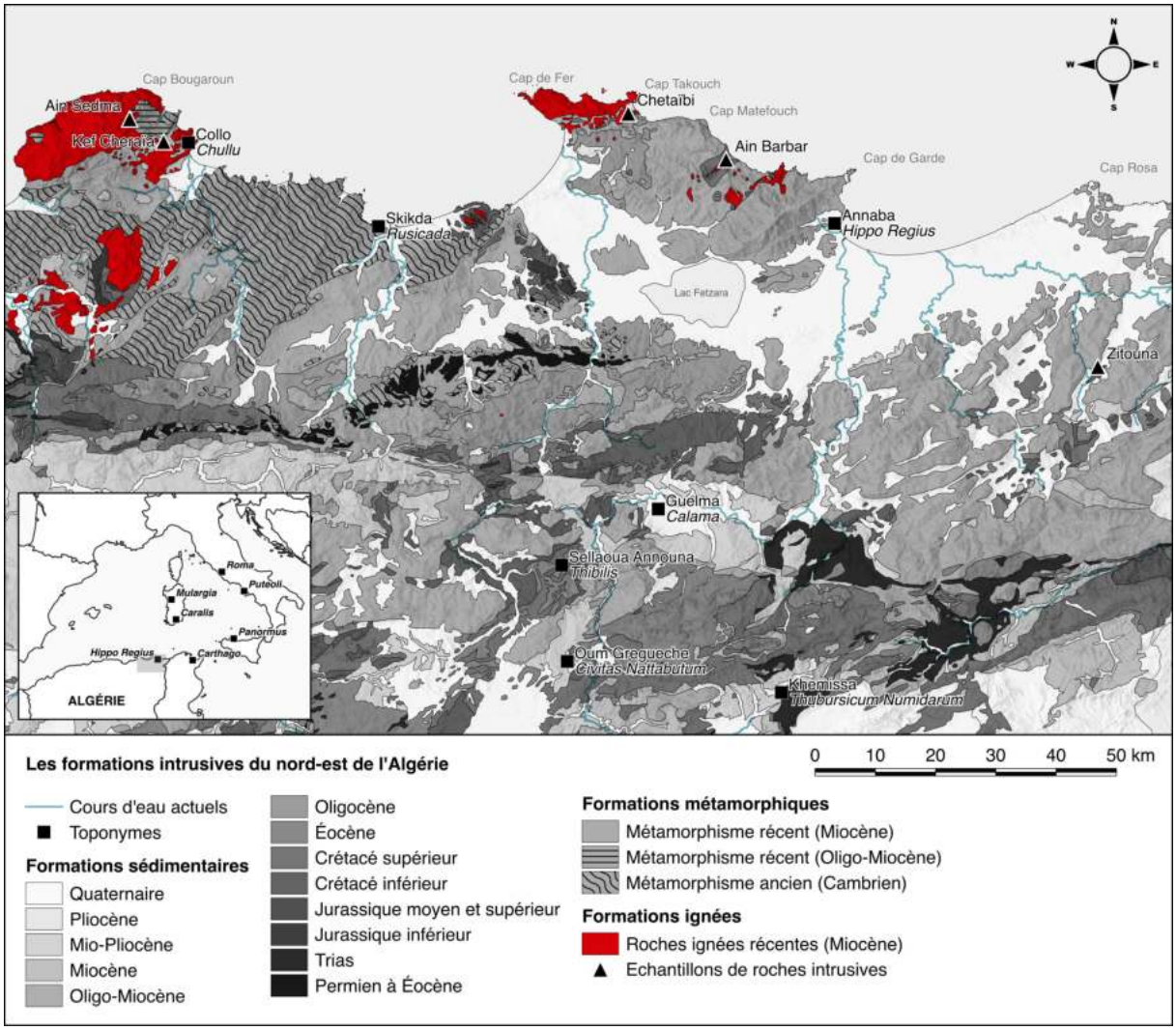

Figure 23 : Carte géologique schématique mettant en évidence les formations ignées du Néogène dans le nord-est de l'Algérie ainsi que la localisation des échantillons de roches volcaniques tertiaires (d'après Vila, 1980 ; Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016 ; Lakkaichi et Bouabsa, 2017)

Les échantillons de rhyolite provenant de ces filons présentent le plus souvent des textures microlitiques porphyriques, avec des inclusions de phénocristaux de quartz corrodés, des feldspaths alcalins et plagioclases, des cristaux de biotite, ainsi que de rares cristaux de zircon. En outre, ces roches contiennent d'autres phases minérales qui résultent de l'altération naturelle des biotites et des feldspaths plagioclases, telles que des chlorites, de la séricite, de l'épidote et de la calcite (Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016).

VI.2. La provenance de la pierre à chaux

Les artisans romains produisaient de la chaux vive en calcinant de la roche calcaire riche en carbonate de calcium ($CaCO_3$), à des températures comprises entre 830 et 1 100 °C, et ce, de manière continue pendant environ trois jours (Baradez, 1957). L'approvisionnement en pierres à chaux se faisait généralement depuis des gisements de calcaire se trouvant à proximité du chantier romain. Selon les prescriptions de Vitruve, le choix des pierres à chaux devait se faire parmi les pierres blanches et les roches solides (*De architectura*, II, 5, 1). D'après Caton l'Ancien, les pierres à chaux devaient être les plus blanches et les moins tachetées possible (*De re rustica*, XLIV, 1). L'examen du contexte géologique de la région d'*Hippo Regius* (fig. 21) nous a permis d'identifier des formations rocheuses qui sont susceptibles d'avoir été exploitées par les artisans romains pour produire de la chaux : il s'agit du marbre du cap de Garde, des affleurements de calcaires d'Aïn Kerma et des calcaires du massif du Bou Hamra.

VI.2.1. Le marbre du cap de Garde

Le marbre, qu'il provienne de carrières ou du recyclage de décors, fait partie des roches calcaires qui ont été exploitées pour produire de la chaux, principalement durant l'Antiquité tardive (Fichera et al., 2015 ; Lezzerini et al., 2016 ; Büttner, 2020b). Le *greco scritto* du cap de Garde constitue la source de calcaire la plus abondante qui se trouve à proximité de la cité d'*Hippo Regius*. Son transport étant facilité en raison de la proximité de la carrière avec le littoral, on retrouve à *Hippo Regius* de nombreux éléments de décors réalisés à partir de ce marbre (Antonelli et al., 2009 ; Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012b).

Toutefois, l'analyse pétrographique que nous avons effectuée n'a révélé aucun fragment de marbre partiellement calciné. En effet, les nodules de chaux partiellement calcinés que nous avons observés dans les échantillons de mortier de chaux se présentent sous la forme d'éléments bioclastiques. Il s'agit principalement de débris d'encroûtement de Rhodophycées et de Codiacées, de fragments squelettiques de mollusques (bivalves et lamellibranches), de gastéropodes, de tests d'échinodermes, ainsi que de foraminifères (*Orbitolina* et probablement *Trocholina*). De plus, la découverte de moellons présentant des traces de feu, identifiés comme des rebuts de pierre à chaux pendant les fouilles du « sondage T » (Morel, 1968), suggère que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* avaient vraisemblablement utilisé une roche calcaire sédimentaire plutôt qu'un calcaire métamorphique.

VI.2.2. Les affleurements de calcaires d'Aïn Kerma

Parmi les roches calcaires d'origine sédimentaire dont le faciès pétrographique correspond aux caractéristiques des nodules de chaux partiellement calcinés, on retrouve les formations priaboniennes à blocs d'Aïn Kerma (fig. 24). En effet, la composition de cette série de blocs remaniés, proche de celle des flyschs massyliens (Vila, 1980), présente une corrélation avec les éléments bioclastiques que nous avons identifiés dans les nodules de chaux partiellement calcinés qui sont présents dans les échantillons prélevés à *Hippo Regius*.

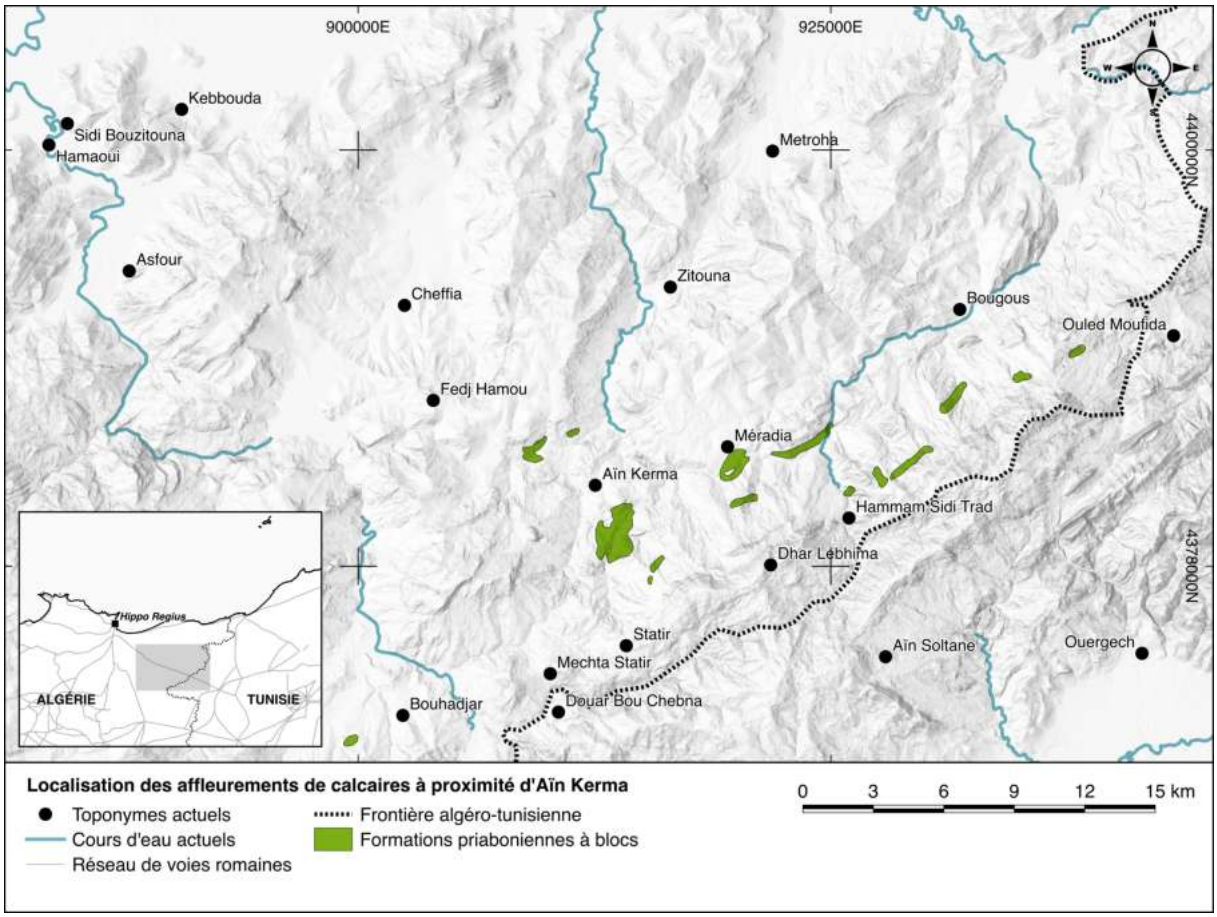

Figure 24 : Carte géologique schématique mettant en évidence les formations priaboniennes à blocs se trouvant à proximité d'Aïn Kerma (d'après Vila, 1980 ; McCormick et al., 2013)

Ces affleurements sont associés à la série ultra-tellienne, qui s'étend vers l'est de l'Algérie et prolonge la série tunisienne d'Aïn Draham (Rouvier, 1977). D'après les observations de Vila (1980), ces blocs sont de compositions et de faciès pétrographiques variés. Les calcaires massifs sombres sont graveleux et présentent des éléments oolithiques, des débris d'algues codiacées, de bryozoaires, d'échinodermes, de lamellibranches et de gastéropodes. Les biomicrites présentent des débris d'échinodermes, des sections d'ammonites, ainsi qu'une abondante variété de foraminifères (*Lagenida*, *Rosalina*, *Globigerina* et *Globotruncana*). En ce qui

concerne les oosparites, elles renferment des *Trochalina* et des *Epistomina*, tandis que les pelsparites contiennent des débris d'algues dasycladacées et des *Trochalina*. Un grand nombre de ces éléments bioclastiques ont été identifiés parmi les nodules de chaux partiellement calcinés, incluant des fragments d'algues, d'échinodermes, de gastéropodes, ainsi que des foraminifères (*Trochalina*). De plus, la présence de la voie romaine reliant *Hippo Regius* et *Simitthus*, qui traverse les affleurements de calcaires d'Aïn Kerma (fig. 31), renforce fortement l'hypothèse que les formations priaboniennes à blocs ont été exploitées par les artisans romains pour l'extraction de la pierre à chaux.

VI.2.3. Les calcaires du massif du Bou Hamra

Parmi l'ensemble des spécimens que nous avons analysés, l'échantillon de joint de carreaux de pilettes (BDX22411) qui provient de l'hypocauste des thermes du sud présente une matrice carbonatée de couleur marron (tab. 4), avec des inclusions d'oxydes de fer et des fragments de micaschiste à grenat. En se référant à l'étude géologique de la région présentée par Joleaud (1936), une concordance apparaît entre les propriétés du liant de l'échantillon BDX22411 et les caractéristiques des affleurements de calcaires des collines de Bou Hamra. En effet, ces formations calcaires, situées au sud du site archéologique d'Hippone, sont décrites par Joleaud comme étant riches en oxydes de fer et en contact avec des micaschistes grenatifères. De plus, certains de ces calcaires présentent des cassures remplies de calcite de recristallisation. Du côté des mamelons de Bou Hamra et d'Hippone, Joleaud (1936) signale la présence de concentrations en amas lenticulaires de magnétite (Fe_3O_4), d'ilménite ($FeTiO_3$) et de pyrite (FeS_2). Ainsi, ces données suggèrent que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* avaient la possibilité de se procurer localement de la pierre à chaux à partir des formations calcaires du massif du Bou Hamra, en plus des affleurements de calcaires d'Aïn Kerma. Le transport terrestre étant facilité par la proximité de la cité par rapport aux collines de Bou Hamra et d'Hippone.

VI.3. La provenance des sables

Les diverses formations sédimentaires, métamorphiques et ignées ont joué un rôle essentiel dans l'approvisionnement des dépôts détritiques quaternaires de la région géologique du nord-est de l'Algérie. En effet, ces formations rocheuses ont produit des sables de compositions et de formes variées. Parmi ces sables, on retrouve les sables éoliens qui forment le cordon dunaire littoral, s'étendant d'Annaba jusqu'à El Kala (*Tuniza*), les sables

alluvionnaires charriés par les cours d'eau, notamment ceux des bassins versants de l'Edough, de l'oued Seybouse et de l'oued Bou Namoussa (Joleaud, 1936), ainsi que les sables des plages actuelles qui font partie de l'ensemble cristallophyllien du massif de l'Edough (Chemam, 2018). La caractérisation pétrographique de la charge présente dans les échantillons de mortier de chaux prélevés à *Hippo Regius* a révélé la présence de quatre variétés de sables utilisées par les artisans de la cité : un sable calcaire composé de grains anguleux, ainsi que des sables silico-calcaires caractérisés par des grains anguleux, sub-anguleux et très émoussés.

VI.3.1. Le sable calcaire

Le sable calcaire est présent dans les spécimens du G01. Il a été employé uniquement dans la couche d'épiderme (BDX22400a) et dans la couche intermédiaire (BDX22400c) de l'échantillon d'enduit peint. Les composantes minéralogique et lithique de ce sable, constituées respectivement de monocristaux de calcite et de fragments de marbre, indiquent que ce sable est vraisemblablement dérivé du marbre du cap de Garde (fig. 25).

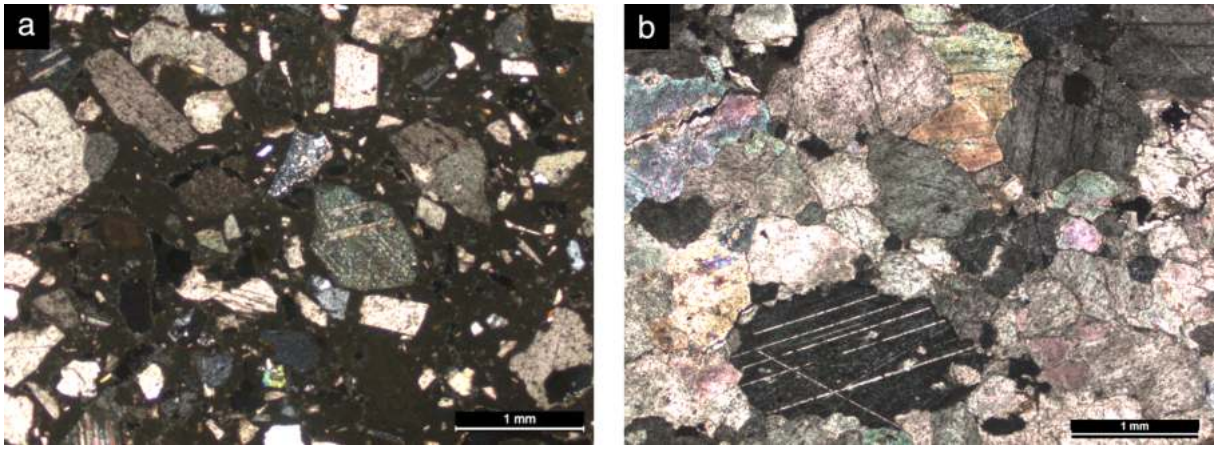

Figure 25 : Microphotographies en LPA montrant : (a) des cristaux de calcite constituant la charge dans le spécimen BDX22400c ; (b) un fragment de greco scritto présent dans le spécimen BDX22400d

La géométrie anguleuse des grains (fig. 25a) est similaire à celle des cristaux de calcite entrelacés (Antonelli et al., 2009) que l'on observe dans le fragment de *greco scritto* (fig. 25b). En outre, on retrouve dans ce sable des cristaux de calcite avec des macles polysynthétiques identiques à celles présentes dans le fragment de marbre. Ces observations attestent du concassage et du broyage des fragments de *greco scritto* par les artisans, dans le but d'obtenir de la poudre de marbre. Cette pratique étant commune à cette époque et conforme à la recommandation de Vitruve quant à la préparation des couches de finition des enduits peints (*De architectura*, VII, 3, 6), ainsi que le recyclage des éclats collectés à proximité des carrières de marbre (*De architectura*, VII, 6, 1).

VI.3.2. Les sables silico-calcaires

Nous avons distingué trois types de sables silico-calcaires dans les échantillons de mortier de chaux. Les spécimens des groupes G02 à G04 contiennent des sables à grains anguleux, ceux des groupes G05 à G08 présentent des sables à grains sub-anguleux, tandis que le spécimen du groupe G09 présente un sable à grains très émoussés.

VI.3.2.1. Les sables à grains anguleux

Des sables silico-calcaires à grains anguleux ont été repérés dans les plages actuelles de l'anse du Fort Génois et de la presqu'île du cap de Garde. Ces sables sont principalement composés de débris anguleux de schistes et de quartzites (Joleaud, 1936), qui proviennent de l'érosion du massif de l'Edough et de l'altération des roches se trouvant à proximité (Oularbi et Zeghiche, 2009). En effet, il a été démontré que les éléments calcaires présents dans ces sables proviennent de l'érosion des bancs de marbre associés à la roche schisteuse (Chemam, 2018) ainsi qu'à l'altération de la mollasse marine. En outre, Jouleaud (1936) mentionne que les éléments rocheux roulés sont relativement peu fréquents dans cette formation détritique. Ceci nous permet de considérer les plages de l'anse du Fort Génois et du cap de Garde comme des sources probables pour l'approvisionnement des artisans de la cité d'*Hippo Regius* en sables silico-calcaires. Par ailleurs, Chemam (2018) signale que la proportion des minéraux clairs tels que les quartz, les feldspaths et les carbonates est plus importante dans le sable de la plage actuelle d'Aïn Achir (la plus proche de la presqu'île du cap de Garde). Les sables des plages qui se trouvent dans la baie des Corailleurs étant composés principalement de minéraux lourds, tels que les grenats, les staurotides, les disthènes et les tourmalines.

VI.3.2.2. Les sables à grains sub-anguleux

Les spécimens des groupes G05 à G08 révèlent la présence de sables silico-calcaires à grains sub-anguleux, dont les composantes lithiques et minéralogiques sont similaires à celles des sables silico-calcaires à grains anguleux. Ces similitudes suggèrent que la matière détritique dans les deux types de sables provient de l'arénisation des roches métamorphiques et des roches ignées intrusives du massif de l'Edough. En outre, la forme sub-angulaire des cristaux suggère un charriage des grains par des cours d'eau, vraisemblablement à travers les bassins versants de l'Edough (Oularbi et Zeghiche, 2009). Cependant, nous ne parvenons pas à identifier avec certitude, à partir de la documentation géologique existante, les emplacements où l'on pourrait retrouver cette typologie spécifique de sables.

VI.3.2.3. Le sable à grains très émoussés

En ce qui concerne le sable silico-calcaires à grains très émoussés que nous avons identifié dans le spécimen du groupe G09 (BDX22388), celui-ci pourrait avoir été extrait aussi bien à partir des dunes côtières que des alluvions à proximité de la cité d'*Hippo Regius*. La composante lithique de ce sable comprend des fragments d'arénite quartzeuse, de siltite, de silex, ainsi que des lithoclastes granitiques et de rares fragments de marbre. Du côté minéralogique, on observe principalement des cristaux de quartz roulés, des feldspaths, ainsi que des éléments calcaires tels que des bioclastes et des cristaux de calcite qui présentent des formes très émoussées. Les sables des alluvions récentes du Néo-pléistocène sont principalement constitués de limons et de cailloux roulés (Joleaud, 1936). On retrouve ces sédiments au fond des vallées de l'Edough ainsi qu'au niveau des berges des nombreux cours d'eau, tels que La Seybouse, Bou Namoussa et La Cheffia. Quant aux séries de lignes de dunes qui s'étirent le long du littoral, Joleaud (1936) rapporte que celles-ci ont été alimentées pendant le Quaternaire par des dépôts éoliens. Ces sables sont formés principalement de grains de quartz et de débris de mollasse calcaire marine qui proviennent de la désagrégation lente et continue des grès de Numidie. En outre, un ensemble de calcaires marneux à silex a été signalé par Joleaud (1936) dans la série des grès numidiens. Ceci explique la présence de fragments de silex (calcédoine) dans la charge de l'échantillon BDX22388, renforçant ainsi l'hypothèse de l'exploitation des sables du cordon dunaire par les artisans de la cité d'*Hippo Regius*.

VI.4. La provenance de la pouzzolane naturelle

Les agrégats réactifs d'origine naturelle que nous avons identifiés dans douze échantillons de mortier de chaux (tab. 6) présentent des textures microlithiques aphanitiques à microgrenues porphyriques, ainsi que des structures qui sont propres aux roches volcaniques pyroclastiques. En effet, certains fragments de ponces sont constitués d'une matrice vitreuse avec des inclusions de microlithes feldspathiques (fig. 15a), alors que d'autres présentent un assemblage de phénocristaux de sanidine, accompagnés de rares cristaux de biotite, de clinopyroxène et de feldspath plagioclase (fig. 15c et 15d). L'examen du contexte géologique du nord-est de l'Algérie révèle l'existence de roches volcaniques datant du Néogène dans la région d'*Hippo Regius* (fig. 23). Ces roches affleurent ponctuellement à Zitouna, Chetaïbi (*Tacuata*), Aïn Barbar (Daif et Toubal, 2015), Aïn Sedma (Lakkaichi et Bouabsa, 2017) et Kef Cheraïa (Abbassene et al., 2016). Ainsi, ceci nous amène à considérer l'hypothèse de l'exploitation de ces filons rhyolitiques par les artisans de la cité d'*Hippo Regius*.

VI.4.1. L'hypothèse de la provenance locale

Les analyses pétrographiques des échantillons de rhyolite, qui affleurent dans l'environnement géologique du nord-est de l'Algérie (fig. 23), révèlent que ces roches présentent généralement des textures microlitiques porphyriques, comprenant des inclusions de phénocristaux de quartz, de feldspaths alcalins et de plagioclases, ainsi que des cristaux de biotite et occasionnellement des cristaux de zircon (Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016). En outre, les analyses géochimiques des échantillons de rhyolite qui proviennent du cap Bougaroun (Aïn Sedma et Kef Cheraïa) présentent des concentrations élevées en silice (SiO_2) qui varient de 74,93 à 76,70 % pds et de faibles teneurs en minéraux alcalins ($Na_2O + K_2O$), évaluées entre 7,26 et 7,81 % pds (Abbassene et al., 2016 ; Lakkaichi et Bouabsa, 2017). Les échantillons de rhyolite des filons qui affleurent entre le cap de Fer et le cap de Garde (Chetaïbi et Aïn Barbar) sont également caractérisés par des concentrations élevées en SiO_2, avec des valeurs comprises entre 74,00 et 79,80 % pds et de faibles concentrations en $Na_2O + K_2O$, avec des valeurs qui oscillent entre 6,68 et 9,43 % pds. Quant à l'affleurement de rhyolite localisé à proximité de Zitouna, les données géochimiques indiquent des concentrations similaires en SiO_2 qui se situent entre 71,60 et 77,90 % pds et des teneurs en $Na_2O + K_2O$ qui se situent entre 4,83 et 7,18 % pds (Daif et Toubal, 2015).

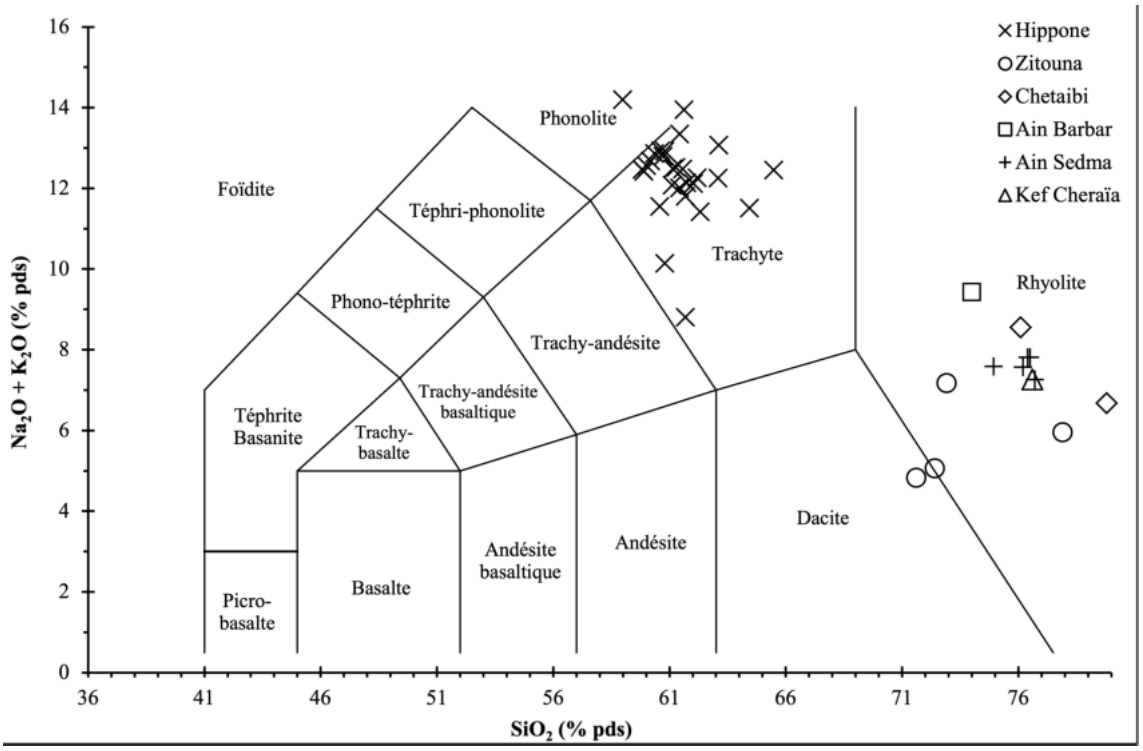

Figure 26 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux ainsi que les échantillons de rhyolite du nord-est de l'Algérie (d'après les données de Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016 ; Lakkaichi et Bouabsa, 2017)

Cependant, les teneurs en silice dans les agrégats réactifs (SiO_2 entre 58,98 et 65,48 % pds) sont inférieures aux teneurs mesurées dans les échantillons de la rhyolite locale (SiO_2 entre 71,60 et 79,80 % pds), tandis que les teneurs en minéraux alcalins (Na_2O + K_2O entre 8,81 et 14,20 % pds) sont supérieures aux teneurs mesurées dans la rhyolite locale (Na_2O + K_2O entre 4,83 et 9,43 % pds). La représentation des données relatives aux échantillons de rhyolite et aux agrégats réactifs identifiés dans les échantillons de mortier de chaux d'Hippone (tab. 7) sur le diagramme TAS (fig. 26) met clairement en évidence les différences dans leurs compositions géochimiques. En effet, les concentrations dans les échantillons de la rhyolite locale forment un nuage de points étendu sur les champs de la rhyolite et de la dacite, tandis que les concentrations dans les fragments pyroclastiques, qui constituent la pouzzolane naturelle, forment un nuage de points recouvrant principalement le champ du trachyte.

De plus, d'après les observations pétrographiques que nous avons réalisées, les agrégats de pouzzolane naturelle présentent des formes sub-émoussées à émoussées (tab. 6), ainsi que des textures pyroclastiques avec une microporosité élevée qui témoignent d'un refroidissement très rapide (Best, 2003). Ainsi, ces données nous amènent à considérer que les agrégats réactifs n'ont pas fait l'objet d'une extraction ni d'un broyage, mais qu'ils représentent plutôt des éjectas de matériel pyroclastique résultant d'une éruption volcanique explosive, infirmant l'hypothèse d'une provenance locale de la pouzzolane naturelle.

VI.4.2. L'hypothèse de l'importation

Après avoir écarté l'hypothèse d'une provenance locale, nous réorientons notre réflexion vers la possibilité que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* aient eu recours à une pouzzolane naturelle importée depuis une province volcanique caractérisée par des éruptions explosives, depuis *Baiae* et *Cumae* comme le suggère Vitruve (*De architectura*, II, 6, 2), ainsi que depuis *Puteoli* comme suggéré par Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXV, 47, 1).

Les îles Éoliennes, localisées dans la mer Tyrrhénienne, constituent la région volcanique la plus proche de la province romaine d'Afrique proconsulaire. Au sein de cette région, le volcan Stromboli est caractérisé par des éruptions explosives générant des téphras et des bombes volcaniques (Pichavant et al., 2011). Les produits volcaniques du Stromboli varient des laves basaltiques-andésitiques et des basaltes shoshonitiques aux laves trachytiques et aux dépôts volcanoclastiques. Ces derniers présentant des teneurs plus faibles en Na_2O et K_2O (Peccerillo, 2001) et une teneur en MgO plus élevée (Peccerillo, 2005a), en comparaison avec les données géochimiques des agrégats pouzzolaniques identifiés dans les échantillons de mortier de chaux d'*Hippo Regius* (fig. 27).

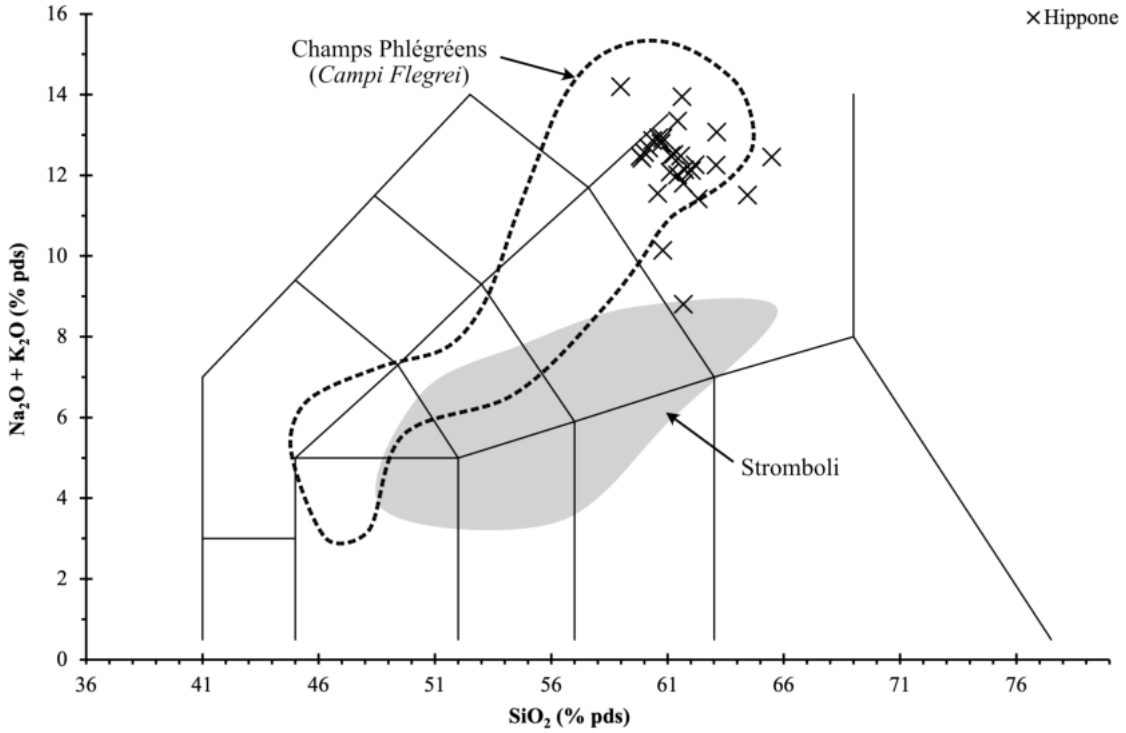

Figure 27 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux en comparaison avec les produits pyroclastiques des champs Phlégréens et les dépôts volcanoclastiques du Stromboli (données d'après Peccerillo, 2005a, 2005b ; D'Antonio et al., 2007 ; Peccerillo, 2020)

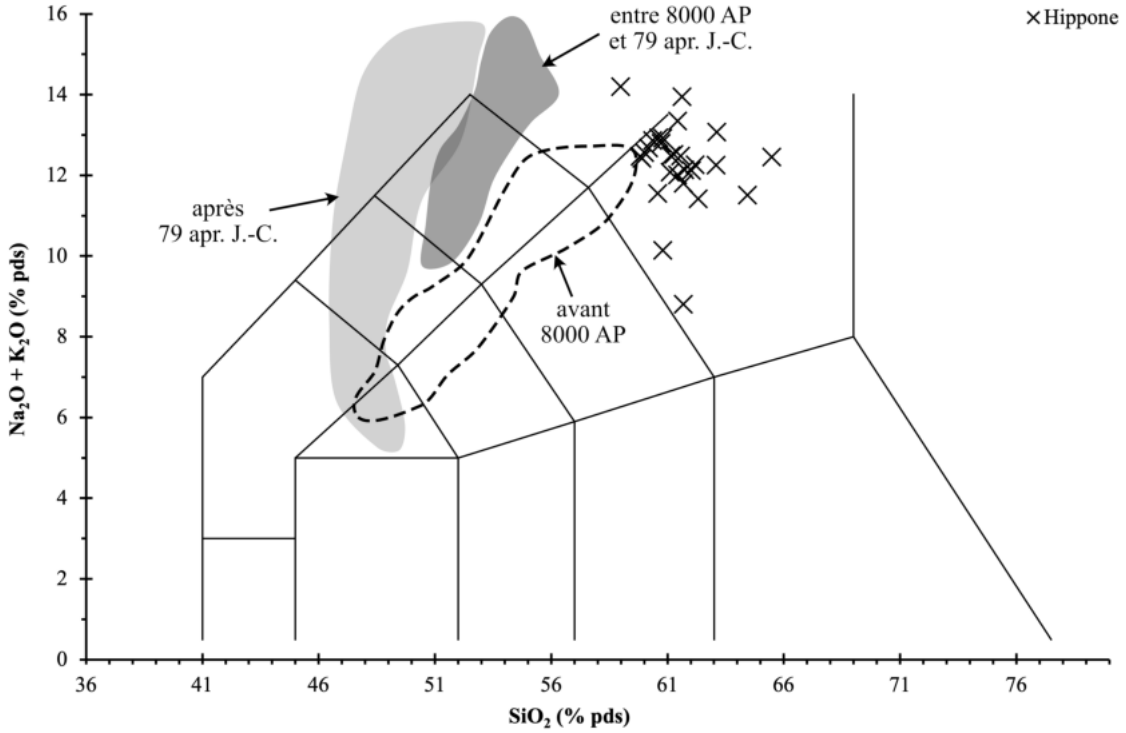

Figure 28 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux en comparaison avec la géochimie des produits pyroclastiques des trois principales éruptions du complexe Somma-Vésuve (données d'après Peccerillo, 2005b)

Plus au nord, la province magmatique campanienne (fig. 30) est également caractérisée par la présence de volcans aux éruptions explosives, tels que le complexe volcanique Somma-Vésuve et le supervolcan des champs Phlégréens (*Campi Flegrei*). La série des produits volcanoclastiques du Somma-Vésuve comprend du trachybasalte, de la trachyandésite basaltique, de la latite, du trachyte et de la trachyphonolite (Peccerillo, 2020). Cette série de roches est modérément sous-saturées en silice et présente des concentrations en SiO_2 comprises entre 47,33 et 60,15 % pds (Peccerillo, 2005b). Cependant, même si des fragments trachytiques sont présents parmi les produits volcaniques énumérés, la représentation sur le diagramme TAS (fig. 28) des données relatives aux agrégats réactifs identifiés dans les échantillons de mortier de chaux d'Hippone forme un nuage de points situé en dehors des champs de composition caractéristiques des produits pyroclastiques des trois principales éruptions du complexe Somma-Vésuve.

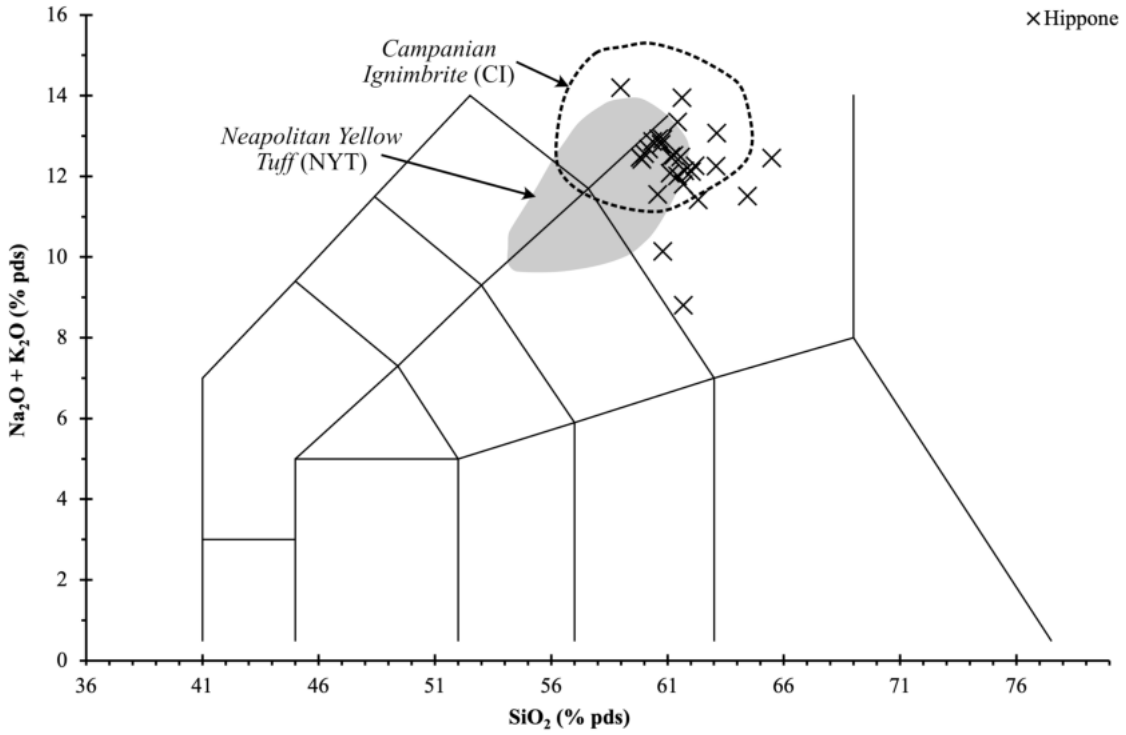

Figure 29 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux en comparaison avec les dépôts pyroclastiques du Neapolitan Yellow Tuff (NYT) et de l'éruption ignimbritique de Campanie (données d'après Peccerillo, 2005b)

En revanche, les données géochimiques des fragments pyroclastiques qui constituent la pouzzolane naturelle correspondent au profil géochimique des téphras produits par le supervolcan des champs Phlégréens (fig. 27). En effet, la représentation sur le diagramme TAS (fig. 29) des données relatives aux agrégats réactifs forme un nuage de points qui correspond aux profils géochimiques des téphras issus de l'éruption ignimbritique de Campanie (40000 à 39000 AP), ainsi que des dépôts pyroclastiques du *Neapolitan Yellow Tuff* (15000 AP).

Du point de vue pétrographique, les trachytes et phonolites des champs Phlégréens présentent des textures allant d'holocristallines à vitreuses, avec des inclusions de phénocristaux de feldspaths alcalins, ainsi que des cristaux de biotite, de plagioclase, de rares clinopyroxènes et amphiboles, et des oxydes de Fe-Ti (Peccerillo, 2005b). Ces éléments sont similaires aux caractéristiques pétrographiques observées dans les fragments pyroclastiques qui forment la pouzzolane naturelle dans nos échantillons de mortier de chaux (*cf.* chapitre V). En outre, les variations entre les rapports K_2O/SiO_2 et Na_2O/MgO dans la composition chimique des fragments pyroclastiques (Djerad et al., 2022) correspondent aux variations observées dans la géochimie du magma trachytique dont sont issus les téphras des événements explosifs de *Baia-Fondi di Baia* (Voloschina et al., 2018).

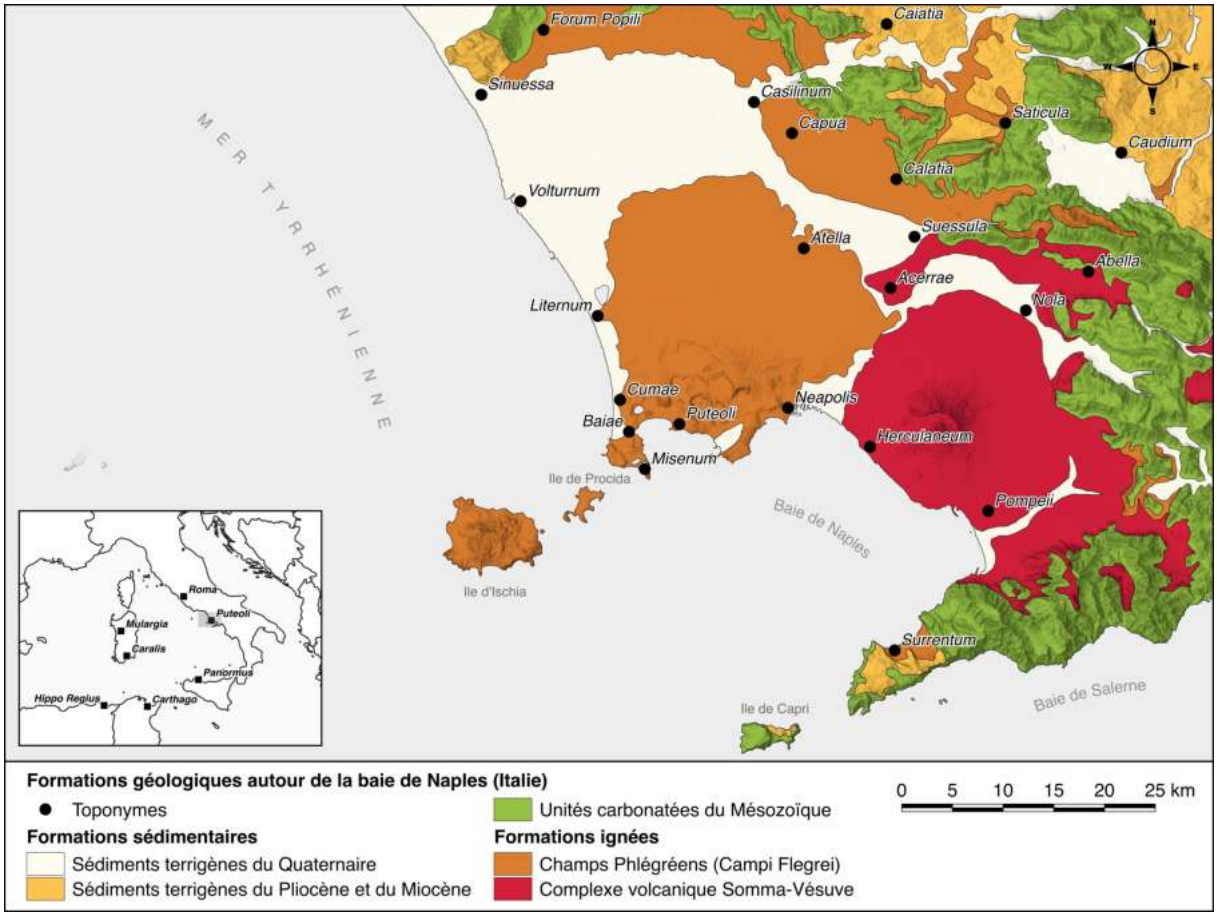

Figure 30 : Carte géologique schématique mettant en évidence les formations sédimentaires et ignées (dépôts pyroclastiques) de la région géologique autour de Naples (d'après Orsi et al., 1999 ; Talbert et Bagnall, 2000 ; Tomlinson et al., 2012 ; Peccerillo, 2020)

Ainsi, l'ensemble de ces données nous permettent de confirmer que la pouzzolane naturelle utilisée par les artisans de la cité d'*Hippo Regius* provient très probablement des champs Phlégréens, précisément des dépôts pyroclastiques qui se trouvent dans les environs de *Baiae*

et *Puteoli* (fig. 30). Cela étant conforme aux prescriptions de Vitruve (*De architectura*, II, 6, 2) et de Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXV, 47, 1).

VI.5. La provenance de la pouzzolane artificielle

À la différence de la pouzzolane naturelle, l'origine des fragments de céramique et de tuileau qui forment la pouzzolane artificielle dans nos échantillons de mortier de chaux ne peut être établie avec certitude. Lorsqu'elle est réduite en poudre ou utilisée sous forme de fragments de petit calibre, l'identification de l'origine des céramiques à l'origine de la pouzzolane artificielle devient complexe, voire impossible. Toutefois, lorsque les fragments sont de plus gros calibre, il devient possible d'identifier leurs caractéristiques pétrographiques afin de déterminer leur origine. Dans les mortiers romains, les tessons de céramique et les fragments de tuileau proviennent généralement du recyclage[41] d'objets en céramique, cuite entre 800 et 900 °C (Chakchouk et al., 2006). Il peut s'agir de terres cuites architecturales (TCA) comme les briques (*testae*) et les tuiles (*tegulae*), ainsi que de céramiques communes telles des ustensiles de cuisine, de la vaisselle, des poteries utilitaires, des amphores, des lampes à huile ou d'autres articles couramment utilisés dans la vie quotidienne (Lancaster, 2019).

VI.5.1. Les terres cuites architecturales

Les fragments de terres cuites architecturales de gros calibre sont présents dans environ 10 % des spécimens que nous avons analysés (*cf.* chapitre V). Il s'agit essentiellement de bétons de tuileau du groupe G08 dans lesquels la pouzzolane artificielle présente une teneur supérieure à 50 % dans le mélange. Les fragments de tuileau se caractérisent principalement par des formes angulaires à très angulaires, indiquant le concassage préalable effectué par les artisans de la cité d'*Hippo Regius*. L'analyse pétrographique des fragments de tuileau révèle une variété de faciès, indiquant l'utilisation d'argiles provenant de sources différentes dans la production des terres cuites architecturales. De plus, les dégraissants utilisés présentent des variations dans leurs compositions minéralogiques : certains correspondent à des sables silico-calcaires d'origine locale, tandis que d'autres correspondent à des sables riches en feldspaths plagioclases (fig. 394), qui ne semblent pas provenir des dépôts détritiques de la région.

[41] D'après Coutelas (2003), on peut aisément parler de « recyclage » étant donné que les tessons de céramique et les fragments de tuileau que l'on observe dans les mortiers romains présentent des caractéristiques pétrographiques variées. Si l'on considère l'éventualité d'un processus de fabrication spécifique de céramique destinée à être utilisée comme pouzzolane artificielle, une homogénéité dans le faciès pétrographique des fragments de tuileau apparaîtrait dans tous les échantillons de mortier, ce qui n'est généralement pas le cas.

VI.5.2. Les tessons de céramique

Les tessons de céramique de petite taille ainsi que la poudre de tuileau sont présents dans environ 70 % des spécimens analysés, notamment dans ceux des groupes G03, G04, G06 et G07. De façon similaire aux fragments de terres cuites architecturales, l'analyse pétrographique des tessons de céramique révèle une diversité de faciès, témoignant de l'utilisation d'argiles provenant de sources différentes dans leur fabrication. Les résultats de l'étude des céramiques d'Hippone nous offrent un ensemble d'éléments permettant d'expliquer la provenance des divers tessons. En effet, Morel (1965) rapporte que la céramique observée à Hippone « frappe par son extrême diversité ». Celle-ci étant particulièrement notable au cours des deux siècles qui précèdent l'introduction des céramiques sigillées italiques et gauloises. Les vases et les tessons qu'il a décrits témoignent de l'activité d'une cité maritime très ouverte aux influences et aux produits en provenance d'Italie. La plupart de la céramique importée date du IIIe siècle av. J.-C. (Morel, 1965). Elle est principalement issue de la « Campanienne A » qui est caractérisée par une pâte rougeâtre ou rougeâtre-marron, relativement pure.

Parmi les céramiques locales et régionales recensées par Morel, la « Campanienne de type D » d'Hippone figure parmi les plus abondantes. Elle est caractérisée par une pâte grise et un vernis noir, et est constituée d'une argile très dure et homogène. En outre, la céramique locale qui imite les formes de la « Campanienne B » est caractérisée par une argile généralement grise ou marron foncé, dure et grenue. Enfin, les céramiques à décor de filets peints, de production locale, se distinguent par la diversité des argiles utilisées, « généralement ocre et mal épurée, parfois blanchâtre et assez grossière, parfois enfin chamois-rosé et fine » (Morel, 1965). Ainsi, les nombreuses variétés de céramiques locales et importées qui ont été retrouvées à Hippone, témoignent non seulement de l'existence de nombreux ateliers de production de céramique dans la région, mais expliquent également la grande diversité des tessons de céramique et des fragments de terres cuites architecturales qui forment la pouzzolane artificielle et que nous observons dans les échantillons de mortier de chaux d'*Hippo Regius*.

VI.6. La provenance des tesselles de mosaïques

Les tesselles de mosaïques que nous avons examinées (*cf.* chapitre V) sont toutes issues de roches sédimentaires carbonatées qui présentent des microfaciès variés. Cependant, les caractéristiques pétrographiques de la plupart de ces tesselles ne présentent pas de concordances avec les caractéristiques des affleurements de calcaires de la région d'*Hippo Regius* (Joleaud, 1936 ; Vila, 1980). En revanche, en élargissant la comparaison aux tesselles de mosaïques

romaines ayant fait l'objet d'études de provenance (Raneri et al., 2017 ; Montana et al., 2018 ; Verità et al., 2019 ; Miletić et al., 2022), des correspondances apparaissent entre les tesselles des mosaïques polychromes d'*Hippo Regius* et les carrières antiques de roches calcaires connues en Afrique proconsulaire (fig. 31).

VI.6.1. Les tesselles de couleur noire

Les tesselles de couleur noire sont caractérisées par une texture à packstone-grainstone ainsi que par la présence d'une boue carbonatée incluant des foraminifères planctoniques. Ceci correspond aux *neri antichi* des carrières antiques de Djebel Oust, Djebel Azeiz, Thala (Tunisie) et particulièrement aux caractéristiques pétrographiques du « *nero antico* » d'Aïn el Ksir (fig. 31). La carrière d'Aïn el Ksir est localisée non loin de la cité de *Simitthus* et est traversée par la voie romaine reliant *Hippo Regius* à *Simitthus* et *Bulla Regia* (*cf.* chapitre III).

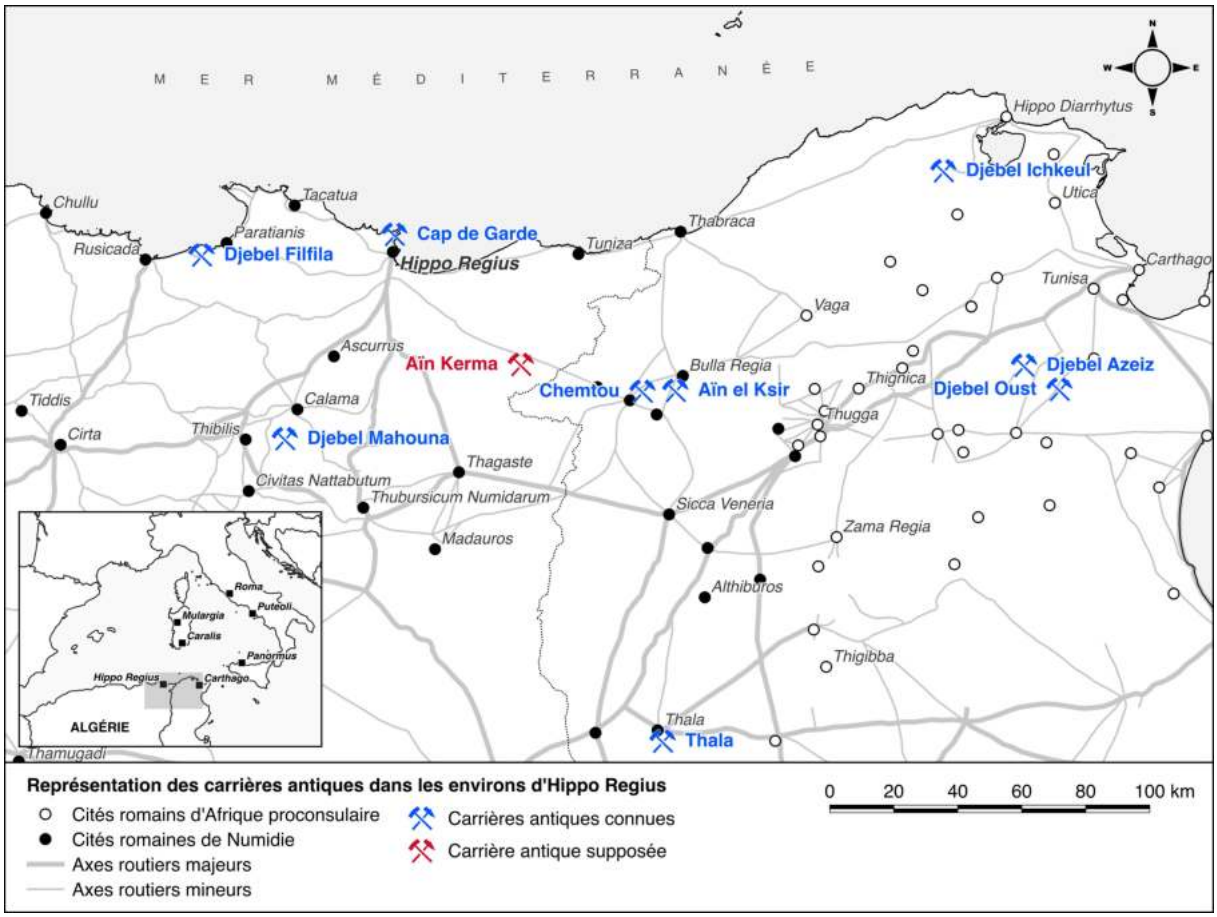

Figure 31 : Représentation des principales carrières antiques connues et supposées se trouvant dans les environs d'Hippo Regius et leur relation avec les voies romaines de l'Afrique proconsulaire (d'après Vila, 1980 ; Talbert et Bagnall, 2000 ; Brilli et al., 2010 ; Herrmann, Attanasio, et Tykot, 2012 ; Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012a ; McCormick et al., 2013 ; Fioretti et al., 2023)

Ce calcaire noir est caractérisé par une texture à grainstone ainsi que par la présence de boue carbonatée bitumineuse, avec des inclusions de foraminifères planctoniques et plus rarement par la présence de radiolaires calcitisés et de bivalves (Brilli et al., 2010).

VI.6.2. Les tesselles de couleur jaune

Les tesselles de couleur jaune sont caractérisées par une texture à grainstone présentant des inclusions de limonite (oxyde de fer hydraté) réparties au sein d'une matrice calcitique. Ces caractéristiques pétrographiques correspondent au *giallo antico* (*marmor numidicum*) de la carrière antique de Chemtou (*Simitthus*). En effet, ce « marbre » qui est en réalité une roche sédimentaire compactée par une diagenèse prononcée, présente le faciès d'un calcaire de couleur jaune, comprenant des agrégats de limonite et d'hématite (Verità et al., 2019 ; Fioretti et al., 2023). En outre, la présence du *giallo antico* de couleur jaune a déjà été confirmée à *Hippo Regius* par l'analyse isotopique d'un panneau découvert dans le quartier des *villae* du front de mer (Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012a).

VI.6.3. Les tesselles de couleur rouge

En ce qui concerne les tesselles de couleur rouge, elles présentent le faciès pétrographique d'une calcilutite avec la texture d'une microsparite. Elles se caractérisent par une matrice microsparitique comprenant de rares bioclastes et de très fins agrégats d'hématite (oxyde de fer). Les caractéristiques de ces tesselles correspondraient au *giallo antico* de couleur rouge qui était également exploité par les Romains depuis la carrière antique de Chemtou (Ling, 2015).

VI.6.4. les tesselles de couleur blanche

Quant aux tesselles de couleur blanche, elles semblent les seules à être issues des ressources géologiques locales. Leur faciès pétrographique est caractéristique d'une biomicrite, composée d'une abondance de bioclastes consolidés par un ciment carbonaté micritique. Ces caractéristiques correspondraient aux biomicrites à microfaune pélagique recensées par Vila (1980) à Djebel Safia (wilaya de Skikda), ainsi qu'aux biomicrites claires qu'il a identifiées à Aïn Kerma (fig. 31).

Conclusion

Les réflexions sur la provenance des matières premières employées par les artisans d'*Hippo Regius* pour produire du mortier de chaux nous ont permis de mettre en évidence de nombreuses sources d'approvisionnement. En effet, ces matières premières pouvaient être obtenues aussi bien à travers l'exploitation des ressources géologiques locales que par l'importation d'« ingrédients » qui n'étaient pas disponibles à proximité de la cité.

Pour produire de la chaux, les artisans d'*Hippo Regius* avaient accès à diverses formations de calcaires dans l'environnement géologique de la cité. Les affleurements de calcaires d'Aïn Kerma et les calcaires du massif du Bou Hamra ont probablement été exploités pour l'extraction de la pierre à chaux, tandis que le marbre du cap de Garde était privilégié pour les éléments de décors. Les éclats produits par la taille du *greco scritto* du cap de Garde étaient récupérés pour être broyés afin de produire de la poudre de marbre. En outre, les sables utilisés dans les mortiers romains d'Hippone proviennent essentiellement des ressources détritiques locales. Les sables silico-calcaires à grains anguleux proviendraient des plages actuelles de l'anse du Fort Génois et de la presqu'île du cap de Garde. Les sables silico-calcaires à grains sub-anguleux proviendraient des thalwegs et des bassins versants de l'Edough. Quant au sable silico-calcaire à grains très émoussés, il serait de nature éolienne et proviendrait du cordon dunaire qui s'étend d'Annaba jusqu'à El Kala. En ce qui concerne la provenance des pouzzolanes, il apparaît que les agrégats réactifs, qui constituent la pouzzolane naturelle utilisée dans les mortiers hydrauliques d'*Hippo Regius*, proviennent très certainement des dépôts pyroclastiques des champs Phlégréens qui se situent dans la région volcanique de Naples. Ces dépôts seraient des produits de l'éruption ignimbritique de Campanie (CI), de l'éruption du *Neapolitan Yellow Tuff* (NYT) et des évènements explosifs de *Baia-Fondi di Baia*. La pouzzolane artificielle est, quant à elle, issue de la récupération des terres cuites architecturales (TCA) ainsi que des objets en céramique provenant tant de productions locales qu'importées.

Enfin, l'analyse des tesselles de mosaïques suggère l'utilisation par les artisans romains d'une diversité de roches calcaires. Le calcaire noir (*nero antico*) proviendrait de la carrière antique d'Aïn el Ksir, les calcaires jaunes et rouges (*marmor numidicum*) proviendraient de la carrière antique de Chemtou, tandis que les tesselles blanches semblent provenir des affleurements de calcaires qui se situent dans l'environnement géologique d'*Hippo Regius*. L'ensemble de ces résultats impulse de nouvelles réflexions quant à la concordance des matières premières utilisées avec les prescriptions des auteurs anciens, ainsi que des réflexions sur le savoir-faire lié à la mise en œuvre du mortier par les artisans d'*Hippo Regius*.

Chapitre VII : Réflexions sur la chaîne opératoire et le savoir-faire

Introduction

Les observations réalisées sur la sélection des composants du mortier de chaux en relation avec son utilisation architecturale, ainsi que sur les proportions de chaux et de granulats dans le mélange (*cf.* chapitre V), fournissent des indices sur les connaissances techniques et le savoir-faire des artisans de la cité d'*Hippo Regius*. En outre, la classification des cinquante-cinq spécimens en fonction des caractéristiques de leurs constituants (tab. 8) met en évidence un rapport entre le choix des composants et l'utilisation architecturale du matériau. Cette corrélation fait écho aux prescriptions des auteurs anciens tels que Vitruve et Pline l'Ancien (*cf.* chapitre I). Toutefois, selon Frizot (1975), les recommandations faites par ces auteurs se retrouvent peu souvent dans la réalité archéologique. En effet, bien que les prescriptions et les « recettes » de Vitruve témoignent d'une forme de standardisation des matériaux de construction à son époque (Adam, 2011), il semblerait que les artisans romains étaient plus enclins à produire leurs matériaux de manière empirique. Ils utilisaient des matières premières essentiellement locales et adaptaient les recettes en fonction des contraintes du contexte géologique de leur région (Frizot, 1975 ; Büttner et Coutelas, 2011).

Ainsi, dans ce septième et dernier chapitre, nous abordons, en premier lieu, une tentative de reconstitution de la chaîne opératoire associée à la production du mortier de chaux à *Hippo Regius*. L'objectif étant de comprendre, à partir de l'étude de la culture matérielle, les différentes étapes de fabrication de ce matériau par les artisans de la cité, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa mise en œuvre. En second lieu, nous procédons à des comparaisons entre les divers types de mortiers que nous avons analysés et les « recettes » décrites par les auteurs anciens. Cette analyse comparative vise à vérifier la corrélation entre les recettes théorisées par des auteurs tels que Vitruve et Pline l'Ancien et la réalité des faits archéologiques que nous avons observés à *Hippo Regius*.

VII.1. La chaîne opératoire : un essai de reconstitution

La question de la chaîne opératoire se pose souvent, lorsqu'il s'agit d'étudier des matériaux anthropiques. Le mortier de chaux étant considéré comme la « mémoire du travail antique » (Coutelas, 2012), l'étude de ses différents constituants nous permet de reconstituer la chaîne opératoire et ainsi, d'appréhender les aspects du chantier antique. La chaîne opératoire associée à la production du mortier de chaux correspond à un processus englobant différentes phases, allant de l'extraction et du transport des matières premières souhaitées jusqu'à la mise en œuvre du matériau au sein des structures architecturales (DeLaine, 2021).

VII.1.1.1. La production de la chaux

Nous avons précédemment identifié les sources potentielles d'extraction de la pierre à chaux utilisée par les artisans de la cité d'*Hippo Regius* (*cf.* chapitre VI). En effet, les affleurements de calcaires blancs d'Aïn Kerma semblent avoir fourni d'importantes quantités de pierre à chaux, tandis que les calcaires du Bou Hamra auraient été exploités de manière ponctuelle par les artisans locaux. La question du transport de la pierre à chaux depuis son lieu d'extraction, ne se pose pas pour le massif du Bou Hamra étant donné que celui-ci se trouve à proximité, au sud de la cité d'Hippone. En revanche, les formations priaboniennes à blocs d'Aïn Kerma se situant à environ 50 km au sud-est d'Hippone (fig. 24), le transport de la pierre à chaux implique des coûts et une organisation logistique considérables.

Le tracé de la voie romaine qui aurait relié *Hippo Regius* et *Simitthus* (fig. 31) répond en partie à cette problématique du transport terrestre. Cependant, en ce qui concerne la gestion des coûts de transport, il est pertinent de se demander si les Romains transportaient de la pierre à chaux brute ou bien calcinée sous forme de chaux vive. En effet, les recherches sur les fours à chaux de *Tipasa* (Maurétanie césarienne) ont conduit à la découverte d'une série de fours à proximité du chantier de l'enceinte de la cité (Baradez, 1957). Au contraire, les conclusions de Coutelas (2003) et DeLaine (2021) s'orientent vers l'implantation préférentielle, des fours à chaux par les Romains, sur les sites d'extraction de la pierre à chaux[42]. Toutefois, en l'absence de mention de découverte de fours à chaux dans les rapports de fouilles d'Hippone[43], il nous est difficile d'affirmer si la calcination de la pierre à chaux était réalisée sur le lieu d'extraction,

[42] La décision des artisans romains d'installer les fours directement sur les sites d'extraction de la pierre à chaux avait pour objectif de réduire la masse volumique de la chaux vive, la rendant moins dense que la pierre à chaux. Cette stratégie visait à faciliter le transport et à réduire les coûts associés (DeLaine, 2021).

[43] En réalité, Amraoui (2017) interprète la description du « four de boulanger » telle que rapportée par Maitrot (1935) comme étant un four à chaux. Cependant, la localisation précise de cette structure dans le site archéologique d'Hippone demeure difficile à établir en se basant sur la description initiale de cette installation.

à Aïn Kerma, ou bien au sein de la cité. En outre, cette activité artisanale dépendait fortement de la présence de combustible dans l'environnement immédiat du lieu d'implantation des fours à chaux (Coutelas, 2003). En nous basant sur les travaux de Baradez (1957) et de Dix (1982), on peut estimer la durée d'un cycle de production de chaux entre douze et treize jours (*cf.* chapitre I). Le chargement de la pierre à chaux demande deux jours, la calcination nécessite entre trois et quatre jours, le refroidissement du calcaire calciné prend quatre jours et enfin, le déchargement de la chaux vive et son transport jusqu'à *Hippo Regius* requièrent deux à trois jours. Quant à l'extinction de la chaux vive, elle se faisait vraisemblablement dans la cité dès l'arrivée du chargement. En effet, il est peu probable, voire inconcevable, que les artisans de la cité aient stocké de la chaux vive, car ce produit est très sensible à l'humidité et réagit de manière violente au contact de l'eau (*cf.* chapitre I).

Les résultats des recherches de Loustaud (1983), de Coutelas (2005) et de DeLaine (2021) offrent la possibilité de reconstituer le processus d'extinction de la chaux vive par les artisans romains, même si les rapports de fouilles d'Hippone ne mentionnent pas la découverte de cuves présentant des résidus de chaux carbonatée. Ce procédé impliquait généralement l'utilisation de deux cuves (tab. 2). Une grande cuve, encastrée dans le sol et revêtue de *tegulae* sur les parois, avec un fond constitué d'une chape de mortier hydraulique, était dédiée à l'extinction en immergeant généreusement les blocs de chaux vive dans l'eau. Le mélange résultant était vigoureusement agité pour assurer une extinction et une fragmentation optimales. La chaux éteinte était ensuite transférée dans une petite cuve, destinée à affiner l'hydratation de la chaux. La mixture y était soigneusement brassée jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, prête à être stockée dans des amphores en vue de sa maturation, puis sa livraison sur les chantiers (DeLaine, 2021). Enfin, d'après la remarque de Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXVI, 55), il était préconisé de laisser maturer la chaux, une fois éteinte, pendant une période d'au moins trois ans avant qu'elle ne soit prête à être utilisée.

VII.1.1.2. La sélection des sables

Les sables naturels, employés dans la réalisation du mortier de chaux à *Hippo Regius*, proviennent des ressources géologiques locales (*cf.* chapitre VI). L'absence de particules terreuses ou argileuses (limons) dans les échantillons de mortiers analysés indique que les artisans de la cité lavaient préalablement les sables avant de les utiliser. De plus, le fait que des sables silico-calcaires à grains sub-anguleux à anguleux soient présents dans près de 95 % des spécimens analysés, témoigne de la rigueur avec laquelle les artisans effectuaient la sélection des sables. En effet, ces catégories de sables correspondent à ce que Vitruve désignait comme

le sable fossile ou « *harenae fossiciae* », selon lui, idéalement caractérisé par un crissement perceptible lorsqu'il est frotté dans la main (*De architectura*, II, 4, 1). Par ailleurs, plusieurs échantillons indiquent également la mise en œuvre d'un traitement granulométrique par criblage ou tamisage préalable des sables utilisés (tab. 8). Le recours à cette pratique, visant à éliminer les grains les plus grossiers (graviers), correspond à la recommandation de Vitruve lorsqu'il s'agissait d'utiliser de sables de rivières ou de bords de mer, en l'absence de l'« *harenae fossiciae* » ou sable de carrière (*De architectura*, II, 4, 2).

VII.1.1.3. L'importation de la pouzzolane

Les analyses pétrographiques et géochimiques réalisées sur les agrégats de pouzzolane naturelle (*cf.* chapitre VI) nous ont permis de démontrer que ce composant était importé par les artisans romains. En effet, les résultats nous permettent d'établir une corrélation entre la pouzzolane naturelle présente dans les échantillons de mortier de chaux d'*Hippo Regius* et la géochimie des événements explosifs des champs Phlégréens (Djerad et al., 2022), suggérant ainsi que la pouzzolane était importée depuis les environs de *Baiae*, de *Cumae* et de *Puteoli* (fig. 30). Les produits pyroclastiques de cette région étaient fréquemment utilisés par les Romains comme composants réactifs dans les enduits et les mortiers hydrauliques (Morra et al., 2010). En outre, la région de *Baiae* est mentionnée à deux reprises par Vitruve comme une source privilégiée d'approvisionnement en pouzzolane naturelle (*De architectura*, II, 6, 1-2).

La diffusion et le transport de la pouzzolane naturelle depuis la région volcanique de Campanie vers les cités de l'Empire romain, à travers la Méditerranée, sont étayés par les nombreuses conclusions[44] du projet de recherche ROMACONS (*cf.* chapitre II). Dans ce contexte méditerranéen, l'existence de connexions maritimes entre *Hippo Regius* et l'Empire romain, en particulier l'Italie, est attestée par la présence de fragments de céramique « Campanienne A » (Morel, 1965) d'une part et par la découverte d'au moins huit meules importées, dont quatre sont confectionnées à partir d'ignimbrite rouge probablement originaire de la région de *Mulargia* (Antonelli et al., 2014) d'autre part. En outre, il est avéré que la cité d'*Hippo Regius* abritait un port important pour l'exportation des différentes céréales de Numidie vers les cités de l'Empire romain (Stone, 2014). Les navires chargés de céréales en direction de l'Italie ne revenaient habituellement pas à vide. On suppose qu'ils effectuaient le voyage de retour avec du sable et des roches volcaniques utilisés comme lest, afin de stabiliser

[44] La diffusion de la pouzzolane naturelle attribuée à la région volcanique de Campanie est attestée par sa présence dans les structures en béton romain des ports de *Chersonasus*, *Soli-Pompeiopolis*, *Caesarea Palestinae* (Brandon et al., 2005 ; Stanislao et al., 2011 ; Vola et al., 2011). Cela témoigne de l'existence, à cette époque, d'un véritable réseau de commerce et de transport de la pouzzolane naturelle au sein de l'Empire romain.

le navire pendant la traversée (Hohlfelder, 1999). Ainsi, ceci nous amène à supposer que la pouzzolane naturelle était acheminée vers *Hippo Regius* dans des navires céréaliers, dans lesquels elle aurait été utilisée comme ballast. La navigation des bateaux par cabotage explique également la présence à *Hippo Regius*, des meules produites à partir d'ignimbrite rouge qui proviendrait de la région de *Mulargia*. Il est vraisemblable qu'une escale devait se faire en Sardaigne (fig. 30), probablement à *Caralis* ou *Nora*[45].

VII.1.1.4. Le recyclage de la céramique

Les observations pétrographiques nous ont permis d'identifier une grande variété de fragments de céramique et de terres cuites architecturales (TCA) provenant de productions aussi bien locales qu'importées. Parmi les produits importés en céramique, figurent en grande partie la céramique « Campanienne A » (Morel, 1965), les amphores hispaniques et italiques (Bonifay, 2005), ainsi que les nombreuses briques *bipedales* d'origine italique[46] qui ont été découvertes dans les hypocaustes des grands thermes du nord (Thébert, 2000). Selon les conclusions des recherches portant sur l'utilisation de la céramique en tant que pouzzolane artificielle dans le mortier de chaux (Chakchouk et al., 2006), il apparaît que la réactivité entre la céramique et le liant à base de chaux, dépend, de deux paramètres : la nature de l'argile employée et la température de cuisson de la céramique.

En effet, les artisans romains utilisaient principalement[47] deux types d'argiles : l'illitique et la kaolinique (Lancaster, 2019). L'étude expérimentale de Chakchouk (2006) révèle que les mortiers préparés avec des fragments de céramique à base d'argile illitique voient leur résistance augmenter lorsque l'argile est cuite à 650 °C, atteignant leur pic de résistance à une température de cuisson de 930 °C. En revanche, les mortiers préparés avec des fragments de céramique à base d'argile kaolinique atteignent leur résistance maximale à une température de cuisson de l'argile à environ 700 °C. Ceci indique que la céramique produite à partir d'une argile kaolinique s'avère être une pouzzolane plus efficace que celle produite avec une argile illitique. Par ailleurs, Lancaster (2019) signale que les céramiques élaborées à partir des deux types d'argiles perdent leur capacité à réagir avec le liant à base de chaux lorsqu'elles sont

[45] Les conclusions de l'étude récente des mortiers du temple romain de *Nora* (Dilaria, Previato, et al., 2023) fournissent de nouveaux éléments attestant de l'utilisation des dépôts pyroclastiques de la région volcanique de Campanie (Naples) en tant que pouzzolane naturelle, et ainsi de sa diffusion au sein du territoire de l'Empire.

[46] Selon Thébert (2000), les *bipedales* qui composent les pilettes supportant la *suspensura* des hypocaustes des grands thermes du nord portent le poinçon de la briqueterie Claudius Felix de Salerne dont les ateliers se trouvaient en réalité à Sousse (*Hadrumetum*) et à Carthage.

[47] D'après Lancaster (2019), la majorité des briques, tuiles, amphores et pots romains étaient élaborés à partir d'argile illitique, tandis que certains ustensiles de cuisine étaient fabriqués à partir d'argile kaolinique en raison de sa résistance accrue aux variations de température et aux chocs thermiques.

soumises à des températures plus élevées (au-delà de 1 000 °C), en raison de la modification de la structure de l'argile lors de la phase de vitrification. Il est clair que les artisans romains n'effectuaient pas une sélection aléatoire des déchets de céramique pour les utiliser comme pouzzolane naturelle. Leur choix était plutôt influencé à la fois par les caractéristiques spécifiques des objets en céramique et par la nature de l'argile utilisée dans leur fabrication.

Les fragments de céramique réutilisés comme tuileau, proviendraient principalement des déchets de briques, de tuiles, d'amphores et d'ustensiles de cuisine, généralement cuits à des températures comprises entre 800 et 900 °C. Ainsi, les ustensiles de cuisine en argile kaolinique présentaient le potentiel d'être d'excellentes pouzzolanes artificielles. Au contraire, les déchets de céramique sigillée, dont la température de cuisson se situe entre 1 050 et 1 100 °C, n'auraient pas été sélectionnés pour servir de pouzzolane artificielle en raison de leur faible réactivité avec la chaux.

VII.2. La mise en œuvre : entre théorie et pratique

Le savoir-faire romain lié à la mise en œuvre du mortier de chaux est perceptible à travers les traces de chantier que peuvent présenter les structures anciennes, ainsi qu'à travers les caractéristiques des échantillons de mortier de chaux. En effet, il existe, selon Coutelas (2011), une recette de mortier de chaux pour chaque utilisation architecturale : en d'autres termes, chaque fonction exige une composition spécifique, ou du moins un savoir-faire technique et une expertise très particuliers. Ainsi, l'analyse des divers échantillons de mortier de chaux (tab. 3), en tenant compte de leurs fonctions et en confrontant les résultats avec les prescriptions des auteurs anciens (*cf.* chapitre I), nous offre un aperçu des compétences pratiques et des connaissances spécifiques des artisans de la cité.

VII.2.1. Les mortiers de maçonnerie

Les échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les maçonneries (tab. 9) présentent des compositions hétérogènes qui témoignent de techniques de mise en œuvre différentes. En effet, on retrouve l'emploi des pouzzolanes naturelle et artificielle dans quelques échantillons (BDX22378, BDX22389 et BDX22408). L'ajout d'agrégats réactifs dans ces mortiers s'explique par la quête des artisans de la cité d'un matériau résistant et imperméable aux infiltrations d'eau. L'échantillon BDX22378 provient d'un mur situé à proximité des brise-lames qui protégeaient les *villae* du front de mer (Bélorgey, 1935b), tandis que les échantillons BDX22389 et BDX22408 proviennent respectivement des grands thermes du nord

et de la fontaine à la Gorgone. En outre, on remarque que les proportions entre la chaux et les granulats sont hétérogènes et varient entre 1:3 et 2:3. Cet intervalle, bien qu'il soit de sens commun pour les mortiers de maçonnerie (Frizot, 1975 ; Coutelas, 2003), ne correspond pas *stricto sensu* aux recommandations faites par Vitruve. Celui-ci préconise l'utilisation d'un mélange constitué d'un volume de chaux pour trois volumes de sable (1:3) en cas d'utilisation d'un sable de carrière et d'un volume de chaux pour deux volumes de sable (1:2) en cas d'utilisation d'un sable de rivière ou de sable marin (*De architectura*, II, 5, 1).

Identifiant	**Groupe**	**Rapport**	**Sable**	**Pouzzolane naturelle**	**Pouzzolane artificielle**
BDX22378	G06	1:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	< 1%	< 1%
BDX22383	G02	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	-	-
BDX22388	G09	1:3	Silico-calcaire à grains très émoussés	-	-
BDX22389	G03	2:3	Silico-calcaire à grains anguleux	5%	10%
BDX22391	G06	2:5	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	3%	-
BDX22393	G07	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	5%
BDX22408	G06	2:5	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	20%	< 1%
BDX22410	G04	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	-	< 1%

Tableau 9 : Caractéristiques des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les structures romaines en maçonnerie se trouvant dans la cité d'Hippo Regius

Dans la catégorie des mortiers de maçonnerie, on retrouve également les joints de carreaux de pilettes (BDX22395, BDX22406 et BDX22411) qui servaient de support à la dalle de *suspensura* des hypocaustes. Ces échantillons présentent des compositions homogènes et appartiennent au groupe G07. Ils sont constitués d'un mélange de chaux, de sable silico-calcaire à grains anguleux et de pouzzolane artificielle, avec des teneurs comprises entre 10 et 40 %.

En outre, le choix porté par les artisans de la cité pour le calcaire du Bou Hamra, riche en limons et en oxydes de fer, que l'on retrouve dans la composition du mortier de maçonnerie BDX22411, peut être interprété comme une recherche délibérée pour obtenir un matériau réfractaire qui devait résister aux températures élevées (Bouet, 2003), auxquelles ce mortier pouvait être exposé dans les hypocaustes des thermes du sud.

VII.2.2. Les revêtements de sol

Parmi les revêtements de sol réalisés avec du mortier de chaux, on retrouve à *Hippo Regius* des supports de dallages et des supports de mosaïques, ainsi que des revêtements en *opus signinum* réalisés avec du béton de tuileau.

VII.2.2.1. Les supports de dallages

Les échantillons BDX22394 et BDX22407 appartiennent au groupe G08 et proviennent respectivement de la dalle de *suspensura* des grands thermes du nord, qui sert également de support aux dalles de marbre et du support de dallage en marbre du *macellum*. Ces revêtements correspondent à la technique de l'*opus signinum* et présentent une composition à base de chaux, de fragments de terres cuites architecturales (TCA) de gros calibre et d'une charge silico-calcaire en faible quantité. Quant à l'échantillon BDX22399, il appartient au groupe G06 et provient de la piscine froide des grands thermes du nord. Ce mortier présente un mélange à base de chaux, d'une charge silico-calcaire et d'inclusions de pouzzolane naturelle et artificielle.

L'utilisation de ce type de revêtement est cohérente face aux charges et à la chaleur que devait supporter la dalle de *suspensura*. En outre l'incorporation de pouzzolane naturelle par les artisans de la cité dans le support de dallage de la piscine froide (BDX22399) s'explique par la nécessité d'obtenir un mortier hydraulique assurant l'étanchéité du revêtement. L'ajout de pouzzolane artificielle dans le support de dallage du *macellum* (BDX22407) répond au même impératif d'étanchéité du sol, compte tenu de la fréquence des lavages à grande eau dans ce type de structure (Marc, 2012).

VII.2.2.2. Les supports de mosaïques

Au cours de notre étude des échantillons de mortier provenant des structures romaines d'*Hippo Regius*, nous avons examiné quatre échantillons de supports de mosaïques : BDX22385, BDX22386, BDX22401 et BDX22403.

Identifiant	Groupe	Rapport	Sable	Pouzzolane artificielle	Épaisseur (mm)
BDX22385a	G02	2:1	Silico-calcaire à grains anguleux	-	9
BDX22385b	G04	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	10%	7
BDX22385c	G04	2:5	Silico-calcaire à grains anguleux	5%	10
BDX22386a	G05	1:4	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	2
BDX22386b	G05	2:1	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	6
BDX22386c	G07	1:2	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	20%	4
BDX22386d	G07	2:5	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	1%	15
BDX22401a	G02	2:1	Silico-calcaire à grains anguleux	-	6
BDX22401b	G02	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	-	8
BDX22401c	G04	2:5	Silico-calcaire à grains anguleux	5%	16
BDX22403a	G05	2:1	Silico-calcaire à grains anguleux	-	7
BDX22403b	G07	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	20%	13
BDX22403c	G07	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	40%	34

Tableau 10 : Caractéristiques des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les supports de mosaïques se trouvant dans le site archéologique d'Hippone

La mise en œuvre des supports de mosaïques (tab. 10) correspond à la stratigraphie des couches spécifiques aux mosaïques romaines (tab. 1). En effet, les quatre échantillons présentent une superposition de couches, principalement les *rudus*, *nucleus* et les lits de pose, qui sont identiques à celles décrites par Vitruve (*De architectura*, VII, 1, 3) dans son chapitre sur les revêtements de sol. En termes de composition, les lits de pose (BDX22385a, BDX22386b, BDX22401a et BDX22403a) présentent un mélange composé de deux volumes de chaux pour un volume de granulat (2:1). La prédominance de la chaux dans cette proportion peut s'expliquer par la nécessité d'obtenir une pâte plastique, facilitant l'insertion progressive des tesselles. Les couches du *nucleus* (BDX22385b, BDX22386c, BDX22401b et BDX22403b) présentent un mélange de chaux et de granulat avec des rapports variant entre 1:3 et 1:2, tandis que les couches du *rudus* (BDX22385c, BDX22386d, BDX22401c et BDX22403c) présentent un mélange de chaux et de granulat avec des rapports variant entre 1:3 et 2:5. En outre, la présence de pouzzolane artificielle dans toutes les couches de préparation indique que des activités liées à l'eau se déroulaient dans les espaces où ces mosaïques étaient installées[48].

Cependant, bien que l'ordre stratigraphique et la composition des couches correspondent aux recommandations de Vitruve, les épaisseurs des couches de préparation dans les échantillons étudiés sont inférieures à celles qu'il préconise (tab. 1). En effet, les épaisseurs des couches constituant le *nucleus* varient entre 4 et 13 mm, tandis que Vitruve recommande une épaisseur supérieure à six doigts (environ 11 cm). De même, les couches formant le *rudus* présentent des épaisseurs comprises entre 10 et 34 mm, alors que Vitruve recommande une épaisseur d'au moins neuf pouces (environ 23 cm).

VII.2.2.3. Les sols en *opus signinum*

Les revêtements de sol en béton de tuileau sont présents, notamment dans la pièce B4 des *villae* du front de mer et dans la salle e4 du groupe d'habitation du quartier chrétien (groupe E). Les échantillons BDX22382 et BDX22405, prélevés depuis ces revêtements de sol, révèlent un mélange constitué de deux volumes de chaux pour cinq volumes de granulat (2:5). Cette proportion correspond à la recommandation de Vitruve pour la mise en œuvre de la couche de *rudus* avec du granulat « recyclé » (*De architectura*, VII, 1, 3). Par ailleurs, le choix de ce type de revêtement est cohérent avec la fonction architecturale de la pièce B4 qui est attenante à la grande salle B3, qui présente les caractéristiques de l'*oecus* (Lavergne, 2005a) et

[48] Les échantillons de supports de mosaïques BDX22385 et BDX22386 proviennent des mosaïques qui recouvrent les sols des pièces C1 et B7 qui appartiennent aux bains privés des *villae* du front de mer, tandis que les échantillons BDX22401 et BDX22403 ont été prélevés depuis les mosaïques qui ornent les sols des salles D1 et C de l'ensemble baptismal.

qui était probablement destinée à accueillir des banquets. Il était donc nécessaire de pouvoir la nettoyer à grande eau après les repas. Ce choix est également en accord avec les fonctions suggérées pour les salles du groupe E, auquel appartient la salle e4. Cet ensemble de salles aurait abrité une teinturerie à la pourpre ainsi qu'un atelier de foulon, selon Marec (1958) ou encore un atelier de salaison de poissons, selon Amraoui (2018). Ce dernier serait antérieur à l'implantation de la grande basilique et de l'ensemble baptismal.

VII.2.3. Les supports de placages muraux

Des restes de supports de décors pariétaux en marbre sont observables dans la grande salle B3 des *villae* du front de mer, identifiée comme l'*oecus* de la villa (Lavergne, 2005a), ainsi que dans la piscine froide dallée de marbre des grands thermes du nord. L'analyse des échantillons BDX22380 et BDX22381, provenant de ces supports, révèle que les artisans d'*Hippo Regius* possédaient une expertise et une maîtrise des techniques de pose des placages, conformes aux pratiques répandues dans l'architecture romaine. En effet, bien que les auteurs anciens ne décrivent pas explicitement[49] la méthode de mise en œuvre des supports de placages (Barataud, 2022), on retrouve dans ces deux supports l'emploi d'un mélange à base de chaux, de sable et de pouzzolanes.

L'échantillon BDX22381 est remarquable étant donné qu'il présente l'emploi d'une technique de pose similaire à celle décrite par Ball (2002). Celle-ci se caractérise par l'usage de cales concaves en terre cuite (fig. 67) qui sont insérées dans le support en mortier de chaux, afin de faciliter l'ajustement de la plaque de marbre lors de la pose. D'un autre côté, l'incorporation de pouzzolane naturelle, dans les différentes couches de l'échantillon BDX22381, témoigne de la compréhension par les artisans de la cité de l'influence de ce composant sur l'accélération du processus de prise du mortier en l'absence de dioxyde de carbone (Cinzia et al., 2011).

VII.2.4. Les revêtements hydrauliques

Dans la catégorie des revêtements hydrauliques, on retrouve une série de bétons (BDX22404 et BDX22409), de mortiers (BDX22396 et BDX22398) et d'enduits (BDX22379, BDX22384, BDX22387, BDX22397 et BDX22402) destinés à garantir l'étanchéité, voire l'imperméabilité des structures romaines auxquelles ils étaient destinés.

[49] D'après Barataud (2022), seul Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXVI, 6-9) fait référence aux variétés de marbre utilisées à Rome, ainsi qu'à « l'art de découper le marbre en plaques », c.-à-d. la technique de placage réalisée en *opus sectile*. Toutefois, aucune description détaillée sur la mise en œuvre de cette technique n'est fournie par cet auteur.

Identifiant	Groupe	Rapport	Sable	Pouzzolane naturelle	Pouzzolane artificielle
BDX22379a	G07	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	20%
BDX22379b	G07	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	10%
BDX22384a	G04	2:3	Silico-calcaire à grains anguleux	-	20%
BDX22384b	G04	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	-	1%
BDX22387a	G06	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	< 1%	3%
BDX22387b	G06	1:2	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	3%	10%
BDX22396	G07	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	20%
BDX22397a	G06	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	1%	20%
BDX22397b	G07	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	10%
BDX22398	G06	2:3	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	5%	10%
BDX22402a	G04	2:3	Silico-calcaire à grains anguleux	-	30%
BDX22402b	G04	2:5	Silico-calcaire à grains anguleux	-	10%
BDX22404	G08	2:5	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	> 50%
BDX22409	G08	2:5	Silico-calcaire à grains sub-anguleux	-	> 50%

Tableau 11 : Caractéristiques des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les ouvrages hydrauliques se trouvant dans le site archéologique d'Hippone

En termes de composition, tous les échantillons d'enduits sont constitués de deux couches. Les couches de préparation révèlent un mélange constitué de chaux et de granulat, avec des rapports qui varient entre 1:3 et 2:3, tandis que les couches de finition présentent un mélange avec un rapport essentiellement situé autour de deux volumes de chaux pour trois volumes de granulat (tab. 11). Les échantillons de mortiers présentent tous le même rapport de deux volumes de chaux pour trois volumes de granulat (2:3). Quant aux échantillons de bétons de tuileau, ils présentent un rapport de deux volumes de chaux pour cinq volumes de granulat (2:5). Ce rapport est conforme avec la « recette » recommandée par Vitruve (*De architectura*, VIII, 6, 14) pour l'étanchéification des citernes. La présence de pouzzolane artificielle est commune à tous les échantillons, tandis que ceux provenant des grands thermes du nord incluent également de la pouzzolane naturelle, importée depuis les dépôts pyroclastiques des champs Phlégréens (*cf.* chapitre VI). Ceci témoigne d'une part, de la connaissance par les artisans de la cité des propriétés réactives des pouzzolanes et de leur capacité à rendre hydraulique le mortier de chaux. D'autre part, l'utilisation de la pouzzolane naturelle, principalement dans les grands thermes du nord, qui ont été érigés aux frais de la cité et dédiés à l'empereur Septime Sévère (*cf.* chapitre III), souligne la volonté de construire des structures publiques durables selon les normes romaines consignées par Vitruve (*De architectura*, II, 6, 1).

VII.2.5. Les enduits de protection

Parmi les enduits analysés, on retrouve les deux échantillons BDX22390 et BDX22392 qui proviennent des enduits de protection qui recouvrent l'intérieur des *praefurnia* des hypocaustes, qui se trouvent dans la structure des grands thermes du nord. Ces revêtements comprennent deux couches distinctes : une couche de préparation et une couche de finition, toutes les deux appartenant au groupe G07. Elles consistent en un mélange composé d'un liant à base de chaux, de sable silico-calcaire et de fragments de céramique de petit calibre, avec des teneurs comprises entre 5 et 30 %. Ce type de revêtement n'est pas explicitement évoqué par les auteurs anciens, bien qu'il soit fréquemment observé dans les structures de chauffe (Coutelas et Büttner, 2009j). Dans ce contexte, l'utilisation de la pouzzolane artificielle s'explique par les propriétés réfractaires offertes par la présence d'alumine (Al_2O_3) dans la céramique.

VII.2.6. L'enduit de décoration

En ce qui concerne l'échantillon d'enduit peint BDX22400, prélevé depuis la face intérieure du chevet de la grande basilique, la remarquable méthode de mise en œuvre qu'il présente est conforme aux recommandations de Vitruve et de Pline l'Ancien pour la réalisation des enduits peints. En effet, la mise en œuvre de cet enduit se distingue par la qualité d'exécution, observable à travers des transitions relativement lisses entre les différentes couches (fig. 291), ainsi qu'à travers leurs épaisseurs décroissantes (tab. 12).

Identifiant	Groupe	Rapport	Sable	Pouzzolane artificielle	Épaisseur (mm)
BDX22400a	G01	2:1	Calcaire à grains anguleux	-	1,6
BDX22400b	G04	2:3	Silico-calcaire à grains anguleux	1%	5,4
BDX22400c	G01	1:4	Calcaire à grains anguleux	-	7
BDX22400d	G04	1:3	Silico-calcaire à grains anguleux	< 1%	20

Tableau 12 : Caractéristiques des couches constituant l'échantillon d'enduit peint BDX22400

Ces caractéristiques témoignent du soin apporté par les artisans, en procédant au battage et au lissage des couches successives, au fur et à mesure de la prise, et ce, conformément aux recommandations de Vitruve (*De architectura*, VII, 3, 6-7). En outre, la couche de préparation (*rinzaffo*) mesure environ 20 mm d'épaisseur et présente un mélange constitué d'un volume de chaux pour trois volumes de sable silico-calcaire. La couche intermédiaire (*arricio*) mesure 7 mm d'épaisseur et renferme un mélange composé d'un volume de chaux pour quatre volumes de sable calcaire, obtenu par le broyage du marbre (*cf.* chapitre VI). La couche de finition (*intonaco*) mesure quant à elle 5,4 mm d'épaisseur et présente un mélange constitué de deux

volumes de chaux pour trois volumes de sable silico-calcaire. Enfin, la couche d'épiderme (*intonachino*) mesure 1,6 mm d'épaisseur et comprend un mélange constitué de deux volumes de chaux pour un volume de poudre de marbre[50]. D'après les observations rapportées par Marec (1958), cet enduit fait partie de panneaux de fresques composées de « zigzags bleus et verts » cherchant à reproduire l'aspect des veinures du marbre. De plus, l'observation en cathodoluminescence révèle une concentration élevée en carbonate de calcium dans la couche d'épiderme (fig. 307). Cela peut résulter aussi bien du lissage de l'enduit qui entraîne la remontée en surface de l'eau chargée d'hydroxyde de calcium (Treilhou, 2012), que de l'application d'un badigeon au lait de chaux (Baraldi et al., 2006). En effet, l'incorporation de la poudre de marbre seule ne suffit pas à assurer la fixation des pigments à l'enduit. Il est possible que les artisans aient appliqué un badigeon au lait de chaux à la surface de la couche d'épiderme afin d'accélérer la fixation des pigments par carbonatation. Ce procédé expliquerait la concentration élevée en carbonate de calcium dans la couche picturale et témoigne de la compréhension par les artisans de l'importance de la carbonatation pour garantir une fixation optimale des pigments et conférer à l'enduit l'éclat du marbre.

Ainsi, l'ensemble de ces caractéristiques correspondent aux prescriptions de Vitruve (*De architectura*, VII, 3, 5-7) et de Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXVI, 55), à l'exception du nombre de couches constituant l'enduit. En effet, Vitruve préconise la mise en œuvre de sept couches, comprenant trois couches de préparation, trois couches de finition et une couche d'épiderme, tandis que Pline l'Ancien en suggère cinq, avec trois couches de préparation et deux couches de finition.

Conclusion

Les réflexions sur la chaîne opératoire et le savoir-faire nous ont permis de mettre en évidence les compétences techniques des artisans de la cité d'*Hippo Regius*, ainsi que leurs connaissances des normes romaines en vigueur concernant la mise en œuvre du mortier de chaux. En effet, la variété des mortiers de chaux et des recettes utilisées reflète la compréhension approfondie des artisans, des caractéristiques intrinsèques des matériaux employés, ainsi que leur aptitude à ajuster les recettes en fonction de l'architecture des lieux où les enduits et les mortiers devaient être appliqués.

[50] L'étude récente concernant l'intégration de la poudre de marbre en tant que granulat principal dans la préparation du mortier de chaux a dévoilé qu'une telle pratique entraînait une diminution significative des propriétés mécaniques du mortier par rapport à l'utilisation d'un sable ordinaire (Lezzerini et al., 2022). Ainsi, il est possible d'affirmer que l'utilisation de la poudre de marbre par les artisans romains était principalement motivée par des considérations esthétiques, visant à reproduire l'éclat caractéristique du marbre.

Dans l'essai de reconstitution de la chaîne opératoire, il apparaît que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* préféraient extraire de la pierre à chaux depuis les formations de calcaires d'Aïn Kerma qui se situent à environ 50 km plutôt que d'exploiter les filons de calcaires qui se trouvent à proximité, dans le massif du Bou Hamra. Ceci témoigne du soin apporté par les artisans à la sélection de calcaires pour produire une chaux aérienne qui corresponde à qualité mentionnée par Caton l'Ancien (*De re rustica*, XLIV, 1) et Vitruve (*De architectura*, II, 5, 1). Il apparaît également que la sélection des sables était conditionnée par les caractéristiques sonores de ces derniers. Les sables employés pour la charge dans les mortiers que nous avons étudiés, étant majoritairement à grains anguleux à sub-anguleux, correspondent à la prescription de Vitruve « […] le meilleur est celui qui crisse quand on le frotte dans la main […] » (*De architectura*, II, 4, 1 ; traduit par Callebat). Par ailleurs, les résultats des recherches que nous avons menées sur la provenance de la pouzzolane naturelle (Djerad et al., 2022) indiquent qu'elle était vraisemblablement importée des environs de Baïes, Cumes et Pouzzoles. Ces localités sont citées à la fois par Vitruve (*De architectura*, II, 6, 2) et par Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXV, 47, 1) pour la qualité de la pouzzolane qui s'y trouve.

Pour finir ce travail de recherche, nous avons tenu à vérifier la concordance entre les prescriptions des auteurs anciens et les constatations archéologiques relatives à l'utilisation du mortier de chaux. À travers l'ensemble des échantillons de mortier de maçonnerie, des revêtements de sol, des supports de placages muraux, des revêtements hydrauliques, des enduits de protection et de l'enduit de décoration, il apparaît clairement que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* exploitaient savamment leurs ressources géologiques locales et pouvaient même recourir à l'importation pour obtenir des matières premières qui n'étaient pas disponibles dans les environs de la cité. Ainsi, les différences mineures que nous avons constatées dans la mise en œuvre des mortiers, notamment les variations dans les proportions entre le liant et le granulat ou encore les différences dans le nombre de couches de préparation et de finition des enduits, ne semblent pas être le produit d'expérimentations empiriques, mais résultent plutôt d'une forme d'interprétation par les artisans de la cité. En effet, les recettes énoncées dans les traités de Vitruve et de Pline l'Ancien sont les reflets d'un savoir-faire « idéal » et de pratiques conformes aux « normes romaines » qui étaient principalement appliquées à Rome. Les recettes des mortiers que nous avons étudiés correspondent principalement aux normes romaines en ce qui concerne la sélection de composants qui répondent aux exigences architecturales (résistance, hydraulicité, esthétique, *etc*.), tout en présentant des techniques spécifiques de mise en œuvre propres aux artisans de la cité d'*Hippo Regius*.

Conclusion

Conclusion et perspectives

À travers cette thèse, nous avons cherché à évaluer dans quelle mesure les artisans de la cité d'*Hippo Regius* étaient influencés par les « normes romaines » énoncées dans les traités d'auteurs anciens, tels que ceux de Caton l'Ancien, de Vitruve et de Pline l'Ancien qui abordent les techniques de préparation et de mise en œuvre du mortier de chaux. Notre objectif était d'acquérir une compréhension approfondie des « recettes » de mortier de chaux adoptées par les artisans de cette cité romaine, ainsi qu'à reconstituer la chaîne opératoire associée à sa préparation et à sa mise en œuvre.

Au fil de nos recherches, il est devenu évident que l'hypothèse suggérant une forme d'appropriation des recettes « idéalisées » par les auteurs anciens était la plus vraisemblable. Cette conclusion découle des résultats de la caractérisation archéométrique des échantillons de mortier de chaux provenant du site archéologique d'Hippone, ainsi que des réflexions engagées sur l'origine des matières premières, la chaîne opératoire et le savoir-faire des artisans. Les diverses analyses archéométriques, incluant la pétrographie, la cathodoluminescence et la microscopie électronique à balayage couplée à la spectrométrie à dispersion d'énergie, ont mis en évidence une appropriation par les artisans de la cité des préceptes énoncés dans les traités, lesquels étaient principalement mis en œuvre dans l'Italie romaine. Cette appropriation se manifeste à la fois par des variations dans les dosages entre la chaux et le granulat, ainsi que par le nombre et l'épaisseur des couches de préparation et de finition de certains supports. Parallèlement, elle se reflète dans la sélection de matières premières visant à garantir une qualité aussi conforme que possible aux normes de la construction romaine.

En effet, bien que les recommandations portant sur le choix des matières premières se fondent essentiellement sur des concepts subjectifs tels que l'appréciation visuelle et tactile des matériaux (Frizot, 1975), il est apparu à travers nos recherches que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* employaient des matières premières provenant à la fois des ressources géologiques locales et d'importations. Le choix des roches calcaires d'Aïn Kerma pour produire de la chaux aérienne répond aux critères visuels relatifs à la qualité de la pierre à chaux posés par Caton l'Ancien (*De re rustica*, XLIV, 1) et Vitruve (*De architectura*, II, 5, 1). Les sables à grains anguleux et sub-angulaires employés pour la charge, répondent aux critères sensoriels énoncés par Vitruve (*De architectura*, II, 4, 1) tandis que la préparation de la poudre de marbre, à partir du *greco scritto* du cap de Garde, est en accord avec la recommandation de Vitruve (*De architectura*, VII, 6, 1). Aussi, les téphras employés en tant que pouzzolane naturelle,

provenant des dépôts pyroclastiques des champs Phlégréens (Djerad et al., 2022), répondent aux préceptes formulés par Vitruve (*De architectura*, II, 6, 2) et par Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXV, 47, 1) qui préconisent l'utilisation de cendres volcaniques se trouvant dans les environs de Baïes, Cumes et Pouzzoles afin d'améliorer la résistance et l'hydraulicité du mortier de chaux. De même, l'incorporation de la chaux vive lors de la préparation du mortier par les artisans de la cité, attestée par la présence de nodules de chaux non mélangés, semble correspondre à une pratique répandue dans le monde romain (Seymour et al., 2023).

Ainsi, il est ressorti de l'ensemble de ces résultats, que les artisans de la cité d'*Hippo Regius* connaissaient et maîtrisaient, à la fois, les normes romaines de la construction en vigueur en Italie romaine, ainsi que les caractéristiques intrinsèques et les propriétés des matières premières qu'ils employaient pour la préparation du mortier de chaux. Cela écarte toute forme de raisonnement pointant vers une adaptation des recettes au contexte géologique local en utilisant des matières premières de substitution. En outre, les légères variations observées dans les proportions des constituants, ainsi que dans les épaisseurs et le nombre de couches de préparation et de finition des enduits, écartent également, l'idée de pratiques artisanales « standardisées » et de l'observation stricte de la norme romaine régissant la construction sur le site archéologique d'Hippone.

Les réflexions engagées sur la chaîne opératoire et le savoir-faire des artisans de la cité d'*Hippo Regius* nous ont permis d'élargir la discussion du point de vue anthropologique. En effet, étant implantée dans une région relativement éloignée du centre du pouvoir romain, il est très probable que la cité ait conservé les influences de l'héritage culturel numide et punique au sein de sa population, même pendant la période de romanisation, comme cela a été constaté dans d'autres régions de l'Empire romain (Secco et al., 2020). Compte tenu de la maîtrise du savoir-faire romain par les artisans de la cité, il est évident qu'une transmission de ces compétences a dû se produire dès l'élévation de la cité au rang de colonie honoraire en passant sous l'administration romaine, après avoir évolué depuis le statut de municipe romain.

Cependant, l'exécution de certaines techniques dans la mise en œuvre du mortier de chaux suggère que les artisans n'étaient pas uniquement des autochtones. Il est plausible qu'il y ait également eu la présence d'artisans étrangers spécialisés dans des domaines spécifiques tels que la pose de pavements de mosaïque (*structores*) ou encore la réalisation d'enduits peints (*tectores*). En effet, les nombreux schémas iconographiques et représentations (tapis géométriques, paysages maritimes, *xenia*, scène de chasse, *etc*.) qui apparaissent dans les mosaïques polychromes d'*Hippo Regius* renvoient à un corpus de décors commun aux provinces africaines. Les similarités avec les motifs des mosaïques romaines produites par les

ateliers de Lambèse, Timgad et Carthage ainsi que certains décors de l'Italie centrale, précisément de Rome et d'Ostie (Blanchard-Lemée, 2005), pointent vers l'existence d'ateliers de mosaïstes itinérants à travers les cités africaines de l'Empire romain. La présence de tesselles calcaires provenant de la carrière antique d'Aïn el Ksir (*nero antico*) et de la carrière antique de Chemtou (*marmor numidicum*) dans les mosaïques d'*Hippo Regius*, renforce l'hypothèse de leur utilisation par des mosaïstes itinérants. De même que la technique et la qualité d'exécution de l'enduit peint de la grande basilique, excluent totalement, l'idée d'un artisanat fruste qui aurait simplement adapté ses techniques aux conditions locales. L'incorporation de la poudre de marbre dans les couches de finition de cet enduit est conforme aux préceptes formulés par Vitruve (*De architectura*, VII, 3, 6) et par Pline l'Ancien (*Naturalis historia*, XXXVI, 55). Ce résultat fait émerger la possibilité qu'une équipe de *tectores* se soit déplacée depuis l'Italie jusqu'à *Hippo Regius* pour mettre en œuvre cet enduit peint au niveau de la grande basilique.

Par ailleurs, au-delà de la révélation du savoir-faire des artisans de la cité, lié à la préparation et à la mise en œuvre du mortier de chaux, l'étude de ce matériau a également, permis d'aboutir à une expression stratigraphique qui ressort particulièrement, à travers la structure des grands thermes du nord. En effet, l'étude des mortiers de cette structure, érigée aux frais de la cité entre 211 et 217 apr. J.-C., a mis en évidence l'emploi de sables silico-calcaires présentant des grains anguleux, sub-angulaires et très émoussés. Ces résultats offrent un aperçu de la chronologie relative des maçonneries de cette structure et permettent de discerner au moins deux phases distinctes de construction. Ils donnent également, des indications sur l'organisation du chantier de ce programme monumental, suggérant la présence d'au moins deux équipes distinctes de *structores*.

Malgré le nombre réduit d'échantillons de mortier de chaux que nous avons analysés, cette thèse nous a permis d'inscrire la cité antique d'*Hippo Regius*, ainsi que, dans un contexte plus large, d'intégrer l'Afrique romaine, dans la dynamique des recherches sur le mortier de chaux et le savoir-faire associé à sa production. L'une des contributions que nous avons apportées à travers nos recherches réside dans la compréhension des caractéristiques des constituants et l'identification de l'origine des matières premières. Cela offre aux conservateurs du site archéologique d'Hippone, de nombreuses informations sur les diverses recettes employées par les artisans de la cité, permettant de considérer la réalisation de travaux de restauration. En outre, les conclusions tirées des réflexions sur l'origine des matières premières, en particulier la pouzzolane naturelle, représentent une avancée significative dans la compréhension de la circulation des matériaux au sein de l'Empire romain. Cela met en évidence l'exportation de la pouzzolane vers la province d'Afrique proconsulaire, soulignant

qu'il s'agissait d'un commerce plutôt que d'une série d'acquisitions spécifiques pour des chantiers publics liés à des installations portuaires (*cf.* chapitre II), comme démontré par le groupe de recherche ROMACONS. Il s'agit davantage d'une matière première disponible à l'achat pour la construction de diverses structures telles que des thermes publics, des fontaines ou même des aménagements de *villae*. Ainsi, les nombreuses prescriptions énoncées dans les traités d'auteurs anciens tels que Vitruve et Pline l'Ancien semblent désormais, pertinentes et transposables à des contextes environnementaux autres que ceux caractéristiques de l'Italie romaine.

En conclusion, ce travail de thèse marque le début de recherches prometteuses autour de la question du mortier de chaux dans les diverses provinces de l'Afrique du Nord, dans lesquelles de très nombreuses études sur les mortiers romains restent à mener. Le potentiel archéologique mis en évidence dans de nombreux sites de l'Algérie appelle à multiplier les recherches, en particulier pour évaluer le degré d'intégration des matières premières importées par les artisans romains dans les structures locales, notamment en ce qui concerne la pouzzolane naturelle. À l'échelle du site archéologique d'Hippone, la poursuite des recherches sur le mortier de chaux est souhaitable en vue de réaliser des reconstructions stratigraphiques des structures romaines. Cette approche, similaire à celle récemment suggérée par Gheris (2023), permettrait notamment la datation relative de certaines structures à l'aide du mortier de chaux. Parallèlement, il serait opportun d'initier des fouilles archéologiques visant à identifier la possible existence de fours à chaux au sein de la cité. La mise au jour de ces fours nous offrirait l'opportunité d'évaluer, de manière similaire à l'analyse réalisée par Baradez (1957), les volumes de chaux produits par les artisans et la durée d'activité des fours en corrélation avec les chantiers voisins, ainsi que de préciser davantage l'origine de la pierre à chaux en cas de résidus subsistants au niveau de la sole des fours. Enfin, il serait pertinent d'envisager la réalisation d'une étude expérimentale, visant à reproduire en laboratoire des échantillons de mortier selon les recettes et les techniques de mise en œuvre que nous avons reconstituées. L'objectif serait d'évaluer des paramètres que nous n'avons pas pris en compte dans notre recherche, comme les propriétés mécaniques, la quantité d'eau de gâchage, *etc*. Aussi, il serait également essentiel d'examiner la durabilité de ces échantillons en utilisant un processus de vieillissement accéléré afin de déterminer les « recettes » les plus adaptées au contexte du site archéologique d'Hippone devant servir à de potentiels travaux de restauration.

Bibliographie

Sources anciennes

Caton l'Ancien. (1975). *De l'agriculture*, texte établi, traduit et commenté par Raoul Goujard, Paris : Les Belles Lettres.

Diodore de Sicile. (2018). *Bibliothèque historique*, tome XV : livre XX, texte établi, traduit et commenté par Cécile Durvye, Paris : Les Belles Lettres.

Pline l'Ancien. (1981). *Histoire naturelle*, livre XXXVI, texte établi par Jacques André, traduit par Raymond Bloch, commenté par Agnès Rouveret, Paris : Les Belles Lettres.

Pline l'Ancien. (1985). *Histoire naturelle*, livre XXXV, texte établi, traduit et commenté par Jean-Michel Croisille, Paris : Les Belles Lettres.

Pontius, Paulinus, et Possidius. (2012). *Vita di Cipriano, Vita di Ambrogio, Vita di Agostino*, textes édités par Christine Mohrmann, traduits par Luca Canali, et Carlo Carena, commentés par Antoon A. R. Bastiaensen, Verona : A. Mondadori.

Procope de Césarée. (2019). *La Guerre contre les Vandales : Guerres de Justinien* (livres III et IV), préface par Philippe Muray, texte traduit et annoté par Denis Roques, illustrations par Léopold Prudon, Paris : Les Belles Lettres.

Salluste. (2003). *La Conjuration de Catilina. La Guerre de Jugurtha*, texte établi et traduit par Alfred Ernout, Paris : Les Belles Lettres.

Strabon. (1967). *Géographie*, tome III : livres V et VI (Italie-Sicile), texte établi et traduit par François Lasserre, Paris : Les Belles Lettres.

Strabon. (2014). *Géographie*, tome XV : livre XVII, 2e partie (L'Afrique, de l'Atlantique au golfe de Soloum), texte établi et traduit par Benoît Laudenbach, commenté par Jehan Desanges, Paris : Les Belles Lettres.

Théophraste. (2018). *Les pierres*, texte établi, traduit et commenté par Suzanne Amigues, Paris : Les Belles Lettres.

Tite-Live. (1994). *Histoire romaine*, tome XIX : livre XXIX, texte établi et traduit par Paul François, Paris : Les Belles Lettres.

Vitruve. (1973). *De l'architecture*, livre VIII, texte établi et traduit par Louis Callebat, Paris : Les Belles Lettres.

Vitruve. (1990). *De l'architecture*, livre I, texte établi, traduit et commenté par Philippe Fleury, Paris : Les Belles Lettres.

Vitruve. (1995). *De l'architecture*, livre VII, texte établi et traduit par Bernard Liou et Michel Zuinghedau, commenté par Marie-Thérèse Cam, Paris : Les Belles Lettres.

Vitruve. (1999). *De l'architecture*, livre II, texte établi et traduit par Louis Cabellat, avec les contributions de Catherine Jacquemard et de Pierre Gros, Paris : Les Belles Lettres.

Vitruve. (2009). *De l'architecture*, livre V, texte établi, traduit et commenté par Catherine Saliou, Paris : Les Belles Lettres.

Bibliographie générale

Abbassene, F., Chazot, G., Bellon, H., Bruguier, O., Ouabadi, A., Maury, R. C., … Monié, P. (2016). A 17 Ma onset for the post-collisional K-rich calc-alkaline magmatism in the Maghrebides: Evidence from Bougaroun (northeastern Algeria) and geodynamic implications. *Tectonophysics*, *674*, pp. 114-134. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.013

Adam, J.-P. (2011). *La construction romaine : Matériaux et techniques* (6e éd.). Paris : Picard.

Ahmad Bany Yaseen, I., Al-Amoush, H., Al-Farajat, M., et Mayyas, A. (2013). Petrography and mineralogy of Roman mortars from buildings of the ancient city of Jerash, Jordan. *Construction and Building Materials*, *38*, pp. 465-471. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.022

Alföldi, A. (1938). La grande crise du monde romain au IIIe siècle. *L'Antiquité Classique*, *7*(1), pp. 5-18. https://doi.org/10.3406/antiq.1938.3063

Amara, A. (2018). Bône. Dans G. Buti, É. Malamut, M. Ouerfelli, et P. Odorico (Éds), *Entre deux rives* (pp. 195-222). Aix-en-Provence : Presses universitaires de Provence. https://doi.org/10.4000/books.pup.46305

Amraoui, T. (2017). *L'artisanat dans les cités antiques de l'Algérie : Ier siècle avant notre ère-VIIe siècle après notre ère*. Oxford : Archaeopress.

Amraoui, T. (2018). L'évolution de l'urbanisme en Afrique et l'implantation des ateliers entre le Ier s. Avant notre ère et la fin de l'Antiquité. *Antiquités africaines*, (54), pp. 95-114. https://doi.org/10.4000/antafr.923

Antonelli, F., Columbu, S., de Vos Raaijmakers, M., et Andreoli, M. (2014). An archaeometric contribution to the study of ancient millstones from the Mulargia area (Sardinia, Italy) through new analytical data on volcanic raw material and archaeological items from Hellenistic and Roman North Africa. *Journal of Archaeological Science*, *50*, pp. 243-261. https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.016

Antonelli, F., Lazzarini, L., Cancelliere, S., et Dessandier, D. (2009). Minero-petrographic and geochemical characterization of 'Greco Scritto' marble from cap de Garde, near Hippo Regius (Annaba, Algeria). *Archaeometry*, *51*(3), pp. 351-365. https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00408.x

Arizzi, A., et Cultrone, G. (2012). The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: The relationship between textural and physical–mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, *42*(6), pp. 818-826. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.008

Artioli, G., Secco, M., et Addis, A. (2019). The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world. Dans G. Artioli et R. Oberti, *The Contribution of Mineralogy to Cultural Heritage* (pp. 151-202). McLean : Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. https://doi.org/10.1180/emu-notes.20.4

Ball, L. F. (2002). How did the Romans install revetment? *American Journal of Archaeology*, *106*(4), pp. 551-573. https://doi.org/10.2307/4126216

Baradez, J. (1957). Nouvelles fouilles à Tipasa : Les fours à chaux des constructeurs de l'enceinte. *Libyca*, *5*, pp. 277-294.

Baraldi, P., Bonazzi, A., Giordani, N., Paccagnella, F., et Zannini, P. (2006). Analytical characterization of Roman plasters of the ‘ *Domus Farini* ’ in Modena*. *Archaeometry*, *48*(3), pp. 481-499. https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2006.00268.x

Barataud, L. (2022). *Les placages de marbre des édifices publics d'époque romaine : L'étude du complexe monumental d'Excisum à Villeneuvesur-Lot (Lot-et-Garonne) et des monuments de la province d'Aquitaine* (Thèse de doctorat). Université Bordeaux Montaigne, Pessac.

Barsoum, M. W., Ganguly, A., et Hug, G. (2006). Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the Great Pyramids of Egypt. *Journal of the American Ceramic Society*, *89*(12), pp. 3788-3796. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01308.x

Baylet, P. (1962). Le mont Pappua. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *38*, pp. 65-103.

Belfiore, C. M., Fichera, G. V., La Russa, M. F., Pezzino, A., Ruffolo, S. A., Galli, G., et Barca, D. (2015). A multidisciplinary approach for the archaeometric study of pozzolanic aggregate in Roman mortars: The case of Villa dei Quintili (Rome, Italy). *Archaeometry*, *57*(2), pp. 269-296. https://doi.org/10.1111/arcm.12085

Bellot-Gurlet, L., et Dillmann, P. (2019). Introduction. Dans C. Benech, N. Cantin, M.-A. Languille, A. Mazuy, L. Robinet, et A. Zazzo (Éds), *Instrumentation portable : Quels enjeux pour l'archéométrie ?* Paris : Editions des archives contemporaines.

Bélorgey, C. (1935a). Le théâtre d'Hippo Regius. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *37*, pp. 115-116.

Bélorgey, C. (1935b). Sur Hippone. - Réflexions. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *37*, pp. 102-108.

Bernardini, C. (2001). La stipe votiva di Kamiros alla luce dei taccuini di scavo. *Annuario della Scuola archeologica di Atene e delle missioni italiane in oriente*, *79*, pp. 253-261.

Bertrand, A. (1868). Sur les fouilles de Roknia. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, *3*(1), pp. 628-630. https://doi.org/10.3406/bmsap.1868.9883

Bertrand, L. (1921). *Les villes d'or : Algérie et Tunisie romaines*. Paris : A. Fayard.

Best, M. G. (2003). *Igneous and Metamorphic Petrology* (2e éd.). Malden, MA : Blackwell Publishers.

Bizot, B. (2005). La basilique et ses abords. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 193-218). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Bizot, B., Lavergne, D., et Mignon, J.-M. (2005). Le théâtre. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 107-112). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Blain, S., Guibert, P., Prigent, D., Lanos, P., Oberlin, C., Sapin, C.,… Dufresne, P. (2011). Combined dating methods applied to building archaeology: The contribution of thermoluminescence to the case of the bell tower of St Martin's church, Angers (France). *Geochronometria*, *38*(1), pp. 55-63. https://doi.org/10.2478/s13386-011-0010-0

Blanchard-Lemée, M. (2003). Saint Augustin : De la maison du riche à la demeure de Dieu (introduction à la visite des mosaïques d'Hippone). Dans P.-Y. Fux, J.-M. Roessli, et O. Wermelinger (Éds), *Augustinus Afer : Saint Augustin, africanité et universalité actes du colloque international, Alger-Annaba, 1-7 avril 2001* (Vol. 2, pp. 401-411). Fribourg : Ed. universitaires Fribourg.

Blanchard-Lemée, M. (2005). Marbre et couleurs : Les pavements de mosaïque. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 139-148). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Boffey, G., et Hirst, E. (1999). The use of pozzolans in lime mortars. *Journal of Architectural Conservation*, *5*, pp. 34-42. https://doi.org/10.1080/13556207.1999.10785250

Boggs, S., et Krinsley, D. (2006). *Application of cathodoluminescence imaging to the study of sedimentary rocks* (1re éd.). (S.l.): Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511535475

Bonifay, M. (2005). Obsérvations préléminaires sur les céramiques des collections du musée. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 175-180). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Bonsall, C., Radovanović, I., Roksandic, M., Cook, G., Higham, T., et Pickard, C. (2008). Dating burial practices and architecture at Lepenski Vir. *The iron gates in Prehistory : New perspectives*, *1893*, pp. 175-204.

Bøtter-Jensen, L., Solongo, S., Murray, A. S., Banerjee, D., et Jungner, H. (2000). Using the OSL single-aliquot regenerative-dose protocol with quartz extracted from building materials in retrospective dosimetry. *Radiation Measurements*, *32*(5-6), pp. 841-845. https://doi.org/10.1016/s1350-4487(99)00278-4

Bouchenaki, M. (1980). Récentes recherches et étude de l'Antiquité en Algérie. *Antiquités africaines*, *15*(1), pp. 9-28. https://doi.org/10.3406/antaf.1980.1035

Bouet, A. (2003). *Les thermes privés et publics en Gaule narbonnaise* (Vol. 1). Rome : École française de Rome.

Bouffier, S. (2019). Introduction : Les mortiers antiques, un champ d'investigation en essor. Dans I. Fumadó Ortega et S. Bouffier (Éds), *Mortiers et hydraulique en Méditerranée antique* (pp. 5-7). Aix-en-Provence : Presses universitaires de Provence. https://doi.org/10.4000/books.pup.39810

Bouyac, R. (1891). *Histoire de Bône*. Bône : Imprimerie du « Courrier de Bône ».

Brandon, C., Hohlfelder, R. L., Oleson, J. P., et Rauh, N. (2010). Geology, materials, and the design of the Roman harbour of Soli-Pompeiopolis, Turkey: The ROMACONS field campaign of August 2009. *International Journal of Nautical Archaeology*, *39*(2), pp. 390-399. https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2010.00277.x

Brandon, C., Hohlfelder, R. L., Oleson, J. P., et Stern, C. (2005). The Roman Maritime Concrete Study (ROMACONS): The harbour of Chersonisos in Crete and its Italian connection. *Méditerranée*, (104), pp. 25-29. https://doi.org/10.4000/mediterranee.1952

Brilli, M., Antonelli, F., Giustini, F., Lazzarini, L., et Pensabene, P. (2010). Black limestones used in antiquity: The petrographic, isotopic and EPR database for provenance determination. *Journal of Archaeological Science*, *37*(5), pp. 994-1005. https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.11.032

Brysbaert, A. (2008). Painted plaster from Bronze Age Thebes, Boeotia (Greece) : A technological study. *Journal of Archaeological Science*, *35*(10), pp. 2761-2769. https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.05.005

Büttner, S. (2002). *Géoarchéologie des liants de maçonnerie en Bourgogne du nord (Ve-XIXe siècles) : Évolution historique et technique : contribution aux études archéologiques de l'abbaye Saint-Germain d'Auxerre et du chevet de la Madeleine de Vézelay* (Thèse de doctorat). Université Paris 6, Paris.

Büttner, S. (2003). Géoarchéologie des liants de maçonnerie en Bourgogne du nord (Ve-XIXe siècle). Évolution historique et technique—Contribution aux études archéologiques de l'abbaye Saint-Germain d'Auxerre et du chevet de la Madeleine de Véze. *Bulletin du Centre d'études médiévales d'Auxerre*, (7). https://doi.org/10.4000/cem.3642

Büttner, S. (2020a). Le mortier de tuileau en France de l'Antiquité à l'époque moderne : Héritage ou réinvention permanente ? Dans F. Blary et J.-P. Gély (Éds), *Ressources et construction : La transmission des savoirs sur les chantiers*. Paris : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques. https://doi.org/10.4000/books.cths.10932

Büttner, S. (2020b). L'étude archéologique des mortiers de chaux médiévaux : Vers une meilleure compréhension des gestes du maçon. Dans A. Baud et G. Charpentier (Éds), *Chantiers et matériaux de construction : De l'Antiquité à la Révolution industrielle en Orient et en Occident* (pp. 129-141). Lyon : MOM Éditions. https://doi.org/10.4000/books.momeditions.9752

Büttner, S., et Coutelas, A. (2011). Mortiers de chaux et décors architecturaux en Gaule de l'Antiquité au haut Moyen Âge. Dans C. Balmelle, H. Eristov, et F. Monier (Éds), *Décor et architecture en Gaule entre l'Antiquité et le Haut Moyen Age, Actes du colloque international, Université de Toulouse II-Le Mirail, 9-12 octobre 2008* (pp. 663-673). Bordeaux : Aquitania.

Büttner, S., et Prigent, D. (2007). Archéologie des liants de maçonnerie : Entre traités et réalité. Communication présentée au 4e Congrès international d'archéologie médiévale et moderne, Paris-Sorbonne, 2-8 septembre 2007, Paris : Medieval Europe.

Cadix, A., et James, S. (2022). Cementing additives. Dans W. Qiwei (Éd.), *Fluid Chemistry, Drilling and Completion* (pp. 187-254). (S.l.) : Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822721-3.00008-3

Cagnat, R. (1887). La nécropole phénicienne de Vaga. *Revue archéologique*, *9*, pp. 39-46.

Cameron, M. A. S., Jones, R. E., et Philippakis, S. E. (1977). Scientific analyses of Minoan fresco samples from Knossos. *The Annual of the British School at Athens*, *72*, pp. 121-184. https://doi.org/10.1017/s0068245400005980

Camps, G. (1973). Nouvelles observations sur l'architecture et l'âge du Medracen, mausolée royal de Numidie. *Comptes-rendus des séances de l'année—Académie des inscriptions et belles-lettres*, *117*(3), pp. 470-517. https://doi.org/10.3406/crai.1973.12921

Camps, G. (1986). Ailymas. *Encyclopédie berbère*, (3), pp. 325-326. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.833

Camps, G. (1991). Bou Nouara (mer de). *Encyclopédie berbère*, (10), pp. 1570-1577. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.1793

Camps, G., Claudot-Hawad, H., Chaker, S., et Abrous, D. (1996). Écriture. *Encyclopédie berbère*, (17), pp. 2564-2585. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.2125

Cantisani, E., Fratini, F., et Pecchioni, E. (2021). Optical and electronic microscope for minero-petrographic and microchemical studies of lime binders of ancient mortars. *Minerals*, *12*(1). https://doi.org/10.3390/min12010041

Carcopino, J. (1942). Le travail archéologique en Algérie pendant la guerre (1939-1942). *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, *86*(4), pp. 301-319. https://doi.org/10.3406/crai.1942.85702

Carvalho, F., Sousa, P., Leal, N., Simão, J., Kavoulaki, E., Lima, M. M.,… Veiga, J. P. (2021). Mortars from the Palace of Knossos in Crete, Greece : A multi-analytical approach. *Minerals*, *12*(1). https://doi.org/10.3390/min12010030

Chakchouk, A., Samet, B., et Mnif, T. (2006). Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, *33*(2), pp. 79-88. https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.03.009

Chemam, A. (2018). *Les sables sombres côtiers à minéraux lourds de la région de Annaba, Algérie : Caractéristiques et provenances* (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar-Annaba, Annaba.

Choisy, A. (1873). *L'art de bâtir chez les Romains*. Paris : Ducher.

Choupaut, P. (1935). Les fouilles d'Hippone de 1929 à 1934. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *37*, pp. 109-114.

Cinzia, G., Festa, L., et Lugari, A. (2011). La tecnica esecutiva dei rivestimenti parietali marmorei (incrustationes) : Studio e sperimentazione. Dans C. Angelelli (Éd.), *Atti del XVI Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM)*. Tivoli : Scripta Manent.

Cote, M., et Camps, G. (1988). Annaba (Hippone-Bône). *Encyclopédie berbère*, (5), pp. 674-685. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.2511

Coutelas, A. (2003). *Pétroarcheologie du mortier de chaux gallo-romain. Essai de reconstitution et d'interprétation des chaînes opératoires : Du matériau au métier antique* (Thèse de doctorat). Université Paris 1, Paris. Repéré à https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00528508

Coutelas, A. (2005). Les mortiers et enduits des sites gallo-romains en Bourgogne. *Revue archéologique de l'Est*, (Tome 54), pp. 327-335.

Coutelas, A. (2008). De la pierre à chaux au mortier : Le travail de la chaux sur les chantiers de construction gallo-romains. Dans F. Blary, J.-P. Gély, et J. Lorenz (Éds), *Pierres du patrimoine européen. Économie de la pierre de l'antiquité à la fin des temps modernes* (pp. 403-409). Paris : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques.

Coutelas, A. (2011). The selection and use of lime mortars on the building sites of Roman Gaul. *Commentationes Litterarum Humanarum*, *128*, pp. 139-151.

Coutelas, A. (2012). Les mortiers de chaux et de sable : Produits d'un artisanat et témoins du chantier de construction. *Aquitania : Une revue inter-régionale d'archéologie*, *28*, pp. 171-178. https://doi.org/10.3406/aquit.2012.977

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009a). Avènement et place du mortier dans l'architecture : Cas de la chaux et du mortier de chaux. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 11-13). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009b). Échantillonnage. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 126-128). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009c). Introduction : Le choix de la méthodologie. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 123-126). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009d). Le granulat. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 64-73). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009e). Le mortier : Définitions. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 13-22). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009f). Les éléments d'étanchéité. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 89-96). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009g). Les joints regarnis et le rejointement. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 78-83). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009h). Les mortiers de maçonnerie. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 75-78). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009i). Les sols. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 87-89). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009j). Les systèmes de chauffage. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 100-105). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Büttner, S. (2009k). Mortiers de toiture. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 83-87). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., Büttner, S., Prigent, D., et Oberlin, C. (2009). Analyses pétrographiques. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 128-149). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., Godard, G., Blanc, P., et Person, A. (2004). Les mortiers hydrauliques : Synthèse bibliographique et premiers résultats sur des mortiers de Gaule romaine. *Revue d'Archéométrie*, *28*(1), pp. 127-139. https://doi.org/10.3406/arsci.2004.1068

Coutelas, A., et Palazzo-Bertholon, B. (2009). Les finitions de surface. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 105-119). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Prigent, D. (2009). Les supports de placage, de dallage et de mosaïques. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 96-100). Paris : Éditions Errance.

Coutelas, A., et Vauxion, O. (2017). Les enduits fragmentaires : Leurs propriétés comme matériau de construction et leur remploi à Pompéi et en Gaule romaine. Dans M. Carrive (Éd.), *Remployer, recycler, restaurer : Les autres vies des enduits peints* (pp. 37-45). Rome : Publications de l'École française de Rome.

Dagrain, F. (2012). Présentation et application d'une méthodologie de caractérisation physico-mécanique de petits échantillons pour l'étude des matériaux du patrimoine bâti. *ArchéoSciences*, (36), pp. 191-208. https://doi.org/10.4000/archeosciences.3865

Dahmani, S. (1973). *Hippo Regius*. Alger : République algerienne democratique et populaire, Ministère de l'Information et de la Culture, Sous-Direction des beaux-arts et antiquités.

Dahmani, S. (1983). *Annaba*. Alger : Ministère de l'Information.

Dahmani, S. (2005). Hippone dans les sources arabes. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 41-46). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Daif, M., et Toubal, A. (2015). Northeastern extension of Neogene magmatism in Africa: Evidence from the Zitouna rhyolite, Algeria. *Trabajos de Geología*, (35), pp. 29-40.

D'Ambrosio, E., Marra, F., Cavallo, A., Gaeta, M., et Ventura, G. (2015). Provenance materials for Vitruvius' harenae fossiciae and pulvis puteolanis: Geochemical signature and historical–archaeological implications. *Journal of Archaeological Science : Reports*, *2*, pp. 186-203. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.01.012

D'Antonio, M., Tonarini, S., Arienzo, I., Civetta, L., et Di Renzo, V. (2007). Components and processes in the magma genesis of the Phlegrean Volcanic District, southern Italy. Dans L. Beccaluva, G. Bianchini, et M. Wilson, *Cenozoic Volcanism in the Mediterranean Area*. (S.l.): Geological Society of America. https://doi.org/10.1130/2007.2418(10)

Daremberg, C., et Saglio, E. (Éds). (1969). *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines* (Vol. 3). Graz : Akademische Druck-u-Verlagsanstalt.

Daugbjerg, T. S., Lichtenberger, A., Lindroos, A., Raja, R., et Olsen, J. (2022). Revisiting radiocarbon dating of lime mortar and lime plaster from Jerash in Jordan: Sample preparation by stepwise injection of diluted phosphoric acid. *Journal of Archaeological Science : Reports*, *41*. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103244

DeLaine, J. (2021). Production, transport and on-site organisation of Roman mortars and plasters. *Archaeological and Anthropological Sciences*, *13*(11). https://doi.org/10.1007/s12520-021-01401-5

Delestre, X. (2005a). Aqueduc, châteaux d'eau, fontaines… : L'eau, une richesse antique qui menace aujourd'hui la conservation des vestiges. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 121-126). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2005b). Conclusion générale. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 235-238). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (Éd.). (2005c). *Hippone*. Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2005d). Histoire des recherches. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 53-65). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2005e). La conservation préventive des mosaïques « in situ ». Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 149-151). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2005f). Le marché. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 113-115). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2005g). Les thermes. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 117-120). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2005h). Techniques et matériaux de construction. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 83-92). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Delestre, X. (2011). Un exemple de coopération entre l'Algérie et la France. *Les nouvelles de l'archéologie*, (123), pp. 16-18. https://doi.org/10.4000/nda.1459

Delibrias, G., et Labeyrie, J. (1963). La datation des mortiers antiques par la méthode du Carbone 14. *Revue archéologique*, *2*, pp. 209-211.

Della Cella, P. (1840). *Voyage en Afrique au royaume de Barcah et dans la Cyrénaïque à travers le désert*. Traduction par A. Pezant, Paris : Armand-Aubrée.

Dennis, H. V. M. (1925). Another note on the Vandal occupation of Hippo Regius. *Journal of Roman Studies*, *15*(2), pp. 263-268. https://doi.org/10.2307/295642

Desanges, J. (1978). *Recherches sur l'activité des Méditerranéens aux confins de l'Afrique (VIe siècle av. J.-C.-IVe siècle ap. J.-C.)*. Rome : École française de Rome.

de Vos, M. (2003). Documentation archéologique à Hippone (Hippo Regius). Dans P.-Y. Fux, J.-M. Roessli, et O. Wermelinger (Éds), *Augustinus Afer : Saint Augustin, africanité et universalité actes du colloque international, Alger-Annaba, 1-7 avril 2001* (Vol. 2, pp. 401-411). Fribourg : Ed. universitaires Fribourg.

Di Benedetto, C., Graziano, S. F., Guarino, V., Rispoli, C., Munzi, P., Morra, V., et Cappelletti, P. (2018). Romans' established skills: mortars from D46b mausoleum, Porta Mediana necropolis, Cuma (Naples). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. https://doi.org/10.5281/zenodo.1285895

Dibbin, W. J. (1901). *Lime, mortar, & cement: Their characteristics and analyses*. Londres : Sanitary Publishing. Repéré à http://hdl.handle.net/2027/uc2.ark:/13960/t1jh3f54w

Dilaria, S., Previato, C., Bonetto, J., Secco, M., Zara, A., De Luca, R., et Miriello, D. (2023). Volcanic pozzolan from the Phlegraean Fields in the structural mortars of the Roman temple of Nora (Sardinia). *Heritage*, *6*(1), pp. 567-586. https://doi.org/10.3390/heritage6010030

Dilaria, S., et Secco, M. (2022). Mortar recipes through the Ages. A brief review of data from Prehistory to Late Antiquity. *Arheologija I Prirodne Nauke*, *18*, pp. 113-126. https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2022.18.9

Dilaria, S., Secco, M., Ghiotto, A. R., Furlan, G., Giovanardi, T., Zorzi, F., et Bonetto, J. (2023). Early exploitation of Neapolitan pozzolan (pulvis puteolana) in the Roman theatre of Aquileia, Northern Italy. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-30692-y

Dilaria, S., Secco, M., Rubinich, M., Bonetto, J., Miriello, D., Barca, D., et Artioli, G. (2022). High-performing mortar-based materials from the late imperial baths of Aquileia: An outstanding example of Roman building tradition in Northern Italy. *Geoarchaeology*. https://doi.org/10.1002/gea.21908

Dix, B. (1982). The manufacture of lime and its uses in the western Roman provinces. *Oxford Journal of Archaeology*, *1*(3), pp. 331-346. https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.1982.tb00318.x

Djerad, M. S., Boufenara, K., des Courtils, J., Cantin, N., et Lefrais, Y. (2022). Multianalytical characterisation and provenance investigation of natural pozzolana in Roman lime mortars from the archaeological site of Hippo Regius (Algeria). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, *22*(3), pp. 231-248. https://doi.org/10.5281/zenodo.7412076

D'Ovidio, A.-M., et Bromblet, P. (2021). État des recherches sur les sols en mortier de tuileau de Marseille antique. Dans V. Blanc-Bijon (Éd.), *Pavements et sols en béton et en mortier : Vocabulaire, techniques, diffusion : Actes du colloque international, Aix-en-Provence, MMSH, (26-27 avril 2017)* (pp. 39-48). Bordeaux : Ausonius Éditions.

Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional textures. Dans W. E. Ham (Éd.), *Classification of carbonate rocks : A symposium* (pp. 108-121). Tulsa, Oklahoma : AAPG (American Association of Petroleum Geologists).

Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Pardo, E. S., Hansen, E., et Cazalla, O. (2002). Lime mortars for the conservation of historic buildings. *Studies in Conservation*, *47*(1), pp. 62-75. https://doi.org/10.1179/sic.2002.47.1.62

Elsen, J., Balen, K., et Mertens, G. (2012). Hydraulicity in historic lime mortars: A review. Dans J. Válek, J. J. Hughes, et C. J. W. P. Groot (Éds), *Historic Mortars* (pp. 125-139). Dordrecht : Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0_10

Fabre, J., Chapoulie, R., et Schvoerer, M. (2002). Identification des constituants minéraux d'enduits peints de Retjons-Lugaut (Landes) par cathodoluminescence. Dans Institut de Recherche et d'Histoire des Textes, Centre de Recherche sur les Collections, et Équipe Étude des Pigments, Histoire et Archéologie (Éds), *Pigments et colorants de l'Antiquité et du Moyen Âge* (pp. 131-142). Paris : CNRS Éditions. https://doi.org/10.4000/books.editionscnrs.8147

Feneuille, S., Letourneux, J.-P., et Bouchar, M. (2016). *Protocoles d'étude des mortiers anciens à l'usage des archéologues*. Autun : Éditions Mergoil.

Ferchiou, N. (1995). Stucs puniques hellénistiques d'Utique. *Antiquités africaines*, *31*(1), pp. 53-79. https://doi.org/10.3406/antaf.1995.1235

Fichera, G. V., Belfiore, C. M., La Russa, M. F., Ruffolo, S. A., Barca, D., Frontoni, R.,… Pezzino, A. (2015). Limestone provenance in Roman lime-volcanic ash mortars from the Villa dei Quintili, Rome. *Geoarchaeology*, *30*(2), pp. 79-99. https://doi.org/10.1002/gea.21504

Fioretti, G., Acquafredda, P., Monno, A., Montenegro, V., et Francescangeli, R. (2023). Roman marble collections in the earth sciences museum of the University of Bari (Italy) : A valuable heritage to support provenance studies. *Heritage*, *6*(5), pp. 4054-4071. https://doi.org/10.3390/heritage6050213

Folk, R. L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bulletin*, *43*(1), pp. 1-38. https://doi.org/10.1306/0bda5c36-16bd-11d7-8645000102c1865d

Frizot, M. (1974). Recherches sur des mortiers et enduits gallo-romains de bourgogne. *Mémoires de la Commission des Antiquités de la Côte-d'Or*, *3*(29), pp. 111-117.

Frizot, M. (1975). *Mortiers et enduits peints antiques : Étude technique et archéologique*. Dijon : Centre de recherches sur les techniques gréco-romaines.

Frizot, M. (1977). Le mortier romain, mystère ou savoir-faire ? *Les dossiers de l'archéologie*, (25), pp. 60-63.

Furlan, V., et Bissegger, P. (1975). Les mortiers anciens : Histoire et essais d'analyse scientifique. *Revue suisse d'art et d'archéologie*, *32*(2), pp. 166-178. https://doi.org/10.5169/seals-166356

Garfinkel, Y. (1987). Burnt lime products and social implications in the Pre-Pottery Neolithic B Villages of the Near East. *Paléorient*, *13*(1), pp. 69-76. https://doi.org/10.3406/paleo.1987.4417

Germinario, C., Pagano, S., Mercurio, M., Izzo, F., De Bonis, A., Morra, V., … Grifa, C. (2022). Roman technological expertise in the construction of perpetual buildings: New insights into the wall paintings of a banquet scene from a tomb in Cumae (southern Italy). *Archaeological and Anthropological Sciences*, *14*(9). https://doi.org/10.1007/s12520-022-01651-x

Ghaki, M., Laporte, J.-P., et Dupuis, X. (2012). Numides, Numidie. *Encyclopédie berbère*, (34), pp. 5633-5668. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.2768

Gheris, A. (2023). New dating approach based on the petrographical, mineralogical and chemical characterization of ancient lime mortar: Case study of the archaeological site of Hippo, Annaba city, Algeria. *Heritage Science*, *11*(1). https://doi.org/10.1186/s40494-023-00942-3

Gilles, M., et Quenee, B. (1999). Proposal for a useful methodology for the study of ancient mortars. Dans P. Bartos, C. Groot, et J. J. Hughes (Éds), *Proceedings of the International RILEM Workshop on Historic Mortars : Characteristics and Tests, 12-14 May 1999* (pp. 81-91). Paisley, Scotland: RILEM Publications.

Ginouvès, R. (1992). *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome II. Éléments constructifs : Supports, couvertures, aménagements intérieurs.* Rome : École française de Rome.

Ginouvès, R., Martin, R., Coarelli, F., Coulton, J., Gros, P., Guimier-Sorbets, A.-M.,… Krause, C. (1985). *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor.* Rome : École française de Rome.

Goedicke, C. (2003). Dating historical calcite mortar by blue OSL: Results from known age samples. *Radiation Measurements*, *37*(4-5), pp. 409-415. https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00010-6

Goedicke, C., Slusallek, K., et Kubelik, M. (1981). Thermoluminescence dating in architectural history: Venetian Villas. *Journal of the Society of Architectural Historians*, *40*(3), pp. 203-217. https://doi.org/10.2307/989694

Goring-Morris, N., et Belfer-Cohen, A. (1997). The articulation of cultural processes and Late Quaternary environmental changes in Cisjordan. *Paléorient*, *23*(2), pp. 71-93. https://doi.org/10.3406/paleo.1997.4653

Götze, J. (2012). Application of Cathodoluminescence Microscopy and Spectroscopy in Geosciences. *Microscopy and Microanalysis*, *18*(6), pp. 1270-1284. https://doi.org/10.1017/S1431927612001122

Götze, J., Plötze, M., et Habermann, D. (2001). Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz—A review. *Mineralogy and Petrology*, *71*(3-4), pp. 225-250. https://doi.org/10.1007/s007100170040

Götze, J., Schertl, H.-P., Neuser, R. D., Kempe, U., et Hanchar, J. M. (2013). Optical microscope-cathodoluminescence (OM–CL) imaging as a powerful tool to reveal internal textures of minerals. *Mineralogy and Petrology*, *107*(3), pp. 373-392. https://doi.org/10.1007/s00710-012-0256-0

Goyon, J.-C., Golvin, J.-C., Simon-Boidot, C., et Martinet, G. (2004). *La construction pharaonique du moyen empire à l'époque gréco-romaine : Contexte et principes technologiques*. Paris : Picard.

Graziano, S. F., Di Benedetto, C., Guarino, V., Rispoli, C., Munzi, P., Cappelletti, P., et Morra, V. (2018). Technology and building materials in Roman age (1st BC - 2d AD): The « Mausoleo della Sfinge » from the archaeological site of Cuma (Italy). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. https://doi.org/10.5281/zenodo.1256057

Gros, P. (2006). L'opus signinum selon Vitruve et dans la terminologie archéologique contemporaine. Dans P. Gros (Éd.), *Vitruve et la tradition des traités d'architecture : Frabrica et ratiocinatio* (pp. 142-152). Rome : Publications de l'École française de Rome. https://doi.org/10.4000/books.efr.2450

Gsell, S. (1901). Note sur quelques antiquités non romaines conservées à Bône. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *30*, pp. 1-6.

Gsell, S. (1903). *L'Algérie dans l'antiquité*. Alger : Imprimerie de A. Jourdan.

Gsell, S. (1911). Atlas archéologique de l'Algérie ; Édition spéciale des cartes au 200.000e du Service Géographique de l'Armée.

Gsell, S. (1922). *Inscriptions latines de l'Algérie* (Vol. 1). Paris : H. Champion.

Gsell, S. (1924). *Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : La civilisation carthaginoise* (Vol. 4). Paris : Hachette.

Gsell, S. (1928a). *Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Histoire militaire de Carthage* (Vol. 3). Paris : Hachette.

Gsell, S. (1928b). *Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Jules César et l'Afrique, fin des royaumes indigènes* (Vol. 8). Paris : Hachette.

Gsell, S. (1928c). *Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : La République romaine et les rois indigènes* (Vol. 7). Paris : Hachette.

Gsell, S. (1928d). *Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : L'état carthaginois* (3e éd., Vol. 2). Paris : Hachette.

Guérout, J. (1963). Fouilles de la basilique chrétienne d'Hippone. *Bulletin Monumental*, *121*(4), pp. 359-360.

Guimier-Sorbets, A.-M. (2021). Les sols de mortier en Grèce et en Égypte à l'époque hellénistique : Technique et décor. Dans V. Blanc-Bijon (Éd.), *Pavements et sols en béton et en mortier : Vocabulaire, techniques, diffusion : Actes du colloque international, Aix-en-Provence, MMSH, (26-27 avril 2017)* (pp. 126-140). Bordeaux : Ausonius Éditions.

Haldar, S. K., et Tišljar, J. (2014). Igneous Rocks. Dans *Introduction to Mineralogy and Petrology* (pp. 93-120). (S.l.) : Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-408133-8.00004-3

Hale, J., Heinemeier, J., Lancaster, L., Lindroos, A., et Ringbom, Å. (2003). Dating ancient mortar : Although radiocarbon dating is usually applied to organic remains, recent work shows that it can also reveal the age of some inorganic building materials. *American Scientist*, *91*(2), pp. 130-137.

Hauptmann, A., et Yalcin, Ü. (2000). Lime plaster, cement and the first puzzolanic reaction. *Paléorient*, *26*(2), pp. 61-68. https://doi.org/10.3406/paleo.2000.4710

Heinz, R. (2012). The first verifiable application of cast mortar in prefabricated construction in the coffered ceiling of the early Hellenistic Mausoleum of Belevi. Dans R. Carvais, A. Guillerme, V. Nègre, et J. Sakarovitch (Éds), *Nuts & Bolts of Construction History : Culture, Technology and Society. Proceedings of the 4th International Congress on Construction History, Paris, 3-7 July 2012* (Vol. 2, pp. 523-530). Paris : Picard.

Herrmann, J. J., Attanasio, D., et Tykot, R. H. (2012). Aspects of the Trade in white and gray architectural marbles in Algeria. *Africa romana*, *19*, pp. 1315-1330.

Herrmann, J. J., Attanasio, D., Tykot, R. H., et Van den Hoek, A. (2012a). aspects of the trade in colored marbles in Algeria. *Africa romana*, *19*, pp. 1331-1342.

Herrmann, J. J., Attanasio, D., Tykot, R. H., et Van den Hoek, A. (2012b). Characterization and distribution of marble from cap de Garde and Mt. Filfila, Algeria. Dans Association for the Study of Marble and Other Stones used in Antiquity, A. Gutiérrez Garcia-Moreno, P. Lapuente Mercadal, et I. Rodà de Llanza (Éds), *Interdisciplinary studies on ancient stone : Proceedings of the IX Association for the Study of Marbles and Other Stones in Antiquity (ASMOSIA) Conference (Tarragona 2009)* (1. ed, pp. 300-309). Tarragona : Institut Català d'Arqueologia Clàssica.

Herrmann, J. J., Tykot, R. H., Van den Hoek, A., et Blanc, P. (2015). Multimethod marble identification for figural sculpture in Hippo Regius (Annaba, Algeria). Dans P. Pensabene et E. Gasparini (Éds), *Interdisciplinary studies on ancient stone : ASMOSIA X : proceedings of the tenth International Conference of ASMOSIA, Association for the Study of Marble & Other Stones in Antiquity, Rome, 21-26 May 2012* (Vol. 1, pp. 163-169). Rome : L'Erma di Bretschneider.

Hohlfelder, R. L. (1999). Building Sebastos: The Cyprus connection. *International Journal of Nautical Archaeology*, *28*(2), pp. 154-163. https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1999.tb00829.x

Hole, F., et Flannery, K. V. (1962). Excavations at Ali Kosh, Iran. *Iranica Antiqua*, *2*, pp. 97-148.

Holmes Van Mater, D. (1970). *Hippo Regius from the earliest times to the Arab Conquest* (3e éd.). Amsterdam : A. M. Hakkert.

Houghton, B. F., et Wilson, C. J. N. (1989). A vesicularity index for pyroclastic deposits. *Bulletin of Volcanology*, *51*(6), pp. 451-462. https://doi.org/10.1007/bf01078811

Iacopi, G., Maiuri, A., et Laurenzi, L. (1928). *Clara Rhodos : Studi e Materiali pubblicati a cura dell' Istituto Storico-Archeologico di Rodi* (Vol. 6-7). Bergame : Instituto Storico-Archeologico di Rodi.

Jackson, M. D., Chae, S. R., Mulcahy, S. R., Meral, C., Taylor, R., Li, P., … Monteiro, P. J. M. (2013). Unlocking the secrets of Al-tobermorite in Roman seawater concrete. *American Mineralogist*, *98*(10), pp. 1669-1687. https://doi.org/10.2138/am.2013.4484

Jackson, M. D., Landis, E. N., Brune, P. F., Vitti, M., Chen, H., Li, Q., … Ingraffea, A. R. (2014). Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(52), pp. 18484-18489. https://doi.org/10.1073/pnas.1417456111

Jackson, M. D., et Marra, F. (2006). Roman stone masonry : Volcanic foundations of the ancient city. *American Journal of Archaeology*, *110*(3), pp. 403-436. https://doi.org/10.3764/aja.110.3.403

Jackson, M. D., Mulcahy, S. R., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P., et Wenk, H.-R. (2017). Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *American Mineralogist*, *102*(7), pp. 1435-1450. https://doi.org/10.2138/am-2017-5993ccby

Jackson, M. D., Oleson, J. P., Moon, J., Zhang, Y., Chen, H., et Gudmundsson, M. T. (2018). Extreme durability in ancient Roman concretes. *American Ceramic Society Bulletin*, *97*(5), pp. 22-28.

Jackson, M. D., Vola, G., Všianský, D., Oleson, J. P., Scheetz, B. E., Brandon, C., et Hohlfelder, R. L. (2012). Cement microstructures and durability in ancient Roman seawater concretes. Dans J. Válek, J. J. Hughes, et C. J. W. P. Groot (Éds), *Historic Mortars* (pp. 49-76). Dordrecht : Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0_5

Joleaud, L. (1936). *Etude géologique de la région de Bône et de La Calle*. Alger : La typo-litho & Jules Carbonel.

Karkanas, P. (2007). Identification of lime plaster in prehistory using petrographic methods: A review and reconsideration of the data on the basis of experimental and case studies. *Geoarchaeology*, *22*(7), pp. 775-796. https://doi.org/10.1002/gea.20186

Kayama, M., Gucsik, A., Nishido, H., Ninagawa, K., Tsuchiyama, A., et Gucsik, A. (2009). Cathodoluminescence and Raman spectroscopic characterization of experimentally shocked plagioclase. Dans *AIP Conference Proceedings* (pp. 86-95). Mainz : AIP. https://doi.org/10.1063/1.3222897

Khelifa, A. (2005). Histoire politique d'Annaba à l'époque musulmane. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 47-51). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Kingery, W. D., Vandiver, P. B., et Prickett, M. (1988). The beginnings of pyrotechnology, Part II: Production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. *Journal of Field Archaeology*, *15*(2), pp. 219-243. https://doi.org/10.1179/009346988791974501

Kotula, T. (1967). À Propos d'une inscription reconstituée de *Bulla Regia* (Hammam Darradji). Quelques municipes « mystérieux » de l'Afrique Proconsulaire. *Mélanges d'archéologie et d'histoire*, *79*(1), pp. 207-220. https://doi.org/10.3406/mefr.1967.7535

Koui, M., et Ftikos, Ch. (1998). The ancient Kamirian water storage tank : A proof of concrete technology and durability for three millenniums. *Materials and Structures*, *31*(9), pp. 623-627. https://doi.org/10.1007/bf02480613

Lakkaichi, A., et Bouabsa, L. (2017). Pétrologie et géochimie des rhyolites d'Aïn Sedma-Collo (NE algerien) : Essai d'un modèle pétro génétique. *Courrier du Savoir*, (24), pp. 81-92.

Lamare, N. (2019). *Les fontaines monumentales en Afrique romaine*. Rome : École française de Rome.

Lancaster, L. (2005). Ingrédients : Mortar and Caementa. Dans *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome* (1re éd.). Cambridge : Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511610516

Lancaster, L. (2015). Opus caementicium. Dans *Innovative Vaulting in the Architecture of the Roman Empire: 1st to 4th Centuries CE* (1re éd., pp. 19-38). Cambridge : Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9781107444935

Lancaster, L. (2019). Pozzolans in mortar in the Roman Empire : An overview and thoughts on future work. Dans I. Fumadó Ortega et S. Bouffier (Éds), *Mortiers et hydraulique en Méditerranée antique* (pp. 31-39). Aix-en-Provence : Presses universitaires de Provence. https://doi.org/10.4000/books.pup.39835

Lancaster, L., Sottili, G., Marra, F., et Ventura, G. (2011). Provenancing of lightweight volcanic stones used in ancient Roman concrete vaulting: evidence from rome: Volcanic stones used in ancient Roman concrete vaulting. *Archaeometry*, *53*(4), pp. 707-727. https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00565.x

Lancel, S. (1984). Études sur la Numidie d'Hippone au temps de saint Augustin. Recherches de topographie ecclésiastique. *Mélanges de l'École française de Rome. Antiquité*, *96*(2), pp. 1085-1113. https://doi.org/10.3406/mefr.1984.1439

Lancel, S. (1994). Algérie. Dans V. Krings (Éd.), *La civilisation phénicienne et punique* (pp. 786-795). (S.l.) : Brill. https://doi.org/10.1163/9789004293977_058

Laporte, J.-P. (2005a). Hippone vandale et byzantine (un état de la recherche). Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 37-40). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Laporte, J.-P. (2005b). L'épigraphie tardive. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 189-192). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Lassus, J. (1956). L'archéologie algérienne en 1955. *Libyca*, *4*, pp. 161-189.

Lassus, J. (1957). L'archéologie algérienne en 1956. *Libyca*, *5*, pp. 123-152.

Lassus, J. (1958). L'archéologie algérienne en 1957. *Libyca*, *6*, pp. 197-265.

Lassus, J. (1970). Erwan Marec (1888-1968). *Antiquités africaines*, (4), pp. 7-14.

Lavergne, D. (2005a). Le quartier des « villae du front de mer ». Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 127-138). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Lavergne, D. (2005b). Les cultes. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 219-224). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Lazzarini, L., D'Ignoti, K., Alfano, G., Cancelliere, S., et Bennardo, C. (2019). Archaeometric analyses of the stuccoes and polychromy on temple C at Selinunte (Sicily). *Technè*, (48), pp. 6-13. https://doi.org/10.4000/techne.1711

Le Bas, M. J., Lemaitre, R. W., Streckeisen, A., et Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic-rocks based on the Total Alkali Silica Diagram. *Journal of Petrology*, *27*(3), pp. 745-750.

Le Bohec, Y. (2018). La conquête de l'Afrique romaine par les Vandales (429-439 après J.-C.). *Gerión. Revista de Historia Antigua*, *36*(1), pp. 109-140. https://doi.org/10.5209/geri.60296

Leglay, M. (1955). L'archéologie algérienne en 1954. *Libyca*, *3*, pp. 183-206.

Lepelley, C. (2005). Hippone aux époques numide et romaine. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 19-24). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Leroy, A. (1912). Le temple de Baal-Sature à Hippone. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *32*, pp. 45-58.

Leschi, L. (1952). *Algérie antique*. Paris : Arts et métiers graphiques (Imprimerie de Tournon). Repéré à https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3344043d/f16

Lezzerini, M., Luti, L., Aquino, A., Gallello, G., et Pagnotta, S. (2022). Effect of marble waste powder as a binder replacement on the mechanical resistance of cement mortars. *Applied Sciences*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/app12094481

Lezzerini, M., Ramacciotti, M., Cantini, F., Fatighenti, B., Antonelli, F., Pecchioni, E., … Giamello, M. (2016). Archaeometric study of natural hydraulic mortars: The case of the late Roman Villa dell'Oratorio (Florence, Italy). *Archaeological and Anthropological Sciences*. https://doi.org/10.1007/s12520-016-0404-2

Libby, W. F. (1980). Archaeology and radiocarbon dating. *Radiocarbon*, *22*(4), pp. 1017-1020. https://doi.org/10.1017/s0033822200011504

Lindroos, A., Ringbom, Å., Heinemeier, J., Hodgins, G., Sonck-Koota, P., Sjöberg, P., … Lugli, S. (2018). Radiocarbon dating historical mortars: Lime lumps and/or binder carbonate? *Radiocarbon*, *60*(3), pp. 875-899. https://doi.org/10.1017/rdc.2018.17

Ling, R. (2015). Mosaics. Dans B. E. Borg (Éd.), *A Companion to Roman Art* (1re éd., pp. 268-285). (S.l.) : Wiley Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781118886205.ch14

Loustaud, J.-P. (1983). Cuves à chaux gallo-romaines en Haut-Limousin. *Aquitania : Une revue inter-régionale d'archéologie*, *1*(1), pp. 143-154. https://doi.org/10.3406/aquit.1983.994

Mahmoud, H. M., Kantiranis, N., et Stratis, J. (2012). A technical characterization of Roman plasters, Luxor temple, Upper Egypt. *Mediterranean Arhaeology and Archaeometry*, *12*(2), pp. 81-93.

Maitrot, A. (1912). La question de la Basilique de la Paix. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *32*, pp. 61-84.

Maitrot, A. (1935). Les petits métiers à Hippone. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *37*, pp. 91-96.

Malacrino, C. G. (2010). *Constructing the Ancient world : Architectural techniques of the Greeks and Romans*. Traduction par J. Hyams, Los Angeles : J. Paul Getty Museum.

Manfredi, L.-I., Dekayir, A., et Bokbot, Y. (2019). Ancient mines in pre-roman Maghreb. Present and future of archaeological, geophysical and archaeometric researches. Dans S. Di Lernia et M. Gallinaro (Éds), *Papers from the 1st Workshop Archaeology in Africa : Potentials and perspectives on laboratory & fieldwork research* (pp. 63-71). Sesto Fiorentino (FI) : All'insegna del giglio.

Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., et Moropoulou, A. (2003). Physico-chemical study of Cretan ancient mortars. *Cement and Concrete Research*, *33*(5), pp. 651-661. https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01030-x

Marc, J.-Y. (2012). Un *macellum* hellénistique à Thasos. Dans L. Cavalier, R. Descat, et J. des Courtils (Éds), *Basiliques et agoras de Grèce et d'Asie mineure* (pp. 225-239). Bordeaux : Éditions Ausonius.

Marec, E. (1927a). Les nouvelles fouilles d'Hippone : Rapport pour l'année 1925. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *36*, pp. 9-26.

Marec, E. (1927b). Les nouvelles fouilles d'Hippone : Rapport pour l'année 1926. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *36*, pp. 27-44.

Marec, E. (1948). Les fouilles d'Hippone. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, *92*(4), pp. 558-563. https://doi.org/10.3406/crai.1948.78342

Marec, E. (1950). *Hippone : Antique Hippo Regius*. Alger : Direction de l'Intérieur et des Beaux-Arts, Service des Antiquités.

Marec, E. (1954). *Hippone la Royale : Antique Hippo Regius* (2e édition). Alger : Direction de l'Intérieur et des Beaux-Arts, Service des Antiquités.

Marec, E. (1956). Inscriptions recueillies à Hippone dans les Thermes du Nord et du Sud. *Libyca*, *4*, pp. 291-317.

Marec, E. (1958). *Monuments chrétiens d'Hippone, ville épiscopale de Saint Augustin*. Paris : Arts et métiers graphiques.

Marec, E. (1962a). Rapport présenté à l'Assemblée Générale de l'Académie d'Hippone du 14 février 1952. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *38*, pp. 19-28.

Marec, E. (1962b). Rapport présenté à l'Assemblée Générale de l'Académie d'Hippone du 19 mai 1961. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *38*, pp. 29-35.

Marec, E. (1969). Une maison à étages à Hippone. La villa dite « du Procurateur ». *Antiquités africaines*, *3*(1), pp. 157-172. https://doi.org/10.3406/antaf.1969.903

Marignac, C., Aïssa, D. E., Cheilletz, A., et Gasquet, D. (2016). Edough-cap de Fer polymetallic district, northeast Algeria: II. Metallogenic evolution of a Late Miocene Metamorphic Core Complex in the Alpine Maghrebide Belt. Dans M. Bouabdellah et J. F. Slack (Éds), *Mineral Deposits of North Africa* (pp. 167-199). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31733-5_6

Marra, F., Anzidei, M., Benini, A., D'Ambrosio, E., Gaeta, M., Ventura, G., et Cavallo, A. (2016). Petro-chemical features and source areas of volcanic aggregates used in ancient Roman maritime concretes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *328*, pp. 59-69. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.10.005

Marra, F., D'Ambrosio, E., Sottili, G., et Ventura, G. (2013). Geochemical fingerprints of volcanic materials: Identification of a pumice trade route from Pompeii to Rome. *Geological Society of America Bulletin*, *125*(3-4), pp. 556-577. https://doi.org/10.1130/b30709.1

Marrou, H.-I. (1960). La Basilique chrétienne d'Hippone d'après le résultat des dernières fouilles. *Revue d'Études Augustiniennes et Patristiques*, *6*(2), pp. 109-154.

Martinet, G., Deloye, F.-X., et Golvin, J.-C. (1992). Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, (181), pp. 39-45.

McCormick, M., Huang, G., Zambotti, G., et Lavash, J. (2013). Roman Road Network (version 2008). Harvard Dataverse. https://doi.org/10.7910/dvn/ti0kau

McEwen, I. K. (2003). *Vitruvius : Writing the Body of Architecture*. (S.l.): The MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/7136.001.0001

Mège, F. (2021). Ancient concretes and mortars of Selinous: Preliminary results of the projet CaF "Concretes as Floors". *Archäologischer Anzeiger*, pp. 169-187. https://doi.org/10.34780/4739-8g64

Miletić, S., Šmuc, A., Dolenec, M., Miler, M., Mladenovič, A., Gutman Levstik, M., et Dolenec, S. (2022). Identification and provenance determination of stone tesserae used in mosaics from Roman Celeia, Slovenia. *Archaeometry*, *64*(3), pp. 561-577. https://doi.org/10.1111/arcm.12742

Miriello, D., Antonelli, F., Apollaro, C., Bloise, A., Bruno, N., Catalano, M., … La Marca, A. (2015). A petro-chemical study of ancient mortars from the archaeological site of Kyme (Turkey). *Periodico di Mineralogia*, *84*(3A), pp. 497-517. https://doi.org/10.2451/2015pm0028

Miriello, D., Barca, D., Bloise, A., Ciarallo, A., Crisci, G. M., De Rose, T., … La Russa, M. F. (2010). Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *Journal of Archaeological Science*, *37*(9), pp. 2207-2223. https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.03.019

Miriello, D., Bloise, A., Crisci, G. M., Apollaro, C., et La Marca, A. (2011). Characterisation of archaeological mortars and plasters from kyme (Turkey). *Journal of Archaeological Science*, *38*(4), pp. 794-804. https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.11.002

Misseri, M. (1987). Structure et cinématique des péridotites feldspathiques du Cap Bougaroun (Algérie). *Journal of African Earth Sciences (1983)*, *6*(5), pp. 741-744. https://doi.org/10.1016/0899-5362(87)90009-1

Mociu, N. C., Maftei, C. E., Carazeanu Popovici, I., Voicu, G., Buta, C., et Stanescu, M. (2023). Highlighting the characteristics of Roman mortars from Ovidiu's Quadriburgium archaeological site, Romania. *Buildings*, *13*(3). https://doi.org/10.3390/buildings13030672

Modéran, Y. (1999). Les frontières mouvantes du royaume vandale. Dans X. Dupuis et C. Lepelley (Éds), *Frontières et limites géographiques de l'Afrique du Nord antique* (pp. 241-264). Paris : Éditions de la Sorbonne. https://doi.org/10.4000/books.psorbonne.22697

Monceaux, P. (1913). Un couvent de femmes à Hippone au temps de saint Augustin. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, *57*(8), pp. 570-595. https://doi.org/10.3406/crai.1913.73297

Montana, G., Randazzo, L., Vassallo, S., et Udine, F. (2018). The mosaic of the frigidarium of « Villa Bonanno » in Palermo: Mineralogical and petrographic analyses for in situ conservation and restoration interventions. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, *18*(5), pp. 95-107. https://doi.org/10.5281/zenodo.1256059

Montesano, G., Verde, M., Columbu, S., Graziano, S. F., Guerriero, L., Iadanza, M. L., … Cappelletti, P. (2022). Ancient Roman mortars from Anfiteatro Flavio (Pozzuoli, Southern Italy) : A mineralogical, petrographic and chemical study. *Coatings*, *12*(11). https://doi.org/10.3390/coatings12111712

Moore, A. M. T., Hillman, G. C., et Legge, A. J. (1975). the excavation of Tell Abu Hureyra in Syria: A preliminary report. *Proceedings of the Prehistoric Society*, *41*, pp. 50-77. https://doi.org/10.1017/s0079497x00010902

Morel, J.-P. (1965). Céramiques d'Hippone. *Bulletin d'archéologie algérienne*, *1*, pp. 107-137.

Morel, J.-P. (1968). Recherches stratigraphiques à Hippone. *Bulletin d'archéologie algérienne*, *3*, pp. 35-84.

Morel, J.-P. (1969). Kerkouane, ville punique du cap Bon : Remarques archéologiques et historiques. *Mélanges d'archéologie et d'histoire*, *81*(2), pp. 473-518. https://doi.org/10.3406/mefr.1969.7582

Moropoulou, A., Bakolas, A., et Bisbikou, K. (2000). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, *1*(1), pp. 45-58. https://doi.org/10.1016/s1296-2074(99)00118-1

Morra, V., Calcaterra, D., Cappelletti, P., Colella, A., Fedele, L., de' Gennaro, R., … de' Gennaro, M. (2010). Urban geology: Relationships between geological setting and architectural heritage of the Neapolitan area. *Journal of the Virtual Explorer*, *36*. https://doi.org/10.3809/jvirtex.2010.00261

Morricone, A., Macchia, A., Campanella, L., David, M., de Togni, S., Turci, M., … Ronca, S. (2013). Archeometrical analysis for the characterization of mortars from Ostia Antica. *Procedia Chemistry*, *8*, pp. 231-238. https://doi.org/10.1016/j.proche.2013.03.029

Nikolić, E., Delić-Nikolić, I., Jovičić, M., Miličić, L., et Mijatović, N. (2023). Recycling and reuse of building materials in a historical landscape—Viminacium Natural Brick (Serbia). *Sustainability*, *15*(3). https://doi.org/10.3390/su15032824

Oleson, J. P., Brandon, C., Cramer, S. M., Cucitore, R., Gotti, E., et Hohlfelder, R. L. (2004). The ROMACONS Project: A contribution to the historical and engineering analysis of hydraulic concrete in Roman maritime structures. *International Journal of Nautical Archaeology*, *33*(2), pp. 199-229. https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2004.00020.x

Orlandos, A. K. (1966). *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs* (Vol. 1). Traduction par V. Hadjimichali, Paris : E. de Boccard.

Orsi, G., Patella, D., Piochi, M., et Tramacere, A. (1999). Magnetic modeling of the Phlegraean Volcanic District with extension to the Ponza archipelago, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *91*(2-4), pp. 345-360. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00043-8

Oularbi, A., et Zeghiche, A. (2009). Sensibilité à l'érosion du massif cristallophyllien de l'Edough (Nord-Est Algérien). *Revue Synthèse*, (20), pp. 58-72.

Pagano, S., Germinario, C., Alberghina, M. F., Covolan, M., Mercurio, M., Musmeci, D., … Grifa, C. (2022). Multilayer technology of decorated plasters from the Domus of Marcus Vipsanus Primigenius at Abellinum (Campania Region, Southern Italy): An analytical approach. *Minerals*, *12*(12). https://doi.org/10.3390/min12121487

Palazzo-Bertholon, B. (2000). Archéologie et archéométrie des mortiers et des enduits médiévaux. Étude critique de la bibliographie. *Archéologie Médiévale*, *29*, pp. 191-216.

Papier, A. (1888). Du projet de restauration des citernes d'Hippone par la ville de Bône. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *22*(3), pp. 300-303.

Papier, A. (1901). Au sujet de la mosaïque à médaillons de la villa Chevillot, à Hippone. *Bulletin de l'Académie d'Hippone*, *30*, pp. 149-182.

Parsons, I. (1989). Intermediate igneous rocks. Dans *Petrology* (pp. 251-252). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-387-30845-8_106

Pavía, S., et Caro, S. (2008). An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. *Construction and Building Materials*, *22*(8), pp. 1807-1811. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.003

Peccerillo, A. (2001). Geochemical similarities between the Vesuvius, Phlegraean Fields and Stromboli Volcanoes: Petrogenetic, geodynamic and volcanological implications. *Mineralogy and Petrology*, *73*(1-3), pp. 93-105. https://doi.org/10.1007/s007100170012

Peccerillo, A. (2005a). The Aeolian arc. Dans *Plio-Quaternary Volcanism in Italy* (pp. 173-213). Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-29092-3_7

Peccerillo, A. (2005b). The Campania Province, Pontine Islands, and Mount Vulture. Dans *Plio-Quaternary Volcanism in Italy* (pp. 129-171). Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-29092-3_6

Peccerillo, A. (2020). Campania volcanoes. Dans *Vesuvius, Campi Flegrei, and Campanian Volcanism* (pp. 79-120). (S.l.): Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816454-9.00005-5

Perez-Rodriguez, J. L., Perez-Maqueda, L. A., Franquelo, M. L., et Duran, A. (2023). Seville history insight through their construction mortars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. https://doi.org/10.1007/s10973-023-12313-y

Pettijohn, F. J., Potter, P. E., et Siever, R. (1987). *Sand and Sandstone*. New York, NY : Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5

Philokyprou, M. (2012). The earliest use of lime and gypsum mortars in Cyprus. Dans J. Válek, J. J. Hughes, et C. J. W. P. Groot (Éds), *Historic Mortars* (pp. 25-35). Dordrecht : Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0_3

Pichavant, M., Pompilio, M., D'oriano, C., et Dicarlo, I. (2011). Petrography, mineralogy and geochemistry of a primitive pumice from Stromboli: Implications for the deep feeding system. *European Journal of Mineralogy*, *23*(4), pp. 499-517. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2011/0023-2109

Pineda, P., Medina-Carrasco, S., Iranzo, A., Borau, L., et García-Jiménez, I. (2022). Pore structure and interdisciplinary analyses in Roman mortars: Building techniques and durability factors identification. *Construction and Building Materials*, *317*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125821

Piochi, M., Polacci, M., De Astis, G., Zanetti, A., Mangiacapra, A., Vannucci, R., et Giordano, D. (2008). Texture and composition of pumices and scoriae from the Campi Flegrei caldera (Italy): Implications on the dynamics of explosive eruptions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *9*(3). https://doi.org/10.1029/2007gc001746

Piovesan, R., Mazzoli, C., et Maritan, L. (2023). Production recipes of mortar-based materials from ancient Pompeii by quantitative image analysis approach: The microstratigraphy of plasters in the Temple of Venus. *Journal of Cultural Heritage*, *59*, pp. 57-68. https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.11.002

Ponce-Antón, G., Zuluaga, M. C., Ortega, L. A., et Agirre Mauleon, J. (2020). Petrographic and chemical–mineralogical characterization of mortars from the Cistern at Amaiur Castle (Navarre, Spain). *Minerals*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/min10040311

Powers, M. C. (1953). A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *Journal of Sedimentary Research*, *Vol. 23*(2), pp. 117-119. https://doi.org/10.1306/d4269567-2b26-11d7-8648000102c1865d

Prigent, D. (2009). Les traités. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 22-31). Paris : Éditions Errance.

Quesnoy, F. (1850). *Coup d'oeil sur la subdivision de Bône, relatif surtout à son état climatérique et à l'influence que cet état exerce sur les progrès de la colonisation*. Toulon : Imprimerie de Ve Baume.

Raneri, S., Cantini, F., Belcari, R., Baldanza, A., Bertinelli, A., Lorenzetti, G., … Lezzerini, M. (2017). Building materials and architectural models in late Roman Tuscany. Archaeometric studies on mortars, stones and vitreous tesserae from « Villa dell'Oratorio » (Florence). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. https://doi.org/10.5281/zenodo.1285889

Rispoli, C., Esposito, R., Guerriero, L., et Cappelletti, P. (2021). Ancient Roman mortars from Villa del Capo di Sorrento: A multi-analytical approach to define microstructural and compositional features. *Minerals*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/min11050469

Rispoli, C., Graziano, S. F., Di Benedetto, C., De Bonis, A., Guarino, V., Esposito, R., … Cappelletti, P. (2019). New insights of historical mortars beyond Pompei: The example of Villa del Pezzolo, Sorrento Peninsula. *Minerals*, *9*(10). https://doi.org/10.3390/min9100575

Rouvier, H. (1977). *Géologie de l'Extrême-Nord tunisien : Tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrémité orientale de la chaîne nord-maghrébine* (Doctorat d'État). Université Paris 6.

Scholonek, C., et Augustsson, C. (2016). Can cathodoluminescence of feldspar be used as provenance indicator? *Sedimentary Geology*, *336*, pp. 36-45. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.11.005

Secco, M., Asscher, Y., Ricci, G., Tamburini, S., Preto, N., Sharvit, J., et Artioli, G. (2022). Cementation processes of Roman pozzolanic binders from Caesarea Maritima (Israel). *Construction and Building Materials*, *355*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129128

Secco, M., Dilaria, S., Bonetto, J., Addis, A., Tamburini, S., Preto, N., … Artioli, G. (2020). Technological transfers in the Mediterranean on the verge of Romanization: Insights from the waterproofing renders of Nora (Sardinia, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, *44*, pp. 63-82. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.01.010

Seigne, J. (2004). Technique de construction en Gaule romaine. Dans J.-C. Bessac, O. Chapelot, R. De Filippo, A. Ferdière, F. Journot, D. Prigent,… J. Seigne (Éds), *La construction : Les matériaux durs : Pierre et terre cuite* (pp. 51-96). Paris : Éditions Errance.

Seymour, L. M., Keenan-Jones, D., Zanzi, G. L., Weaver, J. C., et Masic, A. (2022). Reactive ceramic aggregates in mortars from ancient water infrastructure serving Rome and Pompeii. *Cell Reports Physical Science*, *3*(9). https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101024

Seymour, L. M., Maragh, J., Sabatini, P., Tommaso, M. D., Weaver, J. C., et Masic, A. (2023). Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Science Advances*, *9*(1). https://doi.org/10.1126/sciadv.add1602

Shaw, J. W. (2009). *Minoan architecture : Materials and techniques*. Padova : Bottega d'Erasmo.

Spiteri, B. (2019). Manuel de lithopréparation adapté au matériel archéologique. IRAMAT-CRP2A.

Stanislao, C., Rispoli, C., Vola, G., Cappelletti, P., Morra, V., et de Gennaro, M. (2011). Contribution to the knowledge of ancient Roman seawater concretes: Phlegrean pozzolan adopted in the construction of the harbour at Soli-Pompeiopolis (Mersin, Turkey). *Periodico di Mineralogia*, *80*(3), pp. 471-488. https://doi.org/10.2451/2011pm0031

Stawski, E. (1957). Plan général des ruines d'Hippone.

Stern, W. B. (2001). Archaeometry – Analyzing the cultural heritage. *CHIMIA International Journal for Chemistry*, *55*(11), pp. 915-922.

Stone, D. L. (2014). Africa in the Roman Empire: Connectivity, the economy, and artificial port structures. *American Journal of Archaeology*, *118*(4), pp. 565-600. https://doi.org/10.3764/aja.118.4.0565

Suméra, F. (2005a). Le forum. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 93-103). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Suméra, F. (2005b). Remarques sur le schéma urbain. Dans X. Delestre (Éd.), *Hippone* (pp. 79-82). Aix-en-Provence, Alger : Édisud, Inas.

Suméra, F. (2009). La chaux. Dans A. Coutelas (Éd.), *Le mortier de chaux* (pp. 33-64). Paris : Éditions Errance.

Talbert, R. J. A., et Bagnall, R. S. (2000). Barrington atlas of the Greek and Roman world.

Terry, R. D., et Chilingar, G. V. (1955). Summary of « Concerning some additional aids in studying sedimentary formations » by M. S. Shvetsov. *Journal of Sedimentary Research*, *25*(3), pp. 229-234. https://doi.org/10.1306/74d70466-2b21-11d7-8648000102c1865d

Ters, M. (1960). Méthodes et techniques modernes en géomorphologie. *L'Information Géographique*, *24*(4), pp. 156-165. https://doi.org/10.3406/ingeo.1960.2005

Thébert, Y. (2000). Transport à grande distance et magasinage de briques dans l'Empire romain. Quelques remarques sur les relations entre production et consummation. Dans *La brique antique et médiévale : Production et commercialisation d'un materiau : Actes du colloque international… : Saint- Cloud, 16-18 novembre 1995*. Rome : École Française de Rome. https://doi.org/10.1400/37107

Thébert, Y. (2003). *Thermes romains d'Afrique du Nord et leur contexte méditerranéen*. Rome : Publications de l'École française de Rome. https://doi.org/10.4000/books.efr.2147

Theodoridou, M., Ioannou, I., et Philokyprou, M. (2013). New evidence of early use of artificial pozzolanic material in mortars. *Journal of Archaeological Science*, *40*(8), pp. 3263-3269. https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.03.027

Thomas, N., Jaupart, C., et Vergniolle, S. (1994). On the vesicularity of pumice. *Journal of Geophysical Research*, *99*(B8). https://doi.org/10.1029/94jb00650

Tomlinson, E. L., Arienzo, I., Civetta, L., Wulf, S., Smith, V. C., Hardiman, M., … Menzies, M. A. (2012). Geochemistry of the Phlegraean Fields (Italy) proximal sources for major Mediterranean tephras: Implications for the dispersal of Plinian and co-ignimbritic components of explosive eruptions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *93*, pp. 102-128. https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.043

Toulotte, A. (1894). *Géographie de l'Afrique chrétienne : Numidie*. Rennes : Imprimerie Oberthur.

Treilhou, S. (2012). Fresque et peinture murale. Dans M. E. Fuchs et F. Monier (Éds), *Les enduits peints en Gaule romaine* (pp. 251-255). Dijon : ARTEHIS Éditions. https://doi.org/10.4000/books.artehis.7893

Uğurlu Sağın, E., Duran, H. E., et Böke, H. (2021). Lime mortar technology in ancient eastern Roman provinces. *Journal of Archaeological Science : Reports*, *39*. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103132

Urbanová, P. (2015). *Recherches sur la datation directe de la construction des édifices : Exploration des potentialités de la datation des mortiers archéologiques par luminescence optiquement stimulée (OSL)* (Thèse de doctorat). Université Bordeaux Montaigne, Pessac. Repéré à https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01452204

Urbanová, P., Boaretto, E., et Artioli, G. (2020). The state-of-the-art of dating techniques applied to ancient mortars and binders : A review. *Radiocarbon*, *62*(3), pp. 503-525. https://doi.org/10.1017/rdc.2020.43

Urbanová, P., Delaval, E., Lanos, P., Guibert, P., Dufresne, P., Ney, C., … Mellinand, P. (2016). Multi-method dating of Grimaldi castle foundations in Antibes, France. *ArchéoSciences*, (40), pp. 17-33. https://doi.org/10.4000/archeosciences.4702

Urbanová, P., et Guibert, P. (2017a). La mesure du temps par luminescence : Datation de réemplois dans la crypte de Saint-Seurin à Bordeaux. *Mélanges de l'École française de Rome. Moyen Âge*, (129-1). https://doi.org/10.4000/mefrm.3633

Urbanová, P., et Guibert, P. (2017b). Methodological study on single grain OSL dating of mortars: Comparison of five reference archaeological sites. *Geochronometria*, *44*(1), pp. 77-97. https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0050

Urbanová, P., Michel, A., Cantin, N., Guibert, P., Lanos, P., Dufresne, P., et Garnier, L. (2018). A novel interdisciplinary approach for building archaeology: The integration of mortar "single grain" luminescence dating into archaeological research, the example of Saint Seurin Basilica, Bordeaux. *Journal of Archaeological Science : Reports*, *20*, pp. 307-323. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.04.009

Válek, J., Hughes, J. J., et Groot, C. J. W. P. (2012). Historic mortars : Characterisation, assessment and repair. A state-of-the-art summary. Dans J. Válek, J. J. Hughes, et C. J. W. P. Groot (Éds), *Historic Mortars* (pp. 1-12). Dordrecht : Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0_1

Van Balen, K., Van Bommel, B., Van Hees, R., Van Hunen, M., Van Rhijn, J., et Van Rooden, M. (2015). *Le livre de la chaux : L'utilisation de la chaux comme liant pour mortiers de construction et de jointement de l'origine à nos jours*. Namur : Institut du Patrimoine Wallon.

Vanorio, T., et Kanitpanyacharoen, W. (2015). Rock physics of fibrous rocks akin to Roman concrete explains uplifts at Campi Flegrei Caldera. *Science*, *349*(6248), pp. 617-621. https://doi.org/10.1126/science.aab1292

Vaschalde, C., Bromblet, P., et Büttner, S. (2016). Gamme de chaux dans les économies anciennes. Méthodes de prélèvement et d'identification des types de chaux dans les fours (DRX, MEB-EDS, pétrographie) (Antiquité, Moyen Âge, époque moderne). *ArchéoSciences*, (40), pp. 119-135. https://doi.org/10.4000/archeosciences.4801

Vassal, V. (2016). Opus signinum, terrazzo, mortier et béton de sol : Un etat de la question. *Journal of Mosaic Research*, *9*, pp. 95-119.

Verità, M., Lazzarini, L., Tesser, E., et Antonelli, F. (2019). Villa del Casale (Piazza Armerina, Sicily): Stone and glass tesserae in the baths floor mosaics. *Archaeological and Anthropological Sciences*, *11*(1), pp. 373-385. https://doi.org/10.1007/s12520-017-0559-5

Vicat, L.-J. (1818). *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*. Paris : Goujon.

Vila, J.-M. (1980). *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens* (Doctorat d'État). Université Paris 6, Paris.

Viollet-le-Duc, E.-E. (1875). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle* (Vol. 4). Paris : A. Morel.

Vola, G., Gotti, E., Brandon, C., Oleson, J. P., et Hohlfelder, R. obert L. (2011). Chemical, mineralogical and petrographic characterization of Roman ancient hydraulic concretes cores from Santa Liberata, Italy, and Caesarea Palestinae, Israel. *Periodico di Mineralogia*, *80*(2), pp. 317-338. https://doi.org/10.2451/2011pm0023

Voloschina, M., Pistolesi, M., Bertagnini, A., Métrich, N., Pompilio, M., Di Roberto, A., … Romano, C. (2018). Magmatic reactivation of the Campi Flegrei volcanic system: Insights from the Baia–Fondi di Baia eruption. *Bulletin of Volcanology*, *80*(10). https://doi.org/10.1007/s00445-018-1247-8

Vössing, K. (2014). Les Vandales en Afrique du Nord – fossoyeurs ou héritiers de la romanitas ? *L'annuaire du Collège de France*, (113), pp. 928-930. https://doi.org/10.4000/annuaire-cdf.2807

Votruba, G. F. (2007). Imported building materials of Sebastos Harbour, Israel. *International Journal of Nautical Archaeology*, *36*(2), pp. 325-335. https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2007.00152.x

Wallace, W. (1865). On ancient mortars. *Chemical News and Journal of Industrial Science*, *11*, pp. 185-186.

Weber, J., Köberle, T., et Pintér, F. (2019). Methods of microscopy to identify and characterise hydraulic binders in historic mortars—A methodological approach. Dans J. J. Hughes, J. Válek, et C. J. W. P. Groot (Éds), *Historic Mortars* (pp. 21-31). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91606-4_2

Weiner, S. (2010). *Microarchaeology : Beyond the Visible Archaeological Record*. Leiden : Cambridge University Press.

Werner, A. M., et Lange, D. A. (1999). Quantitative image analysis of masonry mortar microstructure. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *13*(2), pp. 110-115. https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(1999)13:2(110)

Wintle, A. G., et Huntley, D. J. (1982). Thermoluminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, *1*(1), pp. 31-53. https://doi.org/10.1016/0277-3791(82)90018-x

Zacharias, N., Mauz, B., et T. Michael, C. (2002). Luminescence quartz dating of lime mortars. A first research approach. *Radiation Protection Dosimetry*, *101*(1), pp. 379-382. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006006

Zanella, S. (2017). Des tas et des remblais. Le remploi des enduits à Pompéi ? : Un point sur la question. Dans M. Carrive (Éd.), *Remployer, recycler, restaurer : Les autres vies des enduits peints* (pp. 19-34). Rome : Publications de l'École française de Rome.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition et épaisseurs des couches de préparation pour les revêtements de sol selon les recommandations faites par Vitruve (De architectura, VII, 1) 43

Tableau 2 : Dimensions des cuves à chaux gallo-romaines retrouvées pendant les fouilles dans l'agglomération de Limoges (d'après Loustaud, 1983) 52

Tableau 3 : Liste des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les structures romaines les plus représentatives du site archéologique d'Hippone..... 105

Tableau 4 : Caractéristiques macroscopiques des cinquante-cinq spécimens identifiés dans les échantillons de mortier de chaux des structures romaines du site archéologique d'Hippone 121

Tableau 5 : Rapports entre les volumes de chaux et de granulat dans les spécimens de mortier de chaux prélevés depuis les structures romaines du site archéologique d'Hippone . 122

Tableau 6 : Caractéristiques pétrographiques des fragments pyroclastiques identifiés dans les échantillons de mortier de chaux prélevés à Hippone 130

Tableau 7 : Variation des teneurs en poids d'oxydes (% pds) des éléments majeurs dans les matrices des fragments pyroclastiques identifiés dans les échantillons de mortier de chaux prélevés à Hippone..... 134

Tableau 8 : Classification des échantillons de mortier de chaux romain selon les critères discriminants retenus (les sables mis en évidence en gras correspondent à des sables tamisés)..... 142

Tableau 9 : Caractéristiques des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les structures romaines en maçonnerie se trouvant dans la cité d'Hippo Regius..... 175

Tableau 10 : Caractéristiques des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les supports de mosaïques se trouvant dans le site archéologique d'Hippone 176

Tableau 11 : Caractéristiques des échantillons de mortier de chaux prélevés depuis les ouvrages hydrauliques se trouvant dans le site archéologique d'Hippone 179

Tableau 12 : Caractéristiques des couches constituant l'échantillon d'enduit peint BDX22400 180

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des villages et établissements néolithiques où les premiers liants architecturaux à base de chaux et de plâtre ont été identifiés (d'après Hole et Flannery, 1962 ; Moore et al., 1975 ; Kingery et al., 1988 ; Karkanas, 2007 ; Bonsall et al., 2008 ; Philokyprou, 2012) 25

Figure 2 : Localisation des structures qui présentent des enduits de stuc, des enduits de protection et de décoration et des mortiers hydrauliques datant de l'âge du bronze à l'époque archaïque (d'après Iacopi et al., 1928 ; Orlandos, 1966 ; Cameron et al., 1977 ; Koui et Ftikos, 1998 ; Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003 ; Brysbaert, 2008 ; Shaw, 2009 ; Malacrino, 2010 ; Theodoridou et al., 2013 ; Guimier-Sorbets, 2021) 28

Figure 3 : Localisation des structures des époques classique et hellénistique présentant des enduits de stuc, des revêtements de sol et des mortiers hydrauliques (d'après Orlandos, 1966 ; Morel, 1969 ; Ferchiou, 1995 ; Malacrino, 2010 ; Heinz, 2012 ; Vassal, 2016 ; Lazzarini et al., 2019 ; D'Ovidio et Bromblet, 2021 ; Guimier-Sorbets, 2021) 30

Figure 4 : Localisation des structures et des installations portuaires où l'on observe l'utilisation de l'opus caementicium et des mortiers hydrauliques durant les périodes romaines de la République et de l'Empire (d'après Lancaster et al., 2011 ; Jackson et al., 2012 ; Lancaster, 2015) 32

Figure 5 : Localisation des structures maritimes romaines dont les mortiers hydrauliques ont été étudiés par le groupe de recherche ROMACONS (d'après Jackson et al., 2012) .. 57

Figure 6 : Localisation des bornes-limites numérotées 109, 132 et 134 dans « Inscriptions latines de l'Algérie » et limites du territoire municipal d'Hippo Regius (d'après Gsell, 1922 ; Lancel, 1984) 81

Figure 7 : Réseau des voies terrestres majeures et mineures reliant Hippo Regius aux cités voisines de l'Afrique romaine (d'après Talbert et Bagnall, 2000 ; McCormick et al., 2013) 82

Figure 8 : Plan du site archéologique d'Hippo Regius montrant l'étendue des secteurs fouillés entre 1895 et 1964, ainsi que les structures monumentales et les habitations datant de l'occupation romaine de la cité (d'après Marec, 1954 ; Stawski, 1957 ; Delestre, 2005c) 91

Figure 9 : Charte visuelle utilisée pour l'estimation du pourcentage de grains à partir de l'observation sur une lame mince (d'après Terry et Chilingar, 1955) 115

Figure 10 : Représentation schématique des catégories d'émoussés en fonction de la faible, moyenne et forte sphéricité des grains (d'après Powers, 1953 ; Pettijohn et al., 1987) 116

Figure 11 : Microphotographies en LPA montrant des nodules de chaux non mélangés dans les spécimens : (a) BDX22381b ; (b) BDX22383 ; (c) BDX22384b ; (d) BDX22389.... 123

Figure 12 : Microphotographies en LPA montrant des nodules de chaux partiellement calcinés dans les spécimens : (a) BDX22381a ; (b) BDX22393 ; (c) BDX22394 ; (d) BDX22407 124

Figure 13 : Microphotographies en LPA montrant des pores de formes sphériques et oblongues dans les spécimens : (a) BDX22384b ; (b) BDX22397b ; (c) BDX22399 ; (d) BDX22400b..... 126

Figure 14 : Microphotographies en LPA montrant : (a) une charge calcaire avec des grains anguleux dans BDX22400a et une charge silico-calcaire avec (b) des grains anguleux dans BDX22383 ; (c) des grains sub-anguleux dans BDX22391 ; (d) des grains très émoussés dans BDX22388 128

Figure 15 : Microphotographies en LPA montrant des fragments pyroclastiques avec : (a) une texture microlithique aphanitique dans BDX22378 ; (b) une texture microlithique porphyrique dans BDX22398 ; (c) une texture microgrenue porphyrique dans BDX22387b et (d) BDX22389 131

Figure 16 : Microphotographies en CL montrant des fragments pyroclastiques identifiés dans les spécimens : (a) BDX22387 ; (b) BDX22398 ; (c-d) BDX22399 132

Figure 17 : Images en électrons radiodiffusés montrant des fragments pyroclastiques (ponces) identifiés dans les spécimens : (a) BDX22378 ; (b) BDX22381b ; (c) BDX22387a ; (d) BDX22398 133

Figure 18 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant la répartition des fragments pyroclastiques en fonction de la corrélation chimique entre la silice (SiO_2) et la somme des alcalins ($Na_2O + K_2O$) et en rapport à la chimie des roches volcaniques (d'après Le Bas et al., 1986) 135

Figure 19 : Lames minces montrant des inclusions de pouzzolane artificielle avec des teneurs comprises entre 20 et 50 % dans : (a) BDX22384a ; (b) BDX22380 ; (c) BDX22407 ; (d) BDX22409 137

Figure 20 : Microphotographies en LPA montrant des tesselles de couleur : (a) noire dans BDX22401 ; (b) blanche dans BDX22403 ; (c) jaune dans BDX22403 ; (d) rouge dans BDX22403 138

Figure 21 : Carte géologique schématique mettant en évidence les principales formations sédimentaires dans le nord-est de l'Algérie (d'après Vila, 1980) 148

Figure 22 : Carte géologique schématique mettant en évidence les principales formations métamorphiques dans le nord-est de l'Algérie (d'après Vila, 1980) 150

Figure 23 : Carte géologique schématique mettant en évidence les formations ignées du Néogène dans le nord-est de l'Algérie ainsi que la localisation des échantillons de roches volcaniques tertiaires (d'après Vila, 1980 ; Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016 ; Lakkaichi et Bouabsa, 2017) 152

Figure 24 : Carte géologique schématique mettant en évidence les formations priaboniennes à blocs se trouvant à proximité d'Aïn Kerma (d'après Vila, 1980 ; McCormick et al., 2013 ; Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016 ; Lakkaichi et Bouabsa, 2017) 154

Figure 25 : Microphotographies en LPA montrant : (a) des cristaux de calcite constituant la charge dans le spécimen BDX22400c ; (b) un fragment de greco scritto présent dans le spécimen BDX22400d 156

Figure 26 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux ainsi que les échantillons de rhyolite du nord-est de l'Algérie (d'après les données de Daif et Toubal, 2015 ; Abbassene et al., 2016 ; Lakkaichi et Bouabsa, 2017) 159

Figure 27 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux en comparaison avec les produits pyroclastiques des champs Phlégréens et les dépôts volcanoclastiques du Stromboli (données d'après Peccerillo, 2005a, 2005b ; D'Antonio et al., 2007 ; Peccerillo, 2020) 161

Figure 28 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux en comparaison avec la géochimie des produits pyroclastiques des trois principales éruptions du complexe Somma-Vésuve (données d'après Peccerillo, 2005b) 161

Figure 29 : Diagramme Total Alkali Silica (TAS) représentant les pyroclastes identifiés dans les échantillons de mortier de chaux en comparaison avec les dépôts pyroclastiques du Neapolitan Yellow Tuff (NYT) et de l'éruption ignimbritique de Campanie (données d'après Peccerillo, 2005b) 162

Figure 30 : Carte géologique schématique mettant en évidence les formations sédimentaires et ignées (dépôts pyroclastiques) de la région géologique autour de Naples (d'après Orsi et al., 1999 ; Talbert et Bagnall, 2000 ; Tomlinson et al., 2012 ; Peccerillo, 2020) ... 163

Figure 31 : Représentation des principales carrières antiques connues et supposées se trouvant dans les environs d'Hippo Regius et leur relation avec les voies romaines de l'Afrique proconsulaire (d'après Vila, 1980 ; Talbert et Bagnall, 2000 ; Brilli et al., 2010 ; Herrmann, Attanasio, et Tykot, 2012 ; Herrmann, Attanasio, Tykot, et al., 2012a ; McCormick et al., 2013 ; Fioretti et al., 2023) 166

Table des matières

Introduction **3**

Partie 1 : État des connaissances **9**

Chapitre I : Introduction au mortier de chaux **11**

Introduction 11

I.1. Définitions et terminologie du mortier 11

I.1.1. Définition au sens étymologique 12

I.1.2. Définition archéologique et technique 12

I.1.3. Terminologie relative aux composants 13

I.1.4. Classification typologique des mortiers 19

I.2. L'évolution historique des liants architecturaux 24

I.2.1. Dans l'architecture préhistorique 24

I.2.2. Dans l'architecture protohistorique 25

I.2.3. Dans l'architecture antique 29

I.2.4. Dans l'architecture médiévale 32

I.2.5. Dans l'architecture moderne 33

I.3. Les prescriptions des auteurs anciens 34

I.3.1. Pour la sélection de la charge 35

I.3.2. Pour la production de la chaux 36

I.3.3. Pour le choix des inclusions 38

I.3.4. Pour la mise en œuvre du mortier 41

Conclusion 46

Chapitre II : Dynamique des recherches sur le mortier romain **49**

Introduction 49

II.1. La question du savoir-faire romain 50

II.1.1. Dans la production de la chaux 50

II.1.2. Dans l'extinction de la chaux 51

II.1.3. Dans la mise en œuvre du mortier 53

II.1.4. Dans la durabilité et la résistance du mortier 54

II.2. La question de la provenance des matières premières 56

II.3. La question de la chronologie des structures anciennes 63

II.3.1. La méthode de datation relative 64

II.3.2. Les méthodes de datation absolue 64

Conclusion 68

Chapitre III : État des connaissances sur la cité d'Hippone (*Hippo Regius*)..... 71
Introduction 71
III.1. Le contexte d'implantation et l'histoire de la cité 72
III.1.1. La fondation phénico-punique (XIIe au IIIe siècle av. J.-C.)..... 73
III.1.2. La dualité numido-punique (IIIe au Ier siècle av. J.-C.)..... 76
III.1.3. L'annexion romaine (Ier siècle av. J.-C. au Ve siècle apr. J.-C.) 79
III.1.4. L'invasion vandale (V^{e} au VIe siècle apr. J.-C.) 83
III.1.5. La reconquête byzantine (VIe au VIIe siècle apr. J.-C.) 85
III.1.6. L'expansion de l'Islam (à partir du VIIe siècle apr. J.-C.) 86
III.2. Les recherches archéologiques 87
III.2.1. La redécouverte d'Hippone (1833 - 1895)..... 87
III.2.2. Les fouilles archéologiques (1895 - 1964)..... 88
III.2.3. Les activités scientifiques récentes (1969 - 2020) 90
III.3. Les principales découvertes architecturales 92
III.3.1. Les *villae* du front de mer 92
III.3.2. Le quartier chrétien 93
III.3.3. Le *macellum* 94
III.3.4. Le forum et ses abords 95
III.3.5. Le théâtre..... 95
III.3.6. Les grands thermes du nord 96
III.3.7. Les thermes du sud..... 97
III.4. Les matériaux de construction employés 97
Conclusion..... 99

Partie 2 : Archéométrie du mortier de chaux 101

Chapitre IV : Matériel archéologique et protocoles de l'étude archéométrique..... 103
Introduction 103
IV.1. Le protocole de prélèvement des échantillons 104
IV.2. Le protocole de préparation des échantillons..... 105
IV.2.1. Préparation des lames minces 106
IV.2.2. Préparation des sections polies 107
IV.3. Les méthodes de caractérisation archéométrique..... 107
IV.3.1. La caractérisation macroscopique..... 108
IV.3.2. La caractérisation microscopique 109
IV.4. La méthode d'interprétation des résultats 111
IV.4.1. Les caractéristiques générales..... 112
IV.4.2. Les caractéristiques du liant..... 113

IV.4.3. Les caractéristiques de la charge 115
IV.4.4. Les caractéristiques des inclusions 117
Conclusion 117

Chapitre V : Résultats de caractérisation et classification des échantillons 119

Introduction 119
V.1. Les observations macroscopiques 119
V.2. Les observations microscopiques 121
V.2.1. Les caractéristiques du liant 122
V.2.2. Les caractéristiques de la charge 127
V.2.3. Les caractéristiques des inclusions 130
V.3. La classification des échantillons 139
V.3.1. Les critères discriminants 139
V.3.2. Les groupes de spécimens 139
Conclusion 143

Partie 3 : Reconstitution du mortier de chaux 145

Chapitre VI : Réflexions sur la provenance des matières premières 147

Introduction 147
VI.1. Aperçu du contexte géologique autour d'*Hippo Regius* 148
VI.1.1. Les roches sédimentaires 149
VI.1.2. Les roches métamorphiques 149
VI.1.3. Les roches ignées 151
VI.2. La provenance de la pierre à chaux 153
VI.2.1. Le marbre du cap de Garde 153
VI.2.2. Les affleurements de calcaires d'Aïn Kerma 154
VI.2.3. Les calcaires du massif du Bou Hamra 155
VI.3. La provenance des sables 155
VI.3.1. Le sable calcaire 156
VI.3.2. Les sables silico-calcaires 157
VI.4. La provenance de la pouzzolane naturelle 158
VI.4.1. L'hypothèse de la provenance locale 159
VI.4.2. L'hypothèse de l'importation 160
VI.5. La provenance de la pouzzolane artificielle 164
VI.5.1. Les terres cuites architecturales 164
VI.5.2. Les tessons de céramique 165
VI.6. La provenance des tesselles de mosaïques 165
VI.6.1. Les tesselles de couleur noire 166

VI.6.2. Les tesselles de couleur jaune 167
VI.6.3. Les tesselles de couleur rouge 167
VI.6.4. les tesselles de couleur blanche 167
Conclusion 168

Chapitre VII : Réflexions sur la chaîne opératoire et le savoir-faire 169
Introduction 169
VII.1. La chaîne opératoire : un essai de reconstitution 170
VII.2. La mise en œuvre : entre théorie et pratique 174
VII.2.1. Les mortiers de maçonnerie 174
VII.2.2. Les revêtements de sol 175
VII.2.3. Les supports de placages muraux 178
VII.2.4. Les revêtements hydrauliques 178
VII.2.5. Les enduits de protection 180
VII.2.6. L'enduit de décoration 180
Conclusion 181

Conclusion et perspectives 185

Bibliographie 189

Liste des tableaux 213

Liste des figures 214

Table des matières 217

Fiches archéométriques 225

Plans de prélèvement des échantillons 433

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار – عنابـــــــة

Faculté des Sciences de la Terre
Département d'Architecture

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3ème CYCLE

Filière : Architecture
Spécialité : Restauration et conservation

Préparée dans le cadre d'une cotutelle internationale
de thèse avec l'Université Bordeaux Montaigne

Archéométrie et reconstitution du mortier de chaux des constructions antiques du nord-est de l'Algérie : le cas du site d'Hippone

Volume 2

Présentée et soutenue publiquement le 3 juillet 2024

par

Mohamed Sofiane DJERAD

Sous la direction de Khedidja Boufenara et Jacques des Courtils

Membres du jury

M. Riad ZEGHIB, Maître de conférences A, Université Badji Mokhtar-Annaba	Président du jury
M. Jean-Yves MARC, Professeur, Université de Strasbourg	Rapporteur
M. Zahreddine NAFA, Professeur, Université 8 mai 1945 Guelma	Rapporteur
Mme Laurence CAVALIER, Professeur, Université Bordeaux Montaigne	Examinatrice
Mme Mariette RAAIJMAKERS DE VOS, Professeur, Università di Trento	Invitée
M. Arnaud COUTELAS, Chercheur associé, UMR 8546 AOROC (CNRS-ENS Paris)	Invité

2023-2024

Université Badji Mokhtar-Annaba
B.P.12, Annaba, 23000 Algérie

Sommaire

Fiches archéométriques 225
BDX22378 227
BDX22379 233
BDX22380 239
BDX22381 245
BDX22382 255
BDX22383 261
BDX22384 267
BDX22385 273
BDX22386 281
BDX22387 289
BDX22388 297
BDX22389 303
BDX22390 309
BDX22391 315
BDX22392 321
BDX22393 327
BDX22394 331
BDX22395 335
BDX22396 339
BDX22397 343
BDX22398 351
BDX22399 357
BDX22400 363
BDX22401 373
BDX22402 381
BDX22403 387
BDX22404 393
BDX22405 397
BDX22406 401
BDX22407 405
BDX22408 411

BDX22409 417
BDX22410 421
BDX22411 427

Plans de prélèvement des échantillons 433

Liste des tableaux 441

Liste des figures 448

Fiches archéométriques

Ce second volume regroupe les fiches archéométriques des échantillons de mortier de chaux prélevés à partir des structures du site archéologique d'Hippone (*Hippo Regius*). Les prélèvements ont été réalisés après l'obtention de l'autorisation nº 502/SM/MC du 30 août 2018 auprès du ministère algérien de la Culture, conformément aux dispositions des articles 60 et 62 de la loi nº 98-04 du 15 juin 1998. La préparation des échantillons de mortier de chaux en laboratoire et la réalisation des analyses archéométriques ont été rendues possibles grâce à la coopération entre les deux unités mixtes de recherche, Institut Ausonius (UMR 5607) et Archéosciences Bordeaux (UMR 6034). Les données de caractérisation de chaque échantillon de mortier ont été renseignées dans des « fiches archéométriques » et présentées selon trois échelles distinctes, correspondant aux trois sections suivantes : le contexte archéologique et les caractéristiques générales, les caractéristiques pétrographiques, et enfin, les caractéristiques physico-chimiques.

La première section regroupe les données relatives au contexte archéologique de chaque échantillon. Elle comprend des détails tels que le site archéologique, la structure d'origine du prélèvement, la datation présumée, et les coordonnées géodésiques du point de prélèvement, exprimées en format degré décimal (WGS 84). Cette section présente également les caractéristiques générales de l'échantillon de mortier, évaluées visuellement à l'œil nu et à l'aide d'une loupe binoculaire. En outre, elle inclut des informations telles que la résistance apparente, la couleur du liant, ainsi que l'épaisseur et la texture granulométrique de l'échantillon.

La deuxième section marque la transition vers une échelle microscopique, impliquant l'utilisation d'instruments d'observation spécifiques à la pétrographie tels que le microscope optique polarisant. Les observations réalisées avec le microscope optique en lumière polarisée non analysée (LPNA) et lumière polarisée analysée (LPA) ont permis d'identifier les caractéristiques des constituants du liant (nodules de chaux et porosité) et de la charge (composantes lithique et minéralogique), ainsi que les propriétés des inclusions. Ces descriptions sont accompagnées de microphotographies en LPNA et LPA, ainsi que de tableaux détaillant la forme, la taille, la teneur et la répartition de chaque constituant dans la matrice. Pour les échantillons composés de plusieurs couches, les caractéristiques des composants sont fournies pour chaque couche (couche a, couche b, *etc*.) selon un ordre stratigraphique, c'est-à-dire dans l'ordre inverse de leur application, la première couche étant la couche de finition et la dernière la couche de préparation.

La troisième section présente les données physico-chimiques obtenues à l'aide du microscope optique à cathodoluminescence (CL) et du microscope électronique à balayage (MEB) associé à la microsonde de spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS). Les observations réalisées au microscope optique à CL permettent de différencier les principaux constituants de la charge utilisée dans chaque échantillon, tels que les cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases, ainsi que les cristaux de calcite. Elles permettent également d'évaluer la teneur des nodules de chaux et l'homogénéité du liant.

Les analyses complémentaires réalisées avec le MEB-EDS permettent, quant à elles, une observation détaillée de la structure interne de certains constituants jusqu'à un grossissement de × 600 000, offrant ainsi la possibilité de déterminer leurs compositions élémentaires. Les descriptions des caractéristiques physico-chimiques sont accompagnées de microphotographies en lumière naturelle et en cathodoluminescence, ainsi que d'images en électrons radiodiffusés et de spectres issus des microanalyses EDS. Enfin, le point de prélèvement de chaque échantillon de mortier est introduit dans une couche SIG et représenté sur les plans des structures romaines du site archéologique d'Hippone, avec un système de coordonnées de référence (SCR) : Nord Sahara 1959/UTM zone 32N — EPSG:30732.

FICHE 1 BDX22378

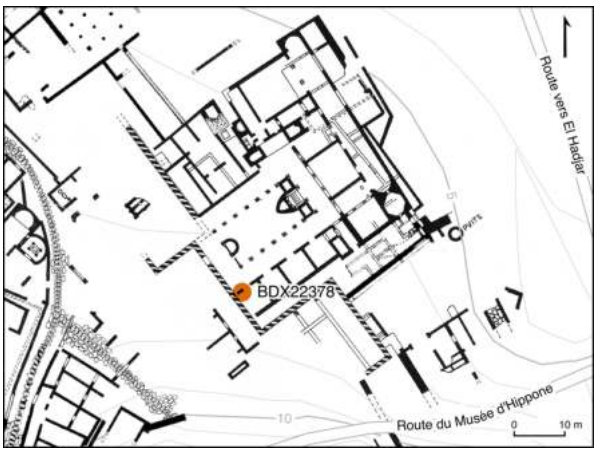

Figure 32 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22378 depuis le mur en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur (*opus testaceum*)
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : 280 à 330 apr. J.-C. (Phase 2)
Localisation : Pièce B15
Date de prélèvement : 11/11/2018
Coordonnées : 36.8830770825079, 7.75159938038433

L'échantillon BDX22378 a été prélevé à partir du mur en *opus testaceum* se trouvant à l'ouest de la pièce B15 du complexe des *villae* du front de mer. Il a été sélectionné entre les troisième et quatrième assises de briques afin d'éviter les sections potentiellement restaurées lors de la campagne dirigée en 1951 par E. Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 30 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur beige foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition homogène, présentant de rares nodules de chaux partiellement calcinés (1 %) ainsi qu'une porosité de formes sphériques (3 %) et oblongues (1 %). La charge se compose d'un sable silico-calcaire caractérisé par une granularité hétérogène et par des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est constitué principalement de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases ainsi que de micas. En ce qui concerne les inclusions, on remarque la présence de quelques fragments pyroclastiques (< 1 %) de nature trachytique, ainsi que d'un fragment de tuileau d'environ 9 mm de large qui provient probablement de la brique utilisée dans le mur en *opus testaceum*.

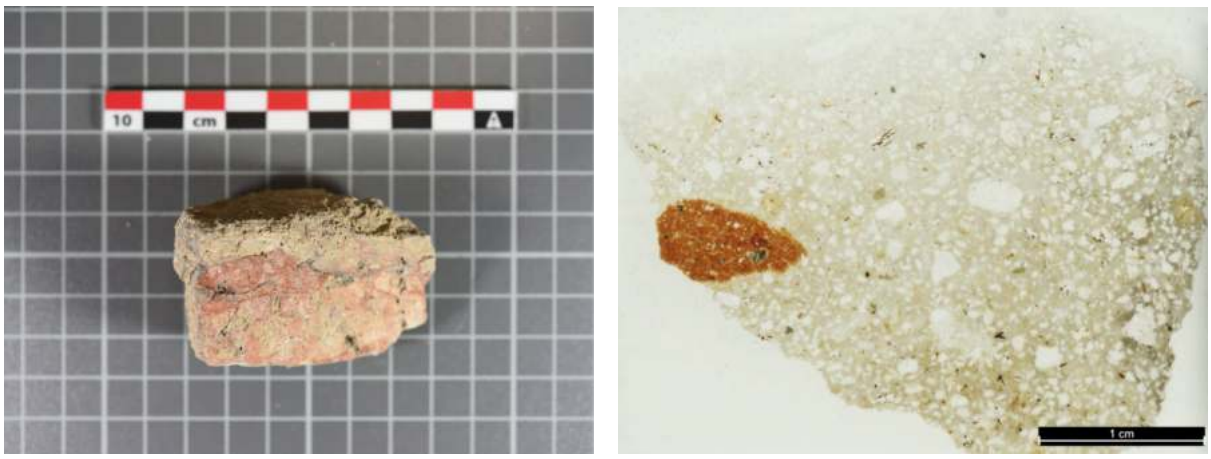

Figure 33 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22378 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.3 - 0.4	1	Sphérique	0.1 - 1.0	3
			Oblongue	0.4 - 0.9	1

Tableau 13 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22378

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 3.4	10	Homogène
Gneiss	Métamorphique	Sub-angulaire	0.4 - 1.8	3	Hétérogène

Tableau 14 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22378

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.3 - 1.2	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 1.8	20	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.4 - 1.8	10	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 1.2	5	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.2	1	Hétérogène
Hornblende	Sub-émoussée	0.9	< 1	Hétérogène
Biotite	Angulaire	0.2 - 0.9	< 1	Homogène
Hornblende	Angulaire	0.4	< 1	Hétérogène

Tableau 15 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22378

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	9.0	< 1	Hétérogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.3 - 0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 16 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22378

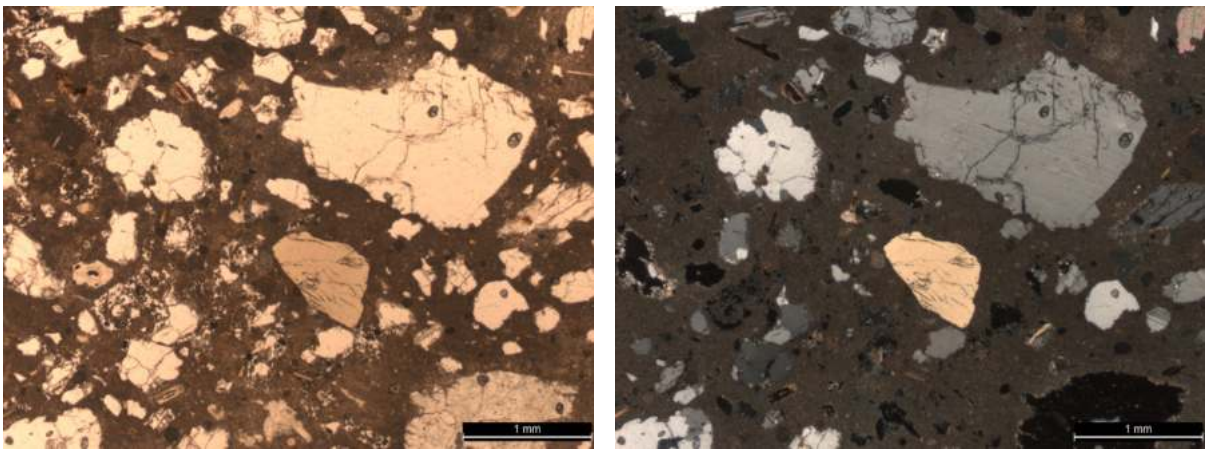

Figure 34 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant des grains de quartz, de micas et de feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 2.5)

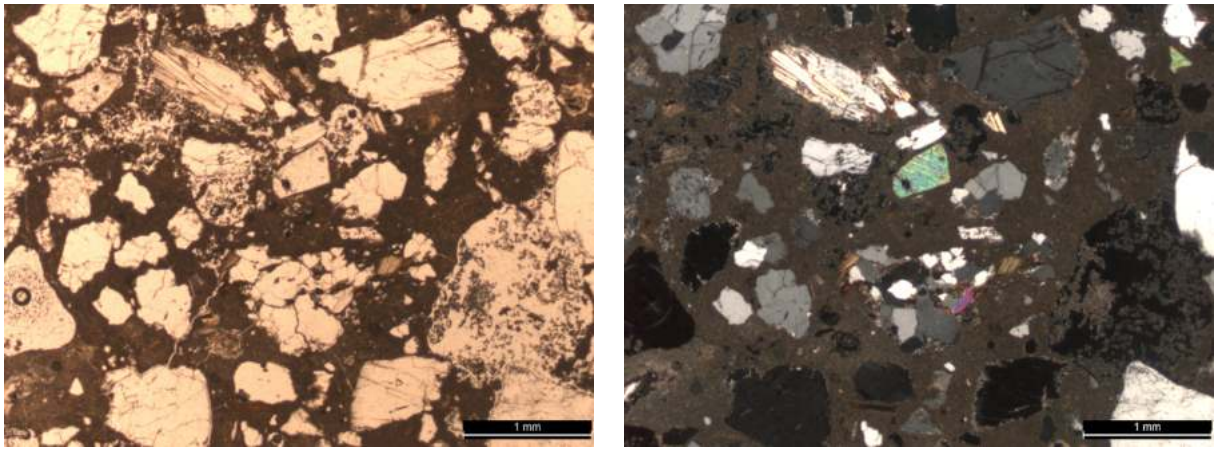

Figure 35 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant la présence de cristaux de calcite et de fragments de roches siliceuses (grossissement × 2.5)

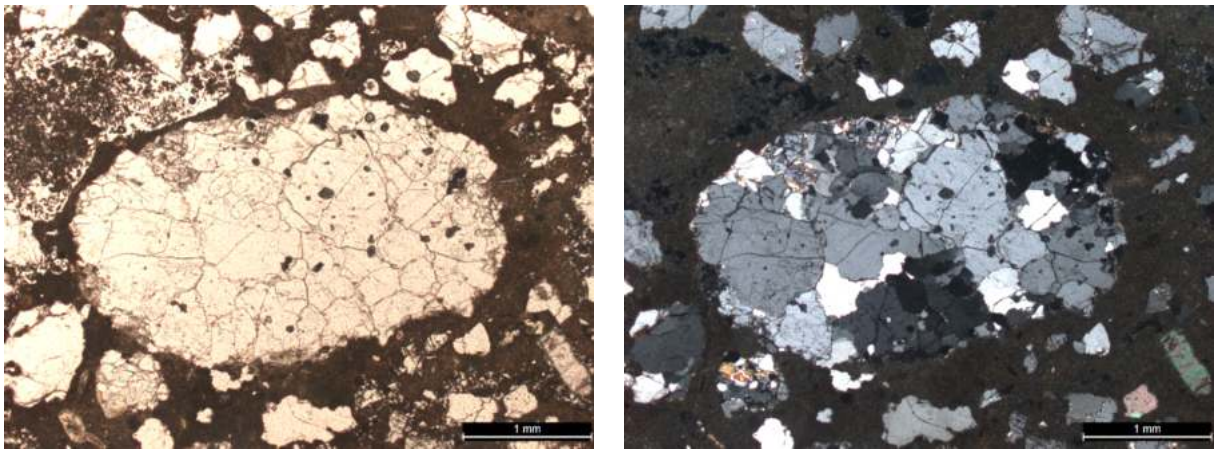

Figure 36 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant un fragment de granite de forme sub-émoussée et de faible sphéricité (grossissement × 2.5)

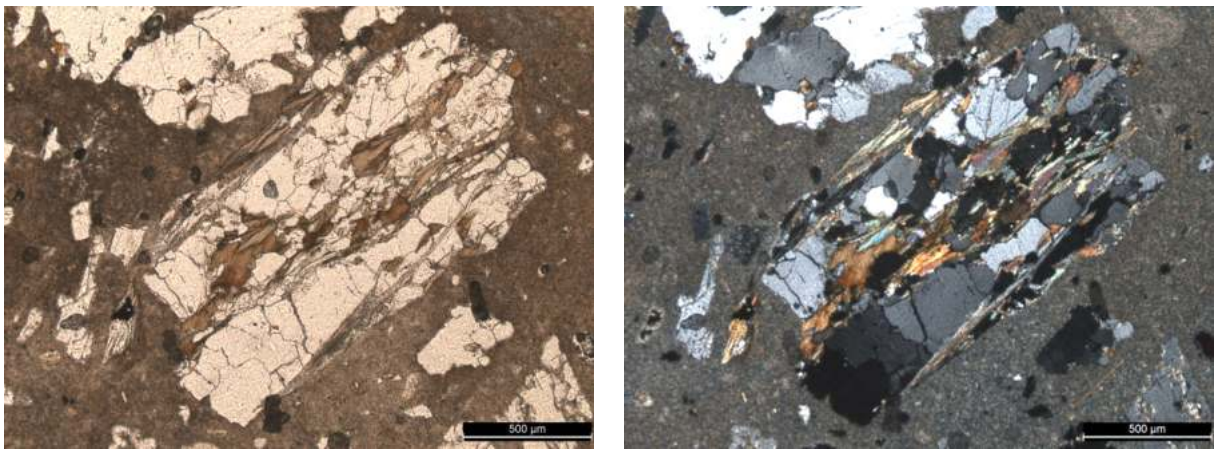

Figure 37 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant un fragment de gneiss avec des plages de quartz, feldspaths et micas (grossissement × 5)

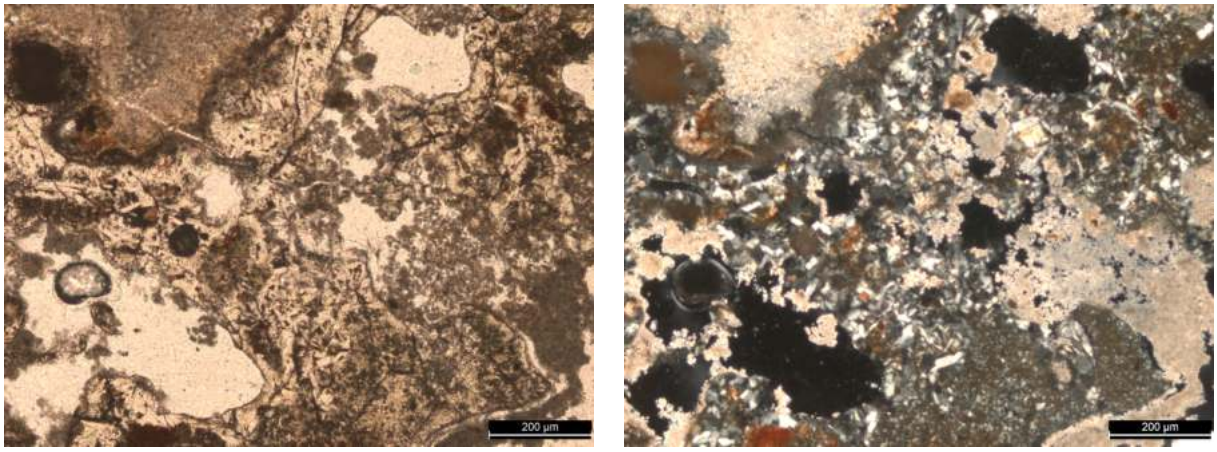

Figure 38 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant des formations de silicates de calcium et d'aluminium hydratés (grossissement × 10)

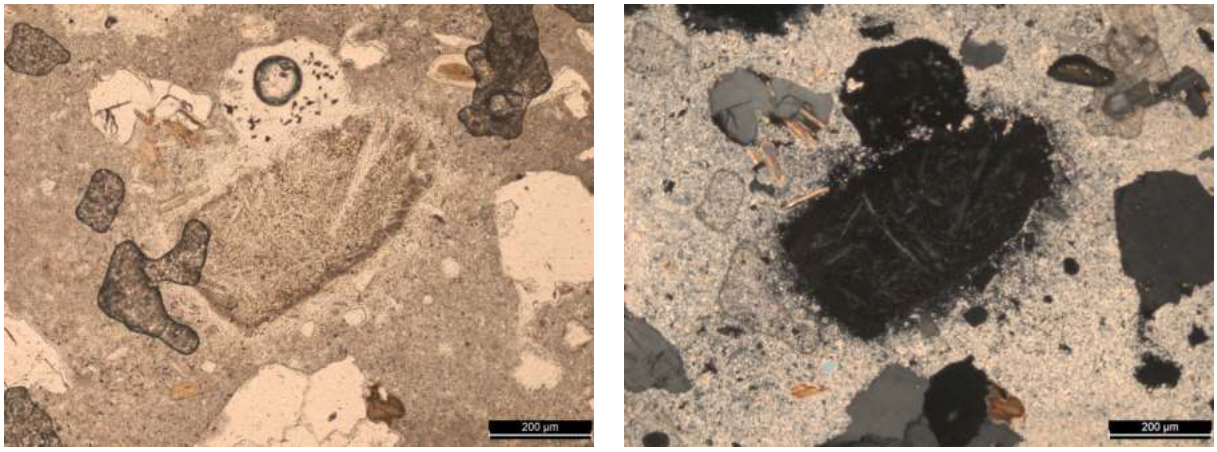

Figure 39 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant un pyroclaste trachytique à texture microlithique (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant constitué de chaux carbonatée (luminescence orange), intégrant quelques rares nodules de chaux partiellement calcinés. En outre, des cristaux de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et plagioclases (luminescence verte) sont également observés. Ceux-ci composant le sable silico-calcaire qui constitue la charge. Les observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) montrent la présence d'un fragment pyroclastique composé d'une matrice vitreuse microporeuse avec des inclusions de microlithes de feldspaths. Une interface de réaction (de couleur gris sombre) est discernable entre le fragment pyroclastique et le liant à base de chaux. Enfin, les analyses élémentaires du fragment pyroclastique réalisées avec la microsonde EDS montrent des teneurs en SiO_2 fluctuant entre 61,44 et 63,03 % pds et des concentrations en $Na_2O + K_2O$ comprises entre 12,01 et 12,25 % pds. Ces résultats ont permis de déterminer la nature trachytique des fragments de roches volcaniques à l'aide du diagramme Total Alkali Silica (TAS).

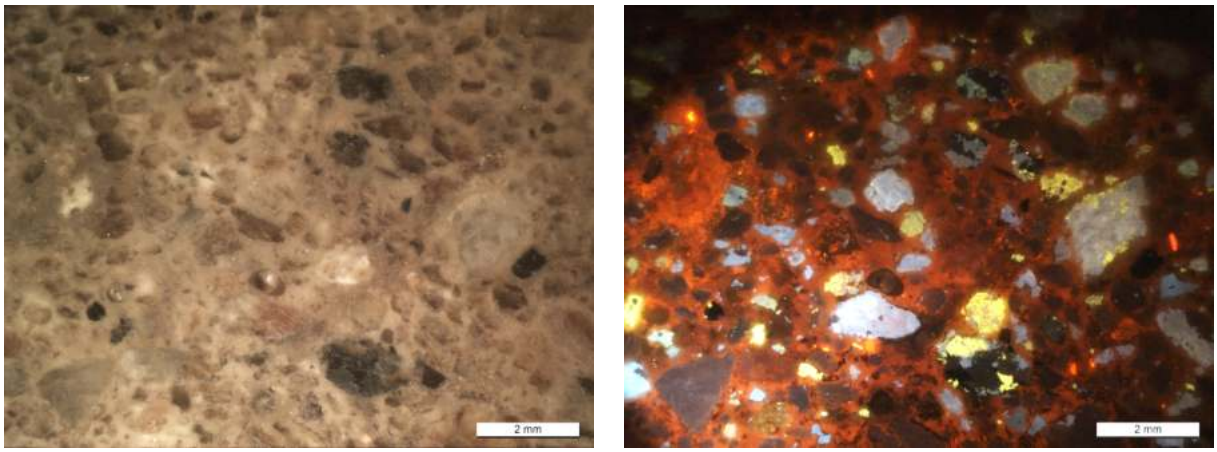

Figure 40 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22378 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

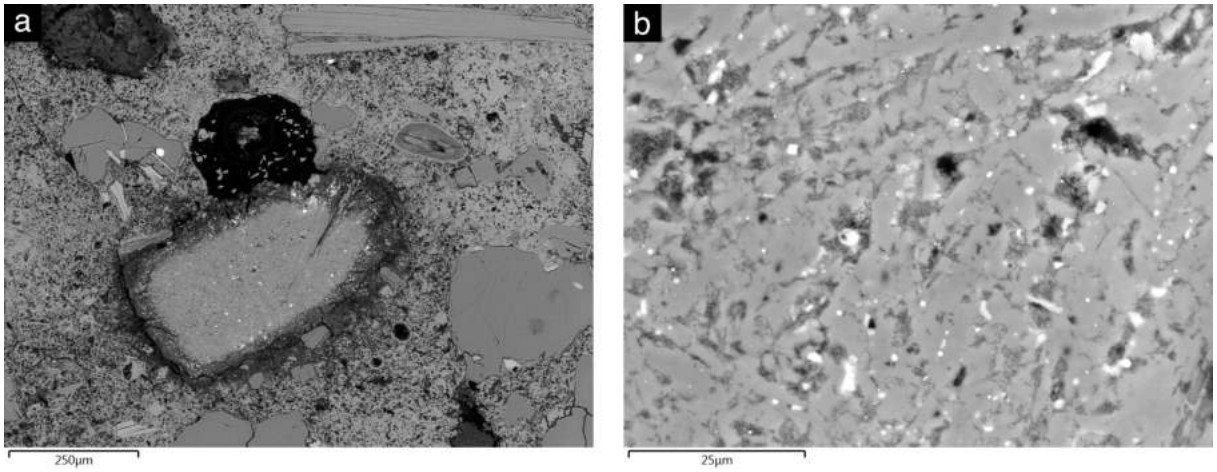

Figure 41 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22378 montrant (a) un fragment de roche volcanique de nature trachytique avec une interface de réaction (en gris sombre) autour du pyroclaste ; (b) le détail de la matrice vitreuse et des inclusions de microlithes

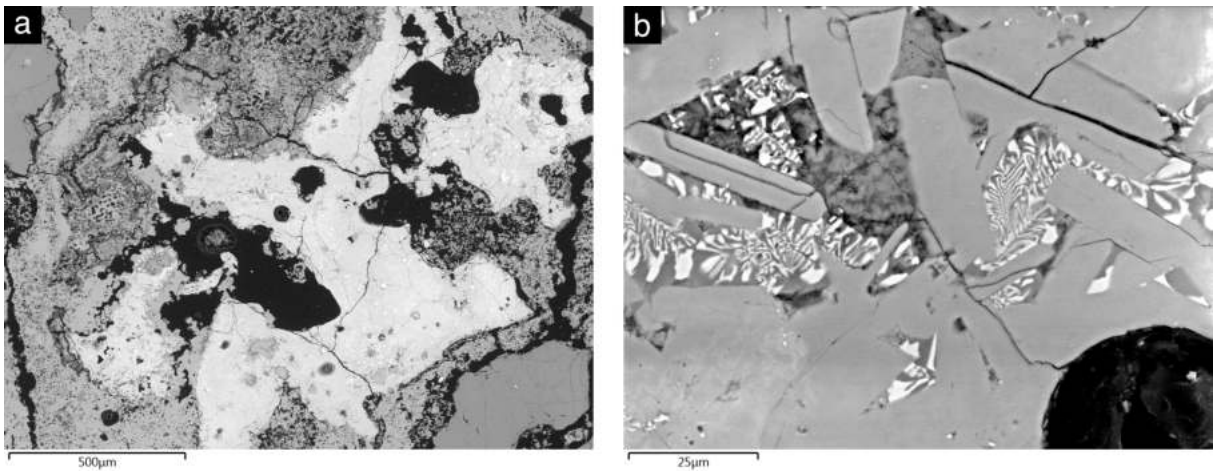

Figure 42 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22378 montrant (a) une réaction entre le liant à base de chaux et la charge ; (b) des formations d'aluminosilicates de calcium hydratés

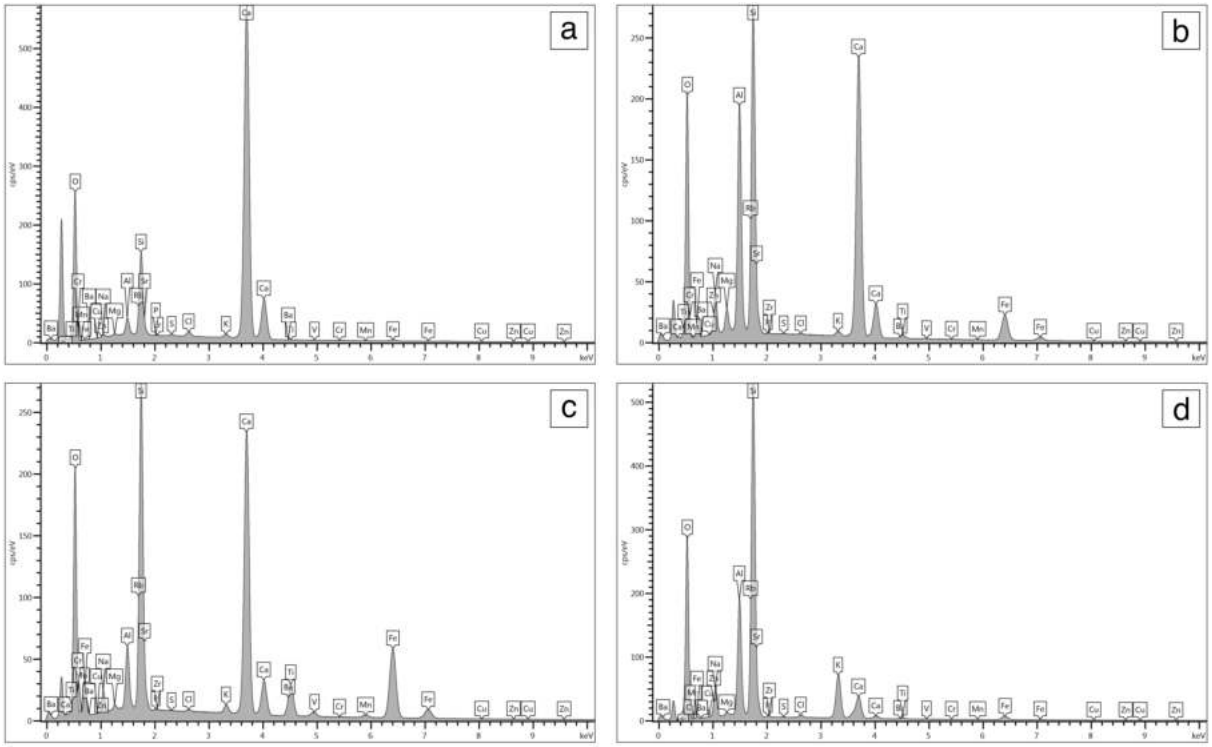

Figure 43 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22378 montrant la composition élémentaire de : (a) liant à base de chaux ; (b-c) aluminosilicates et silicates de calcium hydratés résultants des réactions pouzzolaniques entre le liant et les granulats ; (d) matrice vitreuse du pyroclaste trachytique employé comme pouzzolane naturelle

FICHE 2 BDX22379

Figure 44 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22379 depuis un bassin du péristyle B16 et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Bassin
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : 280 à 330 apr. J.-C. (Phase 2)
Localisation : Péristyle B16
Date de prélèvement : 11/11/2018
Coordonnées : 36.8832291274577, 7.75175179855717

L'échantillon BDX22379 a été prélevé depuis l'enduit de la face externe du bassin situé aux abords du Péristyle B16, au sein des *villae* du front de mer. Il est important de noter que cet enduit n'a pas été modifié lors de la campagne de restauration dirigée en 1951 par E. Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit d'étanchéité
Couleur : Rose ; Beige clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Limono-sableuse

Le fragment d'enduit se compose de deux couches : une couche de finition d'environ 7 mm d'épaisseur, de couleur rose, et une de préparation, d'une épaisseur approximative de 34 mm, de teinte beige clair.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations microscopiques révèlent un liant de composition hétérogène, avec des nodules de chaux non mélangés (20 %) et partiellement calcinés (entre 1 et 3 %), ainsi qu'une porosité élevée présentant des pores de formes oblongues (10 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire avec une granularité hétérogène et des grains présentant des formes sub-angulaires. Ce sable est majoritairement constitué de quartz, de feldspaths alcalins et de micas. Les inclusions de tuileau sont de petit calibre (jusqu'à 3 mm) et en grande quantité (20 %) dans la couche de finition et de plus gros calibre (jusqu'à 9 mm) et en quantité inférieure (10 %) dans la couche de préparation.

Figure 45 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22379 montrant une matrice de couleur beige clair et une charge non tamisée

BDX22379a : Couche de finition (7 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 1.2	20	Sphérique	0.1 - 0.7	10
Partiellement calcinés	0.3 - 0.5	3	Oblongue	0.3 - 1.0	5

Tableau 17 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22379a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	0.9 - 1.0	1	Homogène
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.7 - 2.3	1	Hétérogène
Arénite	Sédimentaire	Sub-émoussée	1.2	< 1	Hétérogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	1.0	< 1	Hétérogène

Tableau 18 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22379a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.4	3	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.3 - 0.4	3	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.1 - 0.4	2	Homogène
Biotite	Sub-angulaire	0.1 - 0.5	1	Homogène
Calcite	Sub-émoussée	0.4 - 0.5	1	Hétérogène

Tableau 19 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22379a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 3.0	20	Homogène

Tableau 20 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22379a

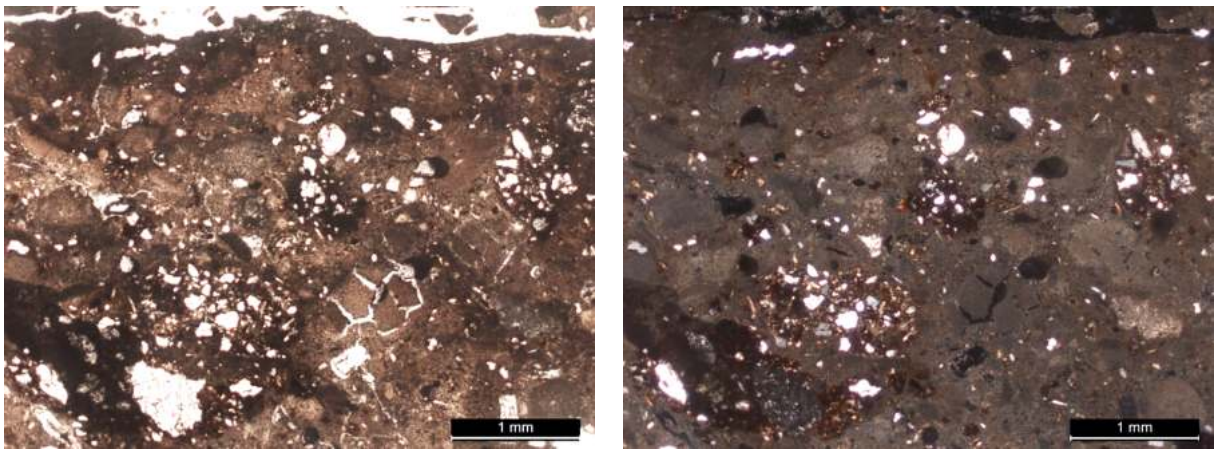

Figure 46 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379a montrant des fragments de terres cuites et des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

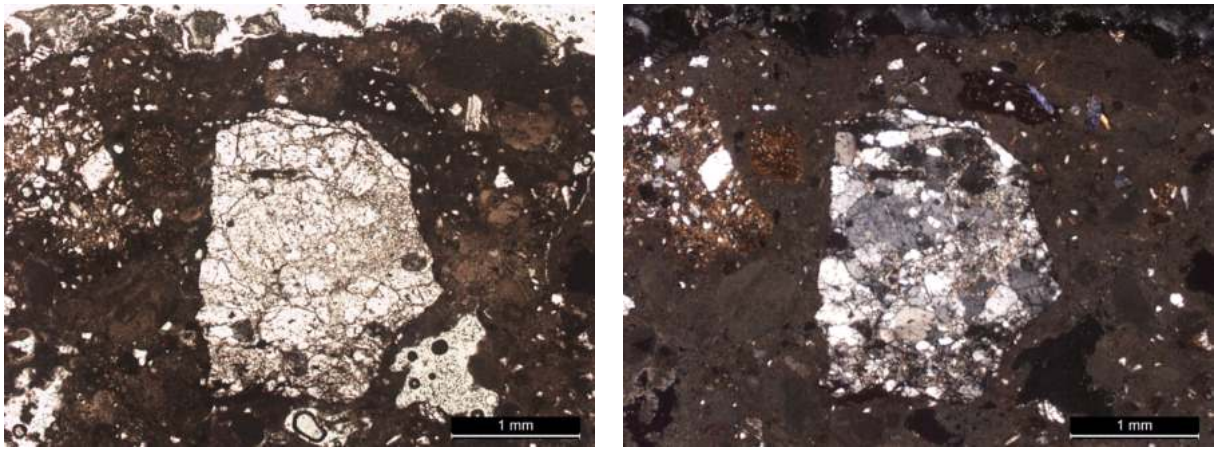

Figure 47 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379a montrant un fragment de granite entouré de fragments de tuileau (grossissement × 2.5)

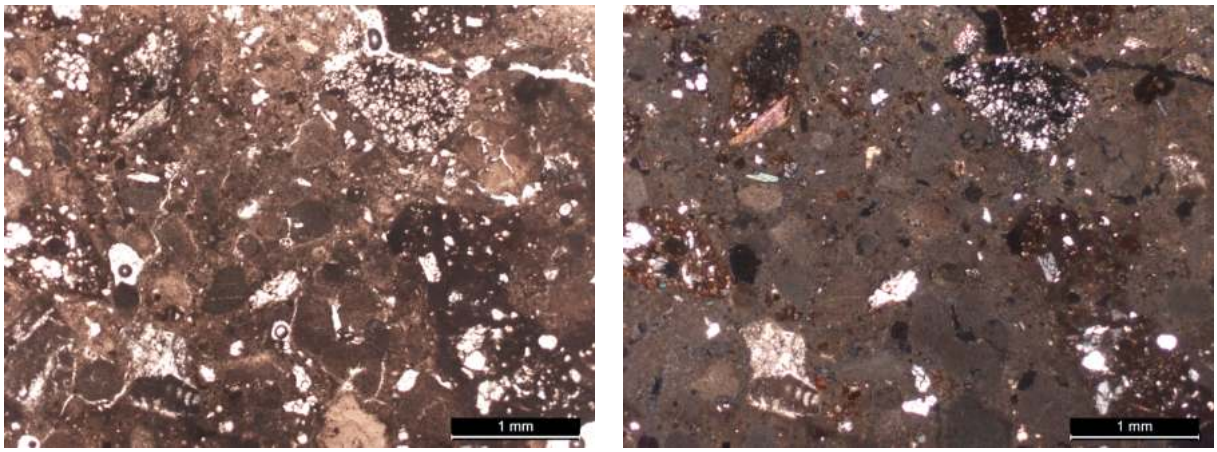

Figure 48 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379a montrant des fragments de roche calcaire à foraminifères et un fragment d'arénite (grossissement × 2.5)

BDX22379b : Couche de préparation (34 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 0.6	20	Sphérique	0.2 - 0.6	10
Partiellement calcinés	0.3 - 0.7	1	Oblongue	0.7 - 4.2	5

Tableau 21 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22379b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.7 - 1.0	< 1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 22 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22379b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.6	3	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	1	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.3 - 0.6	1	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 0.8	1	Homogène

Tableau 23 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22379b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.4 - 9.0	10	Homogène

Tableau 24 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22379b

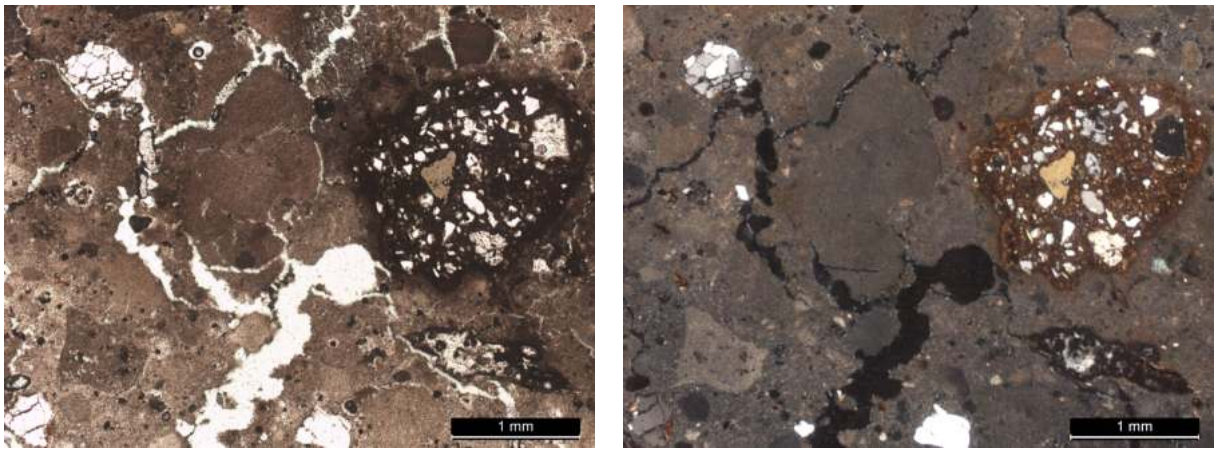

Figure 49 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux et un fragment de tuileau (grossissement × 2.5)

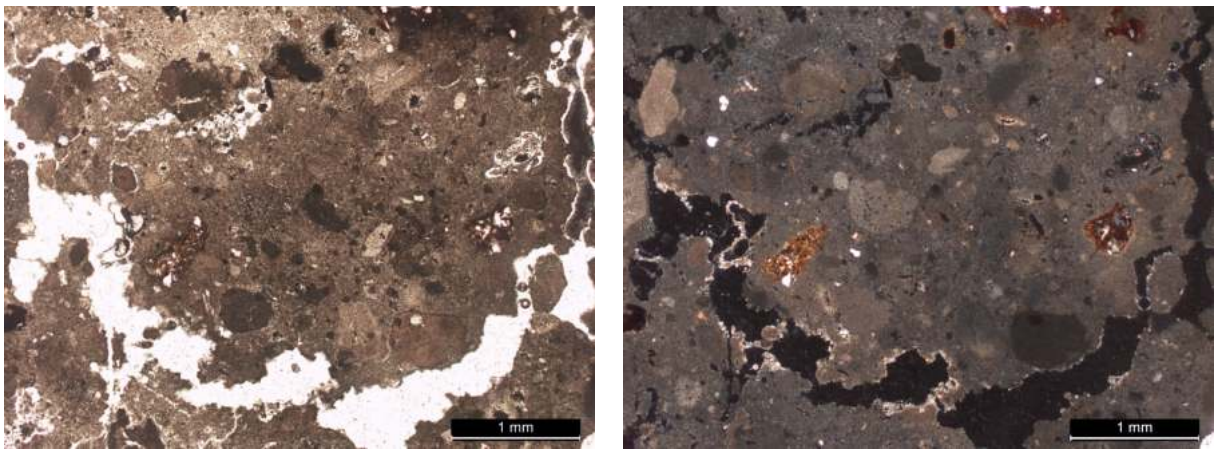

Figure 50 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux non mélangés et des fragments de bioclastes (grossissement × 2.5)

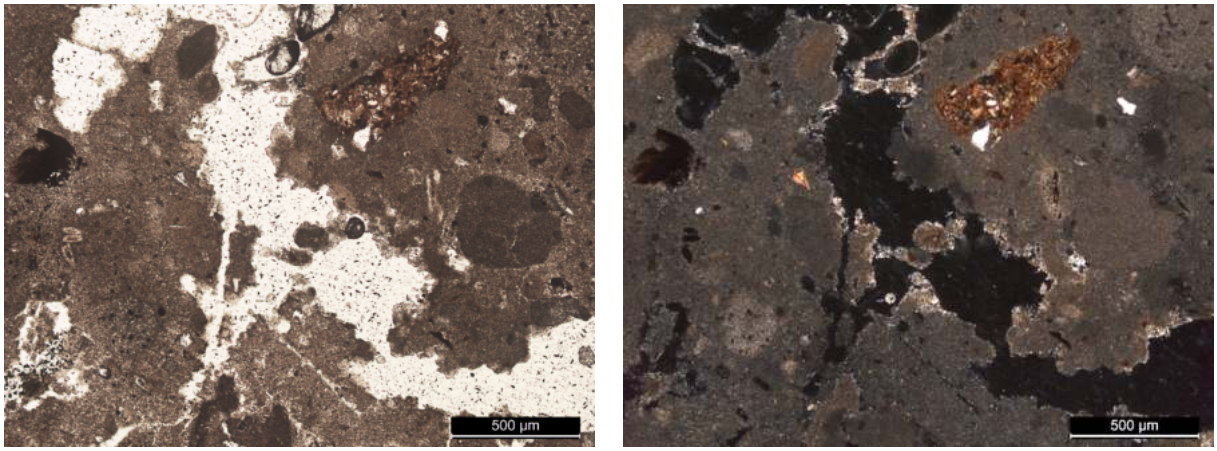

Figure 51 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des dépôts secondaires de cristaux de calcite à l'intérieur des pores (grossissement × 5)

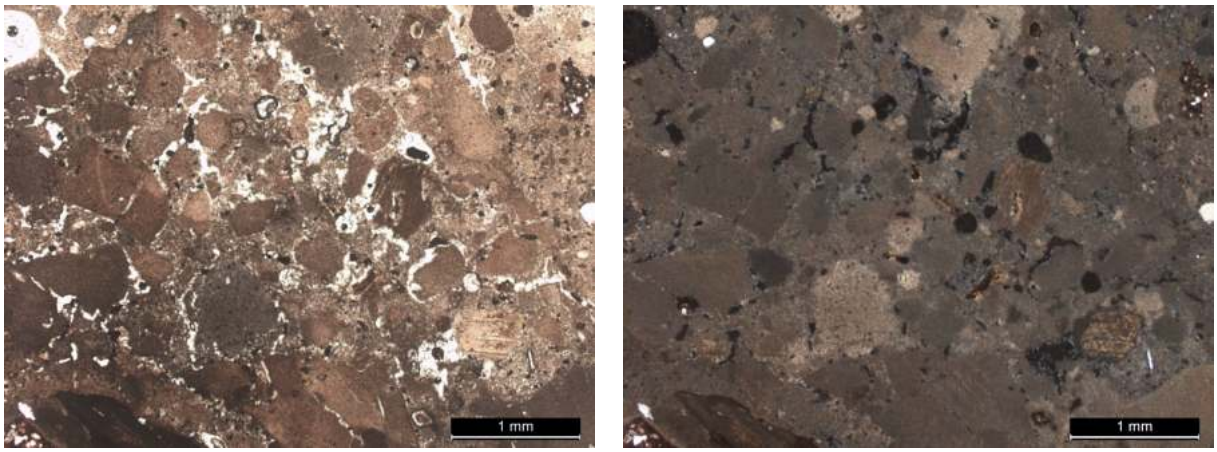

Figure 52 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux non mélangés présents dans la matrice du liant (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de nature hétérogène, comprenant de nombreux nodules de chaux, tant non mélangés (20 %) que partiellement calcinés (1 à 3 %). La présence de fragments de terres cuites aux compositions minéralogiques diverses est également constatée.

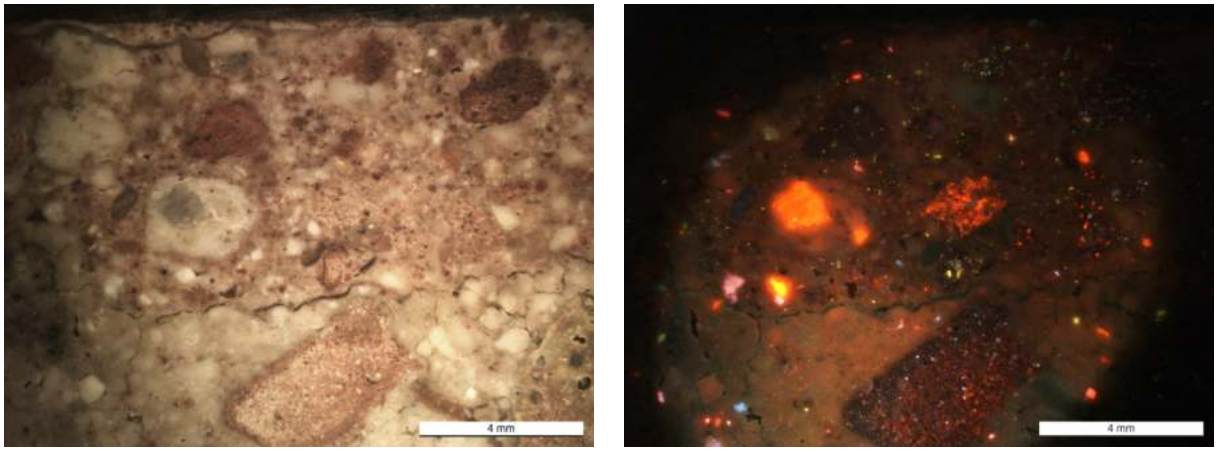

Figure 53 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22379 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

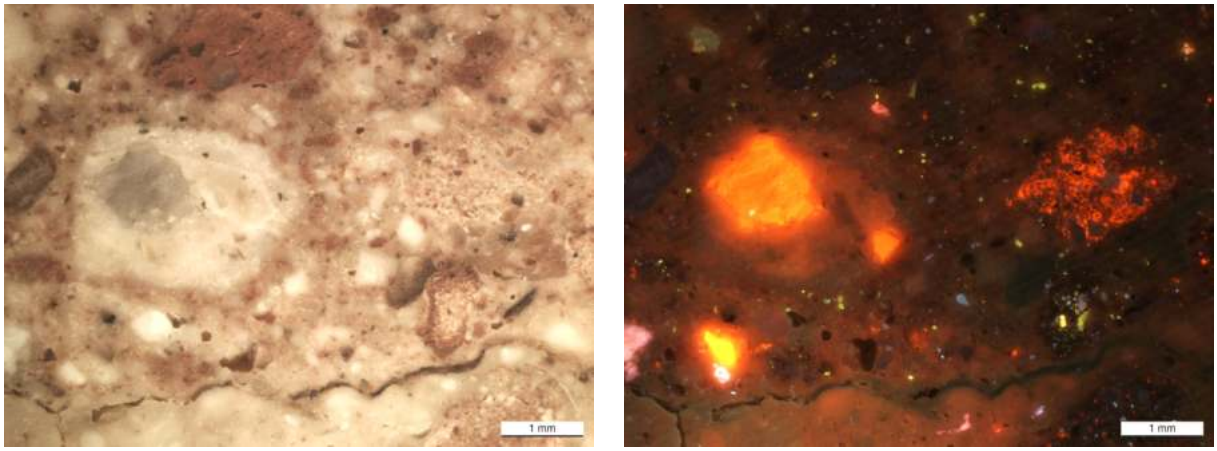

Figure 54 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22379a montrant des cristaux de calcite dans un nodule de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2)

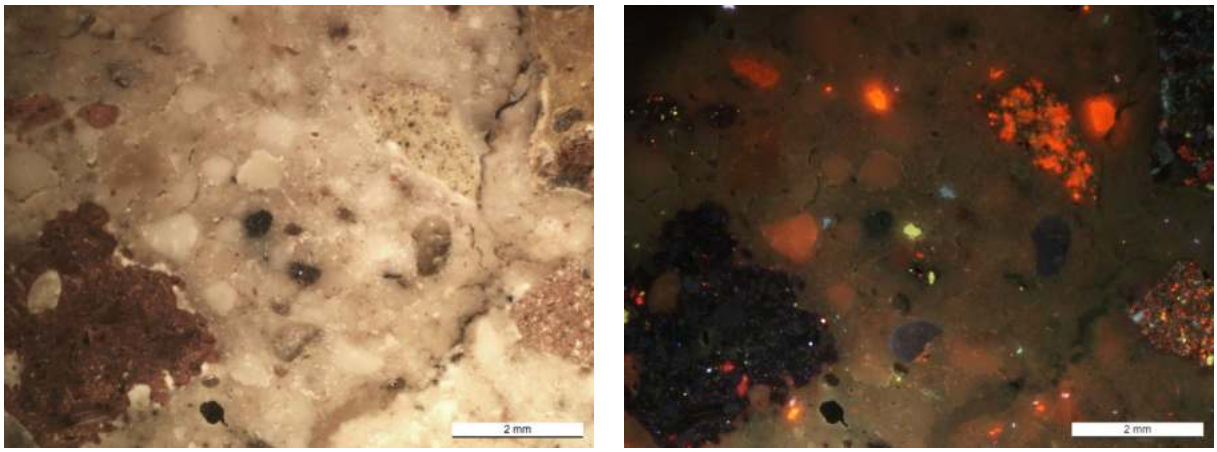

Figure 55 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux non mélangés avec une luminescence de couleur ornage (grossissement × 1.6)

FICHE 3 BDX22380

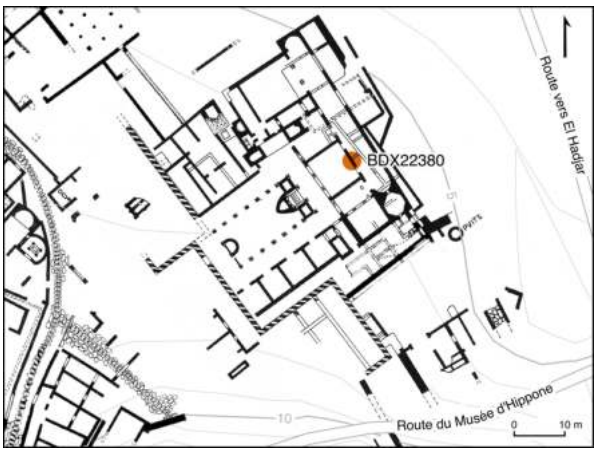

Figure 56 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22380 depuis le mur en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur (*opus testaceum*)
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : 280 à 330 apr. J.-C. (Phase 2)
Localisation : Pièce B3
Date de prélèvement : 11/11/2018
Coordonnées : 36.8833142279874, 7.75183947889385

L'échantillon BDX22380 a été prélevé depuis le mur en *opus testaceum* situé à l'est de la pièce B3, dans le complexe des *villae* du front de mer. Il a été spécifiquement sélectionné depuis la couche de support du décor pariétal en marbre, dont quelques fragments subsistent encore. Il est important de souligner que ce support n'a subi aucune altération lors des travaux de restauration entrepris en 1951 sous la direction d'E. Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de décor en marbre
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 40 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations microscopiques révèlent un liant de composition homogène, comprenant des nodules de chaux partiellement calcinés (5 %) et non mélangés (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est principalement composé de cristaux de quartz, de feldspaths, de micas, de calcite et de fragments lithiques siliceux (granite et micaschiste). On note également une teneur élevée d'inclusions de tuileau (20 %) avec des dimensions variant de 0,3 à 8,5 mm. Ces fragments sont répartis de façon homogène dans le mélange.

Figure 57 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22380 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.6 - 0.9	5	Oblongue	0.4 - 7.0	5
Non mélangés	0.5 - 0.8	1	Sphérique	0.3 - 0.7	3

Tableau 25 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22380

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.6 - 1.6	3	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Sub-émoussée	3.4	< 1	Hétérogène

Tableau 26 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22380

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Sub-angulaire	0.3 - 0.8	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.8	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.3 - 1.0	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.2 - 0.5	1	Hétérogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 1.0	< 1	Hétérogène

Tableau 27 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22380

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 8.5	20	Homogène
Fragment de mortier		0.7 - 4.7	5	Homogène

Tableau 28 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22380

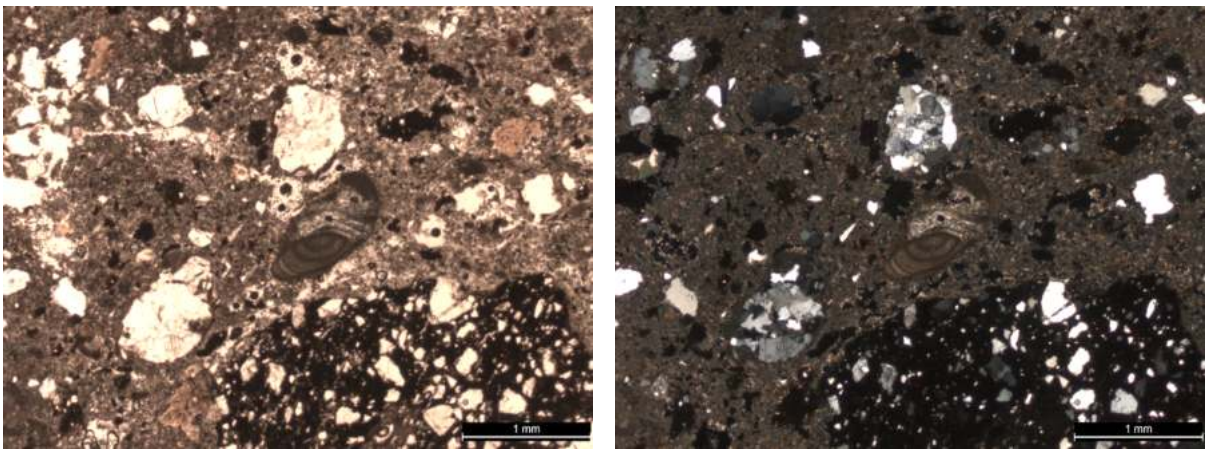

Figure 58 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant des fragments de granite, de tuileau et un bioclaste au centre (grossissement × 2.5)

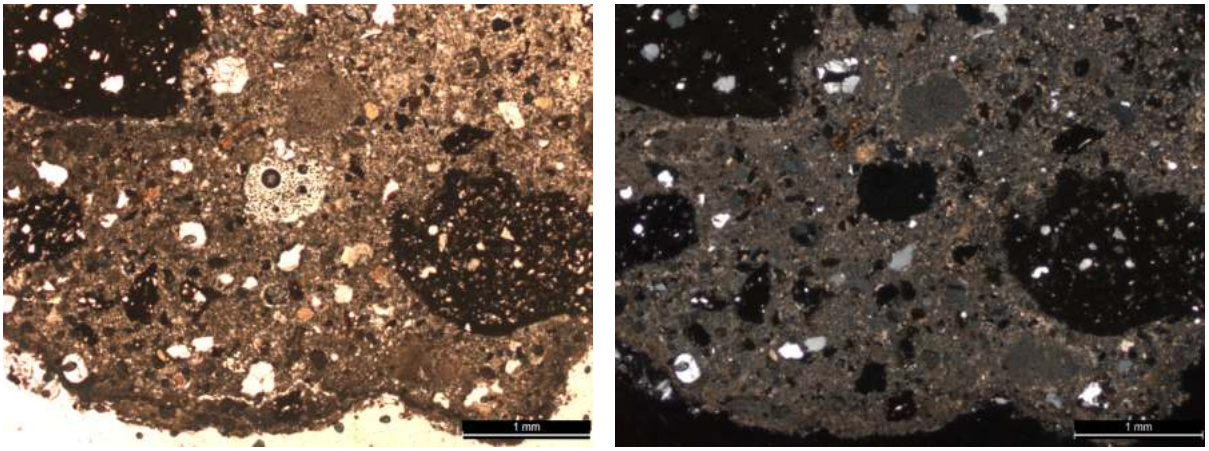

Figure 59 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5)

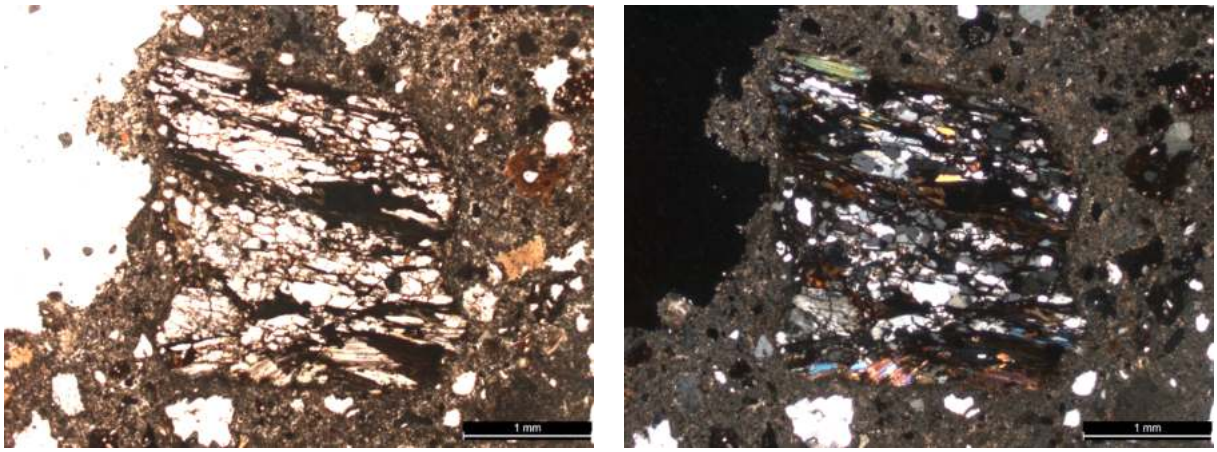

Figure 60 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant un fragment de micaschiste entouré de fragments de céramique (grossissement × 2.5)

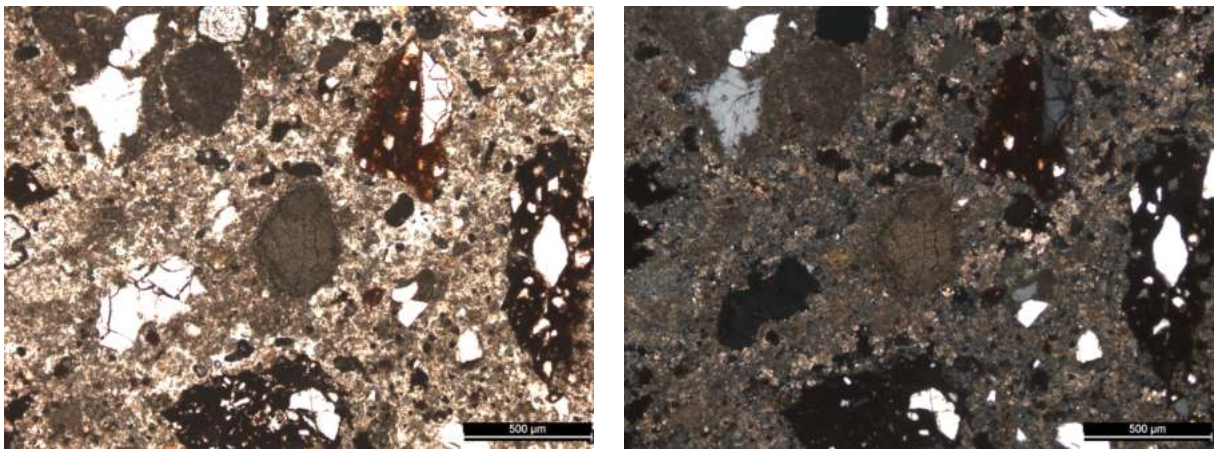

Figure 61 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant des bioclastes dont principalement des algues vertes ou Codiacées (grossissement × 5)

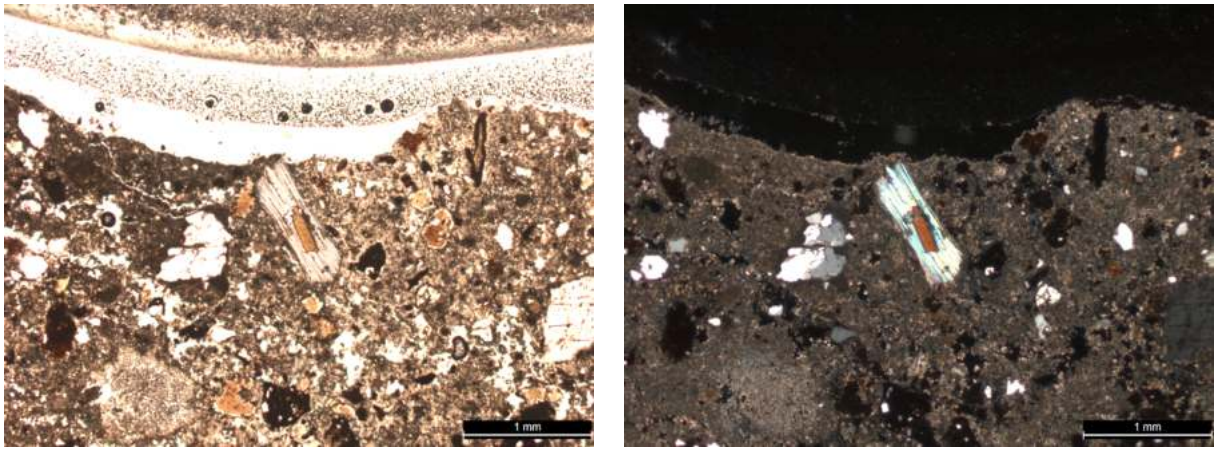

Figure 62 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant des cristaux de muscovite, biotite et des fragments de céramique (grossissement × 2.5)

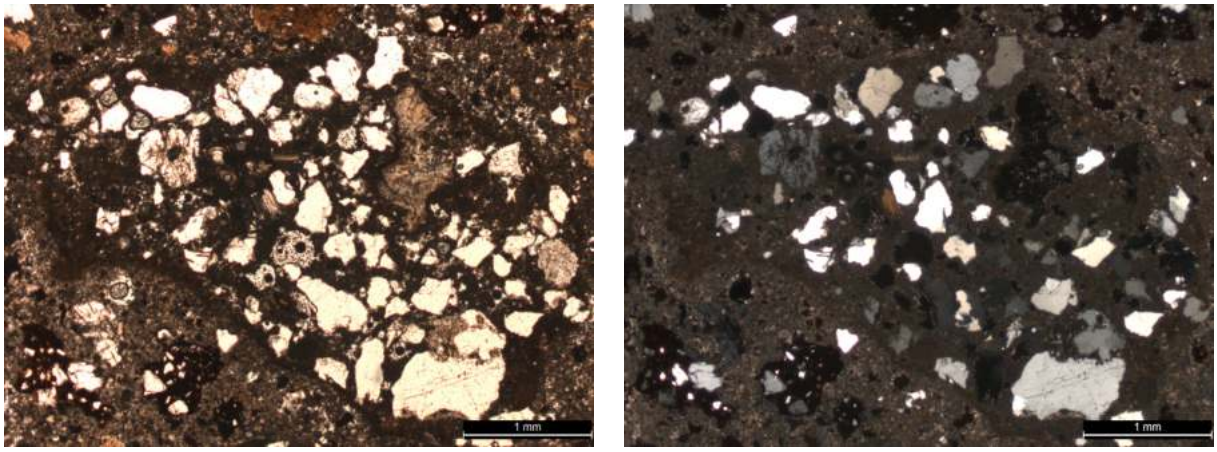

Figure 63 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant un fragment d'un autre mortier inclus dans la charge (grossissement × 2.5)

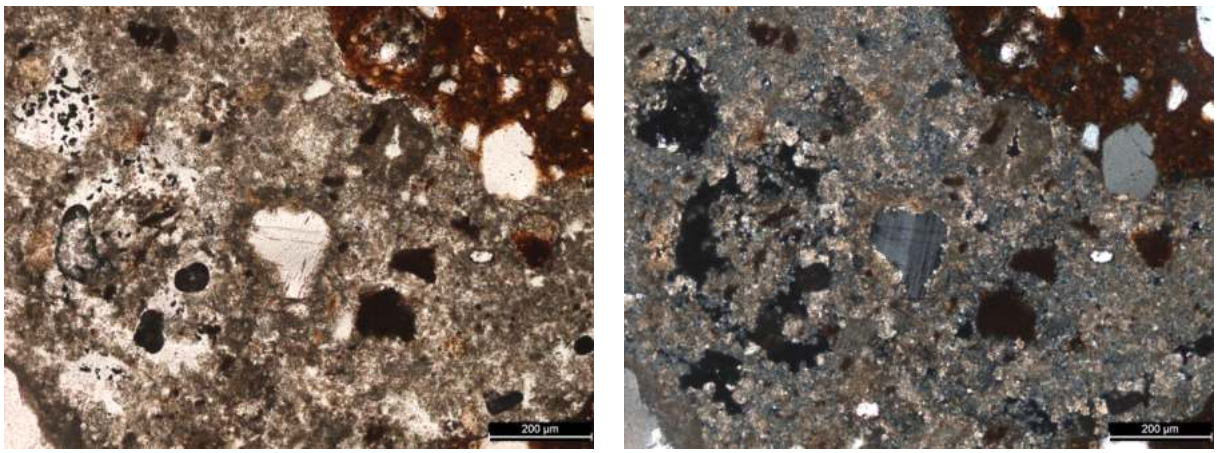

Figure 64 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant un cristal de feldspath plagioclase au centre du cliché entouré de micro-fragments de tuileau ainsi que des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations au microscope optique à cathodoluminescence (CL) mettent en évidence un liant à base de chaux de composition homogène (luminescence orange), présentant des nodules de chaux partiellement calcinés (tels que des cristaux de calcite et des éléments bioclastiques) qui émettent une forte luminescence de couleur orange, ainsi que des nodules de chaux non mélangés qui émettent une luminescence plus faible. On note également la présence de cristaux et de fragments lithiques de formes sub-angulaires constituant la charge. Parmi ceux-ci, on observe des cristaux de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et plagioclases (luminescence verte). Les inclusions de tuileau présentent des compositions minéralogiques diverses : certains fragments présentent un dégraissant riche en feldspaths plagioclases à la granularité fine, tandis que d'autres fragments présentent un dégraissant composé de quartz et de feldspaths alcalins.

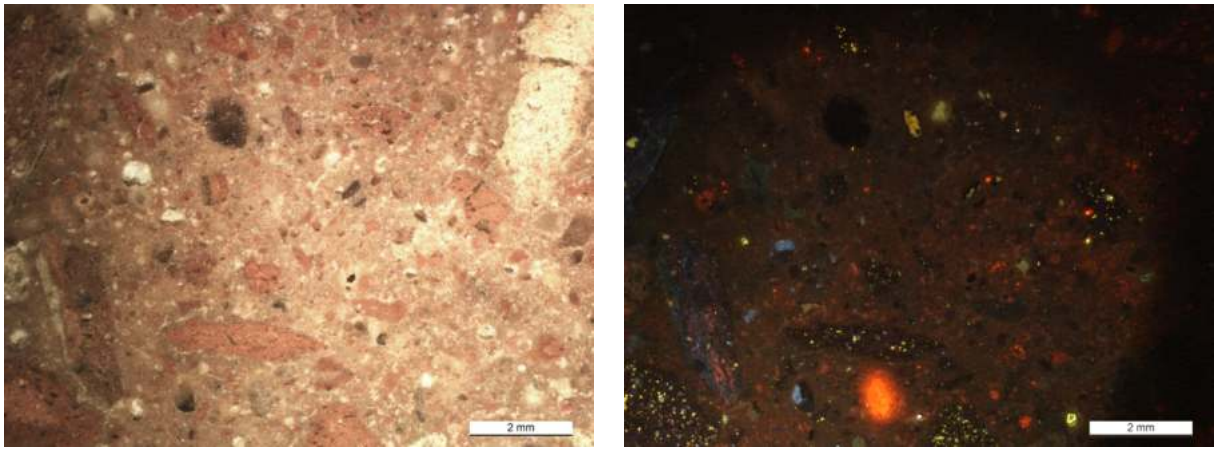

Figure 65 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22380 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

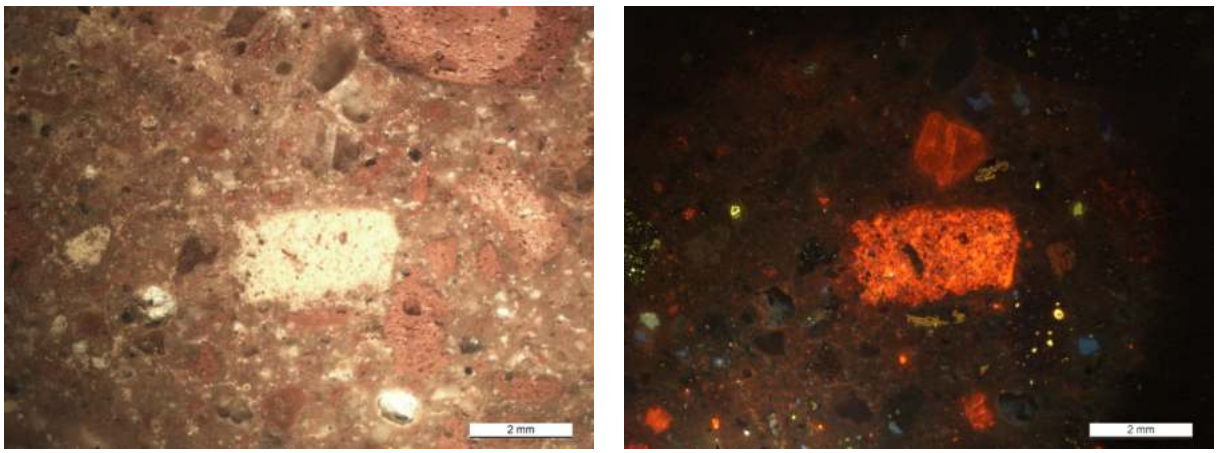

Figure 66 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22380 montrant la présence de cristaux de calcite et de nodules de chaux provenant de fragments de roches calcaires partiellement calcinées (grossissement × 1.25)

FICHE 4 BDX22381

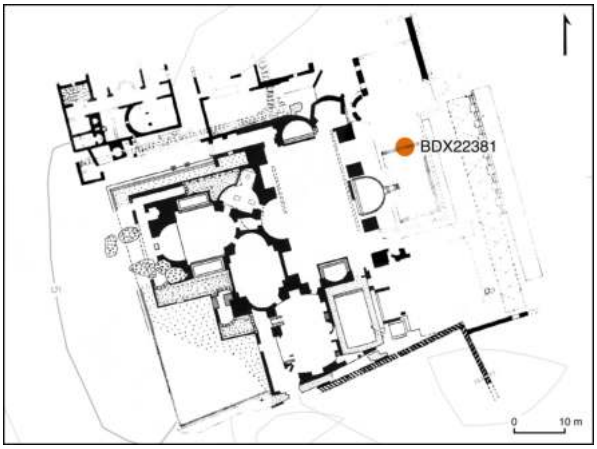

Figure 67 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22381 depuis la piscine froide et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Grand bassin
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Piscine froide dallée de marbre
Date de prélèvement : 15/11/2018
Coordonnées : 36.8849025050756, 7.750386654082

L'échantillon BDX22381 a été prélevé à partir du grand bassin (piscine froide) des grands thermes du nord. Il a été sélectionné depuis une section préservée du support de placage en marbre. Aucune intervention n'a été effectuée dans cette partie lors de la campagne de restauration entreprise en 1954, dirigée par E. Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de décor en marbre
Couleur : Marron ; Rose foncé ; Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est composé de trois couches : une couche de finition d'environ 12 mm d'épaisseur et de couleur marron, une couche intermédiaire mesurant environ 5 mm et de couleur rose foncé, une couche de préparation d'une épaisseur approximative de 20 mm et de couleur beige foncé

Caractéristiques pétrographiques

Les observations microscopiques révèlent un liant de composition homogène avec des nodules de chaux partiellement calcinés (3 à 10 %) qui sont essentiellement des éléments bioclastiques (tels que des algues rhodophycées, des Orbitolinidés, et des Échinides). La charge est formée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Parmi les inclusions, on observe la présence de fragments pyroclastiques (jusqu'à 5 %) de type trachytique et de fragments de tuileau avec une teneur entre 1 et 3 %.

Figure 68 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22381 montrant trois différentes couches et des charges non tamisées

BDX22381a : Couche de finition (12 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.4 - 0.8	3	Sphérique	0.2 - 1.0	5
			Oblongue	0.2 - 1.4	3

Tableau 29 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22381a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.5 - 4.4	5	Homogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	0.8 - 1.8	1	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 30 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22381a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 2.1	5	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.5 - 8.0	5	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.5	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 0.7	3	Homogène
Sanidine	Angulaire	0.4 - 0.9	1	Hétérogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.7	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 31 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22381a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	1.3 - 3.2	3	Homogène
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.6 - 4.5	1	Homogène
Cendre volante	Charbon de bois	1.0 - 2.2	1	Homogène
Fragment de mortier		7.5 - 8.0	1	Hétérogène

Tableau 32 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22381a

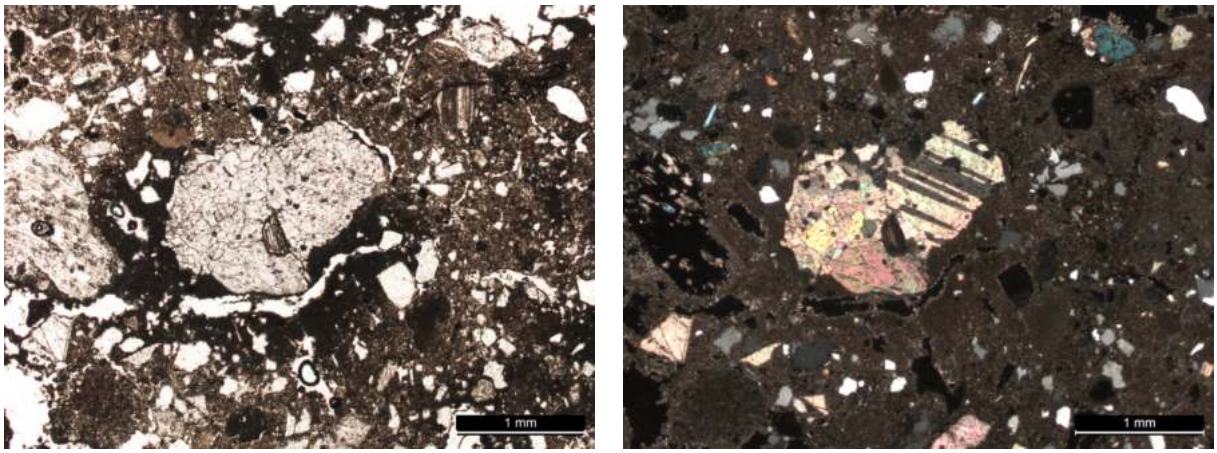

Figure 69 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381a montrant des fragments de calcite et de marbre dispersés dans la matrice (grossissement × 2.5)

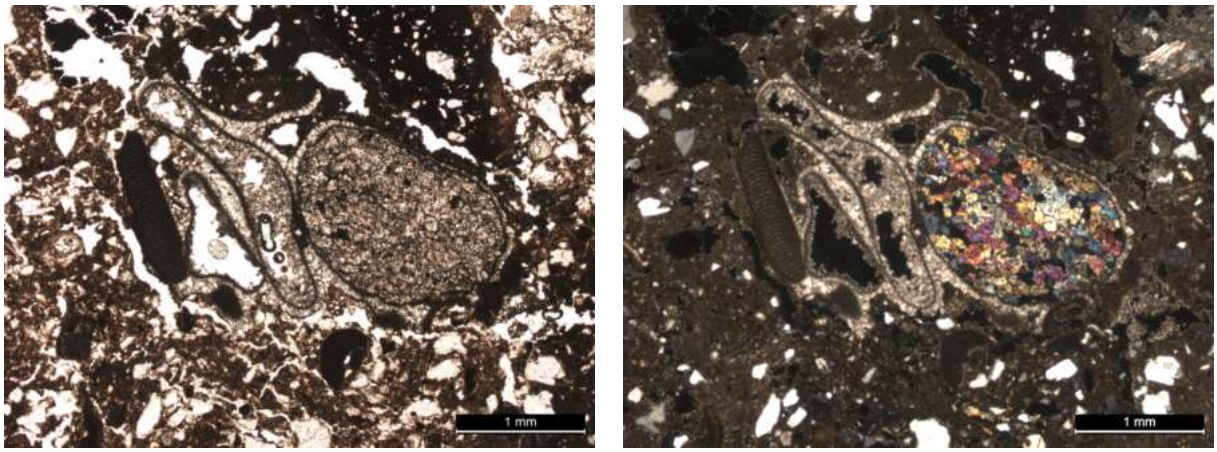

Figure 70 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381a montrant un lithoclaste de roche calcaire composée de débris de foraminifères et de mollusques (Orbitolinidés et Gastéropode à loge colmatée par une sparite diagenétique) et d'algues rhodophycées (grossissement × 2.5)

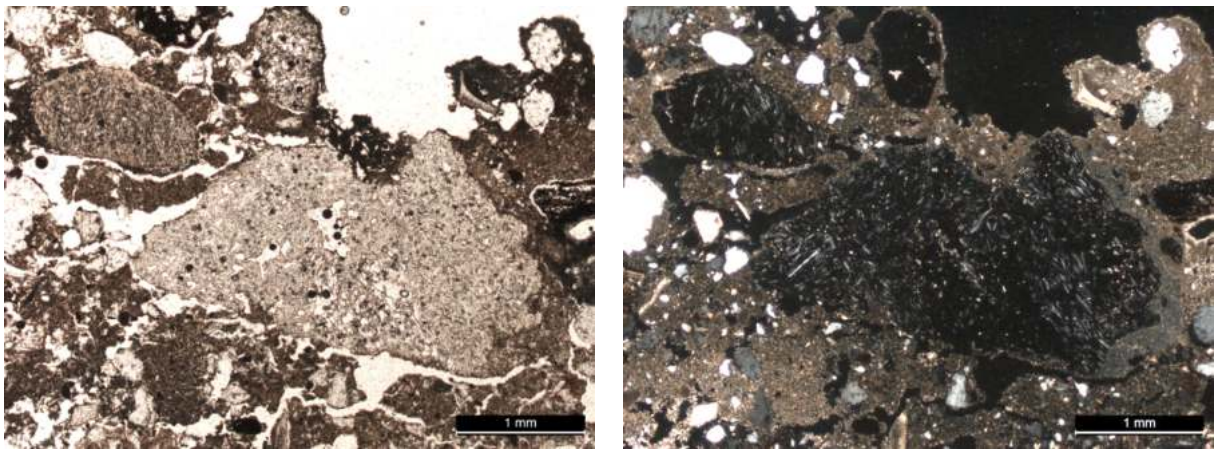

Figure 71 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381a montrant des fragments pyroclastiques trachytiques à matrice vitreuse (grossissement × 2.5)

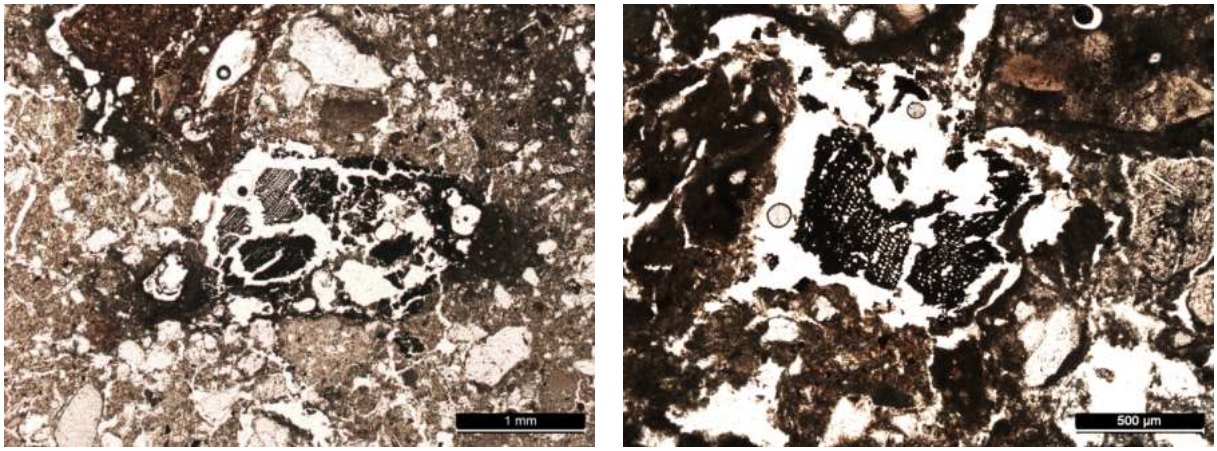

Figure 72 : Microphotographies en LPNA de la couche BDX22381a montrant des résidus de charbon de bois présents dans le liant (grossissement × 5)

BDX22381b : Couche intermédiaire (5 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.2 - 1.6	5	Sphérique	0.1 - 0.9	5
			Oblongue	0.4 - 0.9	1

Tableau 33 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22381b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.6 - 0.9	< 1	Hétérogène
Siltite	Sédimentaire	Sub-émoussée	0.8	< 1	Hétérogène

Tableau 34 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22381b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.6	1	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.2 - 0.6	1	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.3 - 0.6	1	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 0.8	< 1	Homogène

Tableau 35 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22381b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.5 - 2.2	5	Homogène
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.5 - 4.1	3	Homogène

Tableau 36 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22381b

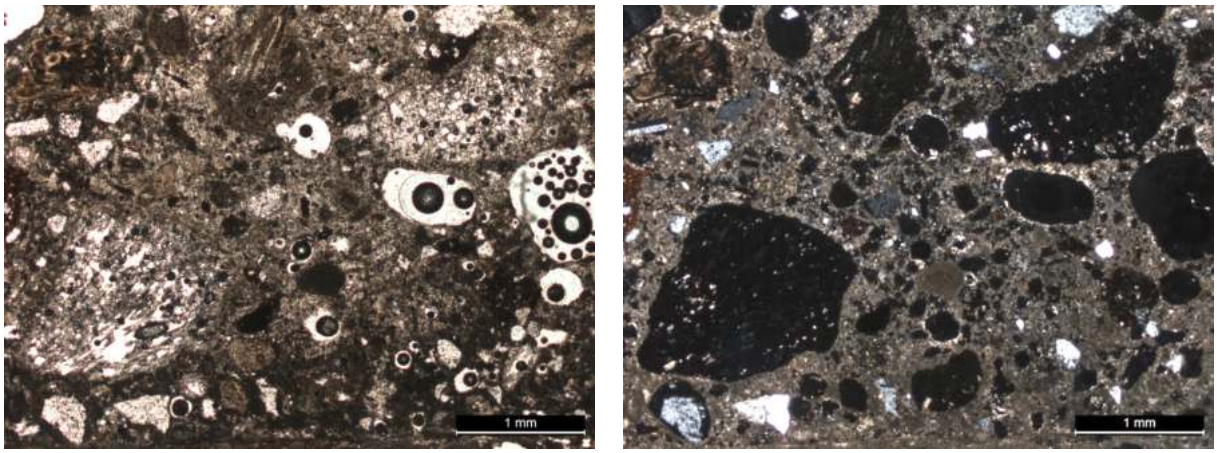

Figure 73 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des pyroclastes trachytiques à texture aphanitique (grossissement × 2.5)

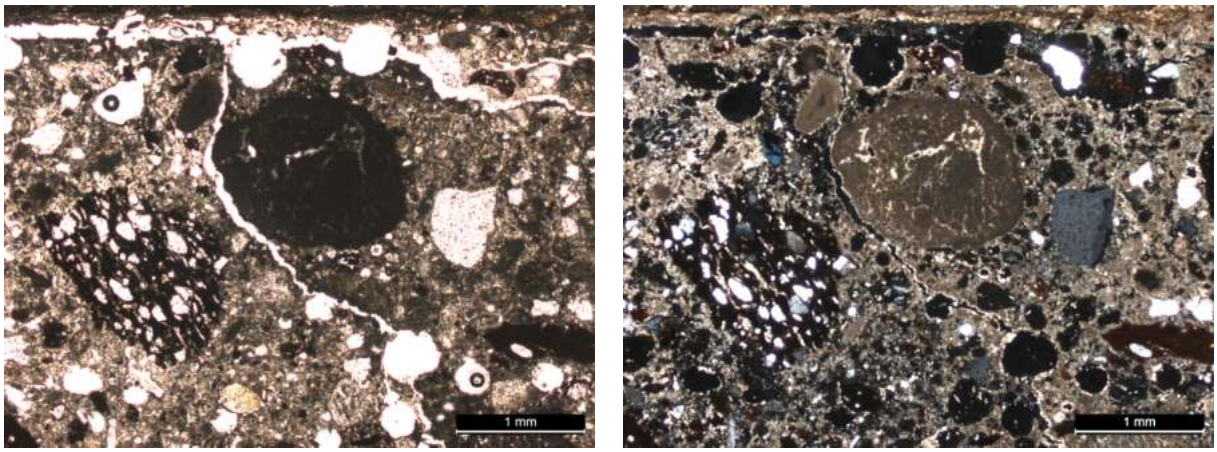

Figure 74 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5)

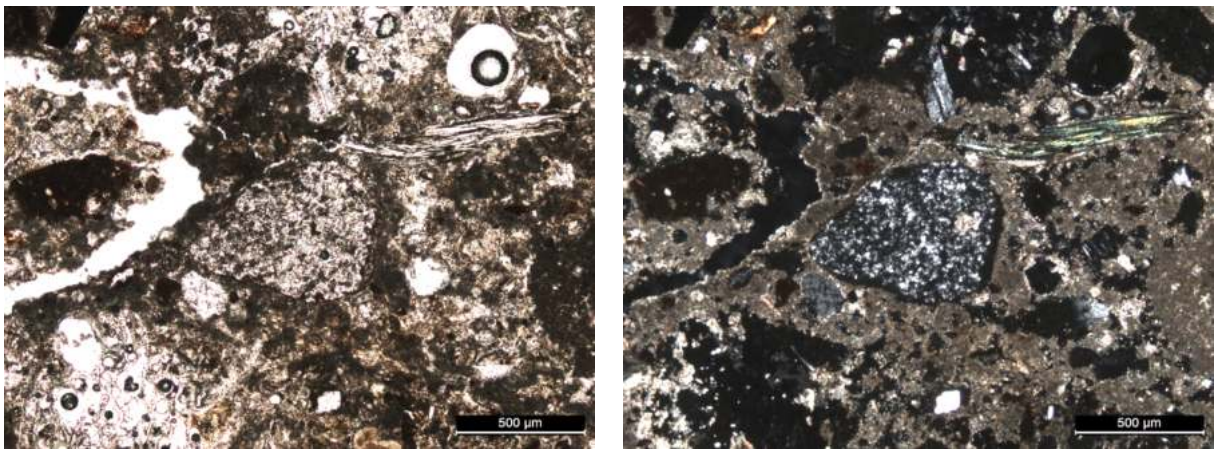

Figure 75 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des composants de la charge, dont des micas et un fragment de siltite (grossissement × 2.5)

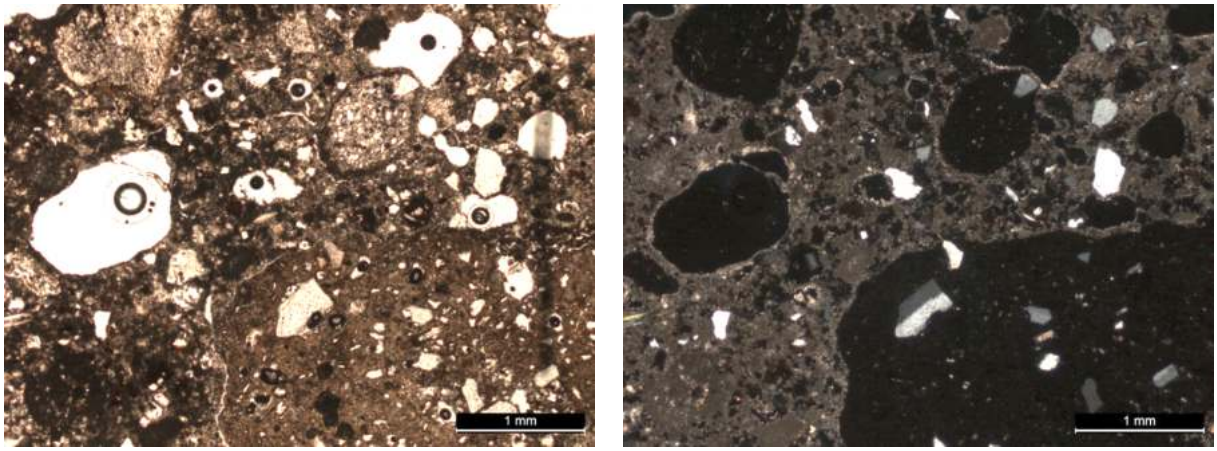

Figure 76 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des pyroclastes trachytiques à texture porphyrique avec des phénocristaux de sanidine (grossissement × 2.5)

BDX22381c : Couche de préparation (20 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.2 - 1.2	10	Sphérique	0.1 - 1.3	10
			Oblongue	0.6 - 11	3

Tableau 37 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22381c

Charge

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Bioclaste	Émoussée	0.2 - 0.9	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.9	3	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	1	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.5 - 0.7	1	Homogène
Sanidine	Sub-angulaire	0.3 - 0.9	1	Homogène
Augite	Émoussée	0.5	< 1	Hétérogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.2	< 1	Hétérogène

Tableau 38 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22381c

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.4 - 1.2	5	Homogène
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.9 - 3.8	1	Homogène

Tableau 39 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22381c

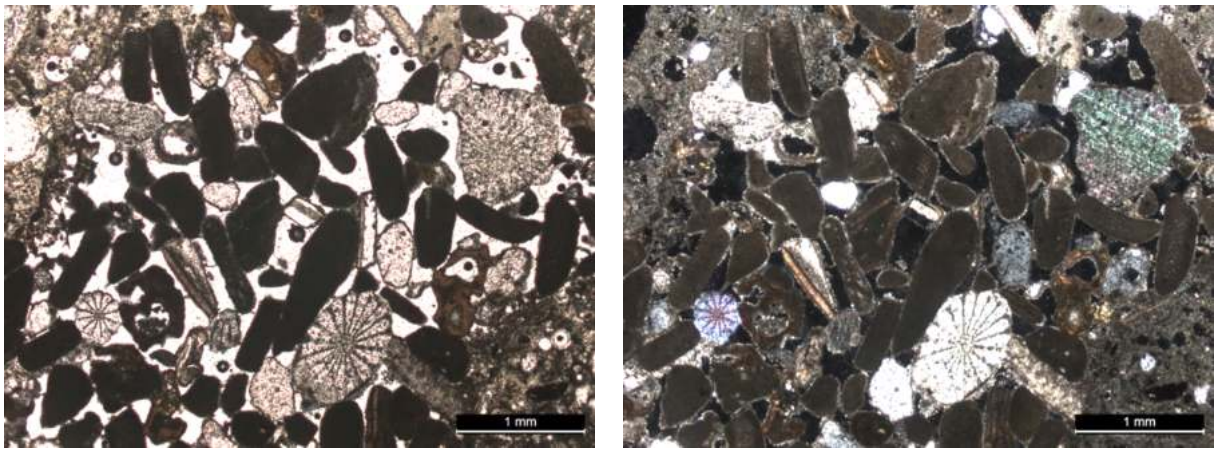

Figure 77 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381c montrant un fragment de roche calcaire composée de bioclastes dont des Échinides, des algues rhodophycées et des lamellibranches (grossissement × 2.5)

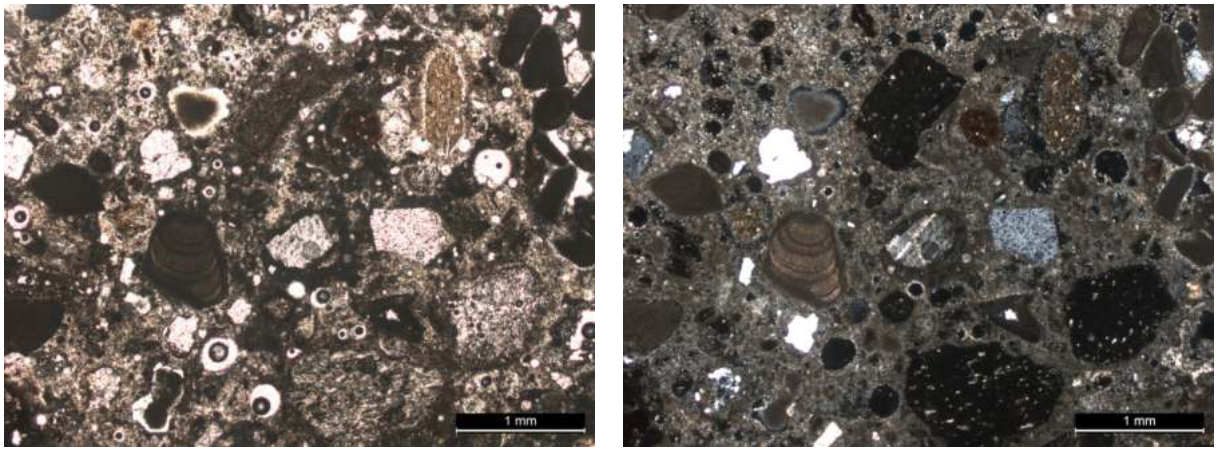

Figure 78 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381c montrant des bioclastes et des pyroclastes trachytiques mêlés à la charge (grossissement × 2.5)

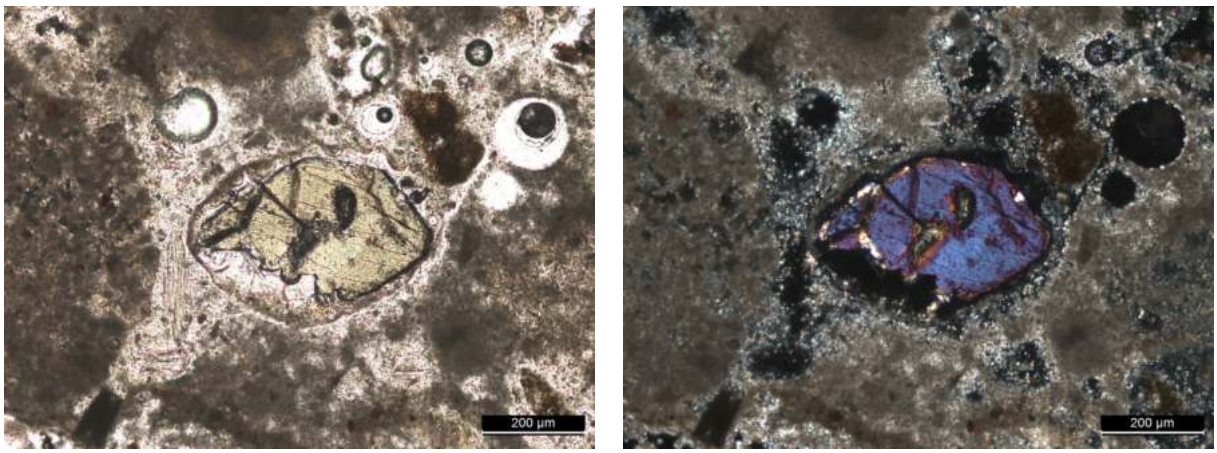

Figure 79 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381c montrant un cristal altéré d'augite présent dans le mélange (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les examens au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent la présence d'une abondante quantité de nodules de chaux partiellement calcinés dans les trois couches. Les cristaux et les fragments lithiques constituant la charge sont principalement des quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et plagioclases (luminescence verte) ainsi que de la calcite (luminescence orange). En outre, les fragments pyroclastiques présentent des textures variant de l'aphanitique au porphyrique, avec des inclusions de microlithes, de feldspaths alcalins, et occasionnellement de feldspaths plagioclases. Des observations plus détaillées des téphras au microscope électronique à balayage (MEB) mettent en évidence une matrice vitreuse avec une microporosité élevée. Des interfaces de réaction entre les fragments pyroclastiques et le liant à base de chaux sont également observées (en gris sombre). Enfin, les analyses élémentaires des fragments pyroclastiques, réalisées avec la microsonde EDS, montrent des concentrations en SiO_2 variant entre 60,18 et 61,74 % pds et des teneurs en $Na_2O + K_2O$ comprises entre 11,55 et 12,93 % pds. Ces résultats permettent l'identification de la nature trachytique des fragments pyroclastiques, à l'aide au diagramme Total Alkali Silica (TAS).

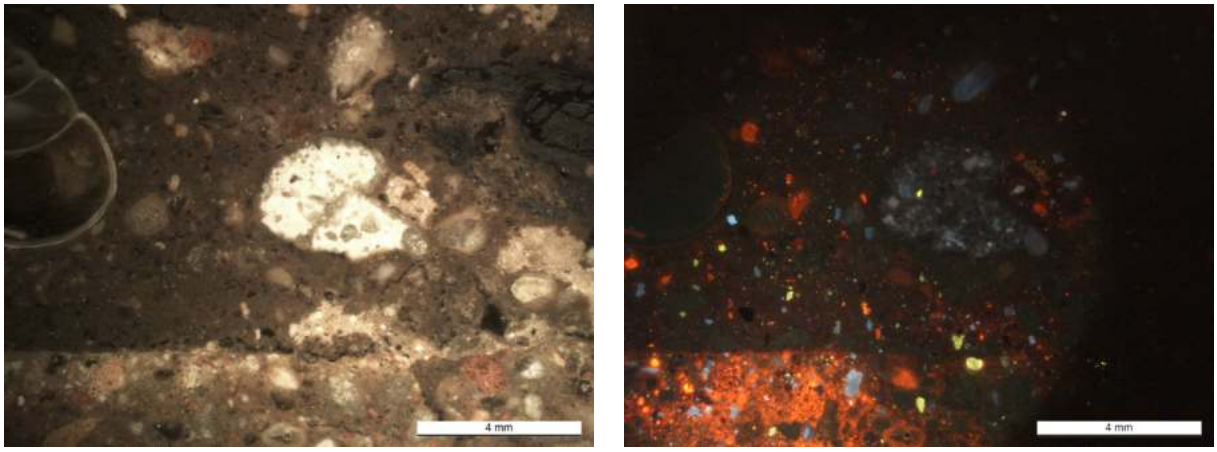

Figure 80 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22381a montrant la composition minéralogique de la charge et des fragments de roche pyroclastique composée essentiellement de feldspaths alcalins qui émettent une luminescence bleue (grossissement × 1)

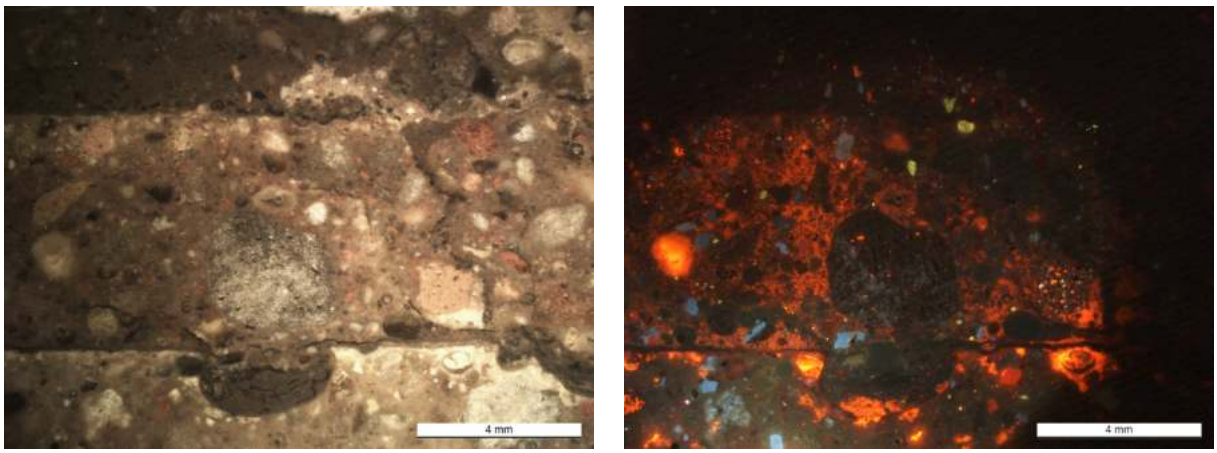

Figure 81 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22381b montrant un fragment pyroclastique riche en feldspaths alcalins (grossissement × 1)

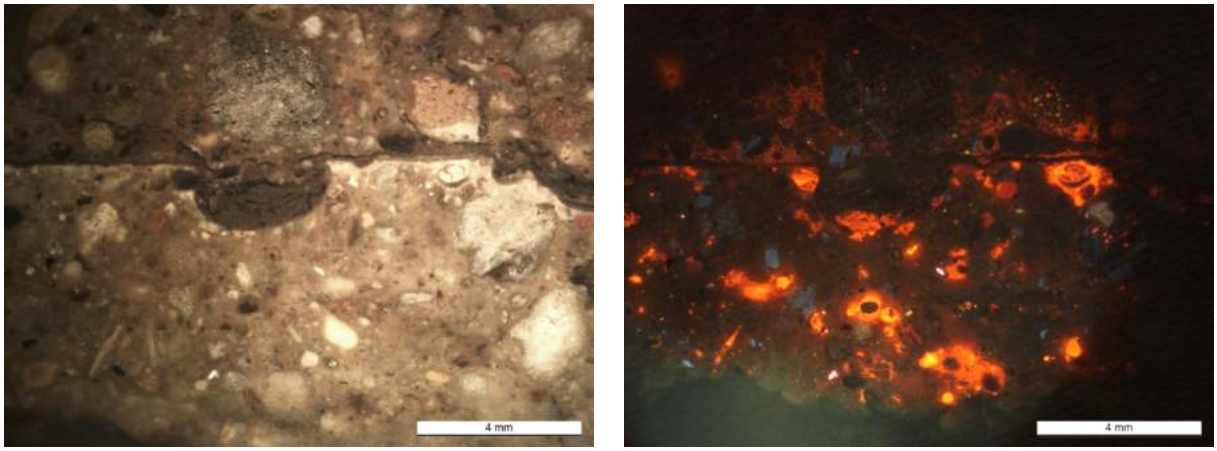

Figure 82 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22381c montrant des fragments de roche calcaire partiellement calcinés qui émettent une forte luminescence de couleur rouge orangé (grossissement × 1)

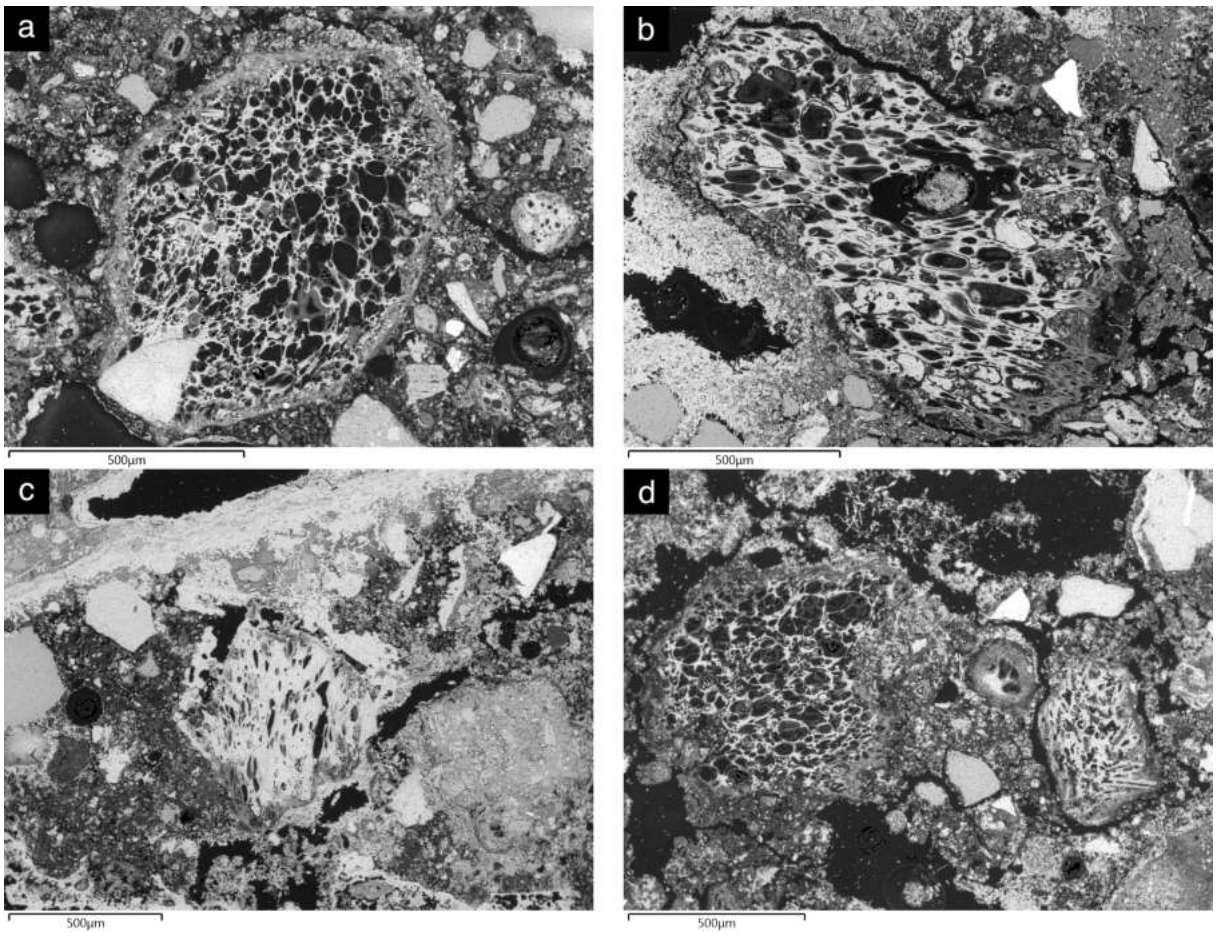

Figure 83 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22381 montrant des fragments de roches volcaniques de formes sub-émoussées à très émoussées et présentant une porosité élevée, dans les couches (a) BDX22381a ; (b) BDX22381b et (c-d) BDX22381c

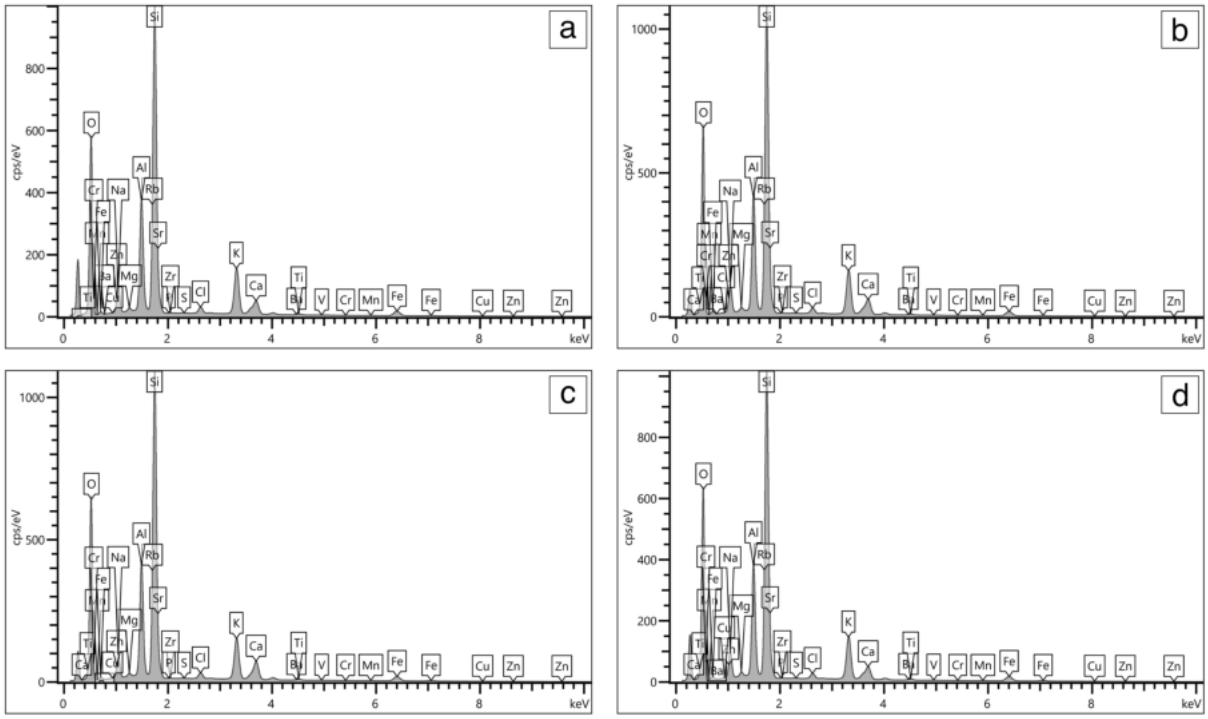

Figure 84 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22381 montrant la composition élémentaire des pyroclastes trachytiques utilisés comme pouzzolane naturelle dans les couches (a) BDX22381a ; (b) BDX22381b et (c-d) BDX22381c

FICHE 5 BDX22382

Figure 85 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22382 depuis le sol en opus signinum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Sol (*opus signinum*)
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : 280 à 330 apr. J.-C. (Phase 2)
Localisation : Pièce B4
Date de prélèvement : 12/11/2018
Coordonnées : 36.8833510691873, 7.75175412135849

L'échantillon BDX22382 a été prélevé à partir du revêtement de sol en *opus signinum* de la salle B4, située dans le complexe des *villae* du front de mer. Il a été spécifiquement sélectionné depuis le bord du revêtement afin de le préserver autant que possible.

Caractéristiques morphologiques

Type : Béton
Nature du liant : Chaux
Fonction : Revêtement de sol
Couleur : Rouge brique
Résistance apparente : Élevée
Texture : Granuleuse

Le fragment de béton est monocouche et mesure environ 40 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rouge brique et une texture granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations microscopiques révèlent un liant à base de chaux présentant des nodules de chaux partiellement calcinés (< 1 %) ainsi qu'une faible porosité (1 %). La matrice est hétérogène et présente à la fois de la chaux carbonatée et des silicates de calcium hydratés (C-S-H). La charge est formée d'un sable silico-calcaire d'une granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est principalement composé de cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases, de calcite, ainsi que de micas. Les fragments de tuileau, de gros calibre (s'étendant de 8 à 24 mm), sont abondants dans le mélange et représentent plus de 50 % de celui-ci.

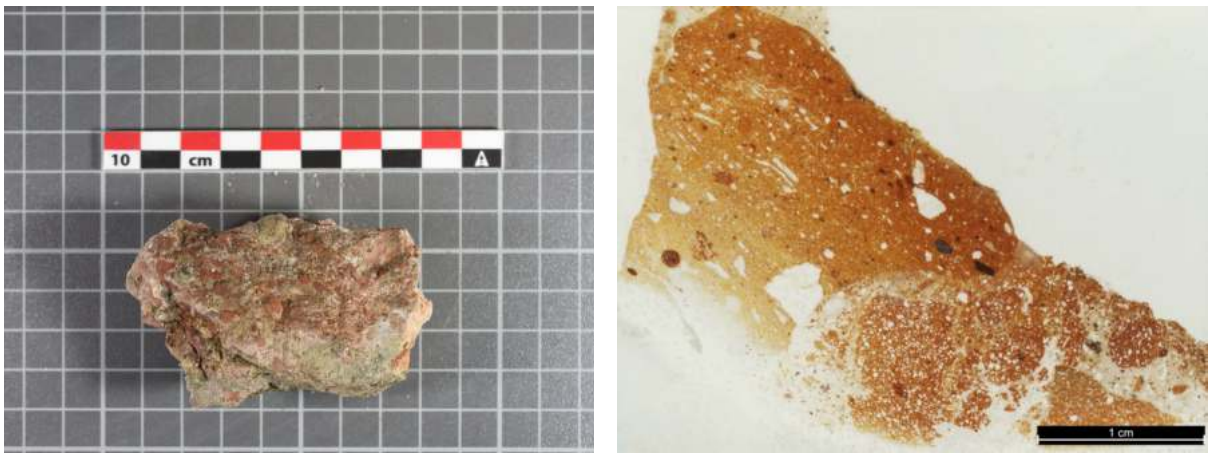

Figure 86 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22382 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.2 - 0.6	< 1	Oblongue	0.3 - 0.8	1

Tableau 40 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22382

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Angulaire	0.6 - 0.4	3	Homogène

Tableau 41 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22382

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.6	5	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.4	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.3 - 1.4	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.4	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.5	< 1	Hétérogène
Biotite	Angulaire	0.2	< 1	Homogène

Tableau 42 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22382

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	8.0 - 24	> 50	Homogène

Tableau 43 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22382

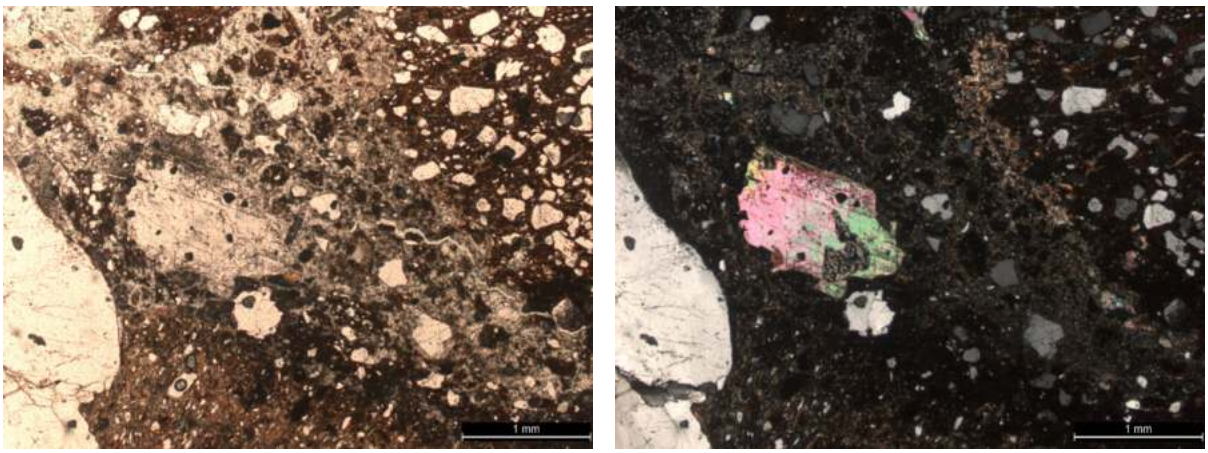

Figure 87 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des grains de calcite, de quartz et de feldspaths présents dans la charge (grossissement × 2.5)

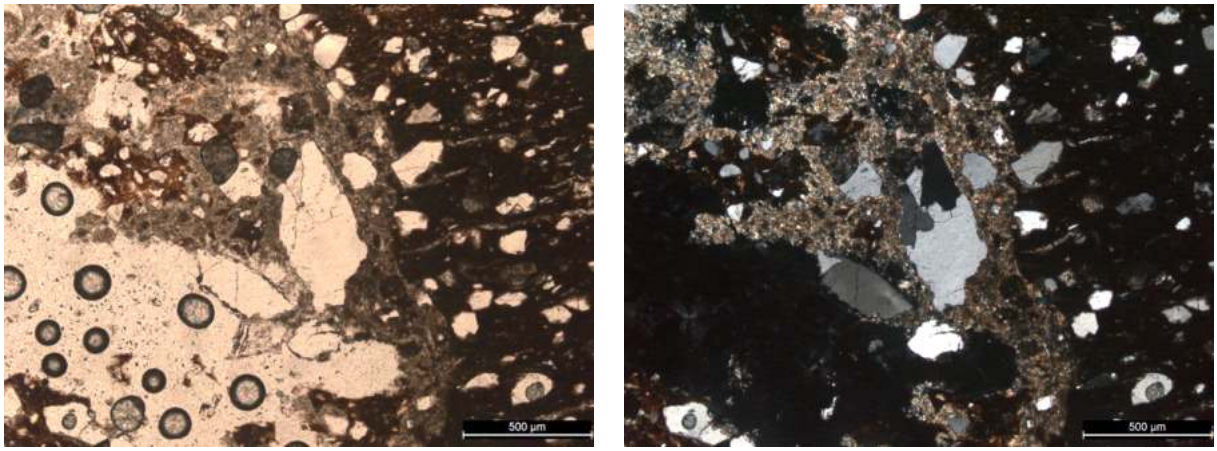

Figure 88 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des fragments de granite et des fragments de céramique dans la charge (grossissement × 5)

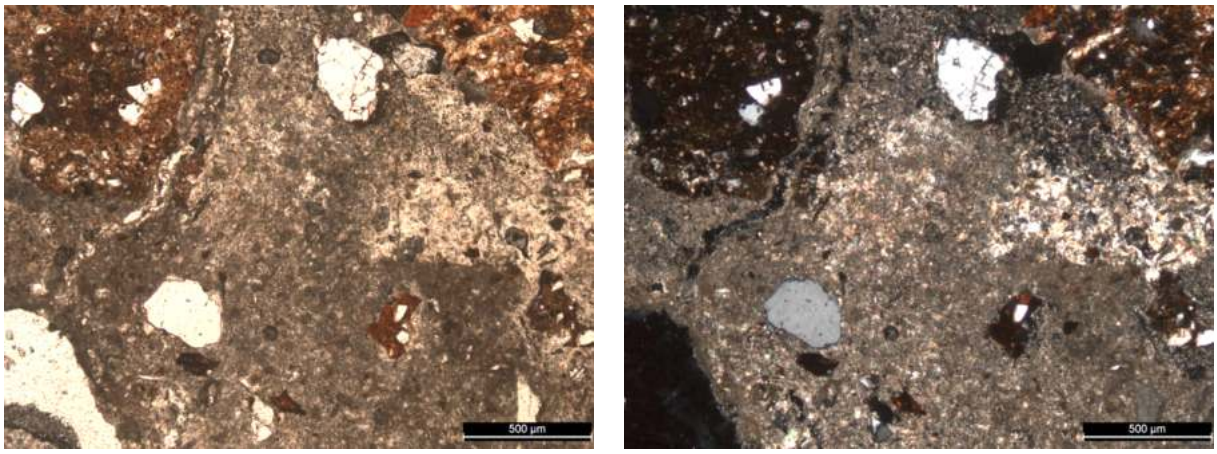

Figure 89 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des grains isolés de quartz et de feldspaths ainsi que des silicates de calcium hydratés qui résultent des réactions entre le liant à base de chaux et le tuileau (grossissement × 5)

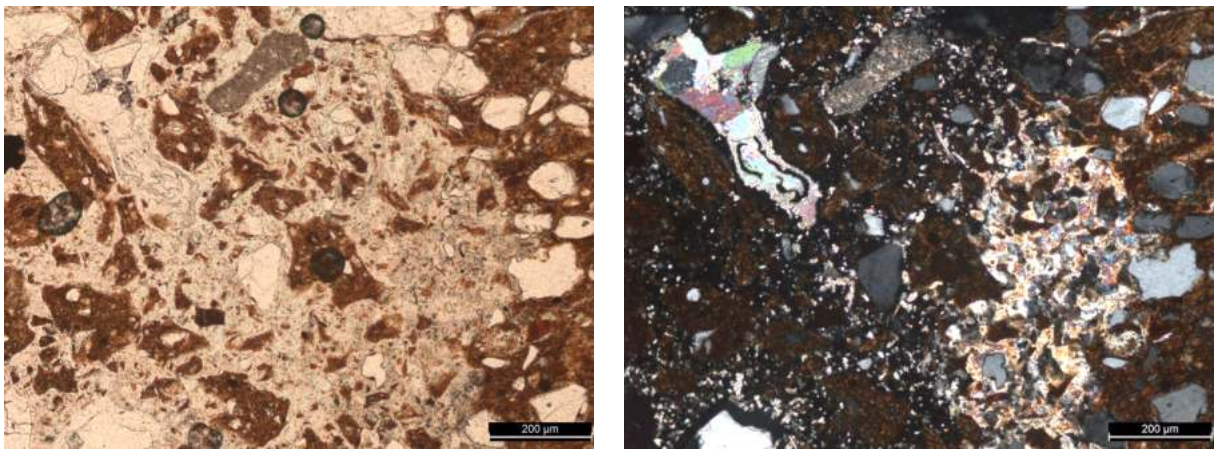

Figure 90 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant les zones de réactions pouzzolaniques entre la chaux et le tuileau (grossissement × 10)

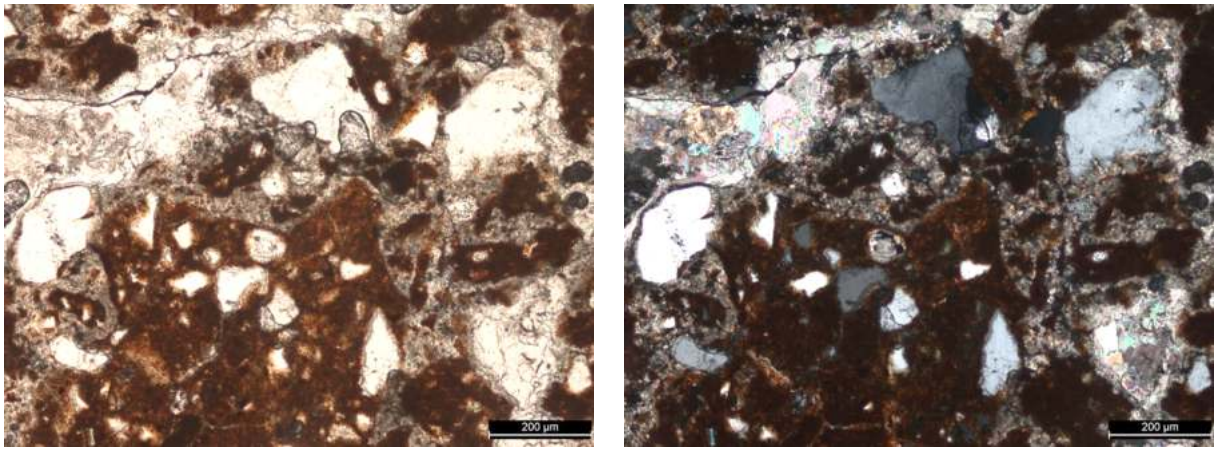

Figure 91 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des réactions pouzzolaniques autour de fragments de céramique (grossissement × 10)

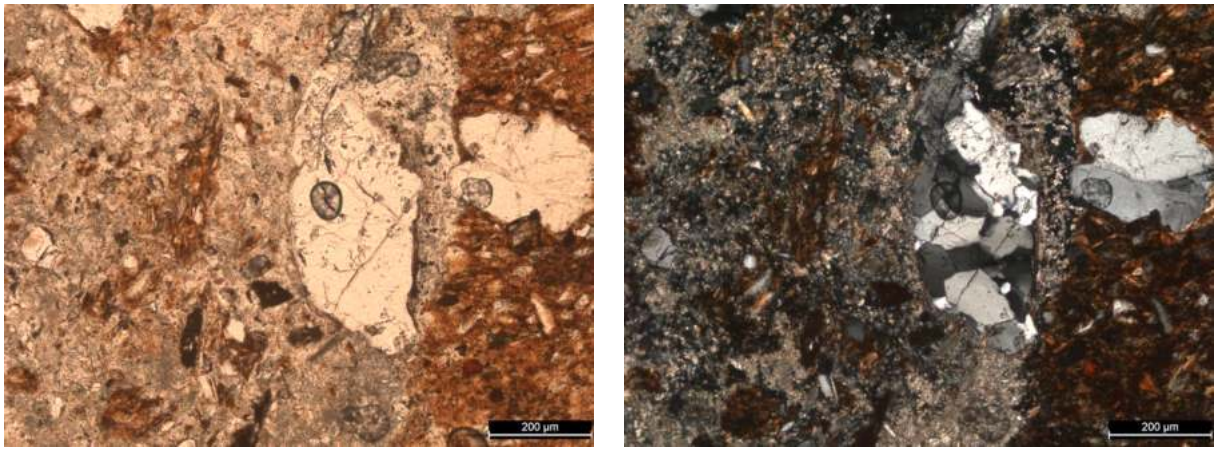

Figure 92 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant un fragment de granite présent dans le sable utilisé comme charge (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au moyen du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant à base de chaux de composition hétérogène, dans lequel des formations de silicates de calcium hydratés émettent une luminescence orange plus marquée, à proximité des fragments de terres cuites architecturales (TCA). On distingue également les minéraux et fragments lithiques qui constituent la charge. Ceux-ci présentent des formes sub-angulaires et sont principalement des quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et plagioclases (luminescence verte) ainsi que des cristaux de calcite (luminescence orange). Les fragments de tuileau présentent des matrices argileuses de différentes couleurs ainsi que des dégraissants de compositions minéralogiques variées. Un premier dégraissant présente des minéraux siliceux tels que des quartz, des feldspaths alcalins et plagioclases, tandis que le second présente une composition silico-calcaire avec des cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et de calcite.

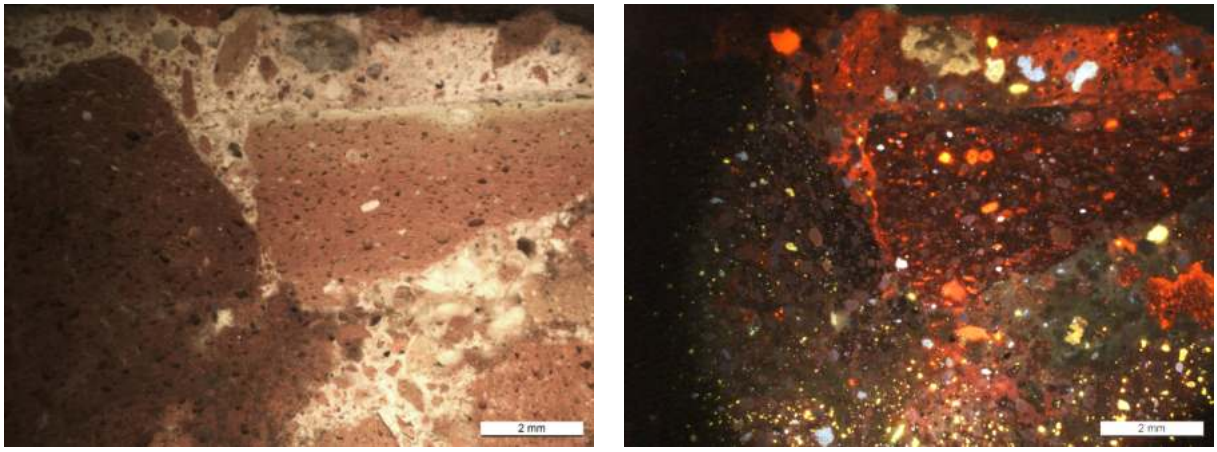

Figure 93 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22382 montrant la composition minéralogique de la charge et des fragments de céramiques (grossissement × 1.25)

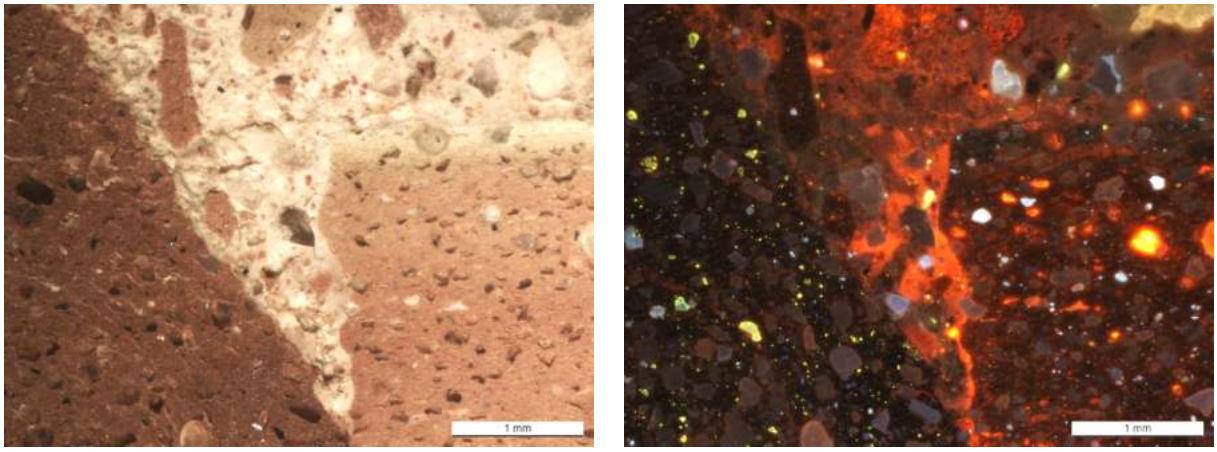

Figure 94 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22382 montrant en détail les minéraux constituant la charge (grossissement × 1.25)

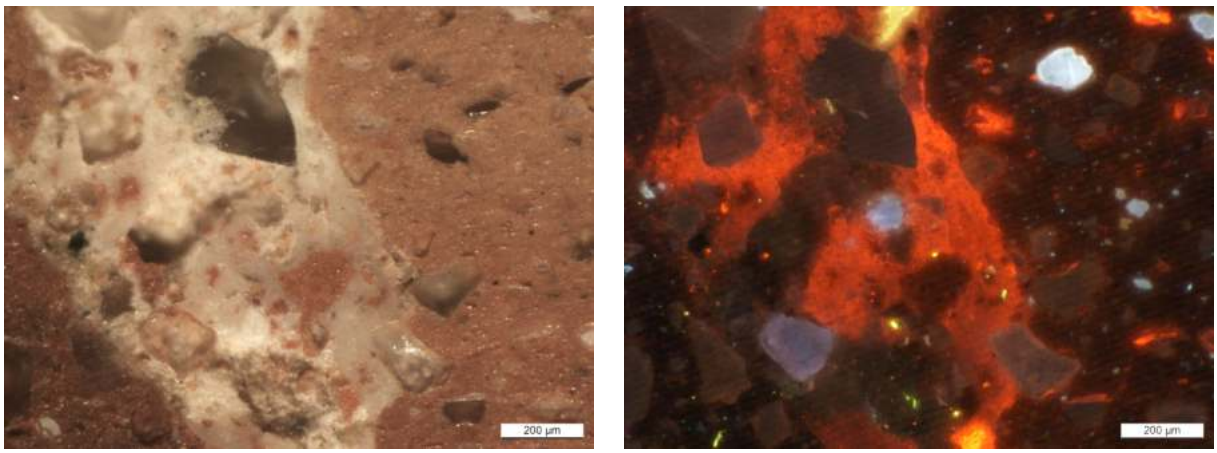

Figure 95 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22382 montrant en détail les formations de silicates de calcium hydratés (grossissement × 10)

FICHE 6 BDX22383

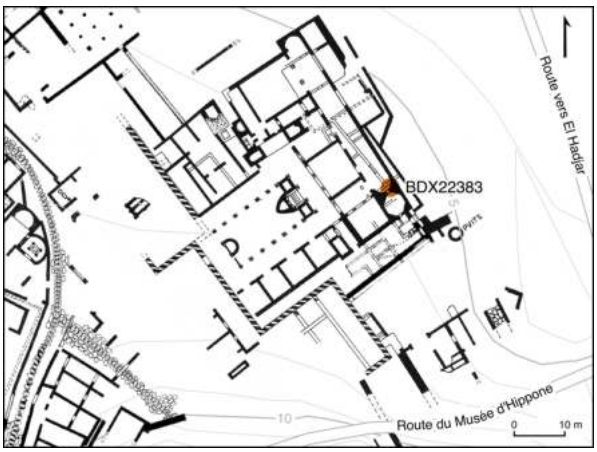

Figure 96 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22383 depuis le mur en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur (*opus testaceum*)
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : 280 à 330 apr. J.-C. (Phase 2)
Localisation : Pièce B4
Date de prélèvement : 13/11/2018
Coordonnées : 36.8832672868833, 7.75192547097214

L'échantillon BDX22383 a été prélevé depuis le mur en *opus testaceum* situé au sud de la salle B4 du complexe des *villae* du front de mer. Le prélèvement a été réalisé entre les dix-huitième et dix-neuvième assises en briques, en prenant le soin d'éviter les restaurations menées en 1951 sous la direction d'E. Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Gris
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sableuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 25 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur grise et une texture sableuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

L'analyse microscopique révèle un liant à base de chaux de composition homogène, caractérisé par une porosité élevée (10 %) et par la présence de nodules de chaux non mélangés (10 %) et partiellement calcinés (5 %). Ces derniers sont principalement des fragments de lamellibranches et de tests d'Échinides. La charge est composée d'un sable silico-calcaire à la granularité homogène, avec des grains de formes angulaires. Ce sable est principalement constitué de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases, de micas, de fragments lithiques (granite, gneiss et micaschiste), ainsi que des cristaux de calcite. Par ailleurs, cet échantillon de mortier de chaux ne présente pas d'inclusions.

Figure 97 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22383 montrant une matrice de couleur grise et une charge tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 3.2	10	Sphérique	0.1 - 1.2	10
Partiellement calcinés	0.2 - 0.6	5	Oblongue	0.4 - 3.0	10

Tableau 44 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22383

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 1.5	3	Homogène
Gneiss	Métamorphique	Sub-angulaire	0.4 - 1.3	1	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Angulaire	0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 45 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22383

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.4	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.4	10	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.3 - 0.5	5	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.4 - 1.4	5	Homogène
Bioclaste	Très émoussée	0.2 - 0.6	5	Homogène
Biotite	Angulaire	0.3 - 0.5	3	Homogène
Calcite	Sub-émoussée	0.7 - 1.0	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.3	< 1	Hétérogène

Tableau 46 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22383

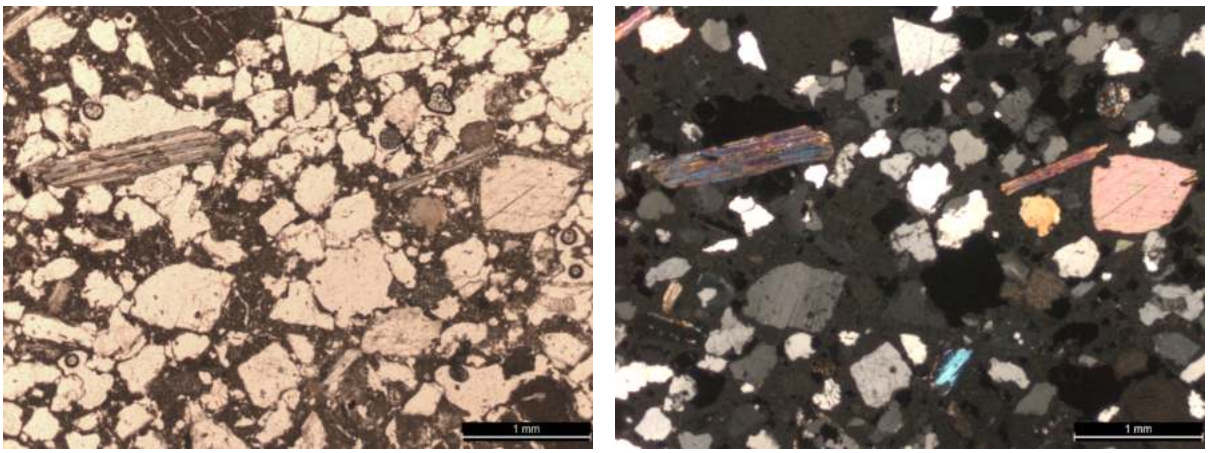

Figure 98 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant une charge composée de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases, associés à des grains de calcite, des micas et des bioclastes (grossissement × 2.5)

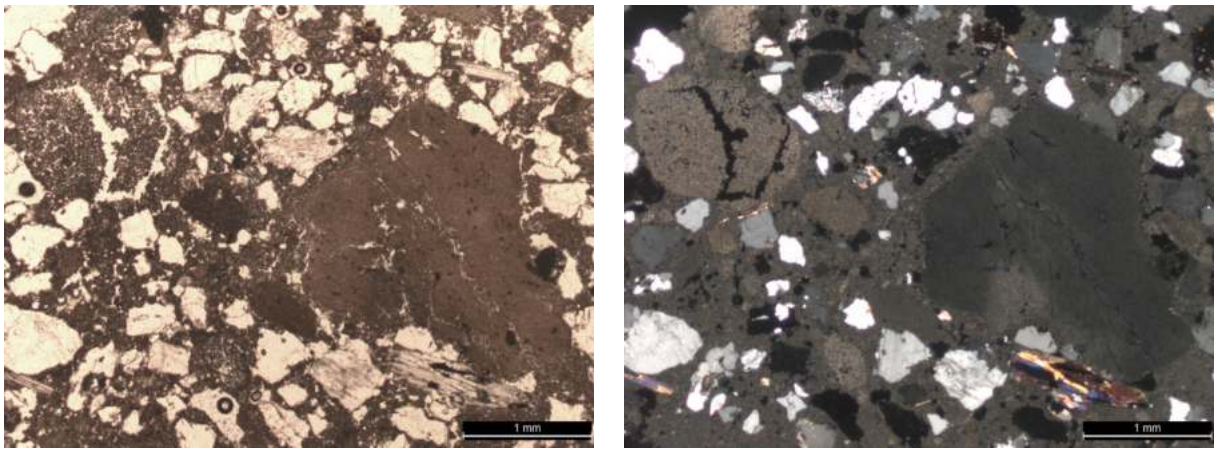

Figure 99 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence dans le liant de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5)

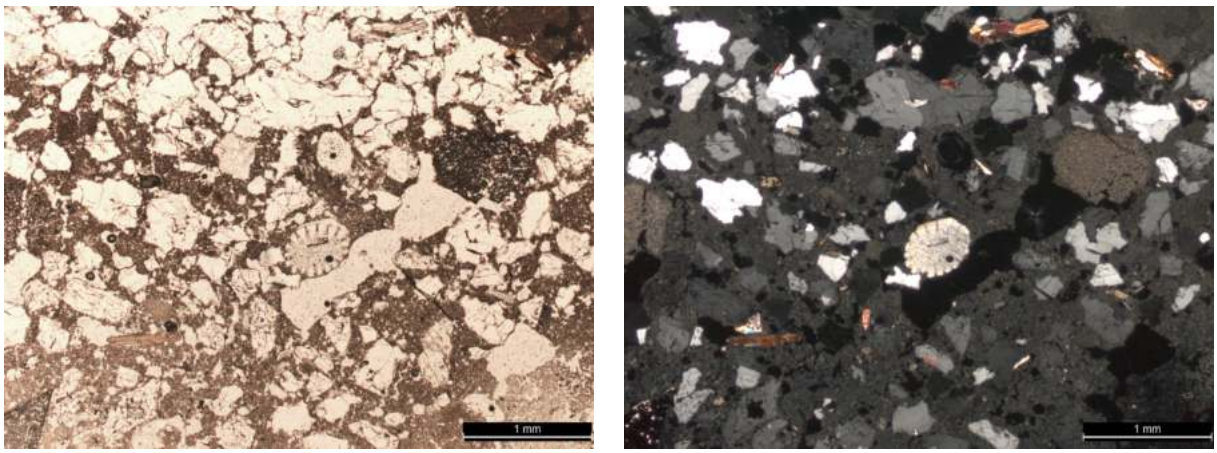

Figure 100 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant et de bioclastes dans la charge, dont un test d'Échinide (grossissement × 2.5)

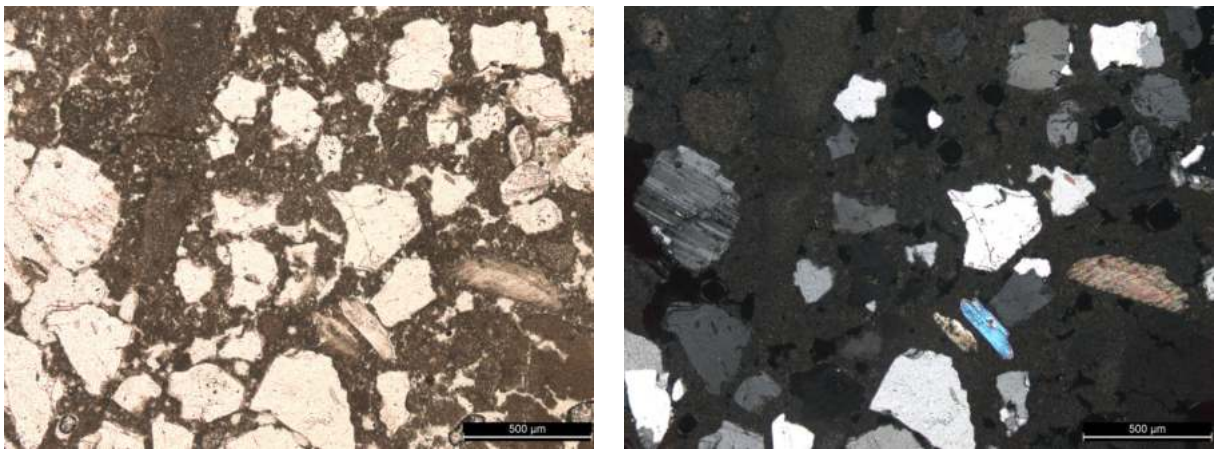

Figure 101 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence de fragments de lamellibranches dans la matrice (grossissement × 5)

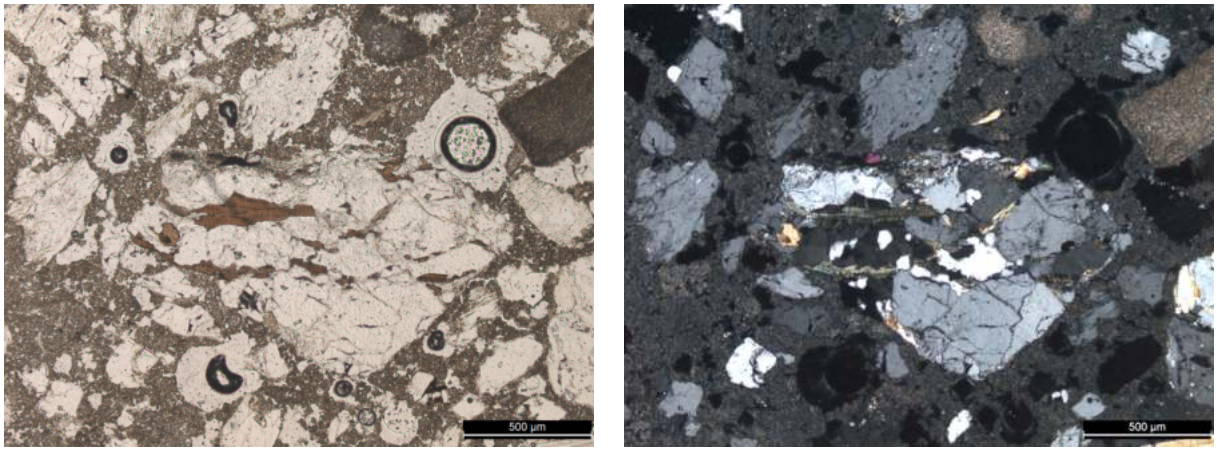

Figure 102 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant un fragment de gneiss faisant partie de la charge (grossissement × 5)

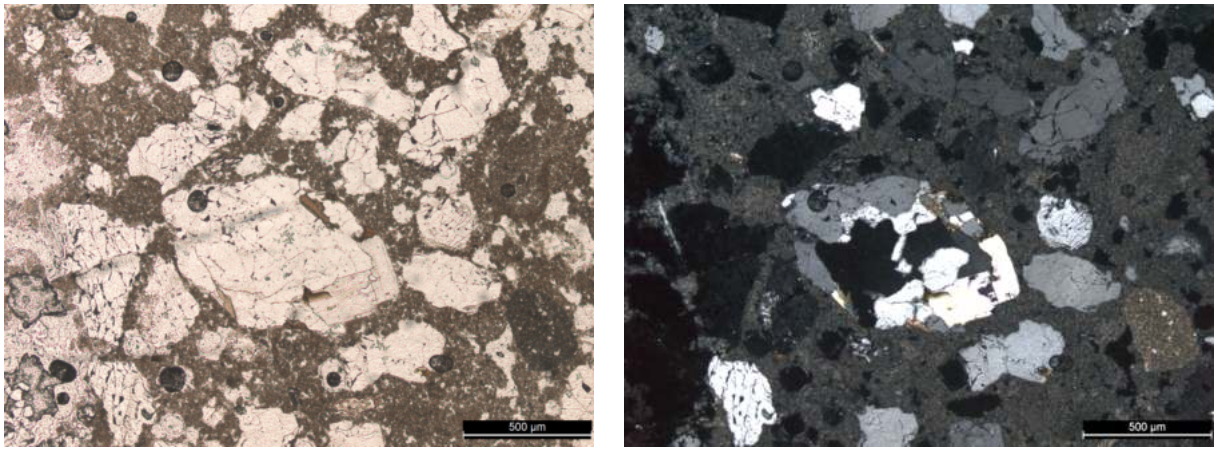

Figure 103 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence de fragments de granite dans la charge (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant à base de chaux de composition homogène. Les nodules de chaux non mélangés apparaissent sous forme de grumeaux blancs en lumière naturelle, tandis que les nodules de chaux partiellement calcinés émettent une luminescence orange intense en cathodoluminescence. En outre, les cristaux et fragments lithiques de formes angulaires qui constituent la charge sont principalement des quartz, des feldspaths alcalins et plagioclases, ainsi que de la calcite. Les observations complémentaires au microscope électronique à balayage (MEB) mettent en évidence les textures micritiques des nodules de chaux non mélangés. Les analyses élémentaires de ces nodules, réalisées à l'aide de la microsonde EDS, révèlent des teneurs en CaO qui varient entre 86,40 et 93,96 % pds et des teneurs en MgO se situant entre 0,52 et 0,53 % pds.

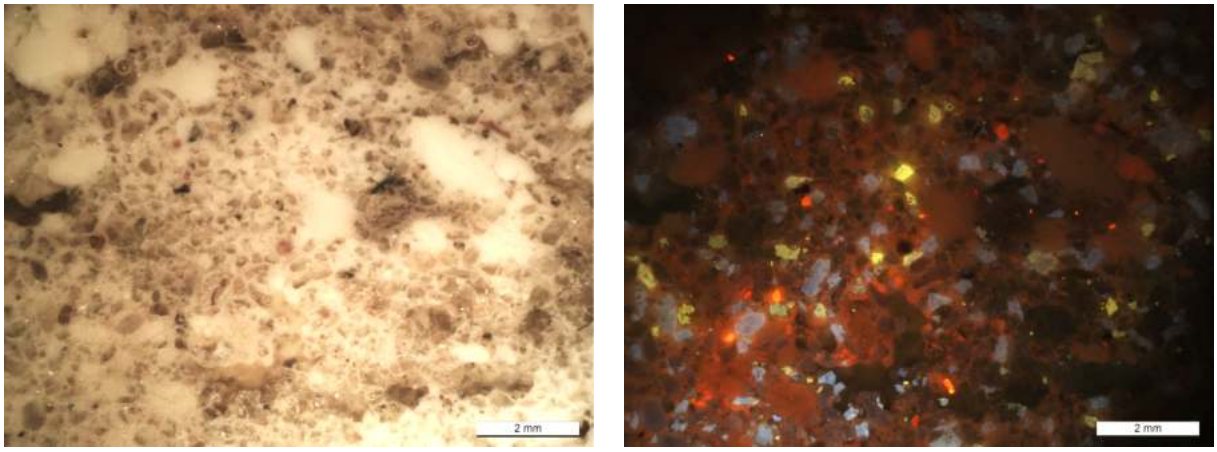

Figure 104 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22383 montrant les constituants de la charge et la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 1.25)

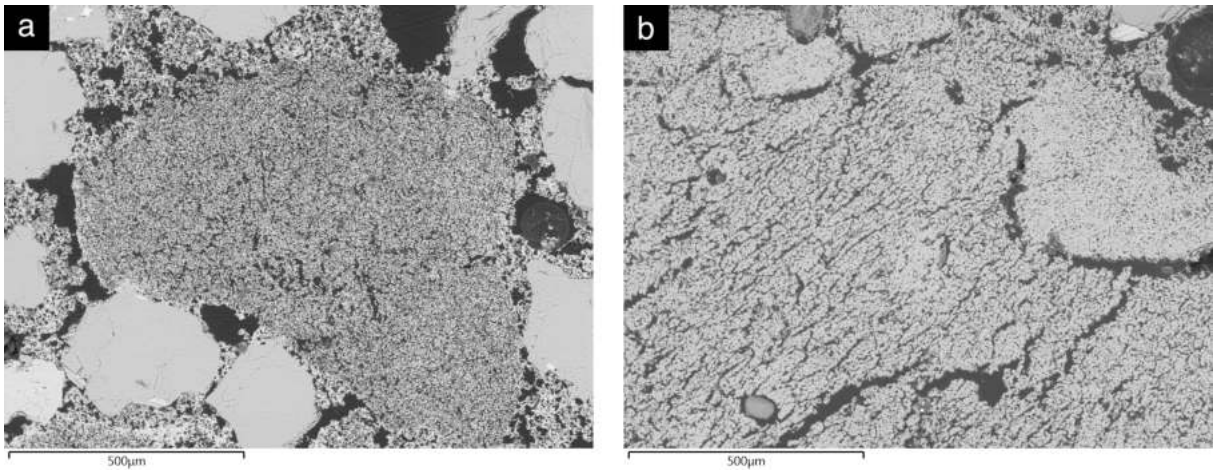

Figure 105 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22383 montrant des nodules de chaux non mélangés présentant une texture micritique

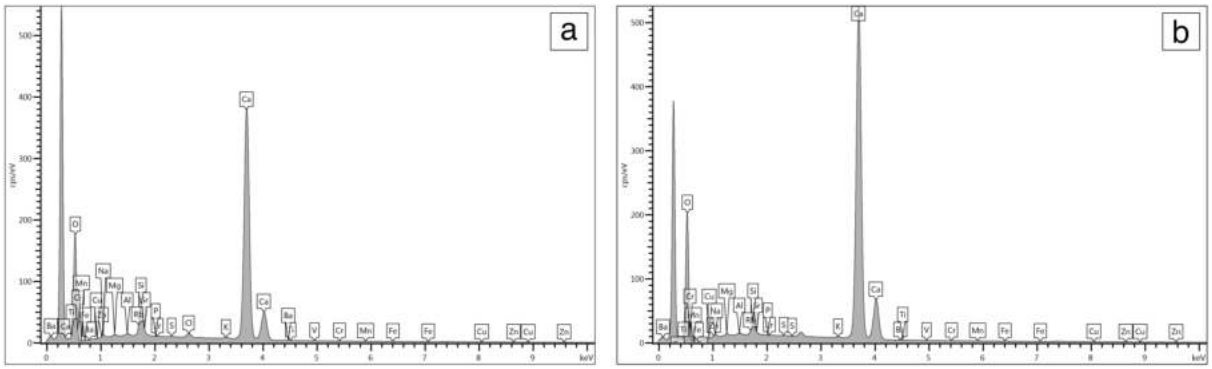

Figure 106 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22383 montrant la composition élémentaire des nodules de chaux non mélangés avec des teneurs en CaO et MgO respectivement entre (a) 86,40 et 0,52 % pds ; (b) 93,96 et 0,53 % pds

FICHE 7 BDX22384

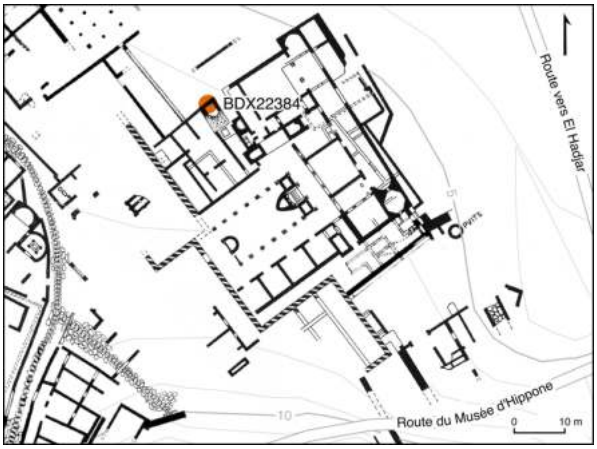

Figure 107 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22384 depuis la citerne C6 et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Citerne
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : Fin IVe ou début du Ve siècle
Localisation : Citerne C6
Date de prélèvement : 13/11/2018
Coordonnées : 36.8834082228096, 7.75151816248405

L'échantillon BDX22384 a été prélevé à partir de l'enduit intérieur de la citerne C6, située dans le complexe des *villae* du front de mer. Il a été sélectionné de manière à inclure toutes les couches de préparation et de finition qui composent l'enduit.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit d'étanchéité
Couleur : Rose clair ; Gris clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment d'enduit se compose de deux couches : une couche de préparation d'environ 11 mm d'épaisseur, de couleur rose clair, et une couche de préparation d'environ 20 mm, de couleur gris clair.

Caractéristiques pétrographiques

Les analyses microscopiques révèlent un liant à base de chaux de composition homogène, incluant des nodules de chaux non mélangés (3 à 5 %) et partiellement calcinés (3 à 5 %). La matrice présente une porosité élevée (5 à 10 %) avec des pores de formes principalement sphériques. La charge est constituée d'un sable silico-calcaire avec des grains de formes angulaires, avec une granularité hétérogène dans la couche de finition et une granularité homogène dans la couche de préparation. Les fragments de céramique sont présents en abondance (20 %) dans la couche de finition et en quantité nettement réduite (1 %) dans la couche de préparation.

Figure 108 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22384 montrant une matrice de couleur rose clair dans la couche de finition et une matrice de couleur beige clair avec une charge tamisée dans la couche de préparation

BDX22384a : Couche de finition (11 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.5 - 3.2	5	Sphérique	0.1 - 0.5	10
Non mélangés	0.4 - 1.0	3	Oblongue	0.2 - 0.8	3

Tableau 47 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22384a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.6 - 0.9	3	Homogène

Tableau 48 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22384a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.1 - 0.6	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.4 - 0.6	5	Homogène
Calcite	Angulaire	0.5 - 1.1	1	Hétérogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.7	1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.1 - 0.3	< 1	Hétérogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.8 - 1.1	< 1	Hétérogène

Tableau 49 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22384a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.1 - 5.2	20	Homogène
Fragment de mortier		5.0	< 1	Hétérogène

Tableau 50 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22384a

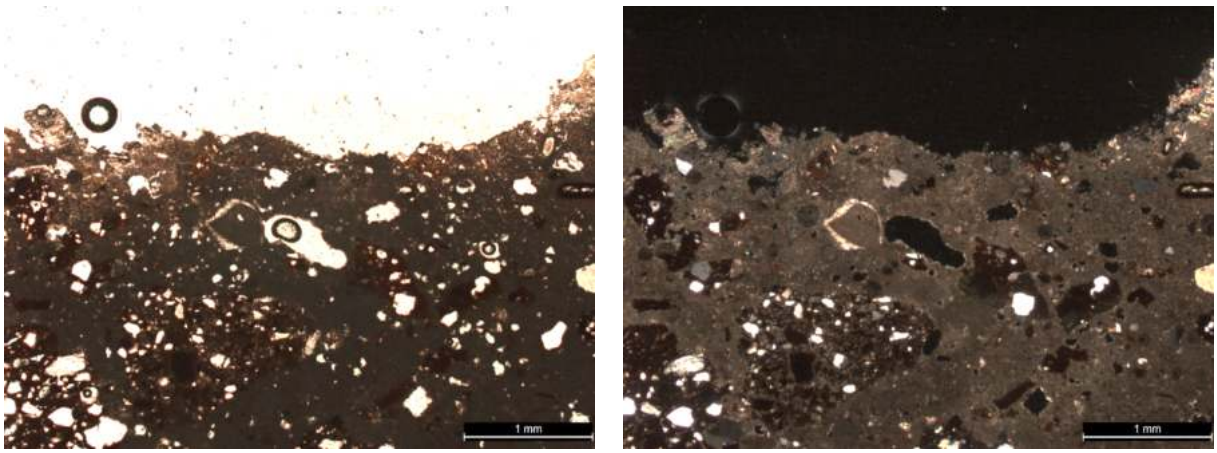

Figure 109 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384a montrant des fragments de céramique utilisés comme pouzzolane artificielle, ainsi qu'un nodule de chaux partiellement calciné, présents dans la matrice (grossissement × 2.5)

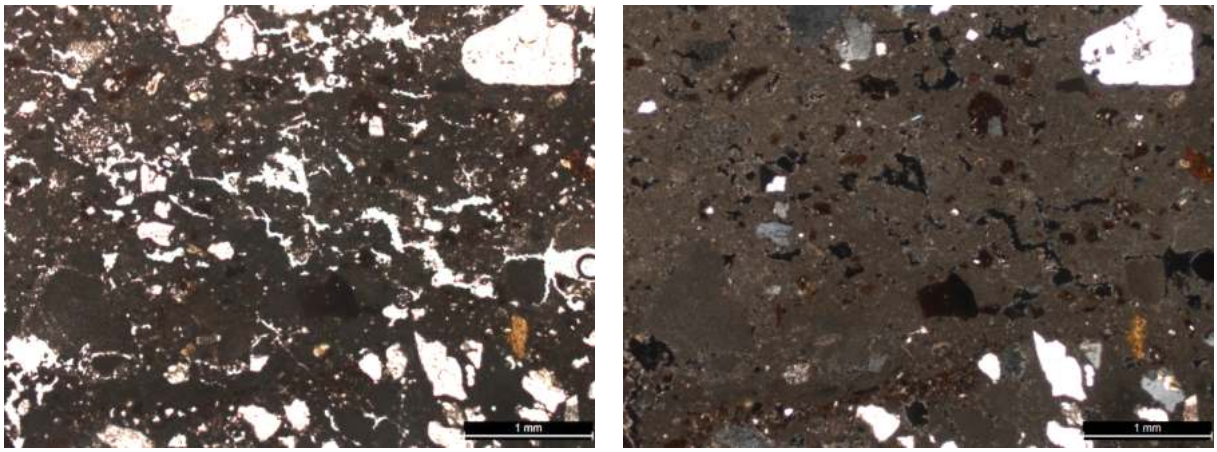

Figure 110 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384a montrant des nodules de chaux non mélangés et des micro-fragments de céramique qui composent la poudre de tuileau utilisée comme pouzzolane artificielle (grossissement × 2.5)

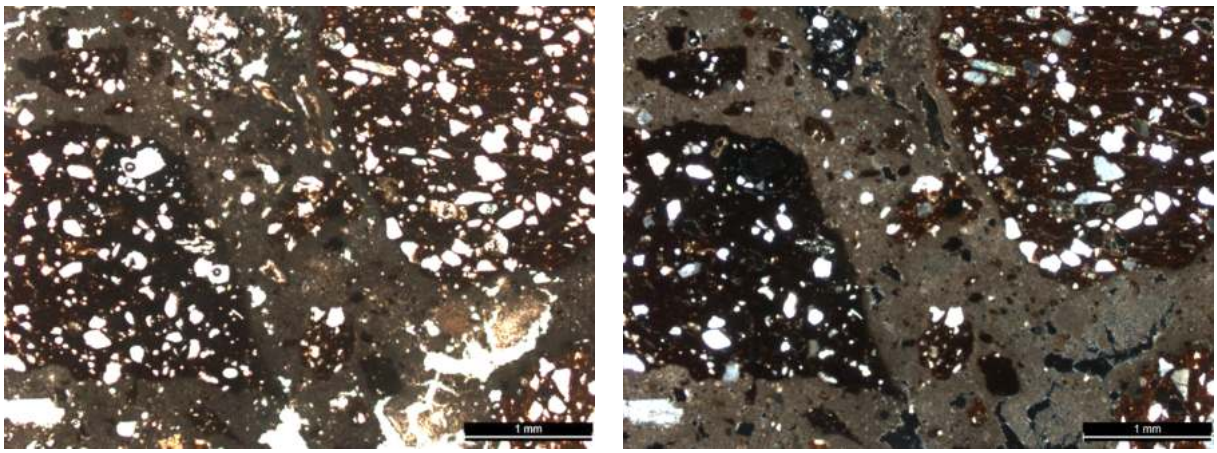

Figure 111 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384a montrant des macro-fragments de céramique (grossissement × 2.5)

BDX22384b : Couche de préparation (20 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.4 - 3.0	5	Sphérique	0.1 - 1.2	5
Partiellement calcinés	0.1 - 1.5	3	Oblongue	0.2 - 1.5	3

Tableau 51 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22384b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.3 - 1.3	10	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Angulaire	1.0	< 1	Hétérogène

Tableau 52 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22384b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.3 - 0.7	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.3 - 0.7	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.4 - 0.5	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 0.9	1	Hétérogène
Muscovite	Angulaire	0.6	< 1	Hétérogène
Biotite	Angulaire	0.5	< 1	Hétérogène

Tableau 53 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22384b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.7 - 4.5	1	Hétérogène

Tableau 54 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22384b

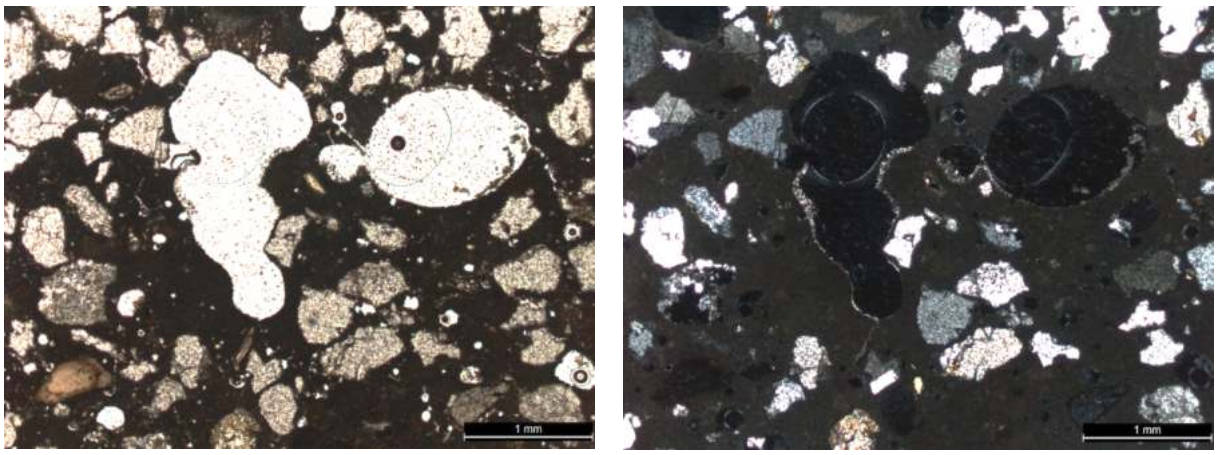

Figure 112 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant la présence de pores de formes sphériques et oblongues dans la matrice avec des dépôts secondaires de calcite sur les surfaces internes des vides (grossissement × 2.5)

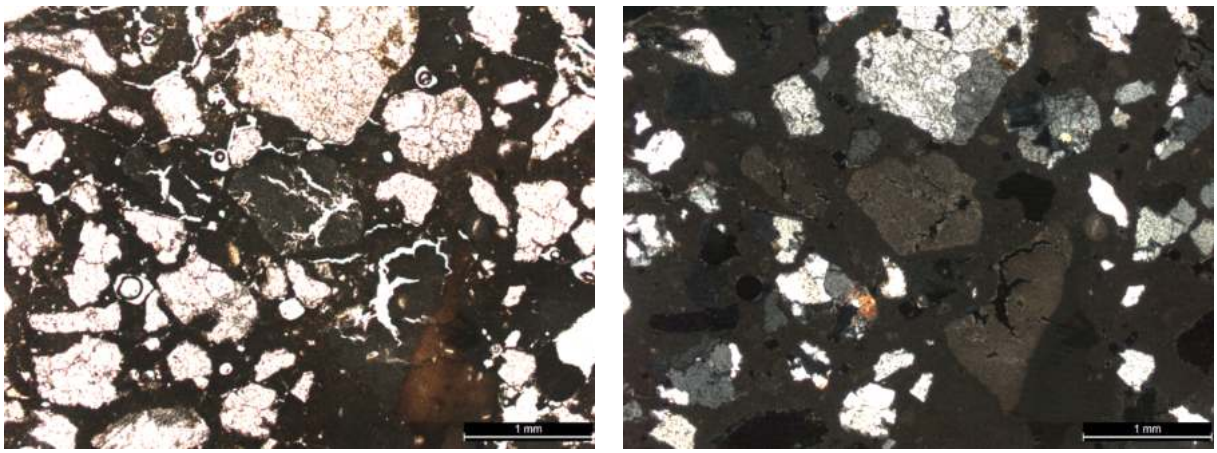

Figure 113 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant des nodules de chaux non mélangés présentant des fissures (grossissement × 2.5)

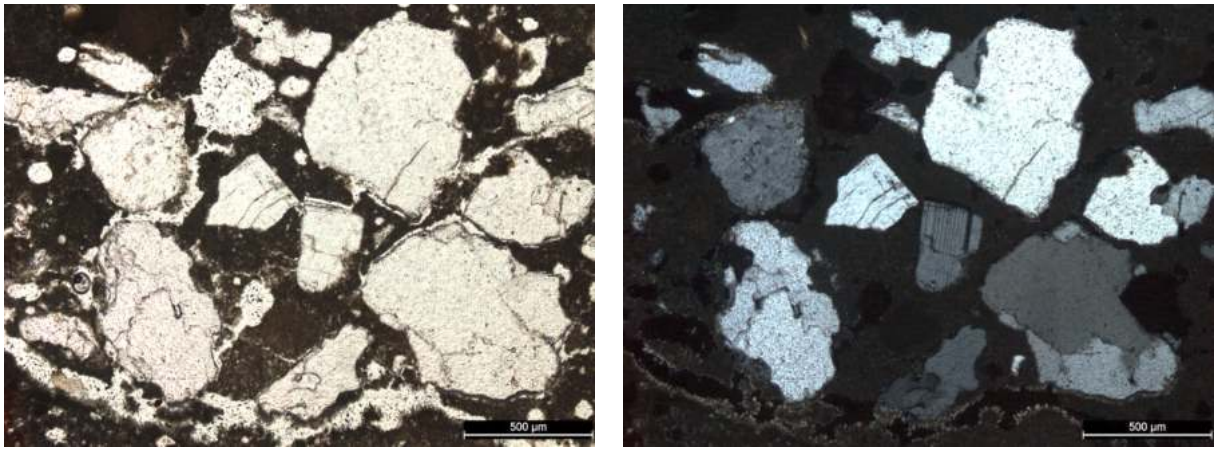

Figure 114 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant des cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases ainsi que des fragments de granite (grossissement × 5)

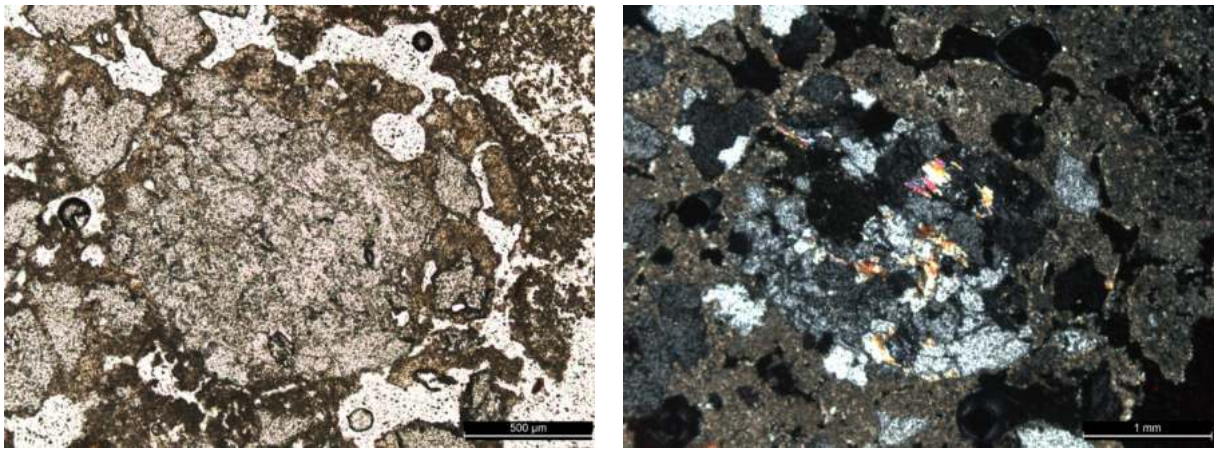

Figure 115 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant un micro-fragment de granite présent dans la charge (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique en cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène avec abondance de nodules de chaux non mélangés (5 %) et partiellement calcinés (5 %). Des fragments de terres cuites de diverses compositions minéralogiques sont observés principalement dans la couche de finition de l'enduit.

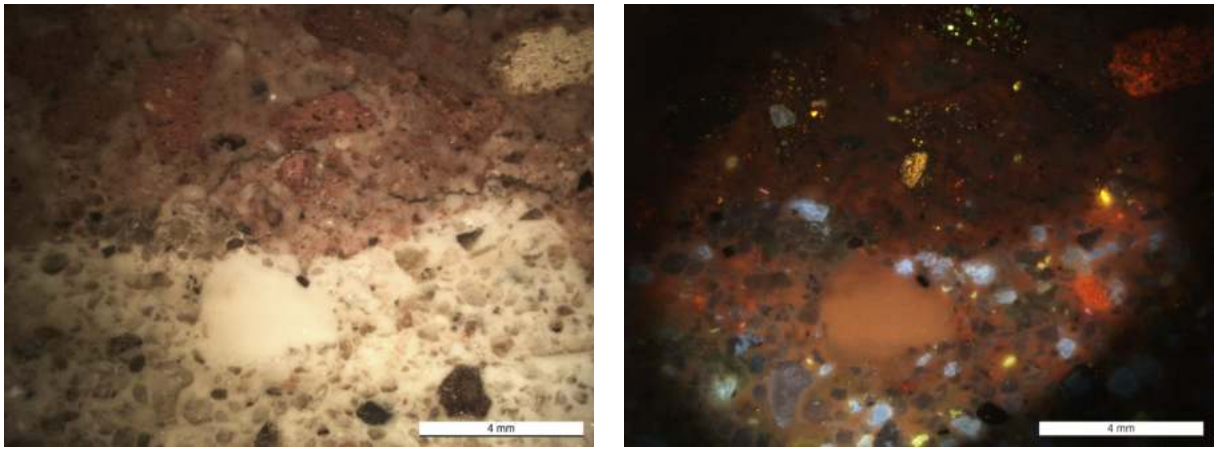

Figure 116 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22384 montrant la composition minéralogique de la charge utilisée dans chacune des deux couches (grossissement × 1)

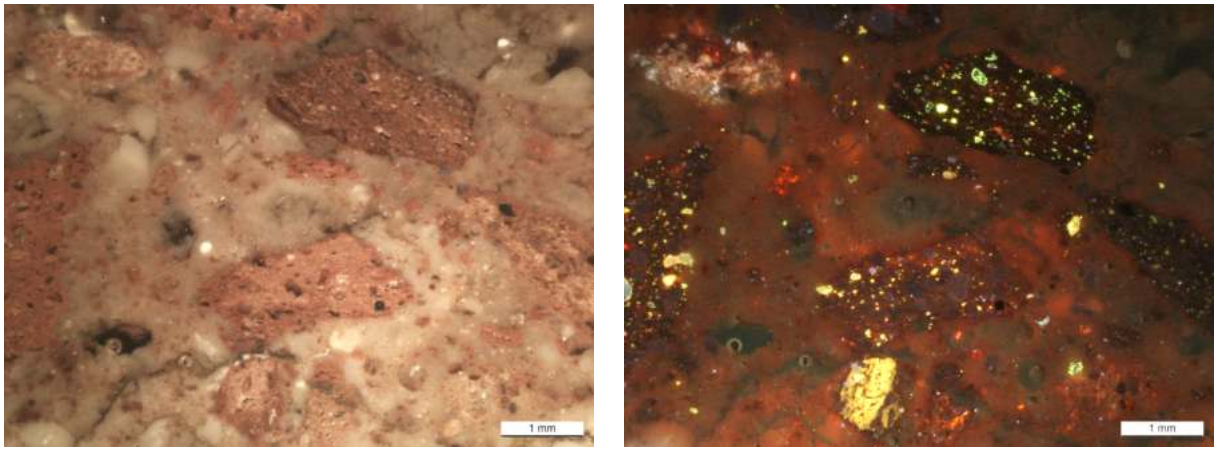

Figure 117 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22384a montrant des fragments de céramique inclus dans la matrice (grossissement × 2)

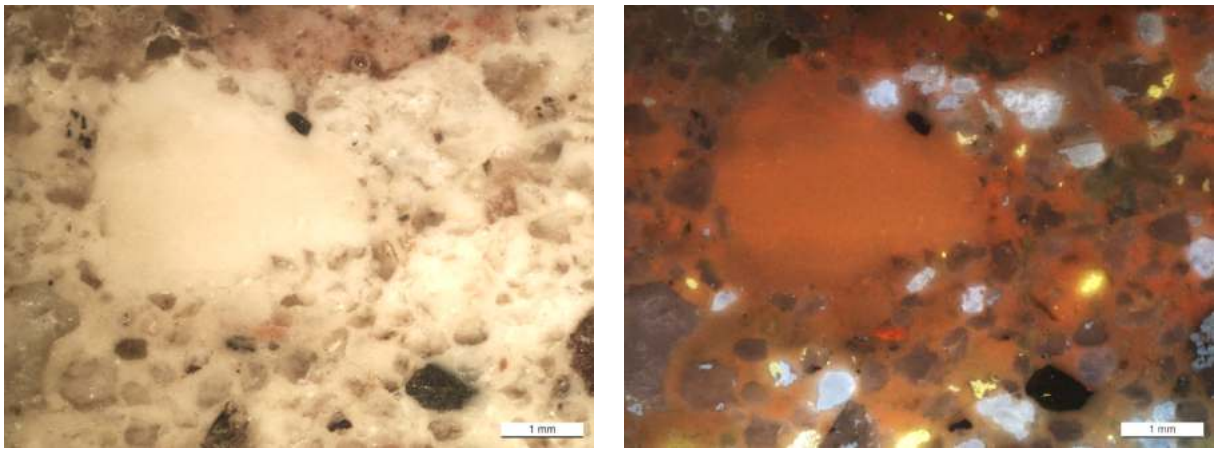

Figure 118 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22384b montrant la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2)

FICHE 8 BDX22385

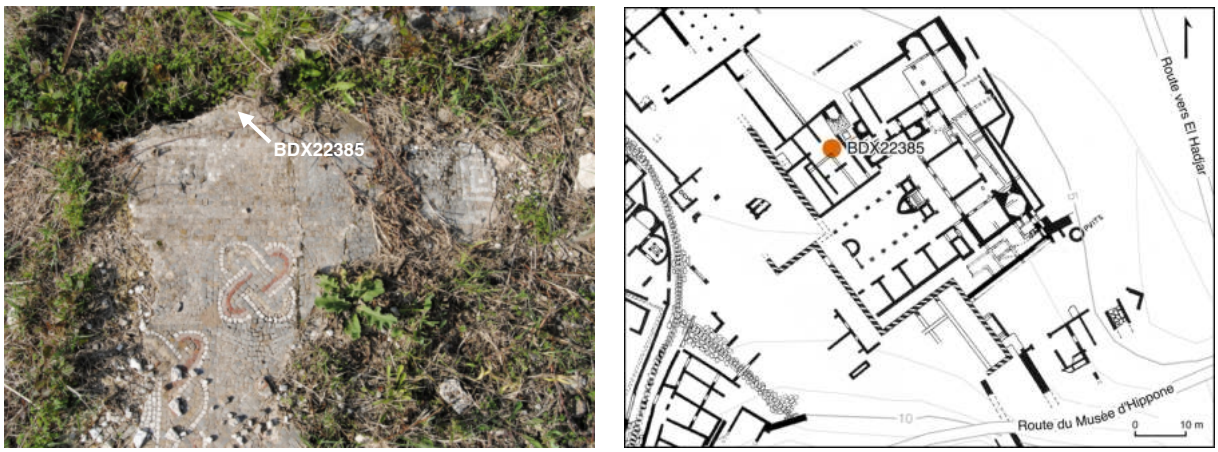

Figure 119 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22385 depuis la mosaïque de l'Aiôn et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mosaïque de l'Aiôn
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : Fin IVe ou début du Ve siècle
Localisation : Pièce C1
Date de prélèvement : 13/11/2018
Coordonnées : 36.8833342401895, 7.75152585013761

L'échantillon BDX22385 a été prélevé depuis la bordure de la mosaïque de l'Aiôn qui se situe dans la pièce C1 du complexe des *villae* du front de mer. La zone de prélèvement n'a pas été soumise à des travaux de consolidation durant la campagne de 1951 dirigée par E. Marec, ni lors des campagnes menées entre 2002 et 2005 sous la direction de X. Delestre.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de mosaïque
Couleur : Blanc, Beige clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mosaïque se compose de trois couches : un lit de pose d'une épaisseur approximative de 9 mm et de couleur blanche, une couche intermédiaire d'environ 7 mm et une couche de préparation d'à peu près 10 mm, de couleur beige clair.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations microscopiques révèlent un liant à base de chaux de composition homogène, avec de rares nodules de chaux non mélangés (3 %) et partiellement calcinés (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire de granularité hétérogène, avec des grains de formes angulaires. Les tesselles calcaires présentent le faciès de roches fossilifères (biosparites). En outre, des fragments de céramique sont présents dans la couche intermédiaire ainsi que dans la couche de préparation du support de mosaïque.

Figure 120 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22385 montrant une matrice de couleur beige clair et une charge non tamisée

BDX22385a : Lit de pose (9 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 1.3	3	Oblongue	0.2 - 1.3	5
Partiellement calcinés	0.6	< 1	Sphérique	0.2 - 0.4	3

Tableau 55 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du lit de pose BDX22385a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.6 - 1.2	< 1	Hétérogène

Tableau 56 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22385a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.7	1	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.7	1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.5	1	Homogène
Calcite	Angulaire	0.3 - 0.5	1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.4	< 1	Hétérogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.5	< 1	Hétérogène

Tableau 57 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22385a

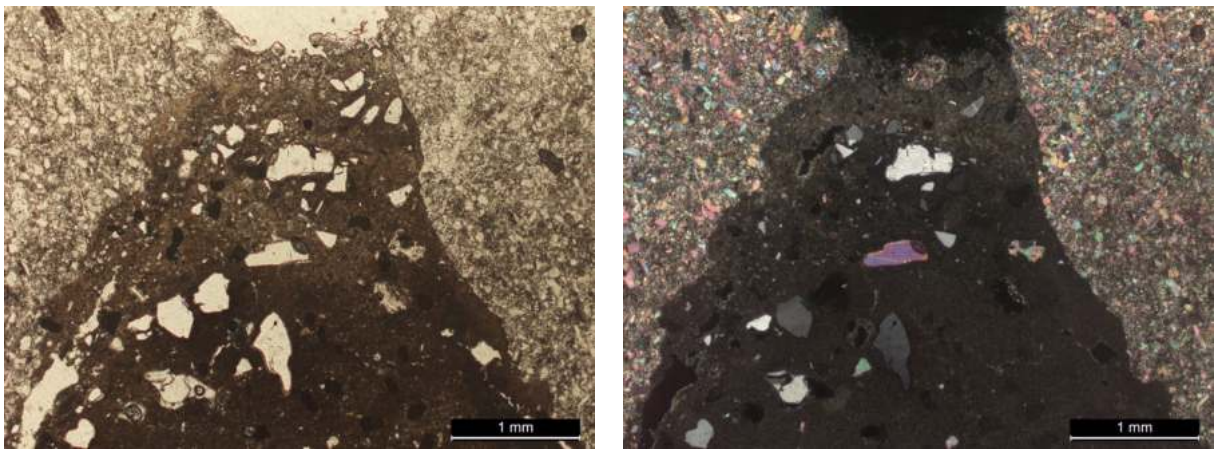

Figure 121 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385a montrant une charge composée de quartz, de feldspaths et de micas (grossissement × 2.5)

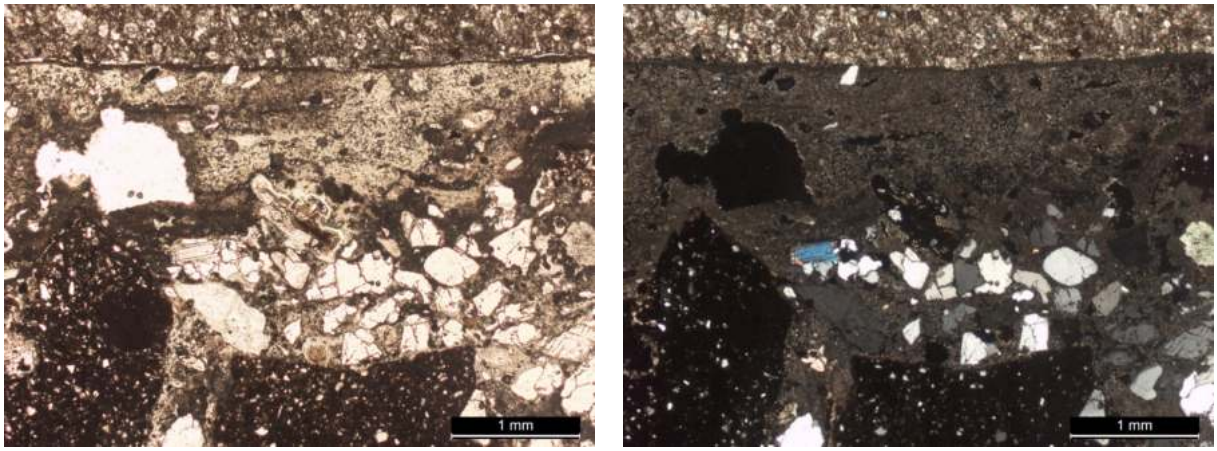

Figure 122 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385a montrant la présence de porosité de formes oblongues et sphériques dans le liant (grossissement × 2.5)

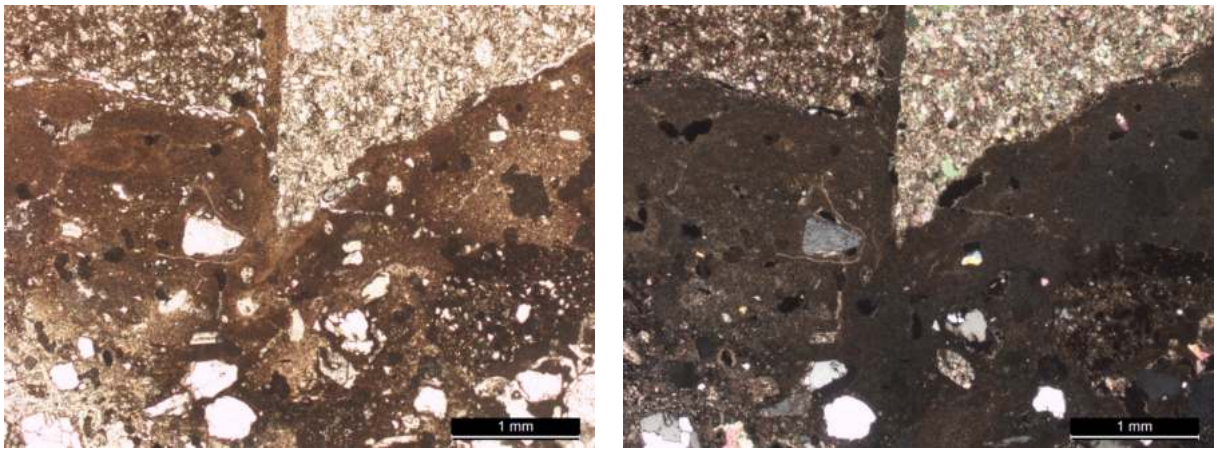

Figure 123 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385a montrant deux tesselles calcaires (grainstone) riches en foraminifères (grossissement × 2.5)

BDX22385b : Couche intermédiaire - *nucleus* (7 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	1.3 - 3.7	3	Sphérique	0.2 - 4.0	5
Partiellement calcinés	0.3 - 0.8	1	Oblongue	0.4 - 1.2	3

Tableau 58 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22385b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Marbre	Métamorphique	Angulaire	0.9	< 1	Hétérogène
Granite	Plutonique	Angulaire	0.3 - 1.8	5	Homogène

Tableau 59 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22385b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.6	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.6	5	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.9	5	Homogène
Biotite	Angulaire	0.4 - 0.6	3	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.4 - 0.6	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.1 - 0.9	1	Homogène
Bioclaste	Angulaire	0.4 - 0.6	1	Homogène

Tableau 60 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22385b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.4 - 3.0	10	Homogène

Tableau 61 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22385b

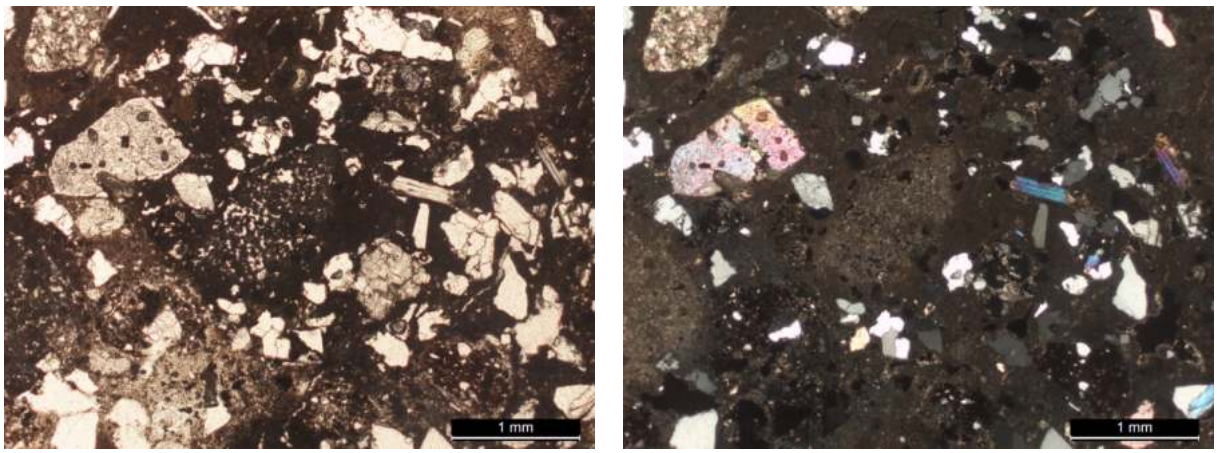

Figure 124 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant la composition minéralogique de la charge et la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5)

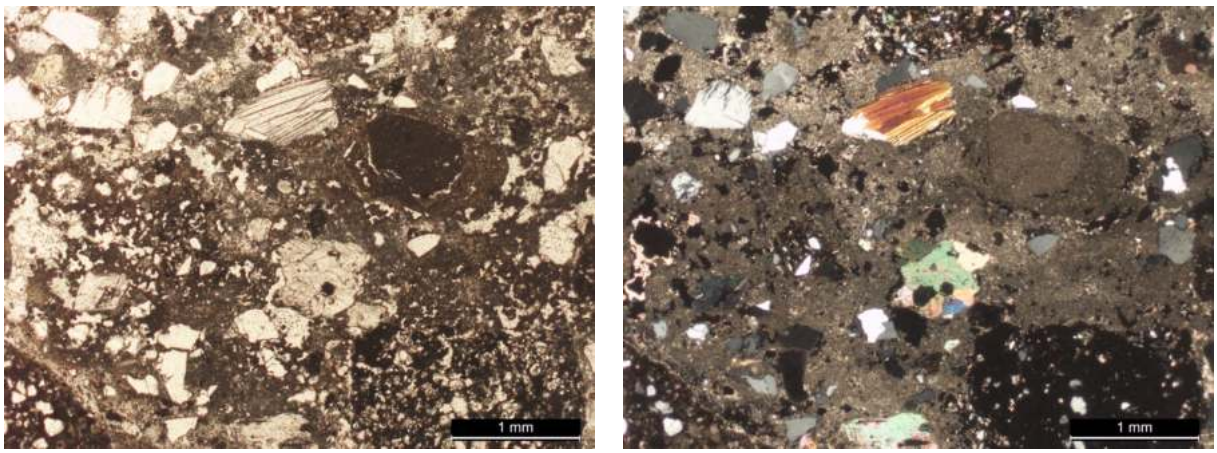

Figure 125 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant des cristaux de calcite et un fragment de marbre, mêlés à la charge (grossissement × 2.5)

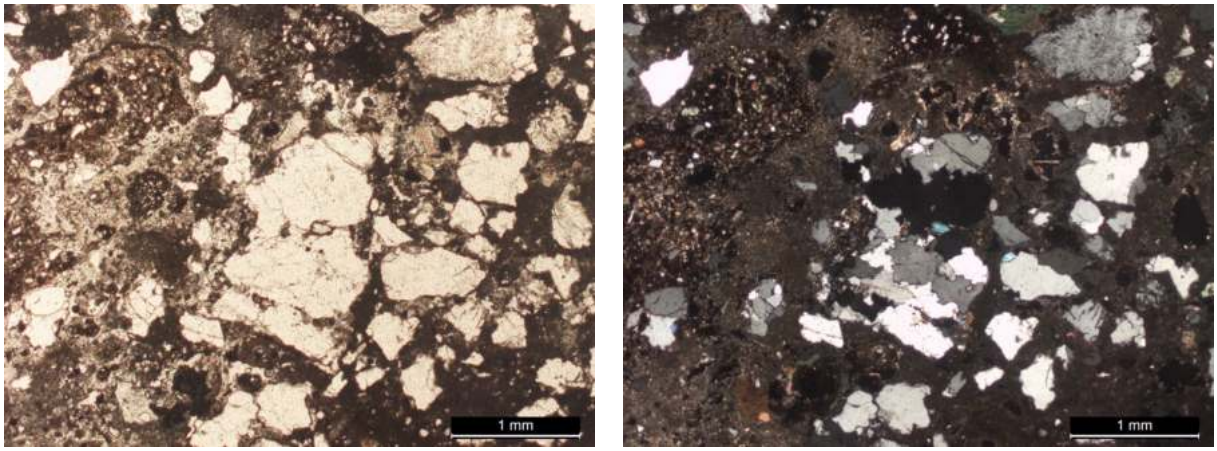

Figure 126 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant plusieurs fragments de granite et de cristaux de quartz et feldspaths (grossissement × 2.5)

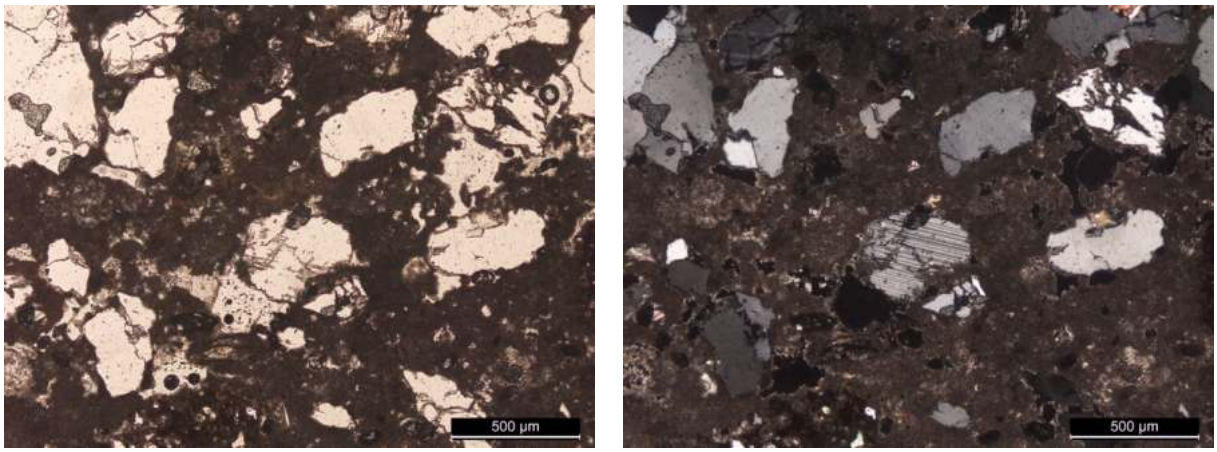

Figure 127 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant en détail des cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 5)

BDX22385c : Couche de préparation - *rudus* (10 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.6 - 1.0	1	Sphérique	0.3 - 0.7	10
			Oblongue	0.2 - 1.0	3

Tableau 62 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22385c

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 3	10	Homogène
Gneiss	Métamorphique	Sub-angulaire	0.7 - 6	5	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Sub-émoussée	7.0 - 17	3	Homogène

Tableau 63 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22385c

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.3 - 1.0	30	Homogène
Calcite	Angulaire	0.3 - 1.2	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.3 - 1.0	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.5	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.6 - 1.9	1	Homogène

Tableau 64 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22385c

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.4 - 7.0	5	Homogène

Tableau 65 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22385c

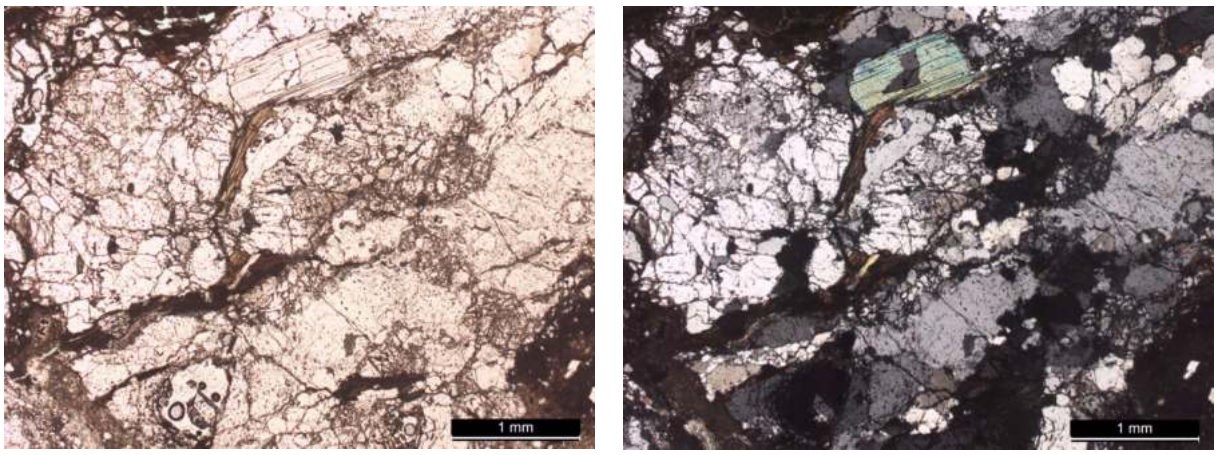

Figure 128 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant fragment de granite avec des inclusions de biotite et muscovite (grossissement × 2.5)

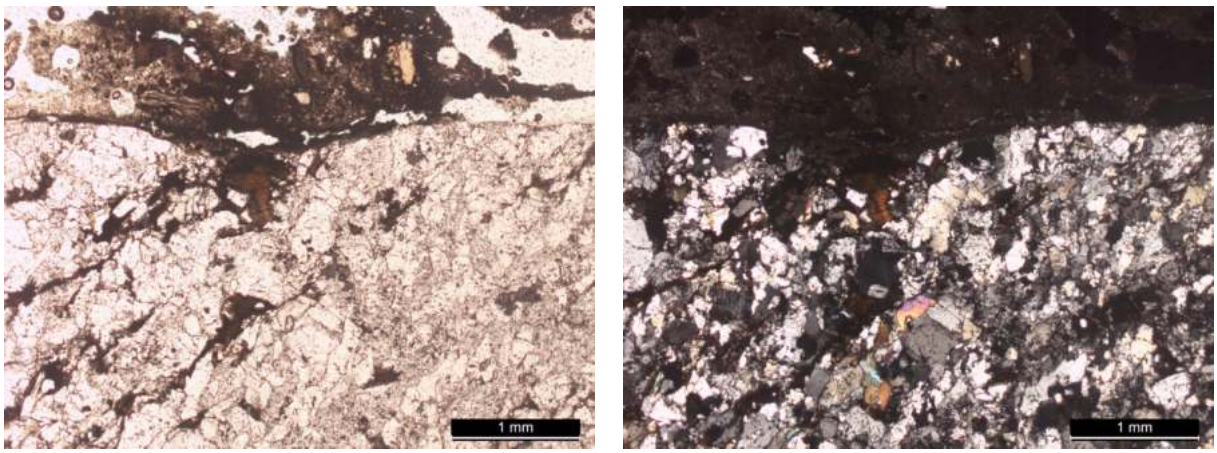

Figure 129 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant un fragment de gneiss faisant partie de la charge (grossissement × 2.5)

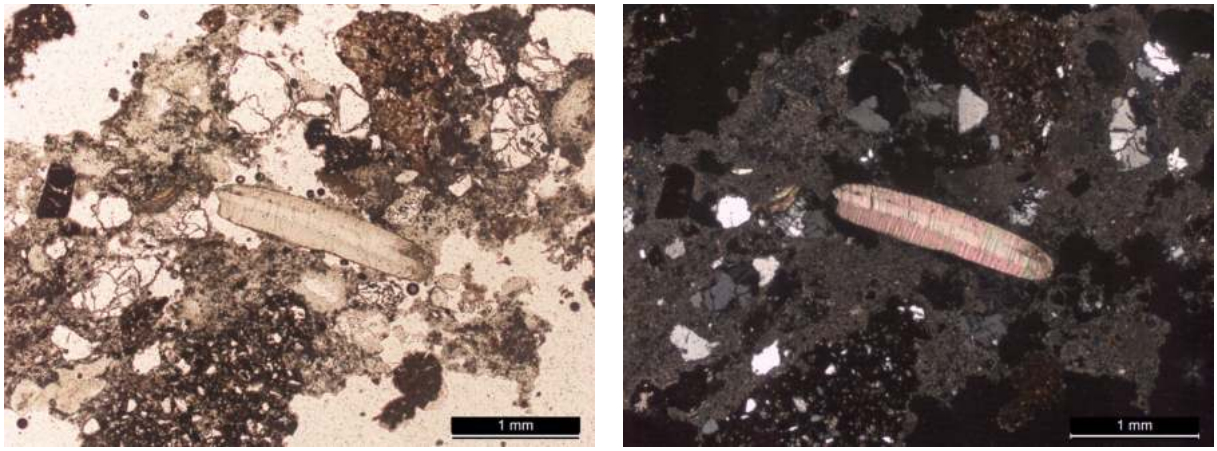

Figure 130 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant un fragment de coquille de lamellibranche isolé dans le liant à base de chaux (grossissement × 2.5)

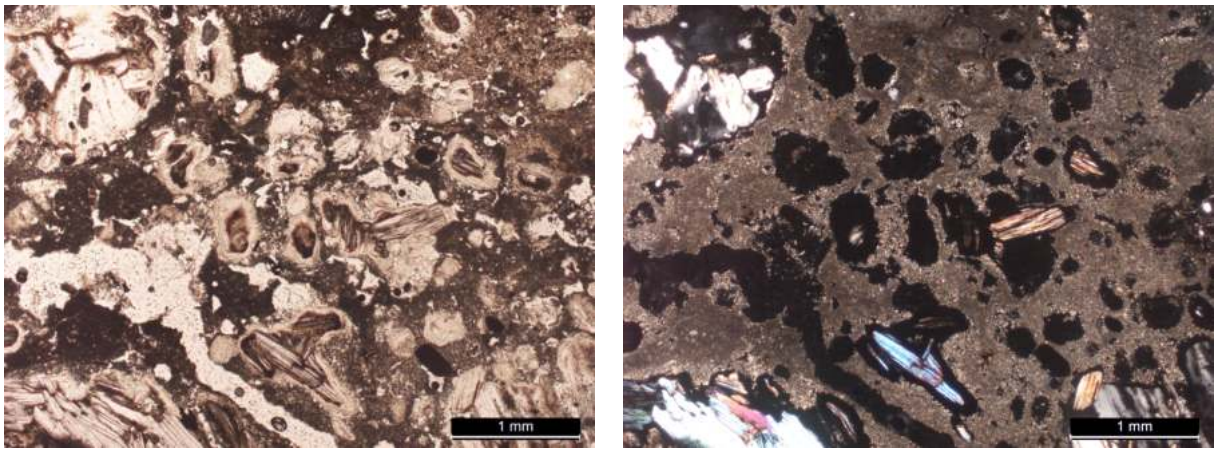

Figure 131 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant des micas (biotite et muscovite) dispersés dans la matrice (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de composition homogène avec de nombreux nodules de chaux non mélangés (3 %) et partiellement calcinés (1 %). La charge, composée de cristaux et de fragments lithiques de

formes angulaires, inclut des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et des plagioclases (luminescence verte), ainsi que des cristaux de calcite (luminescence orange). Les fragments de céramique présentent des compositions minéralogiques similaires. Les dégraissants sont constitués de très fins cristaux de quartz, de feldspaths et de calcite.

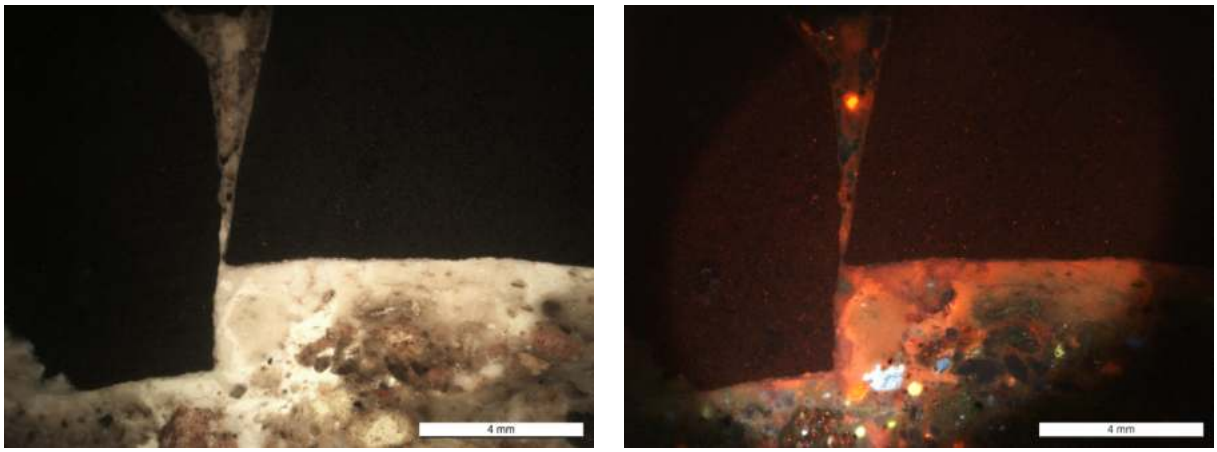

Figure 132 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22385a montrant les matrices carbonatées des tesselles et du lit de pose (grossissement × 1)

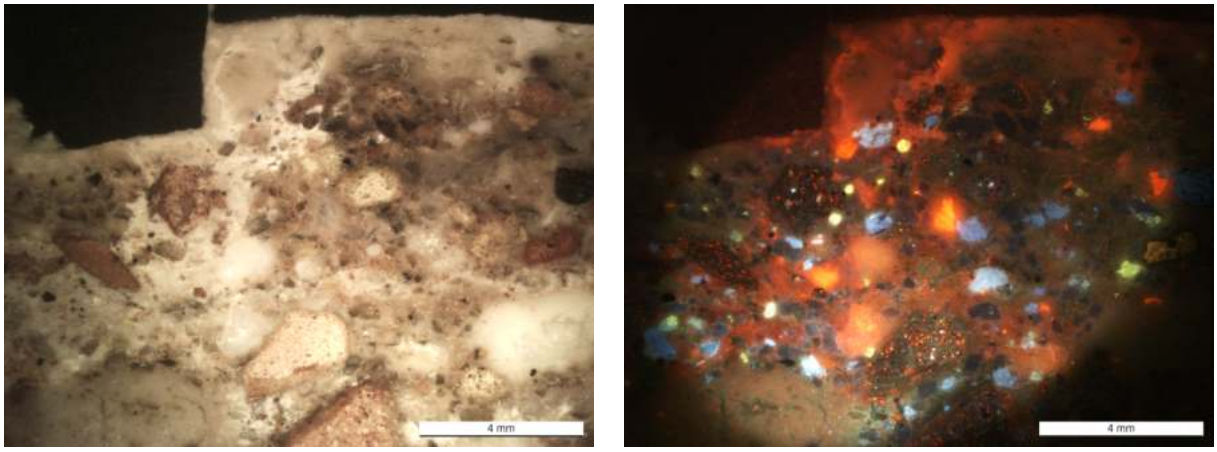

Figure 133 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22385b montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

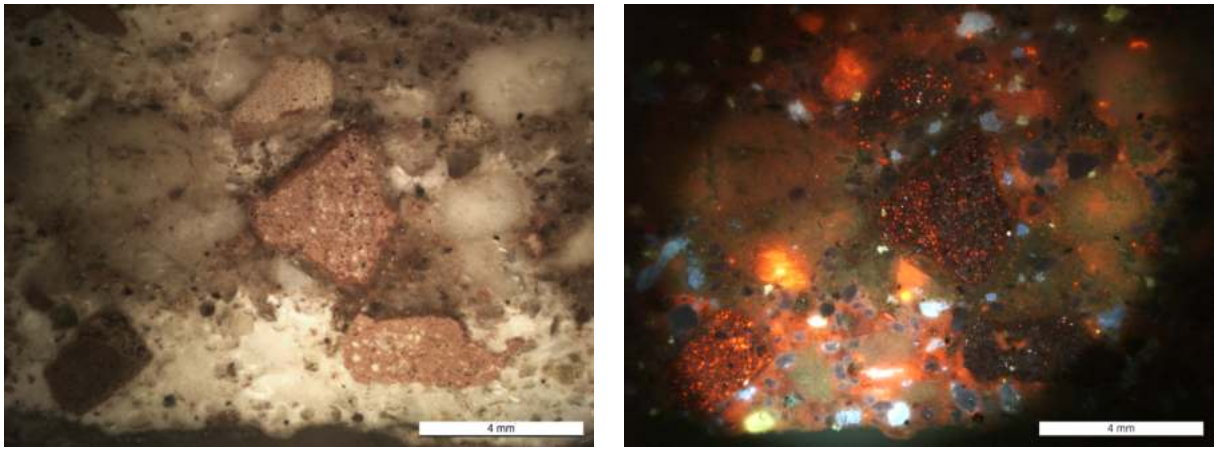

Figure 134 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22385c montrant la présence de nodules de chaux et de tuileau dans le mélange (grossissement × 1)

FICHE 9 BDX22386

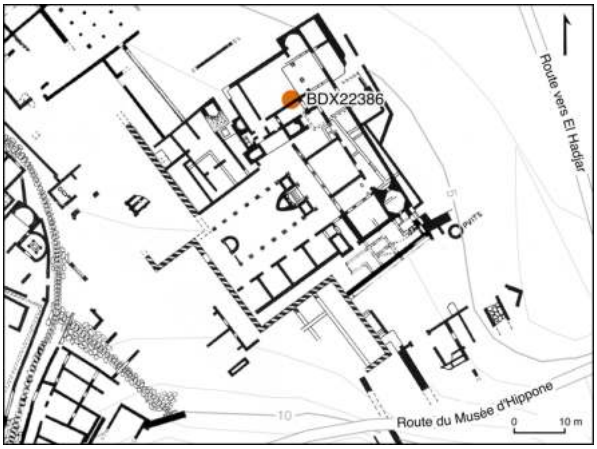

Figure 135 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22386 depuis la mosaïque d'Amphitrite de la pièce B7 et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mosaïque d'Amphitrite
Structure : *Villae* du front de mer
Datation : 280 à 330 apr. J.-C. (Phase 2)
Localisation : Pièce B7
Date de prélèvement : 13/11/2018
Coordonnées : 36.8834183455062, 7.75170299151284

L'échantillon BDX22386 a été prélevé depuis la bordure de la mosaïque d'Amphitrite, située dans la pièce B7 du complexe des *villae* du front de mer. La zone de prélèvement n'a pas été altérée durant les travaux de consolidation réalisés en 1951 sous la direction de E. Marec et 2002 et 2005 sous la direction de X. Delestre.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de mosaïque
Couleur : Blanc ; Beige clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mosaïque se compose de quatre couches : un joint de finition d'une épaisseur de 2 mm, un lit de pose épais de 6 mm, de couleur blanche, une couche intermédiaire d'une épaisseur de 4 mm, et une couche de préparation d'environ 15 mm d'épaisseur, présentant une teinte beige clair.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen microscopique révèle un liant à base de chaux présentant quelques nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés (entre 1 et 3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène, avec des grains aux formes sub-angulaires. Les tesselles de la mosaïque présentent le faciès pétrographique d'une roche calcaire fossilifère (probablement un grainstone). Les fragments de céramique sont présents dans la couche intermédiaire (jusqu'à 20 %) ainsi que dans la couche de préparation (environ 1 %).

Figure 136 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22386 montrant une matrice de couleur beige clair avec des inclusions de tuileau

BDX22386a : Joint de finition (2 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.1 - 0.2	1	Sphérique	0.1 - 0.3	1
Partiellement calcinés	0.3 - 0.9	< 1	Oblongue	0.3	< 1

Tableau 66 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du joint de finition BDX22386a

Charge

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.6	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.1 - 0.7	10	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.1 -0.2	1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.3	< 1	Hétérogène

Tableau 67 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22386a

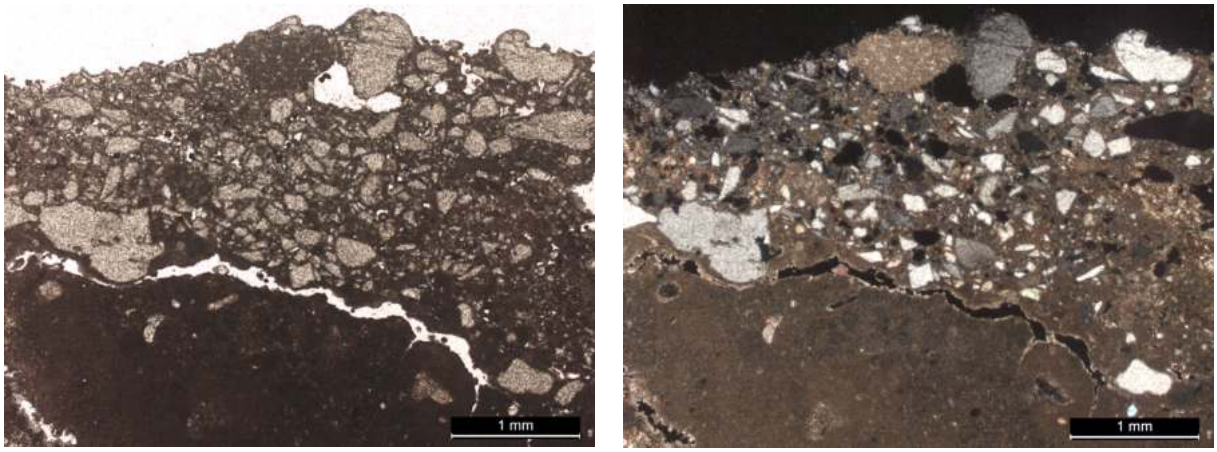

Figure 137 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386a montrant l'utilisation d'une charge tamisée composée d'un sable silico-calcaire (grossissement × 2.5)

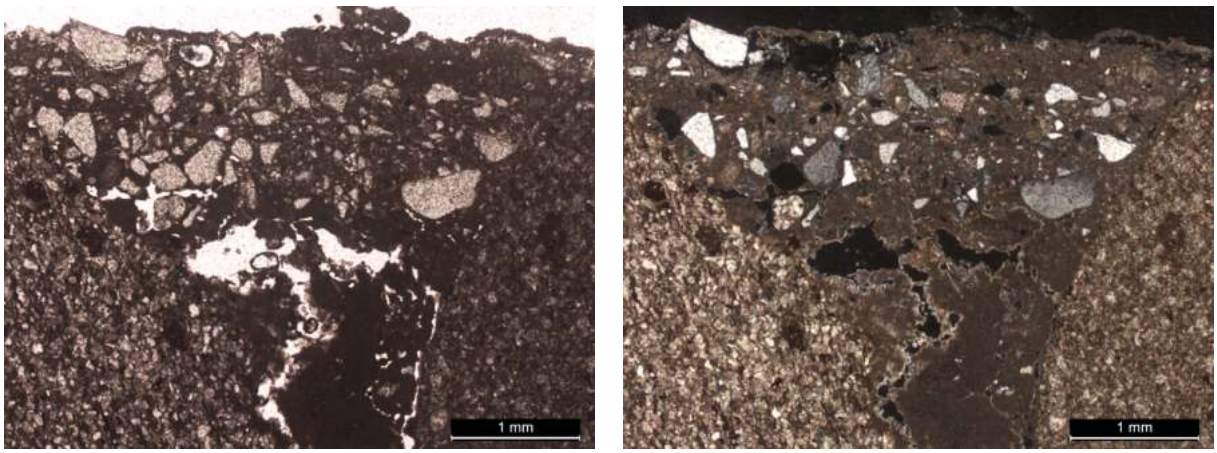

Figure 138 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386a montrant des tesselles taillées dans un grainstone fossilifère (grossissement × 2.5)

BDX22386b : Lit de pose (6 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.1 - 0.3	1	Sphérique	0.1 - 0.3	1
Non mélangés	0.3	< 1	Oblongue	0.5	< 1

Tableau 68 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de du lit de pose BDX22386b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Marbre	Métamorphique	Angulaire	0.7	< 1	Hétérogène

Tableau 69 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22386b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Angulaire	0.1 - 0.2	< 1	Homogène

Tableau 70 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22386b

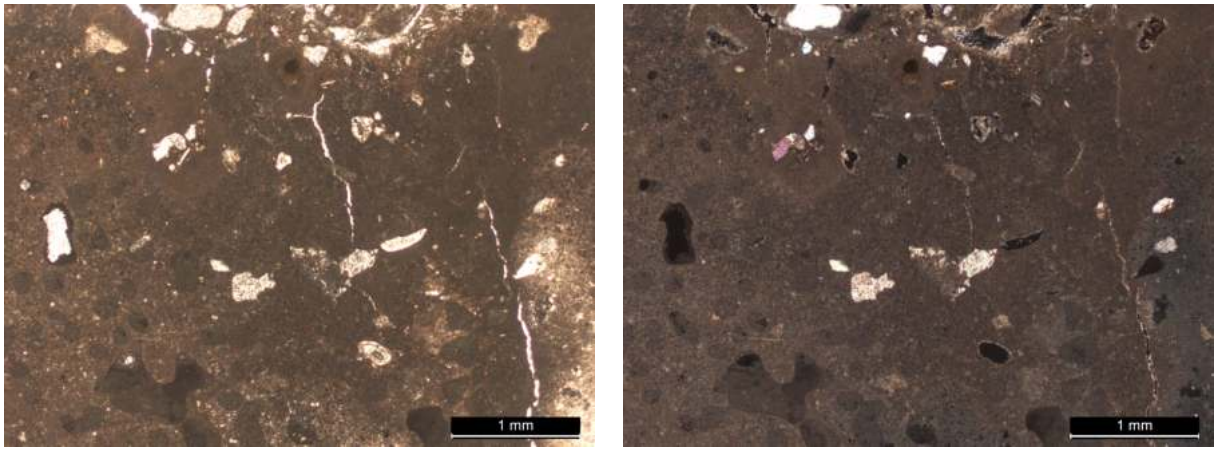

Figure 139 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386b montrant une matrice entièrement carbonatée à faible porosité (grossissement × 2.5)

BDX22386c : Couche intermédiaire - *nucleus* (4 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.3 - 1.1	3	Sphérique	0.1 - 0.4	3
			Oblongue	0.2 - 0.5	1

Tableau 71 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22386c

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Marbre	Métamorphique	Angulaire	0.3 - 1.4	1	Homogène
Granite	Plutonique	Angulaire	0.5 - 1.0	3	Homogène

Tableau 72 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22386c

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.9	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.3 - 1.0	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.3 - 1.0	3	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.3 - 0.6	1	Homogène
Biotite	Sub-angulaire	0.4	< 1	Hétérogène

Tableau 73 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22386c

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.4 - 1.4	20	Homogène

Tableau 74 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22386c

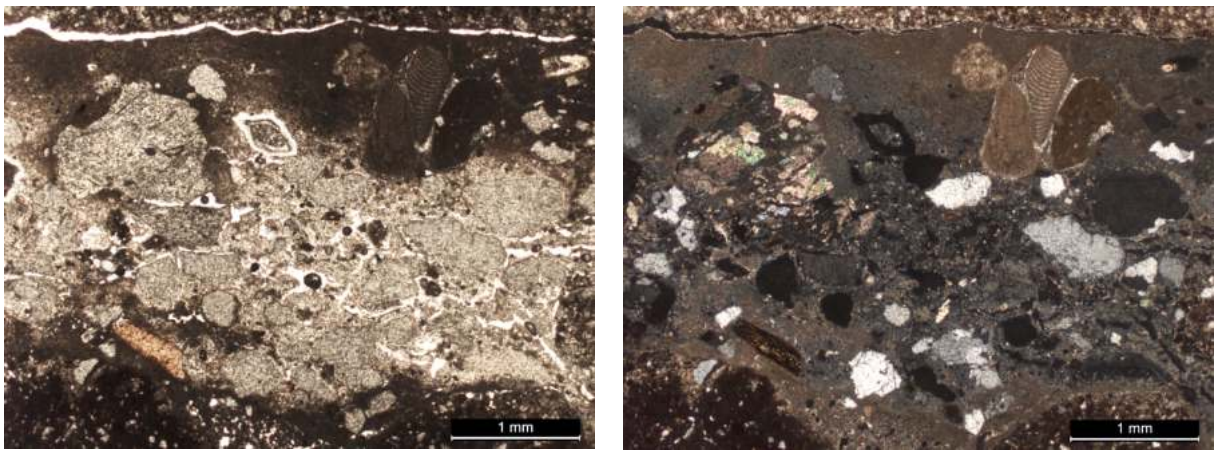

Figure 140 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant une charge non tamisée composée d'un sable silico-calcaire et la présence de bioclastes formant un fragment de calcarénite non calciné (grossissement × 2.5)

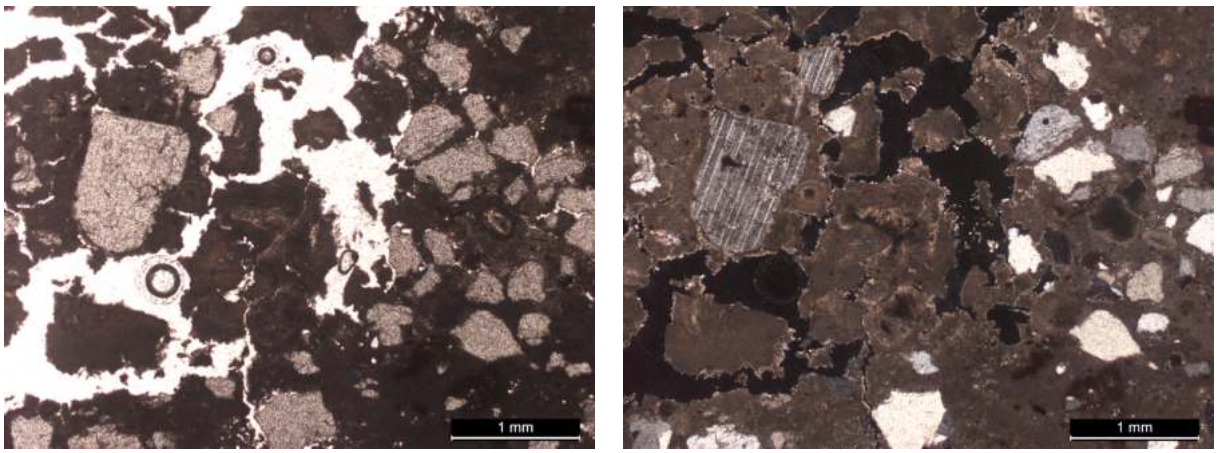

Figure 141 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant une charge composée de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 2.5)

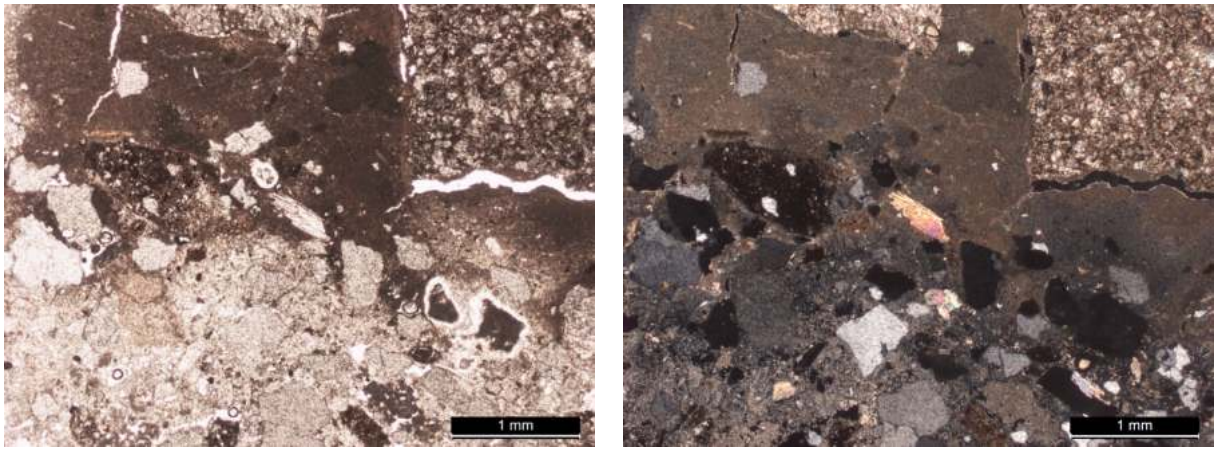

Figure 142 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant des cristaux de calcite et de micas mêlés à la charge (grossissement × 2.5)

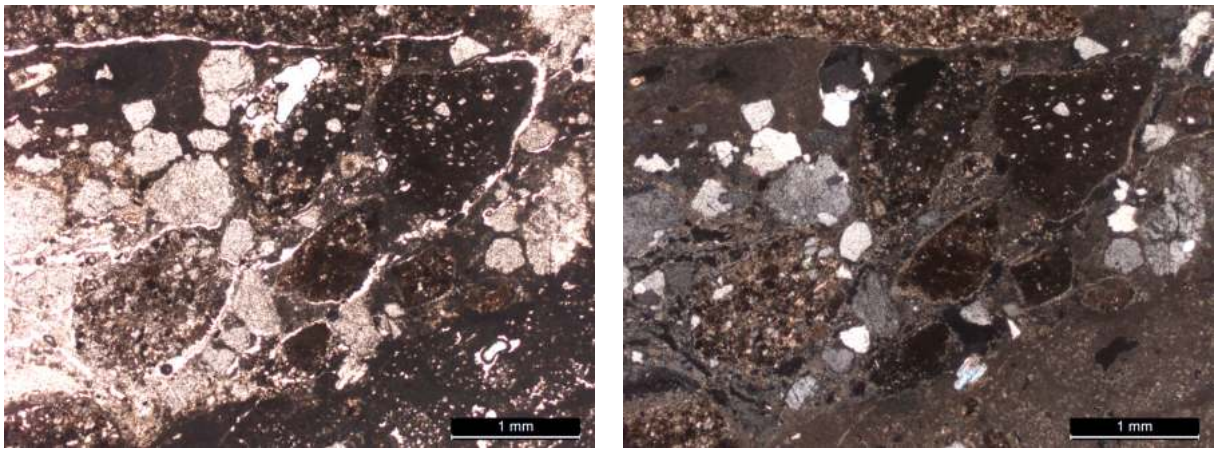

Figure 143 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant des fragments de céramique de compositions différentes (grossissement × 2.5)

BDX22386d : Couche de préparation - *rudus* (15 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 0.4	3	Sphérique	0.1 - 0.4	5
Partiellement calcinés	0.2 - 0.3	1	Oblongue	0.3 - 1.6	5

Tableau 75 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22386d

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.2 - 1.1	5	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Émoussée	7.0 - 13	1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Émoussée	0.7 - 0.8	1	Homogène

Tableau 76 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22386d

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.4	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.5	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.6 - 0.7	3	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.2 - 1.2	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.3	< 1	Homogène

Tableau 77 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22386d

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.5 - 4.2	1	Homogène

Tableau 78 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22386d

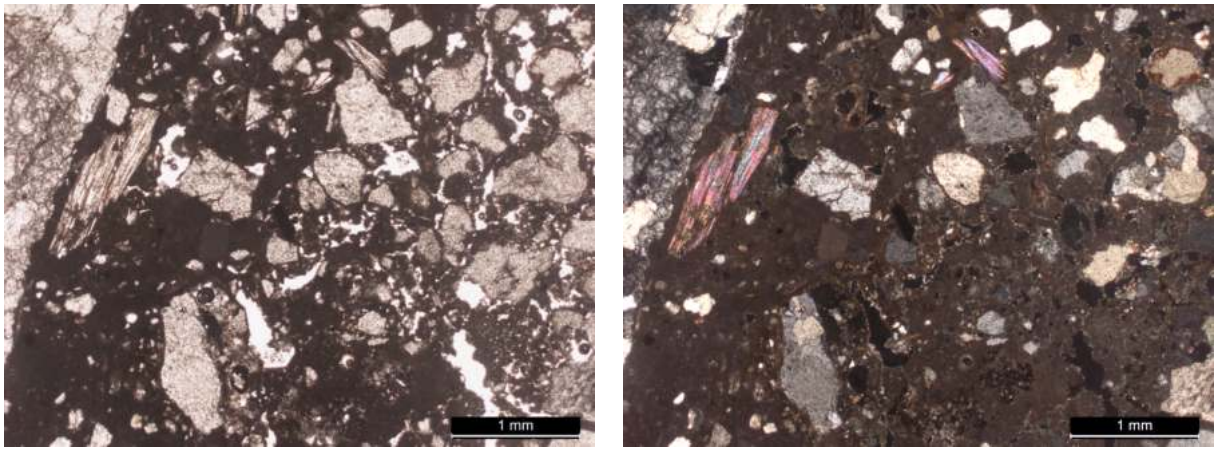

Figure 144 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386d montrant une charge composée d'un sable silico-calcaire (grossissement × 2.5)

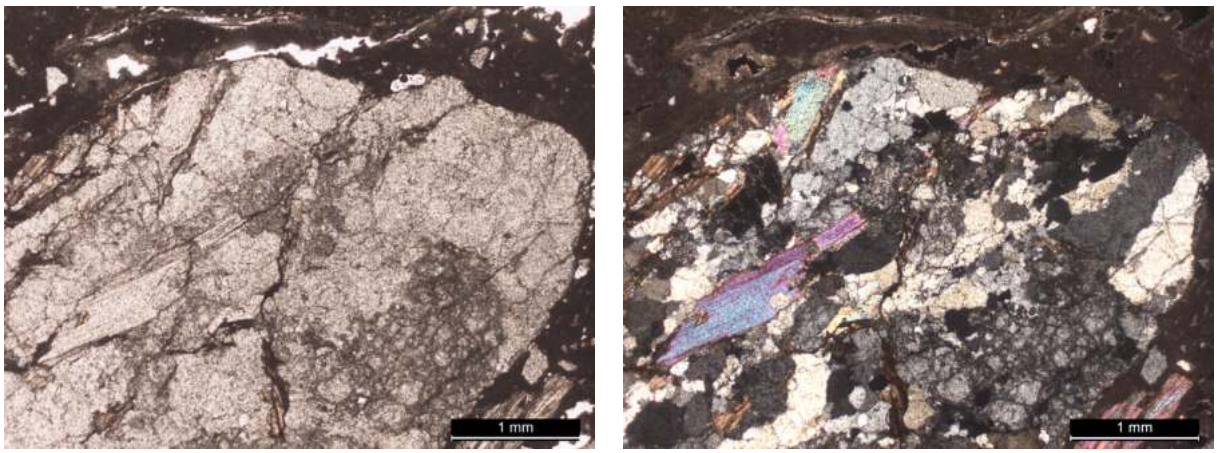

Figure 145 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386d montrant un fragment de granite inclus dans la charge (grossissement × 2.5)

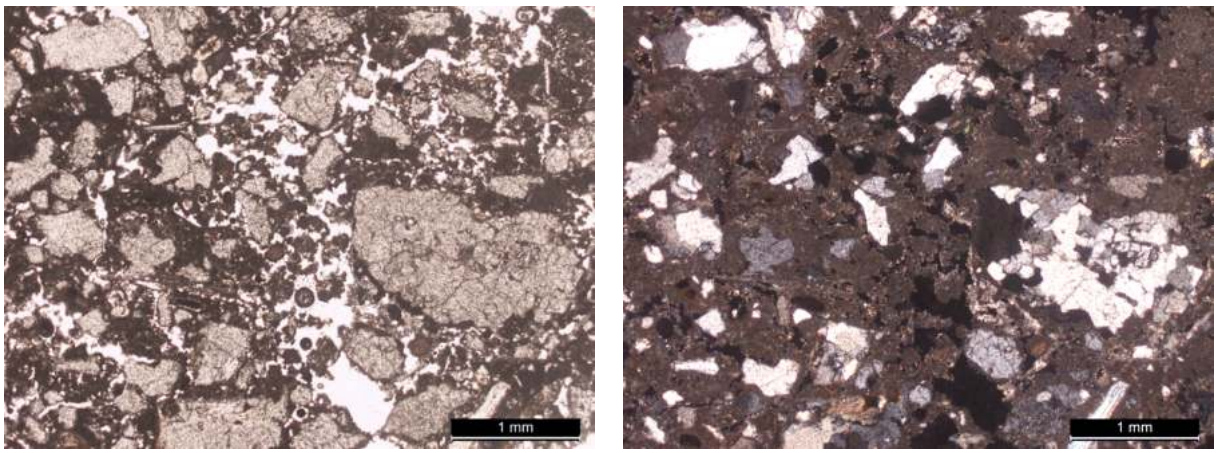

Figure 146 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386d montrant des fragments de granite qui composent la charge (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de composition homogène présentant des nodules de chaux à la fois non mélangés et partiellement calcinés (jusqu'à 3 %). Les cristaux et les fragments lithiques qui constituent la charge sont principalement de formes sub-angulaires et d'une granularité hétérogène. Ces éléments comprennent des cristaux de quartz (avec une luminescence mauve), des feldspaths alcalins (avec une luminescence bleu clair), des plagioclases (avec une luminescence verte) et des cristaux de calcite (présentant une luminescence orange). Les fragments de terres cuites employés comme pouzzolane artificielle présentent des matrices argileuses aux colorations variées ainsi que des composantes minéralogiques constituées essentiellement de très fins cristaux de quartz, de feldspaths et de calcite. S'agissant des tesselles calcaires, les éléments de couleur noire présentent le faciès pétrographique d'une roche calcaire à microfossiles (grainstone). Ceux-ci émettent une luminescence orange attribuable à la présence abondante de carbonate de calcium dans leurs matrices.

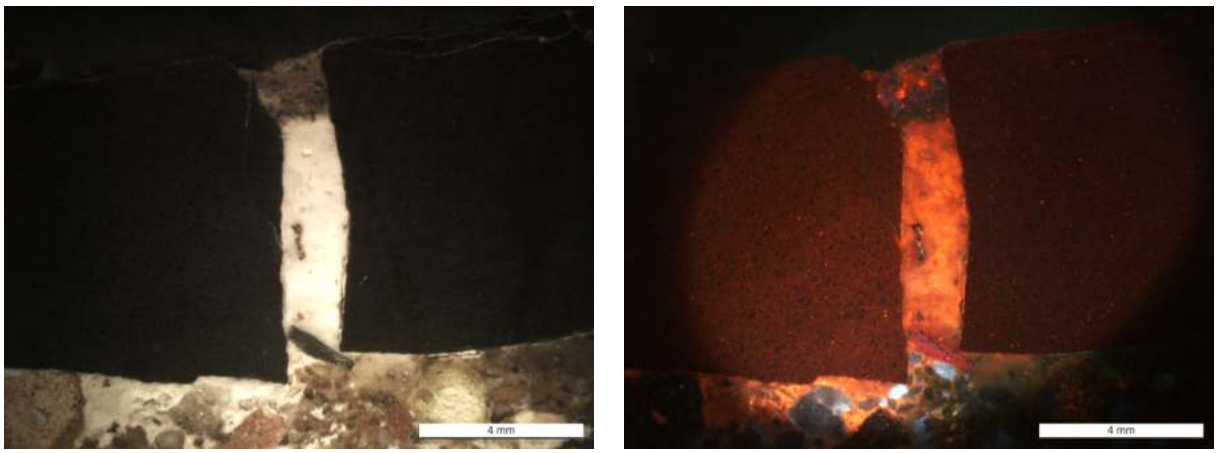

Figure 147 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22386 montrant la composition minéralogique des tesselles et du lit de pose (grossissement × 1)

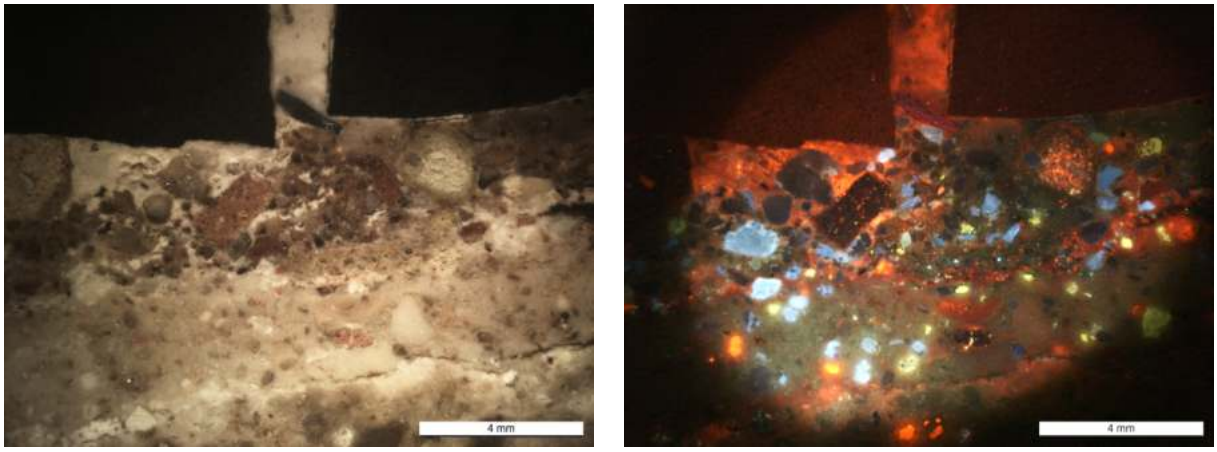

Figure 148 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22386c montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

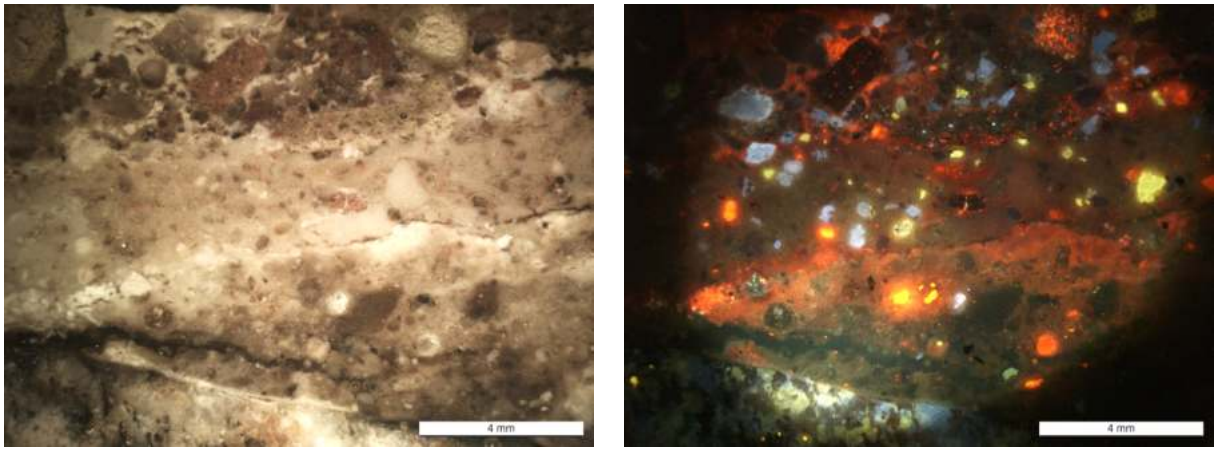

Figure 149 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22386d montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

FICHE 10 BDX22387

Figure 150 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22387 depuis le mur du gymnasium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : *Gymnasium* (ou *palaestrium*)
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.884571289507, 7.74997686874375

L'échantillon BDX22387 a été prélevé depuis l'enduit du mur situé à l'est du *gymnasium*, dans les grands thermes du nord. Les travaux de consolidation entrepris en 1954 par E. Marec n'ont pas eu d'impact sur cette section des thermes.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit d'étanchéité
Couleur : Rose foncé ; Beige clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Limono-sableuse

Le fragment d'enduit est composé de deux couches : une couche de finition d'une épaisseur de 8 mm, de couleur rose foncé et une couche de préparation épaisse d'environ 20 mm, présentant une couleur beige clair.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen microscopique révèle un liant de composition hétérogène présentant une faible proportion de nodules de chaux, à la fois non mélangés et partiellement calcinés (1 à 3 %), ainsi qu'une porosité élevée (5 à 10 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire, caractérisé par des grains de formes sub-angulaires. En outre, on constate la présence d'inclusions de tuileau, représentant une teneur comprise entre 3 et 10 % avec une granularité hétérogène (de 0,5 à 2,2 mm). Des fragments pyroclastiques, de nature trachytique, sont également présents dans la couche de préparation et la couche de finition avec une teneur comprise entre 1 et 3 %.

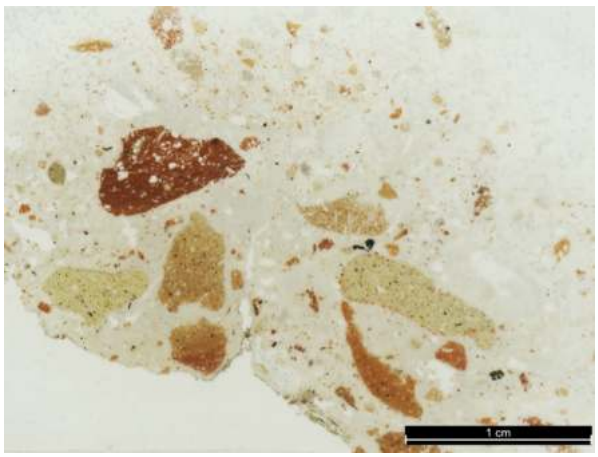

Figure 151 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22387 montrant deux matrices de couleurs rose foncé et beige clair et une charge non tamisée utilisée dans les deux couches de l'enduit

BDX22387a : Couche de finition (8 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.4 - 0.5	1	Sphérique	0.1 - 0.9	5
Non mélangés	0.4	< 1	Oblongue	0.4 - 0.6	1

Tableau 79 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22387a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-émoussée	0.7 - 0.8	1	Homogène

Tableau 80 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22387a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 1.5	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.1 - 0.8	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.5	3	Homogène
Pyroxène	Sub-angulaire	0.1 - 0.3	< 1	Homogène

Tableau 81 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22387a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.5 - 2.2	3	Homogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.9 - 1.1	1	Homogène

Tableau 82 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22387a

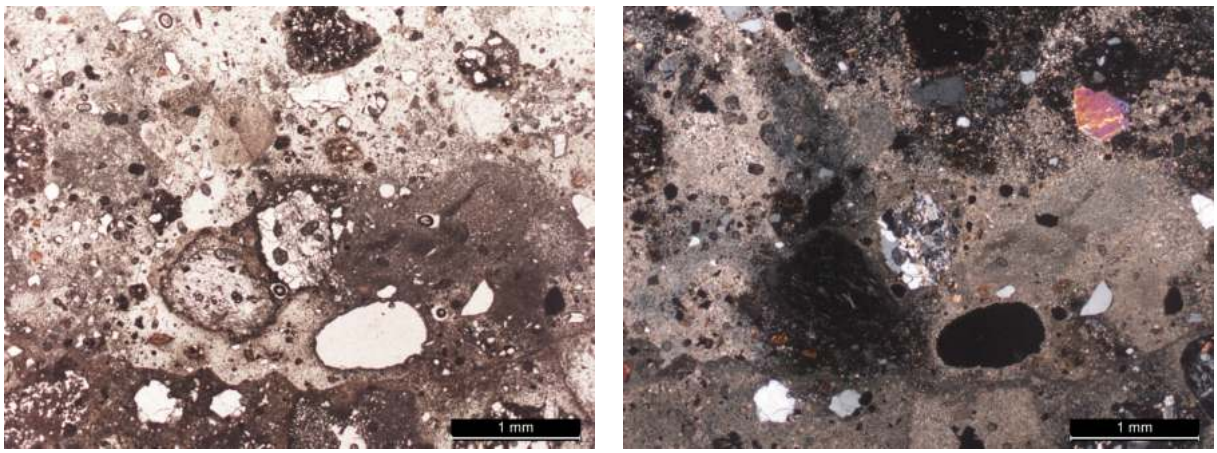

Figure 152 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387a montrant la présence de fragments de granite et de pyroclastes trachytiques (grossissement × 2.5)

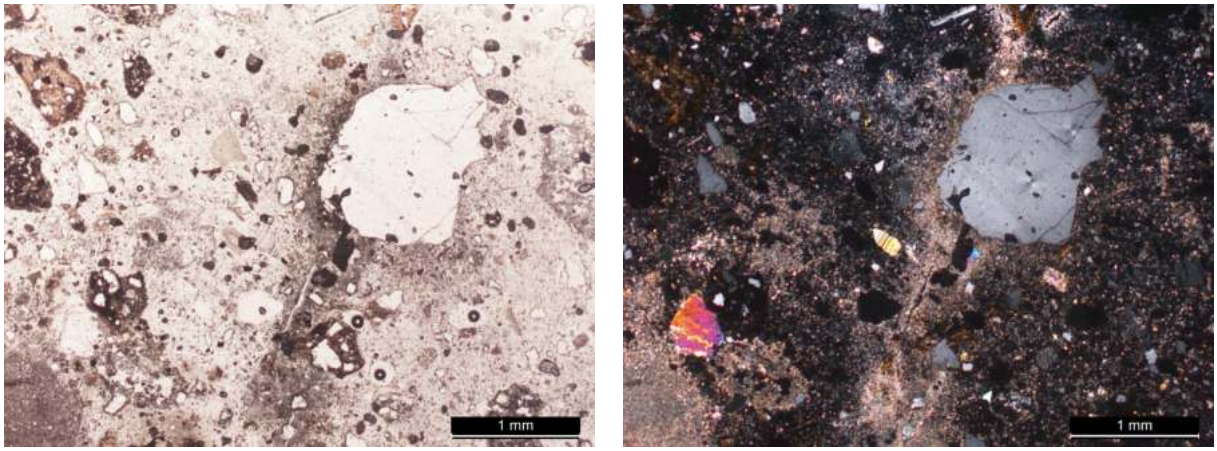

Figure 153 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387a montrant une matrice entièrement carbonatée et une charge composée de quartz, feldspaths alcalins, calcite et de rares cristaux de pyroxènes (grossissement × 2.5)

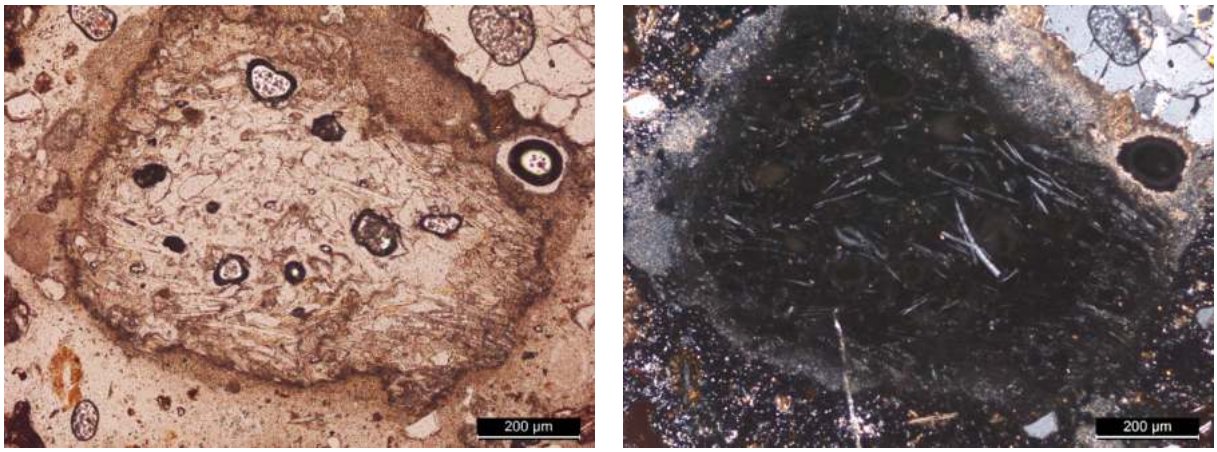

Figure 154 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387a montrant un pyroclaste trachytique à matrice vitreuse et texture microlithique (grossissement × 10)

BDX22387b : Couche de préparation (20 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	1.3 - 2.8	3	Sphérique	0.1 - 0.6	10
Partiellement calcinés	0.3 - 1.0	1	Oblongue	0.3 - 2.0	3

Tableau 83 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22387b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.6 - 0.7	5	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	3.0	< 1	Homogène

Tableau 84 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22387b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.6 - 0.9	3	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.3	< 1	Homogène
Sanidine	Sub-angulaire	1.0	< 1	Homogène
Pyroxène	Sub-angulaire	0.2	< 1	Hétérogène

Tableau 85 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22387b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.9 - 10	10	Homogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.8 - 1.1	3	Homogène

Tableau 86 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22387b

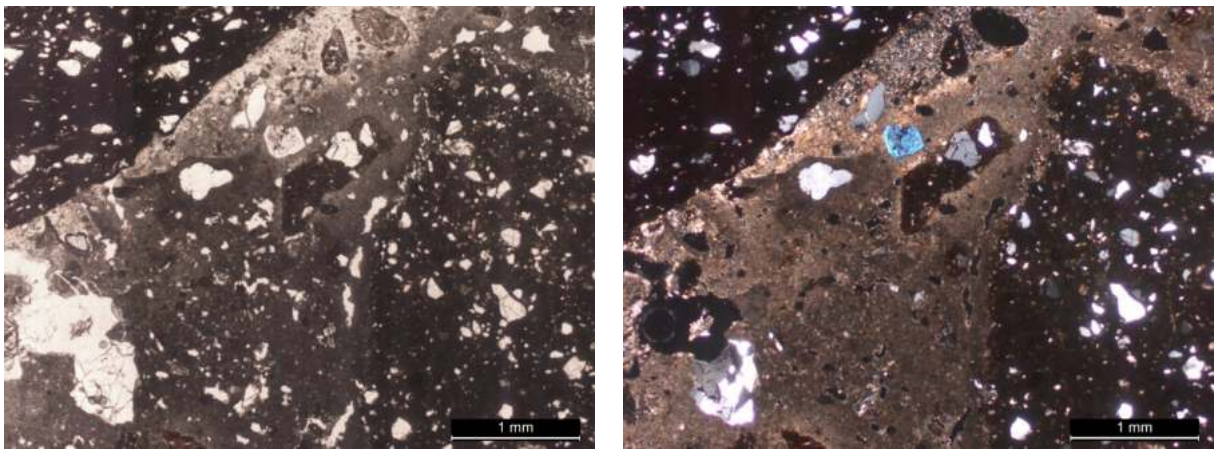

Figure 155 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant la présence de tuileau et de fragments granitiques et pyroclastiques (grossissement × 2.5)

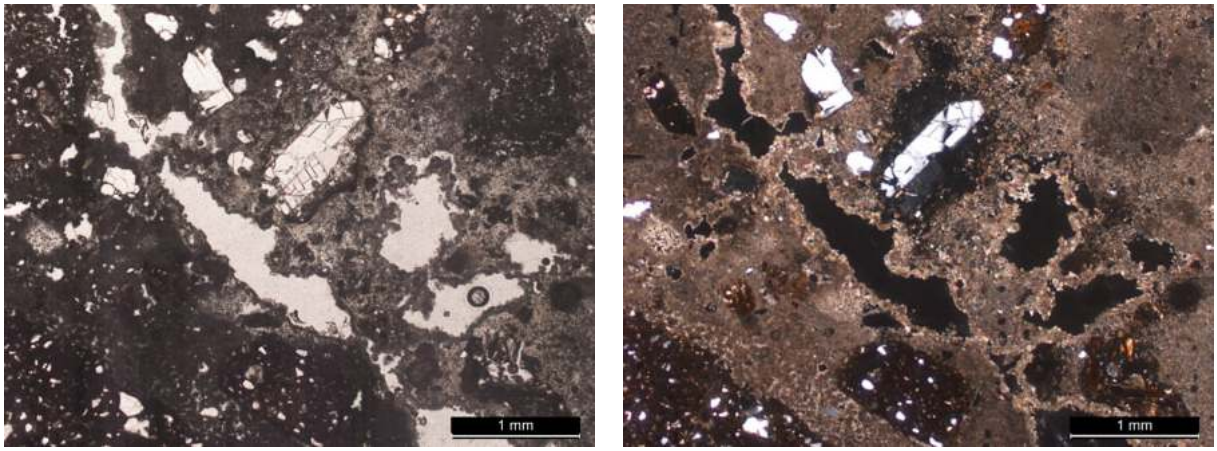

Figure 156 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant des pyroclastes avec des phénocristaux de sanidine (grossissement × 2.5)

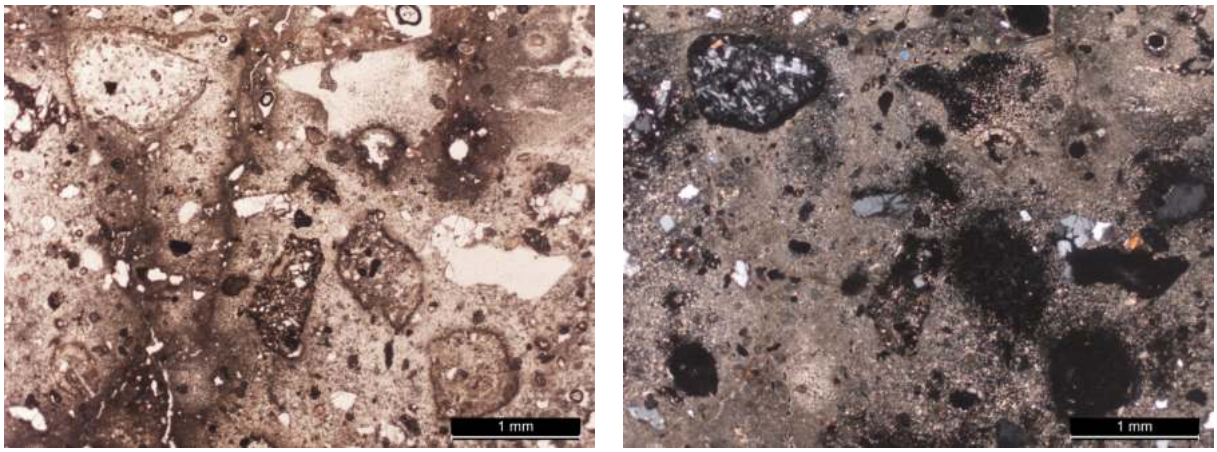

Figure 157 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant des pyroclastes avec des textures aphanitiques à vitrophyriques (grossissement × 2.5)

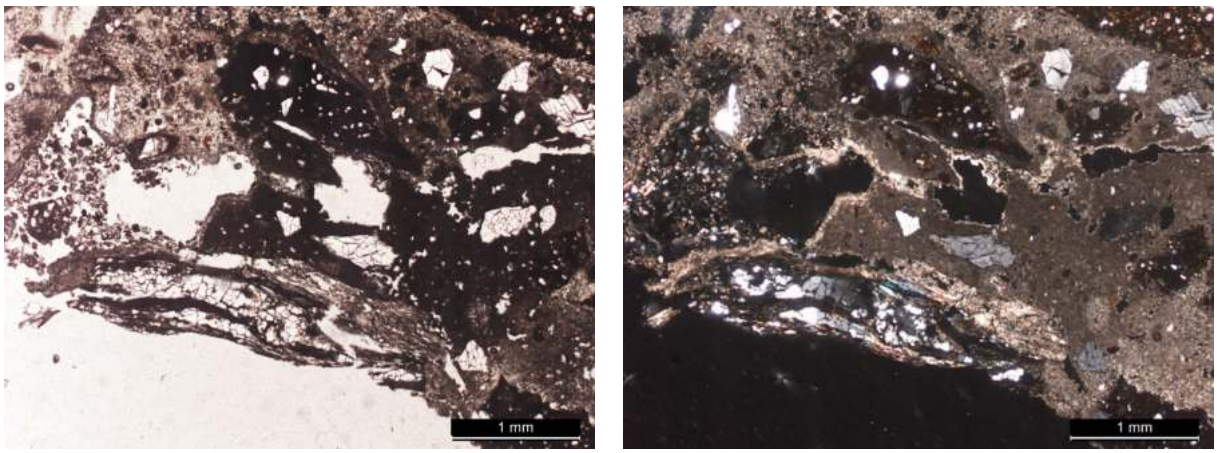

Figure 158 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant la présence de fragments de micaschiste dans la charge (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les analyses réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant à base de chaux de composition hétérogène (luminescence de couleur orange) et mettent en évidence la présence de nodules de chaux, à la fois non mélangés et partiellement calcinés. Les minéraux et les fragments lithiques qui constituent la charge silico-calcaire sont essentiellement des cristaux de quartz (luminescence de couleur mauve), des feldspaths alcalins (luminescence de couleur bleu clair), des plagioclases (luminescence de couleur verte) ainsi que des cristaux de calcite (luminescence de couleur orange). Les fragments pyroclastiques présentent des matrices vitreuses comprenant des inclusions de microlithes feldspathiques (luminescence de couleur bleu clair). D'autre part, l'examen au microscope électronique à balayage (MEB) révèle les micromorphologies des fragments pyroclastiques. Ceux-ci présentent une microporosité importante, caractérisée par des pores de formes allongées et sphériques. De plus, une interface de réaction apparaît en gris sombre entre les fragments pyroclastiques et le liant à base de chaux. Les analyses élémentaires réalisées sur les fragments pyroclastiques à la microsonde EDS indiquent des teneurs en SiO_2 comprises entre 61,68 et 62,32 % pds et des teneurs en $Na_2O + K_2O$ variant de 8,81 à 11,42 % pds. Ces données permettent de déterminer la nature trachytique des fragments pyroclastiques à l'aide du diagramme TAS.

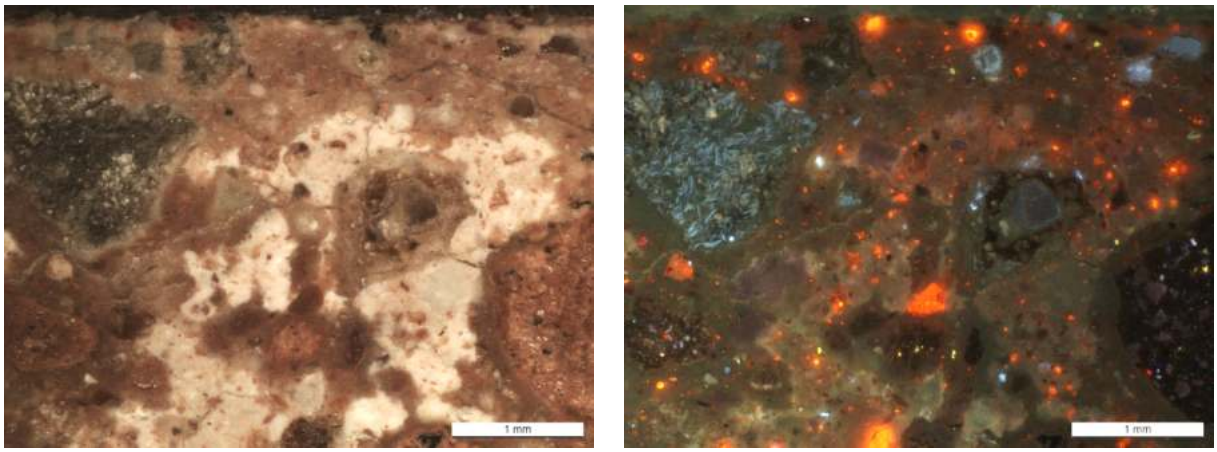

Figure 159 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22387a montrant les compositions lithique et minéralogique du mélange (grossissement × 3.2)

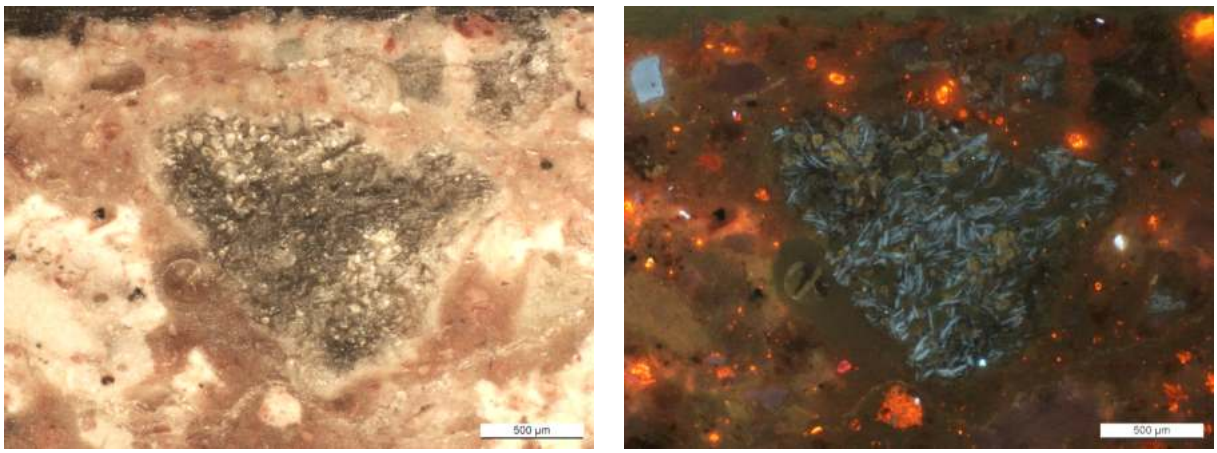

Figure 160 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22387a montrant un pyroclaste trachytique à microlithes (grossissement × 5)

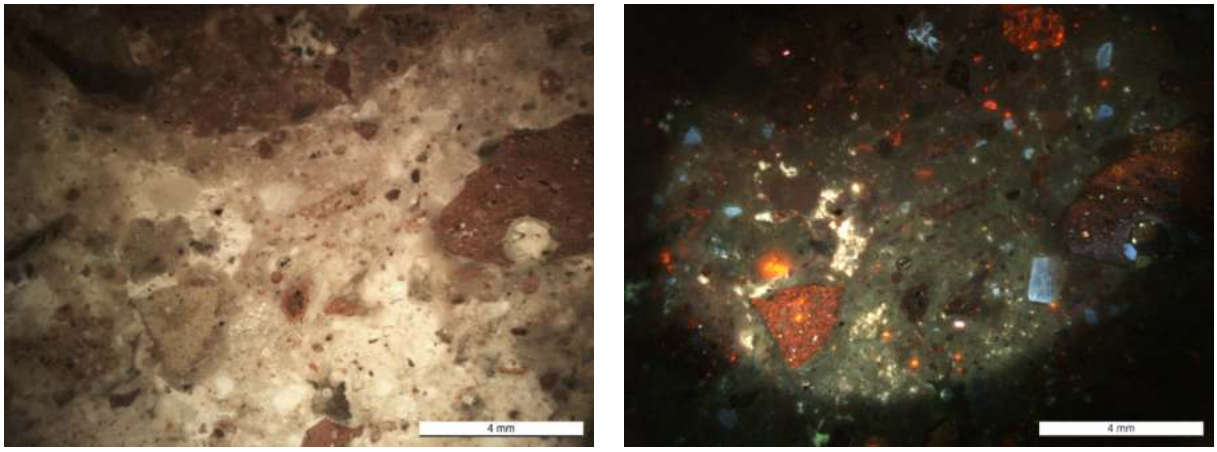

Figure 161 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22387b montrant des phénocristaux de sanidine dispersés dans la charge (grossissement × 1)

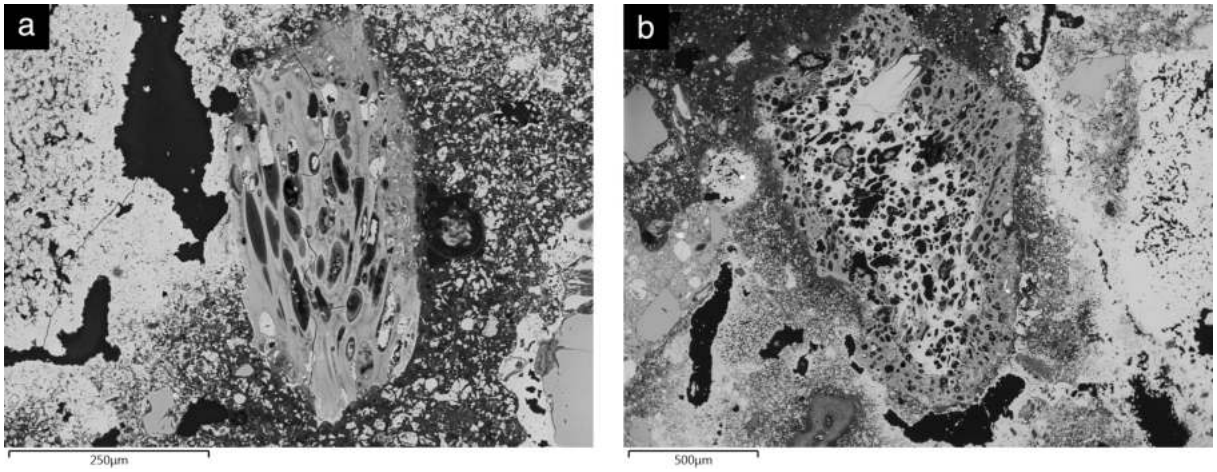

Figure 162 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22387 montrant des fragments de pyroclastes trachytiques avec des pores : (a) ouvertes et allongées ; (b) sphériques

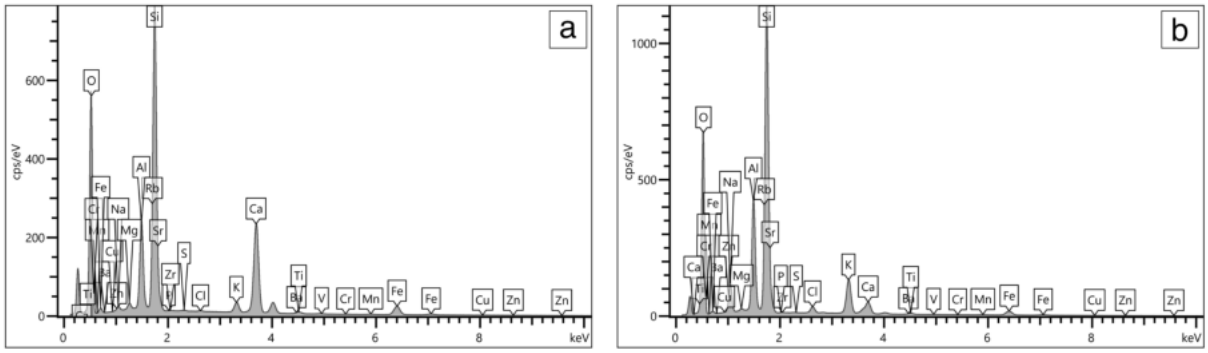

Figure 163 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22387 montrant la composition élémentaire de : (a) fragment pyroclastique trachytique à pores ouvertes et allongées avec des dépôts secondaires de calcite ; (b) fragment pyroclastique trachytique à pores sphériques

FICHE 11 BDX22388

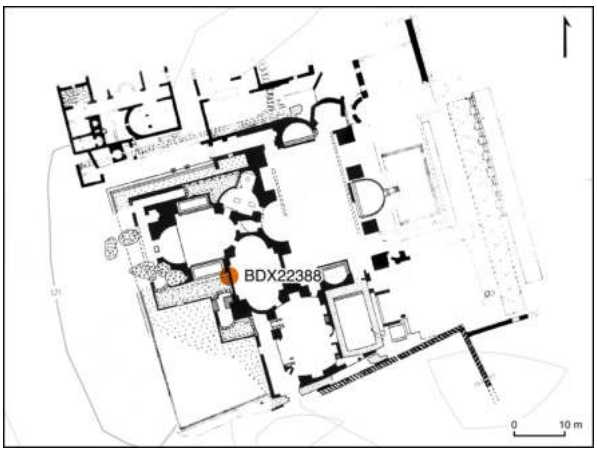

Figure 164 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22388 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur de *praefurnium*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : *Praefurnium*
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8846715041816, 7.74999959900407

L'échantillon BDX22388 a été prélevé à partir du mur en *opus testaceum* du *praefurnium*, qui se situe à l'entrée sud du couloir de service des grands thermes du nord. Il a été sélectionné entre deux niveaux de briques, afin d'éviter les endroits pouvant avoir été affectés par les travaux de consolidation réalisés en 1954, sous la direction d'Erwan Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sableuse

Le fragment de mortier est composé d'une seule couche et présente une épaisseur d'environ 15 mm. Le liant est de couleur beige foncé et possède une texture sableuse, avec une distribution homogène des constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope révèlent un liant de composition homogène, comportant des nodules de chaux partiellement calcinés (3 %) et une porosité qui présente des formes sphériques (5 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à granularité homogène, dont les grains sont de formes très émoussées. Ce sable se compose principalement de quartz, de feldspaths alcalins et de plagioclases, ainsi que de cristaux de calcite et de fragments de bioclastes. On note également la présence de fragments lithiques détritiques dans la charge, dont des fragments d'arénite quartzeuse, de siltite, de silex (calcédoine), ainsi que des fragments de granite.

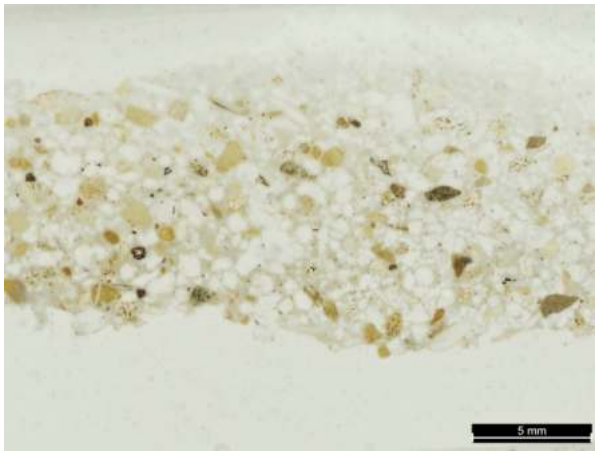

Figure 165 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22388 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.5 - 1.0	3	Sphérique	0.2 - 1.4	5
			Oblongue	1.3 - 1.7	3

Tableau 87 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22388

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Arénite	Sédimentaire	Très émoussée	0.6 - 1.5	10	Homogène
Siltite	Sédimentaire	Très émoussée	0.5 - 1.2	5	Homogène
Silex	Sédimentaire	Sub-émoussée	0.9 - 1.5	3	Homogène
Granite	Plutonique	Émoussée	0.6 - 1.4	3	Homogène
Marbre	Métamorphique	Sub-émoussée	0.6 - 0.7	< 1	Hétérogène

Tableau 88 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22388

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Très émoussée	0.7 - 0.9	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Très émoussée	0.5 - 1.2	20	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.5 - 2.0	10	Homogène
Calcite	Très émoussée	0.4 - 0.7	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-émoussée	0.4	3	Hétérogène

Tableau 89 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22388

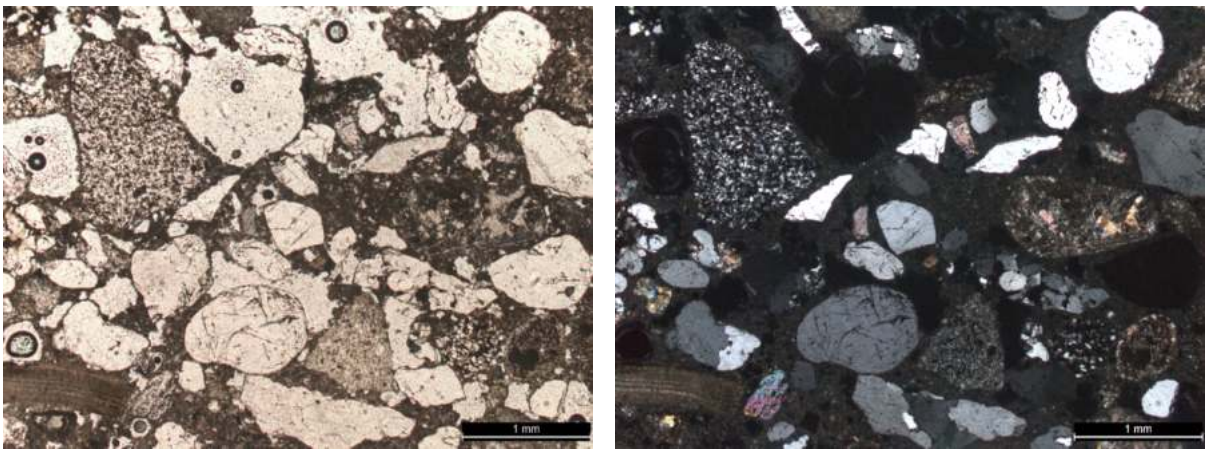

Figure 166 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant des éléments de la charge de formes sub-angulaires à très émoussées (grossissement × 2.5)

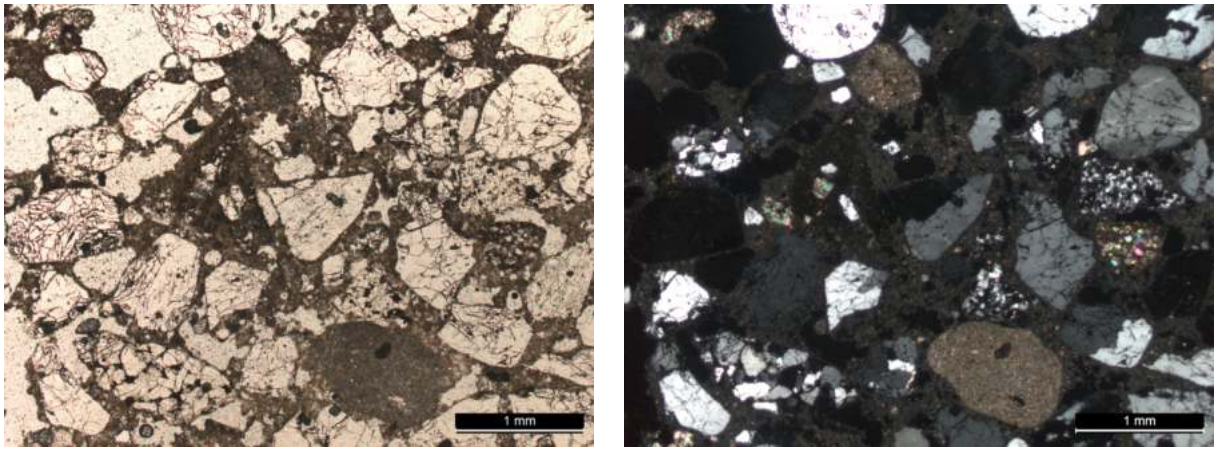

Figure 167 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant des grains de quartz, de feldspaths alcalins et des arénites quartzeuses (grossissement × 2.5)

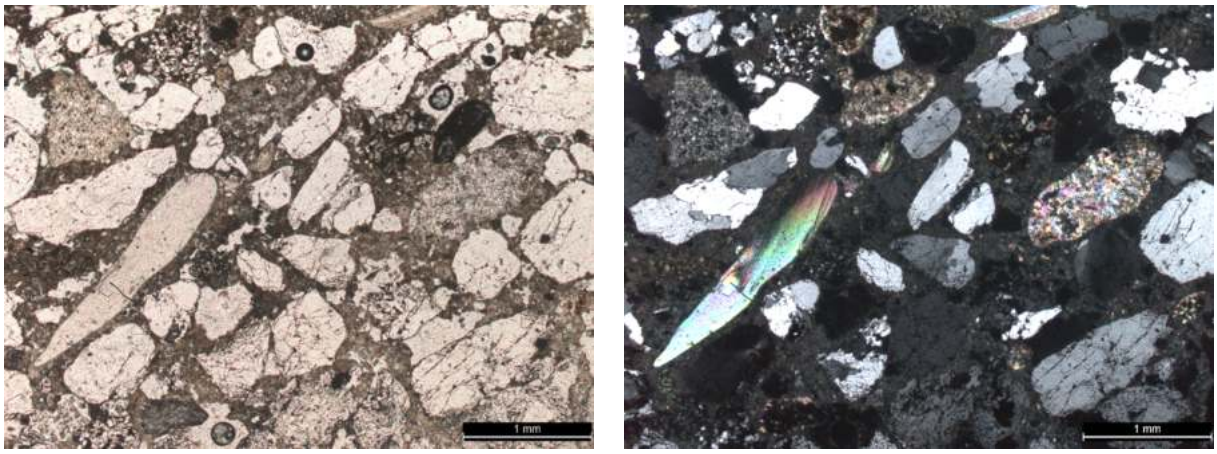

Figure 168 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant la présence de bioclastes à matrices micritiques et sparitiques (grossissement × 2.5)

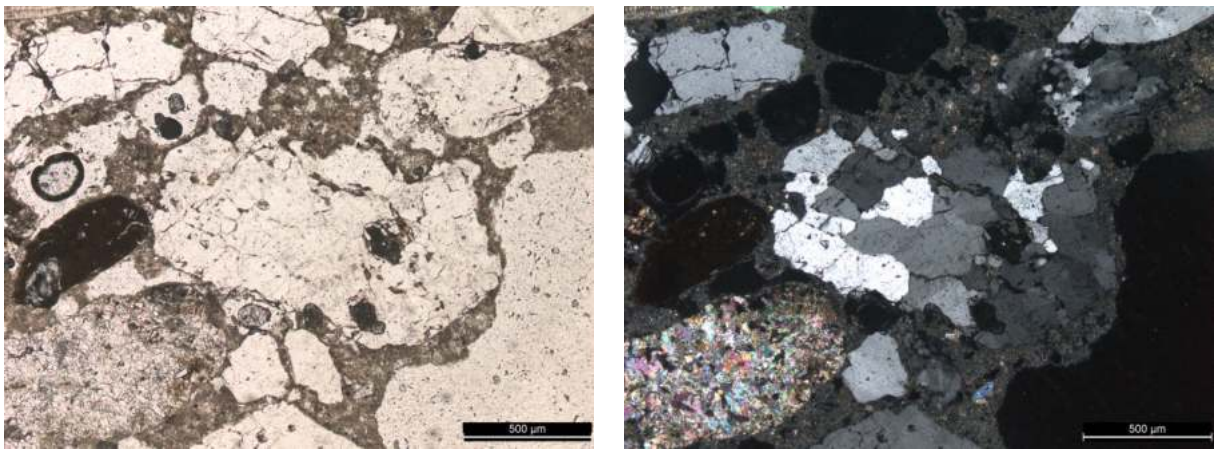

Figure 169 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant un fragment de granite et un bioclaste à matrice sparitique (grossissement × 5)

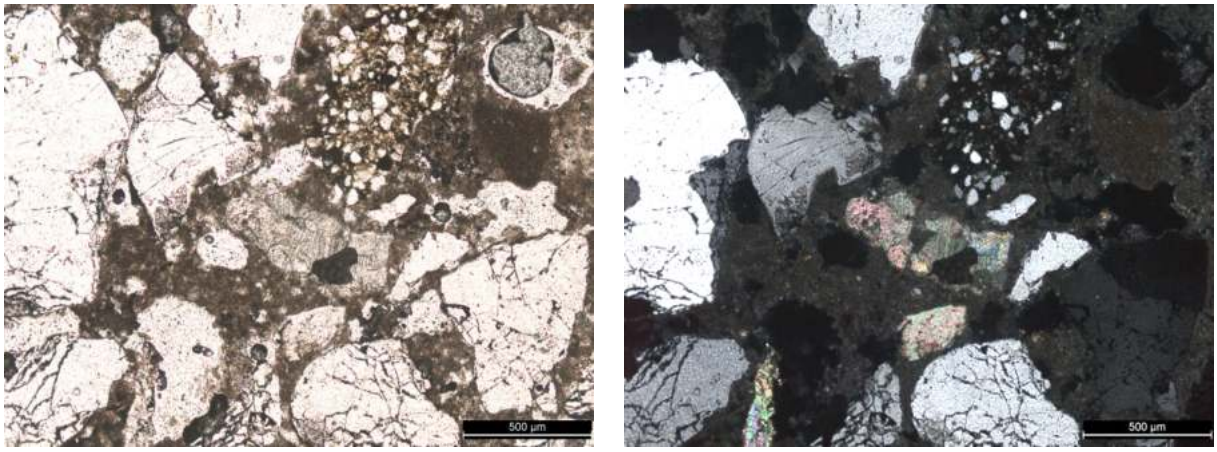

Figure 170 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant un fragment de marbre et des cristaux de calcite mêlés à la charge (grossissement × 5)

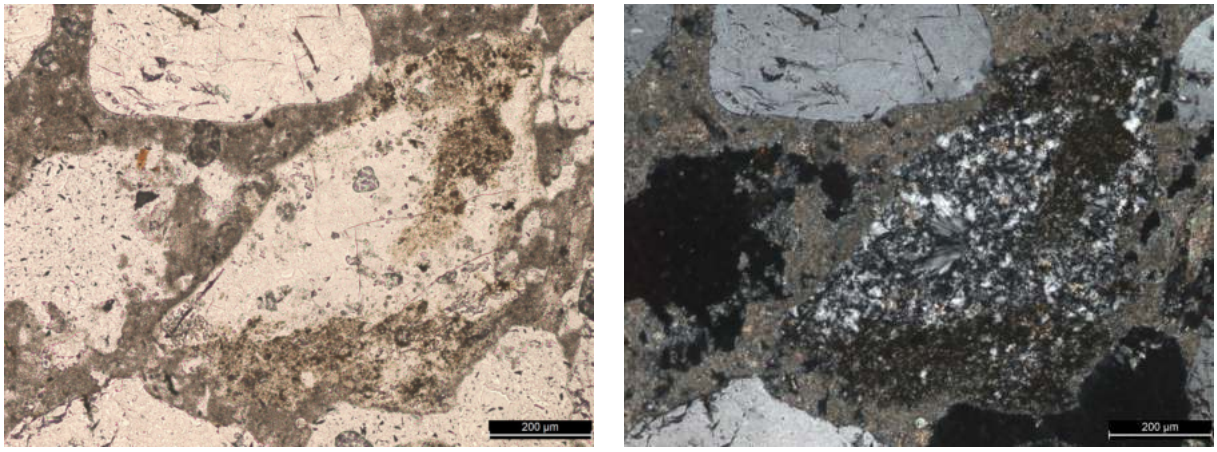

Figure 171 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant un fragment de silex constitué de calcédoine mêlé à la charge (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène constitué de chaux carbonatée (luminescence orange), comportant des nodules de chaux partiellement calcinés. Les cristaux et les fragments lithiques qui composent la charge sont de formes de très émoussées et incluent des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), des plagioclases (luminescence verte), ainsi que des cristaux de calcite et des fragments de bioclastes (luminescence orange). Les observations complémentaires au microscope électronique à balayage (MEB) mettent en évidence la texture micritique du liant à base de chaux ainsi qu'un fragment bioclastique qui fait partie de la charge. Les analyses élémentaires du liant, réalisées grâce à la microsonde EDS, indiquent des teneurs en CaO variant entre 55,54 % et 63,33 % pds et des teneurs en MgO qui se situent entre 2,80 % et 4,52 % pds.

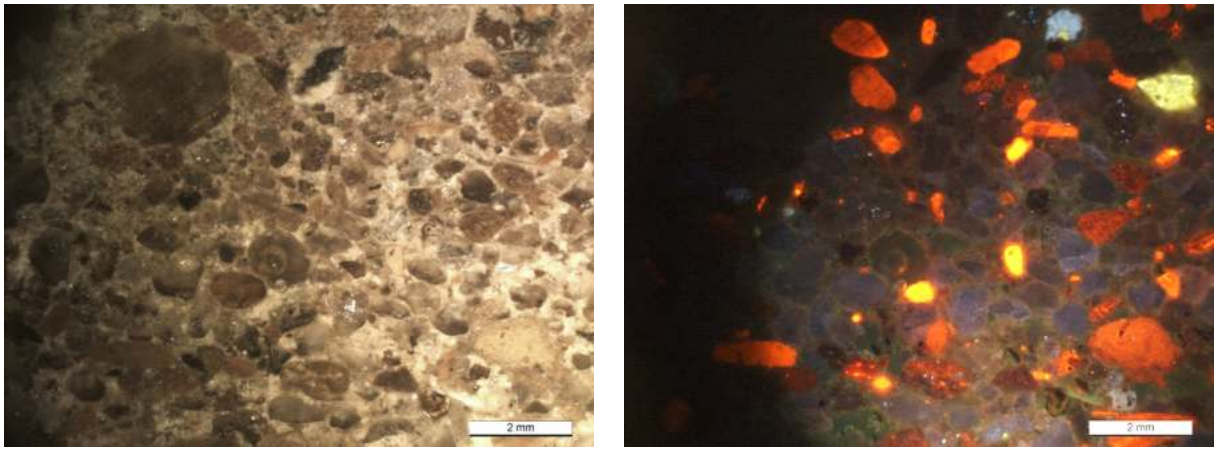

Figure 172 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22388 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

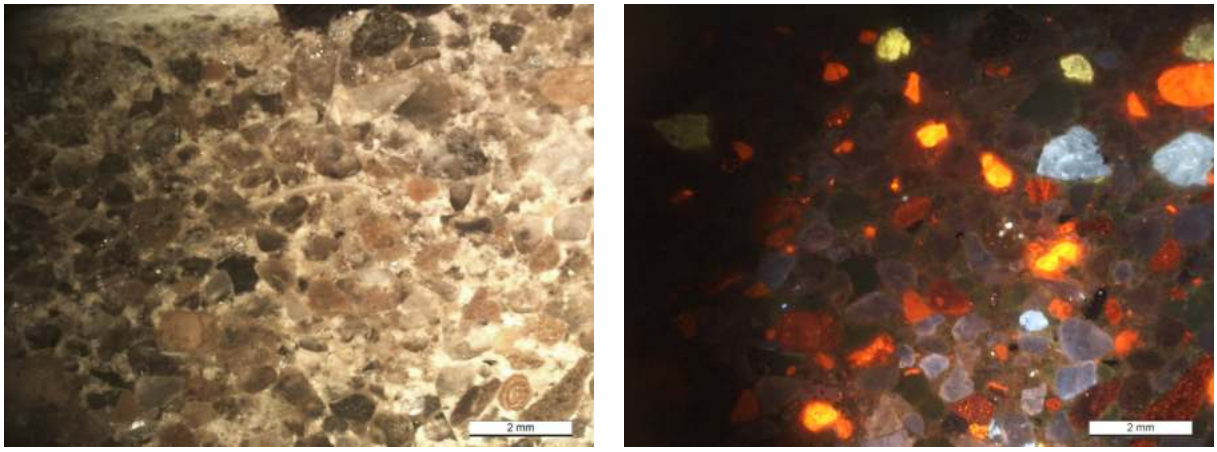

Figure 173 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22388 montrant la présence de bioclastes dans la charge (grossissement × 1.25)

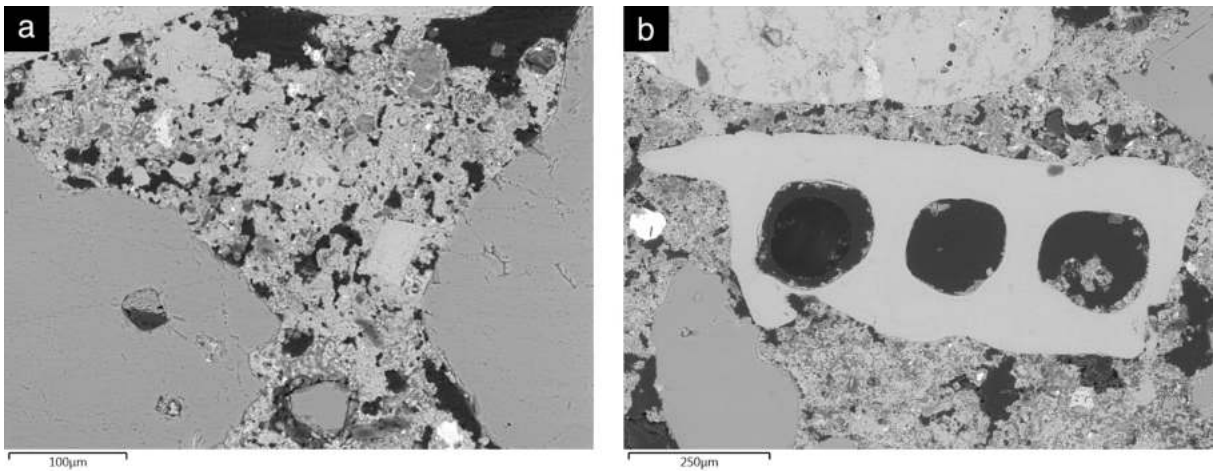

Figure 174 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22388 montrant (a) la matrice du liant à base de chaux carbonatée ; (b) un élément bioclastique inclus dans la charge

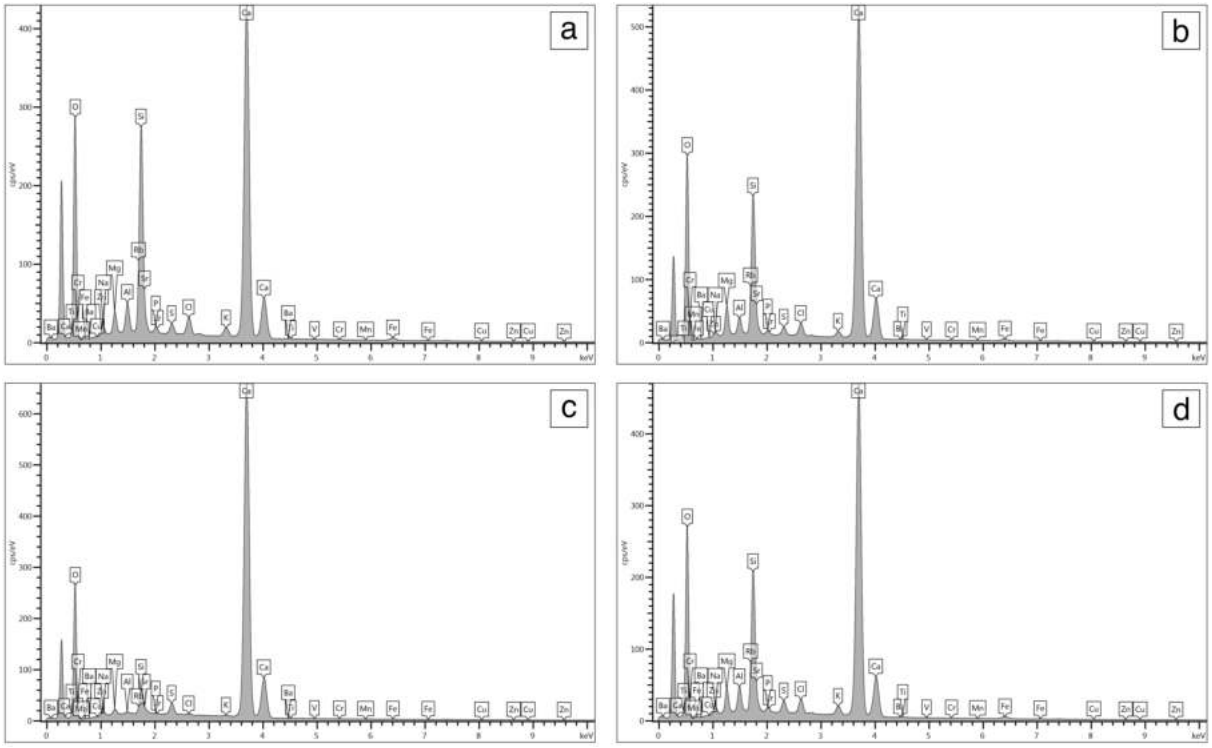

Figure 175 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX2238 montrant la composition élémentaire de : (a-b) matrice carbonatée du liant à base de chaux ; (c) matrice d'un fragment bioclastique ; (d) matrice carbonatée du liant en périphérie d'un bioclaste

FICHE 12 BDX22389

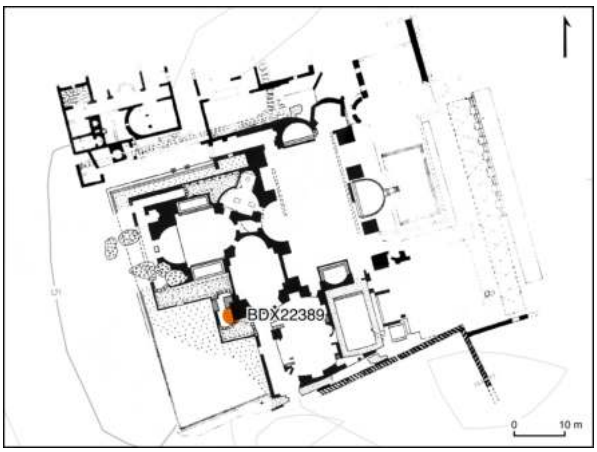

Figure 176 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22398 depuis le mur en opus incertum et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur (*opus incertum*)
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Hypocauste (couloir de service)
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8846017613024, 7.75000732137985

L'échantillon BDX22389 a été prélevé à partir du mur construit en *opus incertum*, qui se situe à l'est du couloir de service des grands thermes du nord. Il a été sélectionné à mi-hauteur entre deux assises de moellons, tout en évitant les endroits susceptibles d'avoir fait l'objet de consolidations pendant la campagne de travaux de 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 45 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur beige foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux non mélangés (10 %), ainsi qu'une porosité avec des formes sphériques (5 %) et oblongues (5 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire dont la granularité est hétérogène, avec des grains anguleux. S'agissant des inclusions, on observe la présence de fragments de tuileau (10 %) qui présentent une granularité variée (entre 0,2 et 2,5 mm), ainsi que des fragments pyroclastiques (5 %) de types trachytique et phonolitique lesquels présentent des textures allant de microlithiques à porphyriques, avec comprennent des inclusions de phénocristaux de sanidine, dont certains sont également dispersés dans la charge.

Figure 177 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22389 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 3.0	10	Sphérique	0.1 - 1.8	5
Partiellement calcinés	0.3 - 1.3	3	Oblongue	0.4 - 2.9	5

Tableau 90 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22389

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-émoussée	0.3 - 0.7	3	Homogène

Tableau 91 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22389

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.6	5	Homogène
Quartz	Angulaire	0.1 - 0.5	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 1.3	3	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.1 - 0.3	3	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.4	< 1	Hétérogène
Sanidine	Sub-émoussée	0.8	< 1	Hétérogène

Tableau 92 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22389

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 2.5	10	Homogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.5 - 1.4	5	Homogène

Tableau 93 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22389

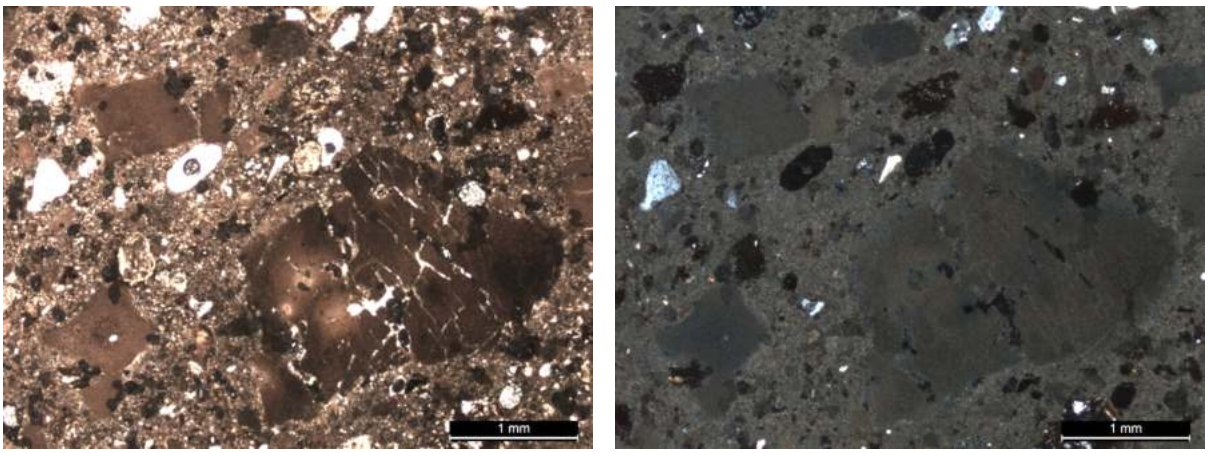

Figure 178 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant des nodules de chaux non mélangés présentant des microfissures (grossissement × 2.5)

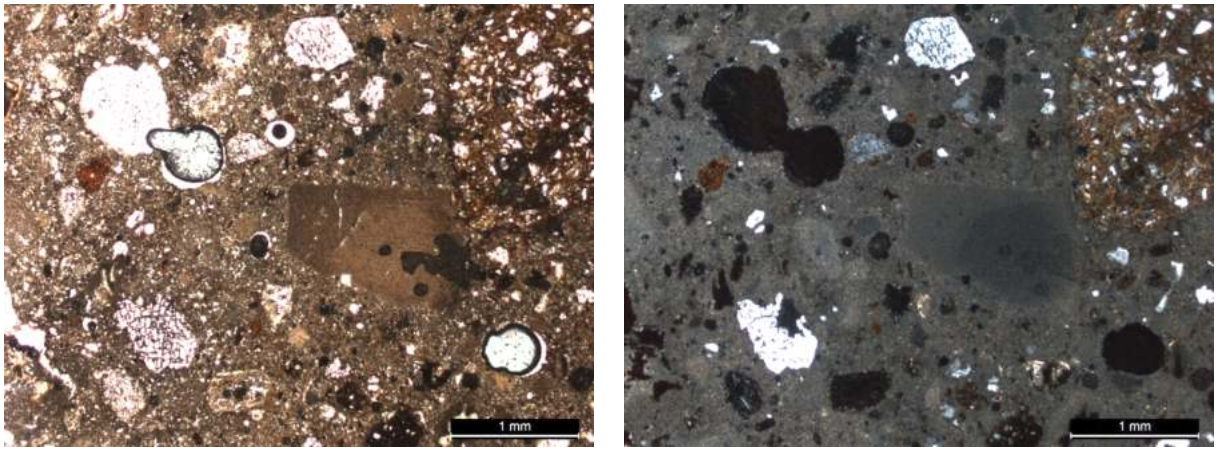

Figure 179 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant des grains de quartz et feldspaths alcalins qui composent la charge ainsi que des fragments de tuileau et de roches pyroclastiques (grossissement × 2.5)

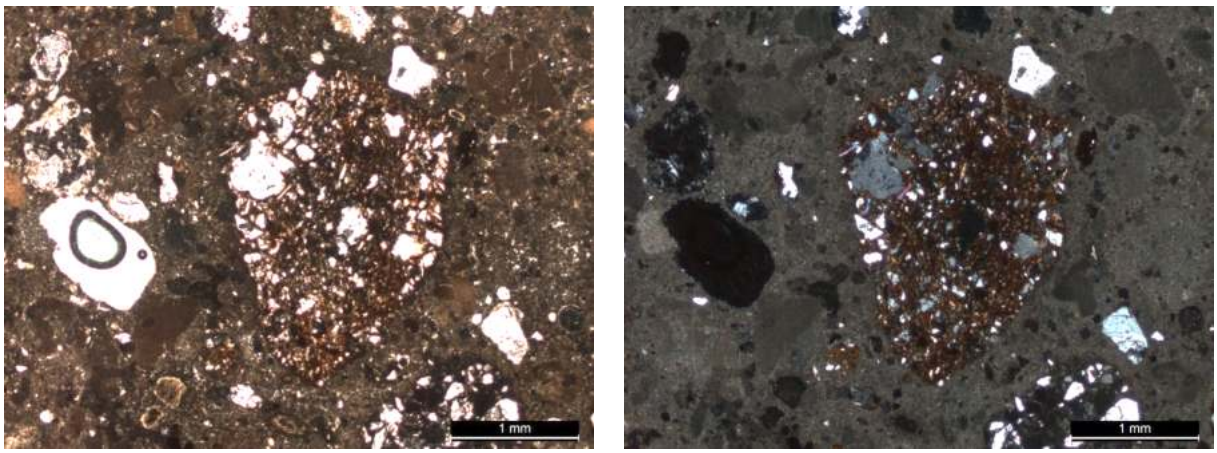

Figure 180 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant la présence de fragments de tuileau et de pyroclastes trachytiques (grossissement × 2.5)

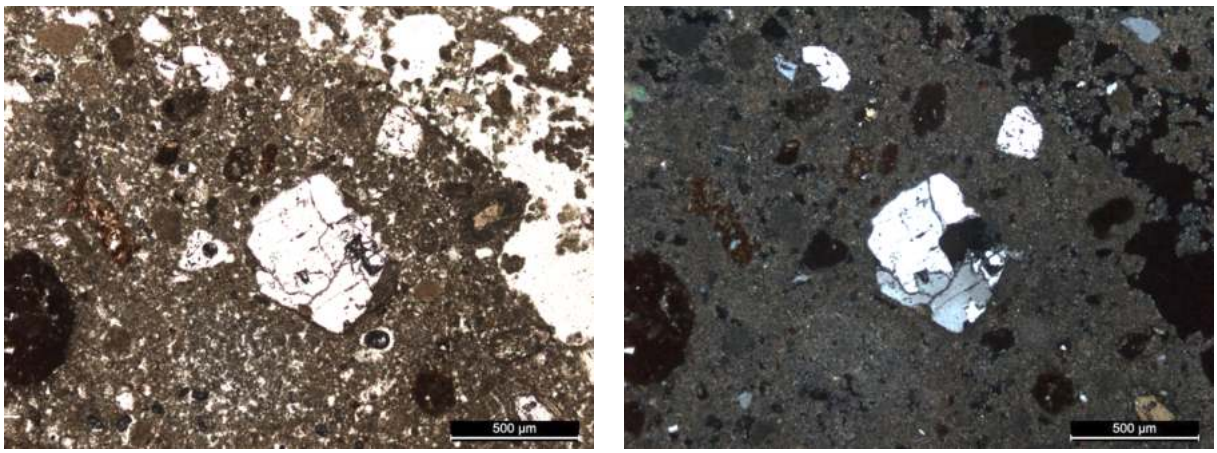

Figure 181 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant un micro-fragment de granite mêlé à la charge (grossissement × 5)

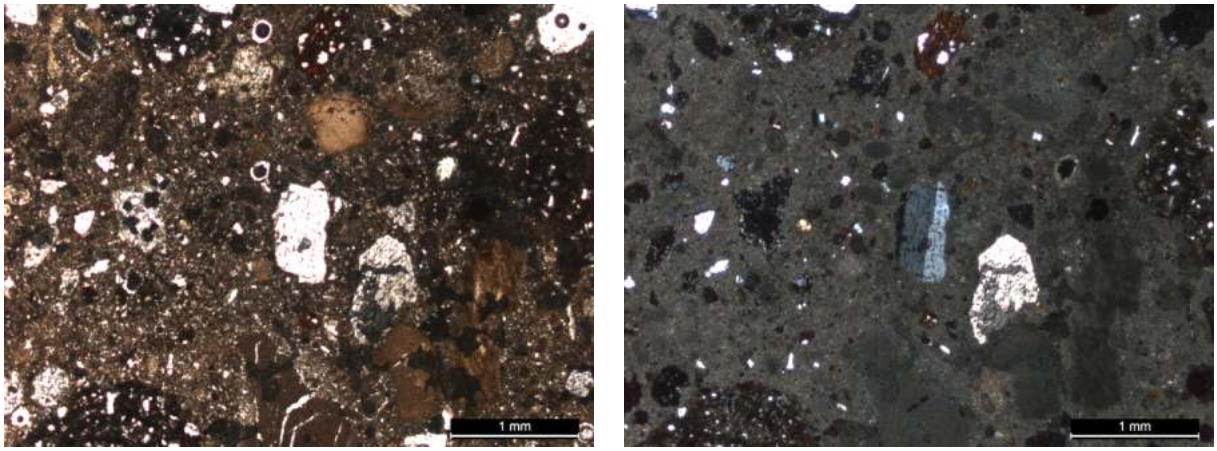

Figure 182 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant un phénocristal de sanidine et des fragments de roches pyroclastiques (grossissement × 2.5)

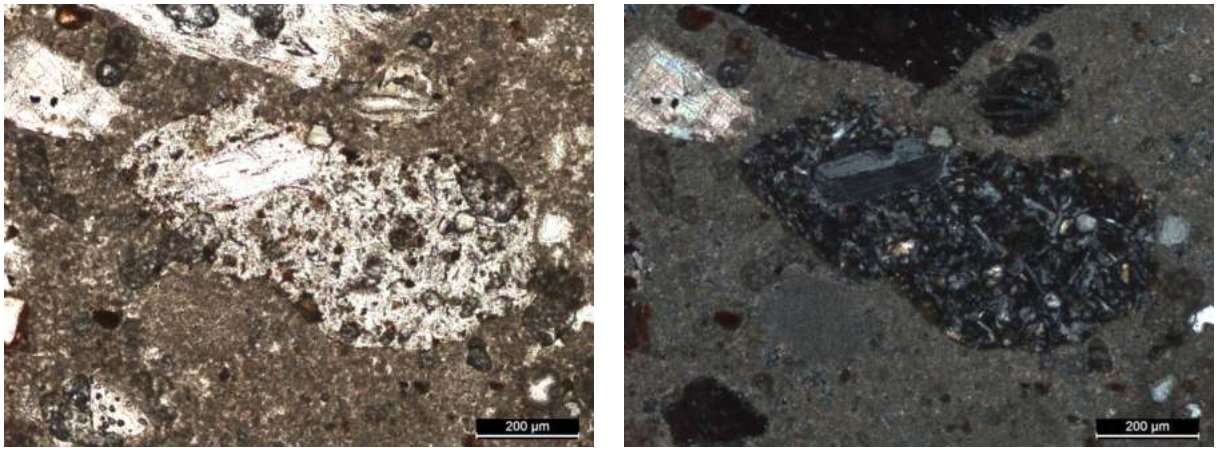

Figure 183 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant un pyroclaste (trachyte) à texture porphyrique composé de phénocristaux de sanidine et des microlithes de feldspaths alcalins inclus dans une matrice vitreuse (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène constitué de chaux carbonatée (émettant une luminescence orange), comportant des nodules de chaux non mélangés. On observe également la présence de cristaux et de fragments lithiques aux formes angulaires qui constituent la charge. Parmi ces éléments, on retrouve des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), des plagioclases (luminescence verte) et de la calcite (luminescence orange). Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) révèlent la microstructre des fragments pyroclastiques. Ces derniers présentent une microporosité ouverte, avec des pores de formes sphériques. Une interface de réaction (bordure grise) entre les fragments pyroclastiques et le liant à base de chaux est également observable. Les analyses élémentaires des fragments pyroclastiques, réalisées à l'aide de la microsonde EDS, indiquent des concentrations en SiO_2 variant de 58,98 à 61,43 % pds et des teneurs en Na_2O + K_2O qui oscillent entre 13,35 et 14,20 % pds. Ces résultats permettent l'identification de la nature des fragments de roches volcaniques grâce au diagramme Total Alkali Silica (TAS), allant du trachyte à la phonolite.

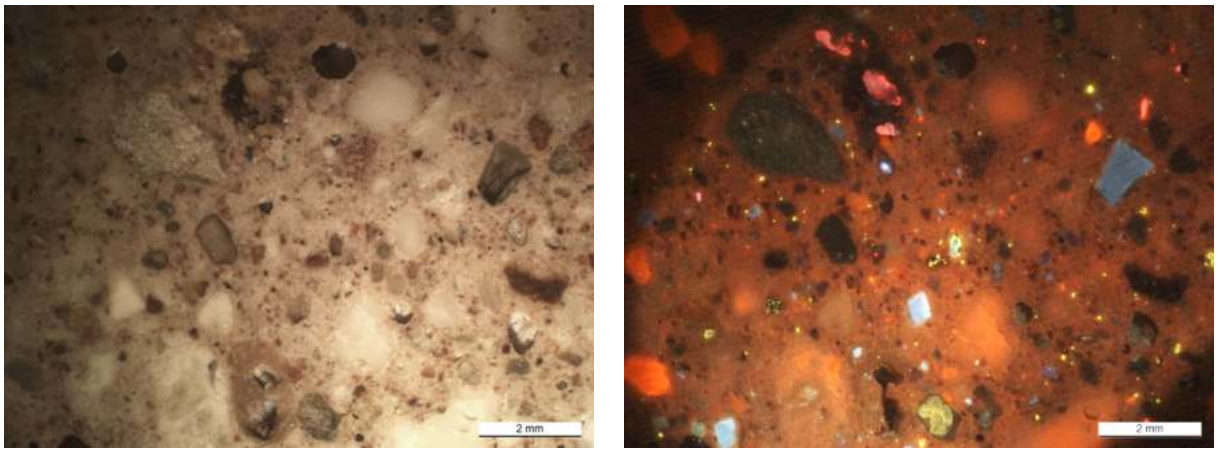

Figure 184 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22389 montrant les compositions lithique et minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

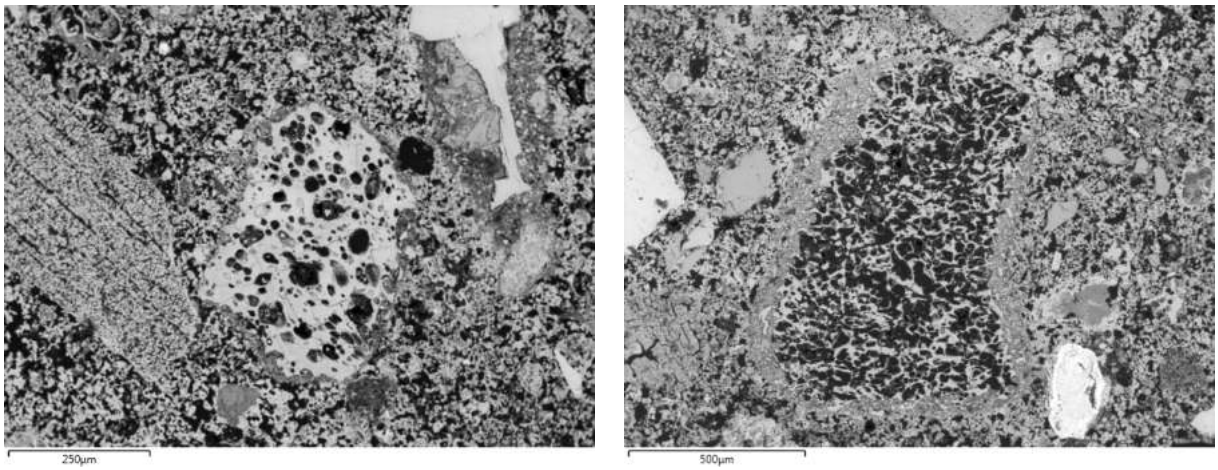

Figure 185 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22389 montrant (a) un fragment de pyroclaste trachytique à microporosité sphérique occluse ; (b) un second fragment de ponce trachytique affichant une forte microporosité ouverte

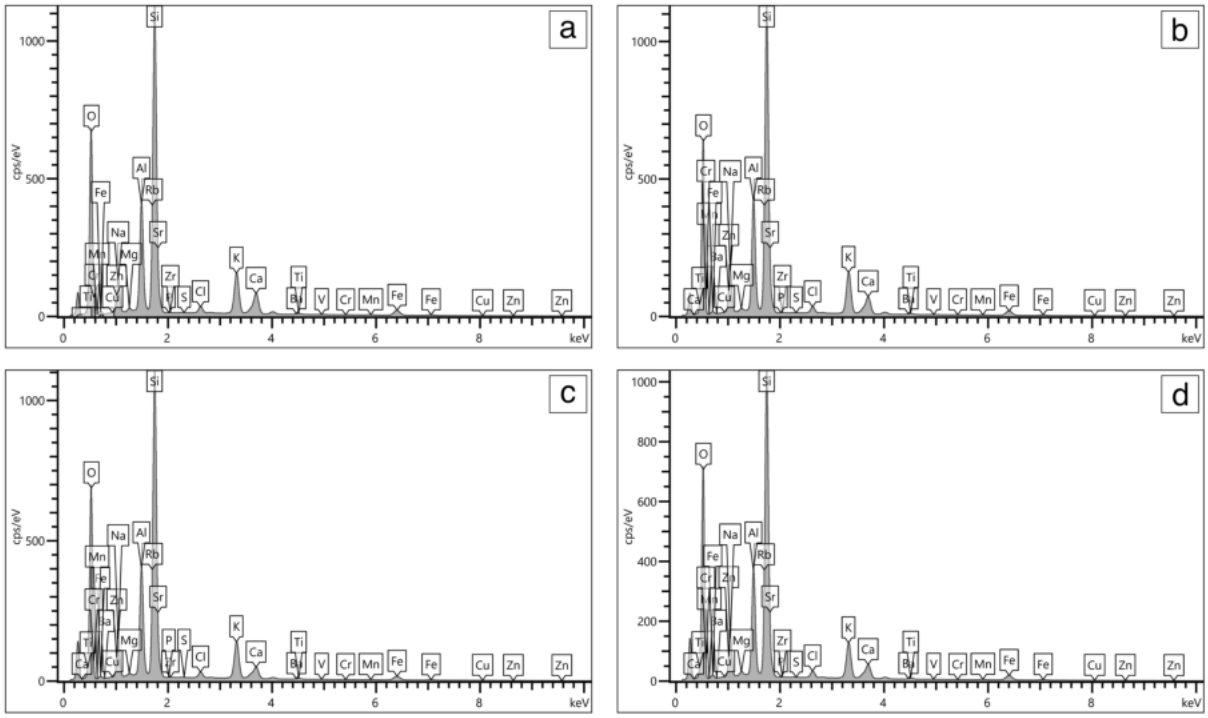

Figure 186 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22389 montrant la composition élémentaire des fragments de roches pyroclastiques où la teneur de SiO_2 varie de 58,9 à 61,4 % pds et la teneur de Na_2O + K_2O varie de 13,3 à 14,2 % pds

FICHE 13 BDX22390

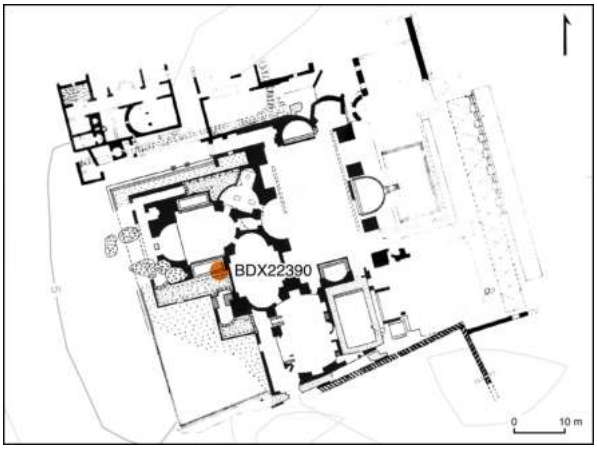

Figure 187 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22390 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur de *praefurnium*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : *Praefurnium*
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8846760354639, 7.74997779453422

L'échantillon BDX22390 a été prélevé à partir de l'enduit situé sur la face interne du *praefurnium* de l'hypocauste qui se situe sous le *caldarium* des grands thermes du nord. Ce revêtement ne présente aucune trace de restauration ou de consolidation datant de 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit de protection
Couleur : Rose foncé ; Beige foncé
Résistance apparente : Moyenne
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment d'enduit est composé de deux couches : une couche de finition épaisse d'environ 9 mm et de couleur rose foncé, et une couche de préparation d'environ 12 mm d'épaisseur et de couleur beige foncé.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope révèlent un liant de composition hétérogène, avec la présence d'une teneur élevée de nodules de chaux non mélangés (20 %) et partiellement calcinés (entre 3 et 5 %), ainsi qu'une porosité allant jusqu'à 10 %. La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à granulométrie hétérogène, avec des grains qui présentent des formes sub-angulaires. Ce sable comporte principalement du quartz, des feldspaths alcalins et des micas. Les inclusions de tuileau sont présentes en abondance dans la couche de finition, représentant environ 30 % et de taille réduite, n'excédant pas 2,6 mm. En revanche, dans la couche de préparation, elles sont moins nombreuses (20 %), mais de taille plus importante, pouvant atteindre jusqu'à 8 mm.

Figure 188 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22390 montrant deux matrices de couleurs rose foncé et beige foncé et une charge non tamisée dans les deux couches de l'enduit

BDX22390a : Couche de finition (9 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 0.9	20	Sphérique	0.2 - 0.4	10
Partiellement calcinés	0.6 - 1.1	5	Oblongue	0.6 - 0.8	5

Tableau 94 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22390a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.3 - 0.7	3	Homogène
Arénite	Sédimentaire	Sub-angulaire	0.6	< 1	Hétérogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	0.9	< 1	Hétérogène

Tableau 95 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22390a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.3 - 0.4	1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.4	3	Homogène

Tableau 96 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22390a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 2.6	30	Homogène

Tableau 97 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22390a

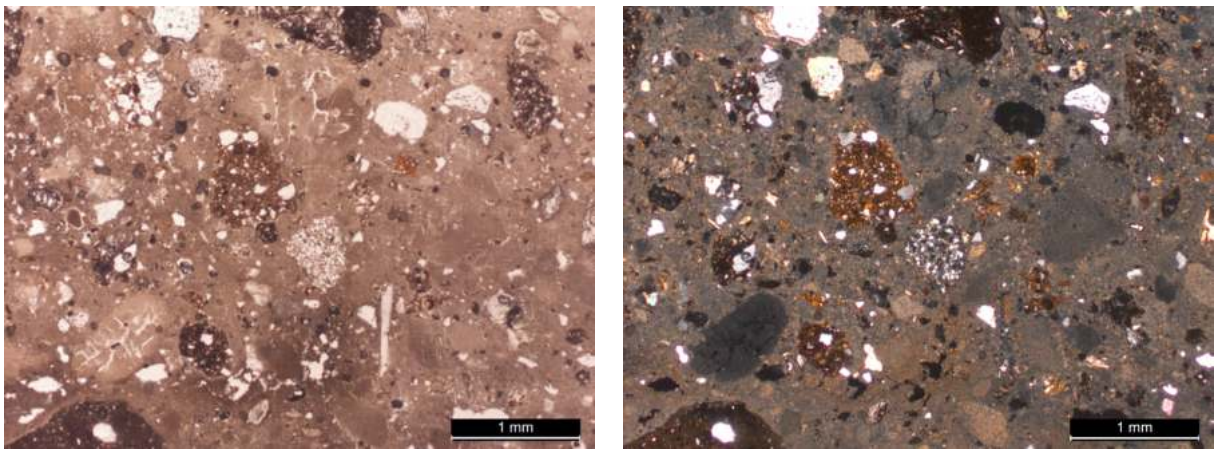

Figure 189 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390a montrant les éléments composants la charge (quartz, feldspaths, calcite et arénite quartzeuse) ainsi que des fragments de tuileau dispersés dans la matrice (grossissement × 2.5)

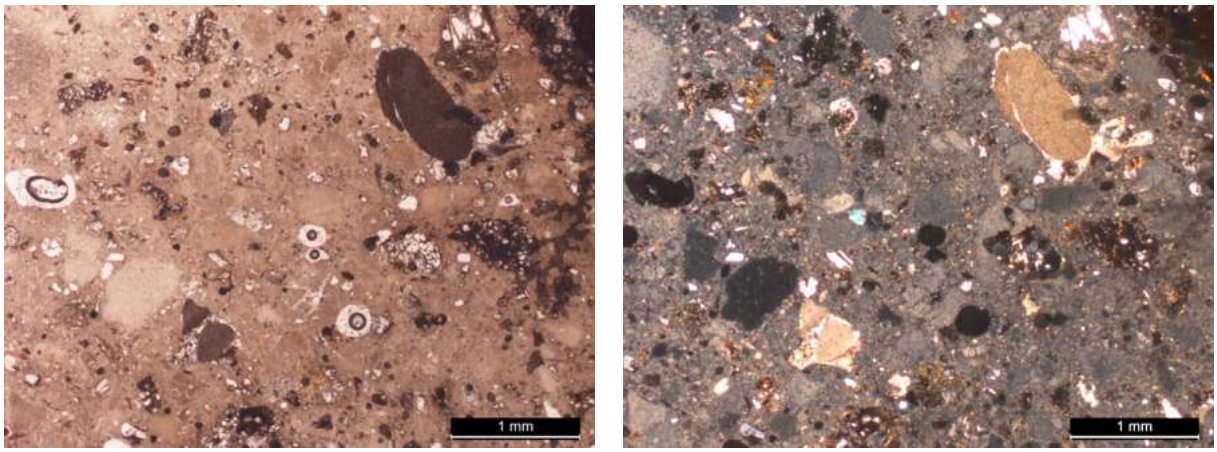

Figure 190 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390a montrant la présence de fragments de bioclastes partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

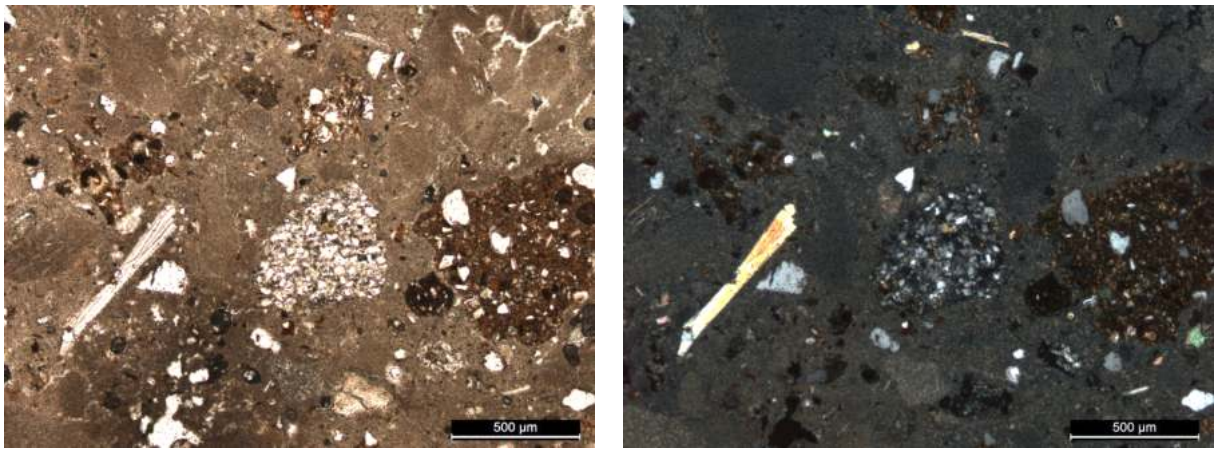

Figure 191 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390a montrant un fragment d'arénite quartzeuse de forme sub-émoussée et des minéraux de la charge, dont des quartz, des feldspaths et des micas (grossissement × 5)

BDX22390b : Couche de préparation (12 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 1.1	20	Sphérique	0.1 - 0.4	5
Partiellement calcinés	0.7	3	Oblongue	0.5 - 2.0	5

Tableau 98 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22390b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.9 - 1.1	3	Homogène

Tableau 99 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22390b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.6	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.6	3	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.4	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.4 - 0.8	1	Homogène

Tableau 100 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22390b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	2.0 - 8.0	20	Homogène

Tableau 101 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22390b

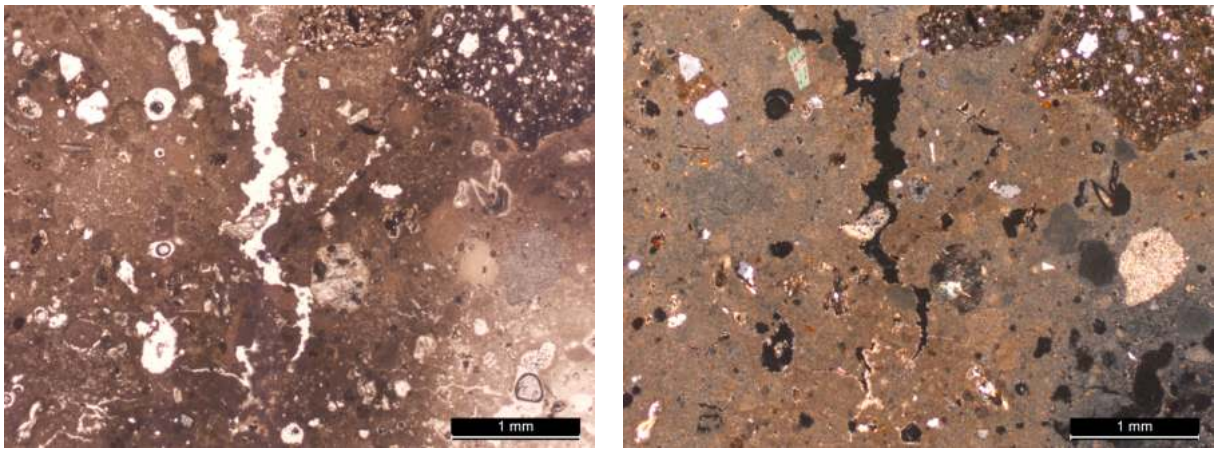

Figure 192 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390b montrant la présence de bioclastes partiellement calcinés et des dépôts secondaires de cristaux de calcite au niveau des fissures et des pores (grossissement × 2.5)

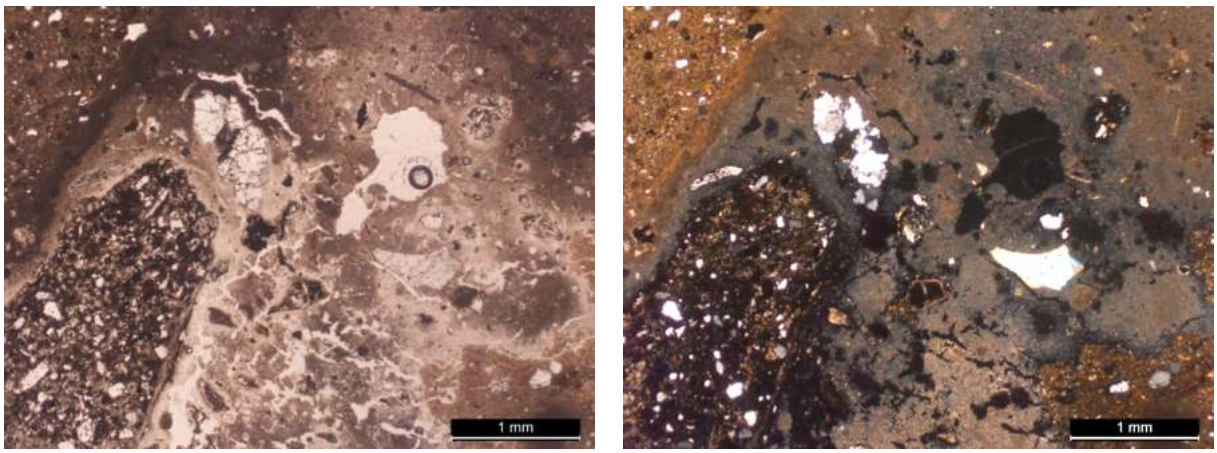

Figure 193 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390b montrant un micro-fragment de granite et un cristal de calcite (grossissement × 2.5)

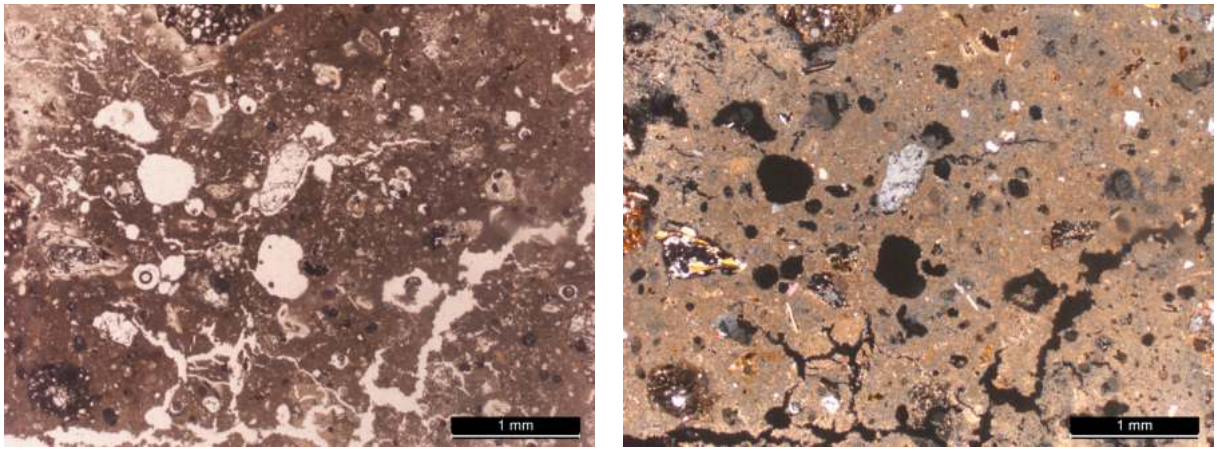

Figure 194 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390b montrant une forte porosité de forme sphérique et la présence de microfissures (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les examens au microscope optique à cathodoluminescence (CL) mettent en évidence un liant hétérogène constitué essentiellement de chaux carbonatée (se manifestant par une luminescence orange), avec des nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés et une présence notable d'éléments bioclastiques. On observe également les cristaux et les fragments lithiques de formes sub-angulaires qui composent la charge, dont des cristaux de quartz (luminescence de couleur mauve), des feldspaths alcalins (luminescence de couleur bleu clair) et plagioclases (luminescence de couleur verte) et des cristaux de calcite (luminescence de couleur orange). En outre, les fragments de terre cuite observés dans le mélange révèlent des matrices argileuses de couleurs et de compositions minéralogiques variées.

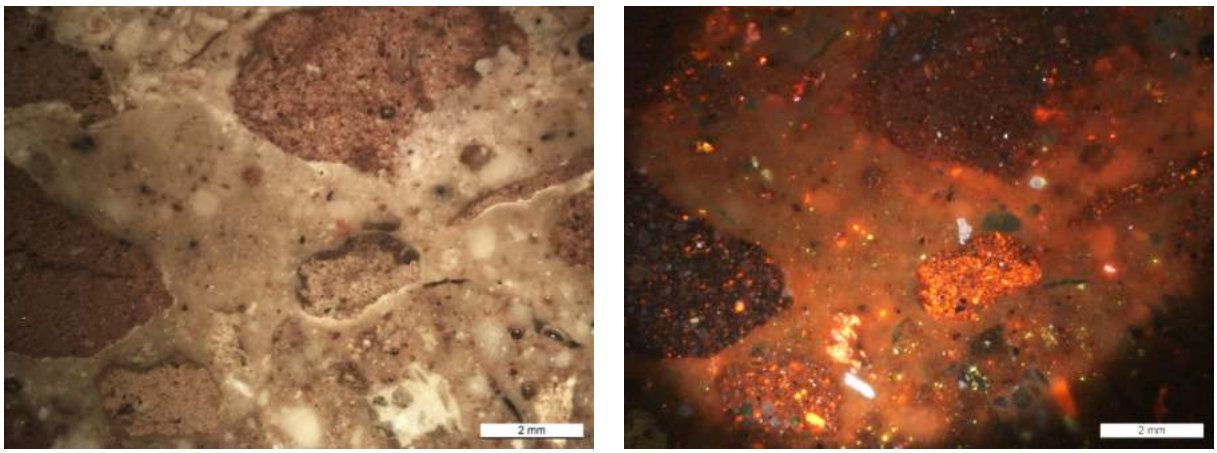

Figure 195 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22390a montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

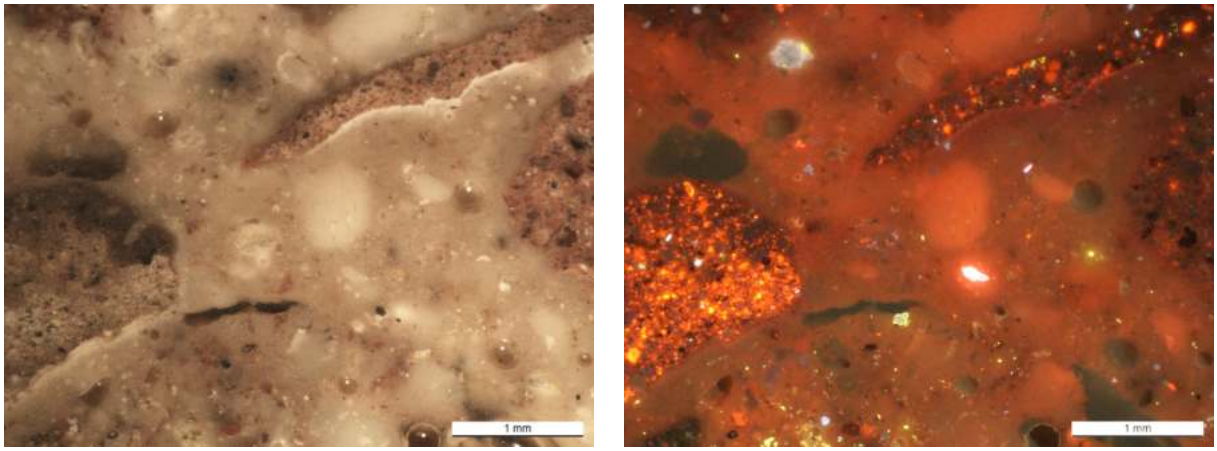

Figure 196 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22390a montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant (grossissement × 3.2)

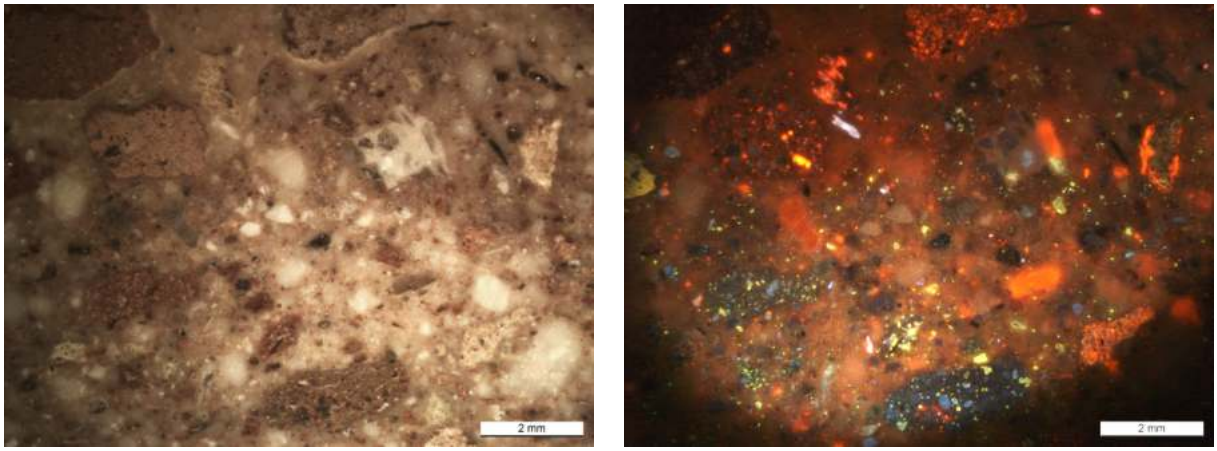

Figure 197 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22390b montrant la présence de fragments de tuileau de compositions différentes (grossissement × 1.25)

FICHE 14 BDX22391

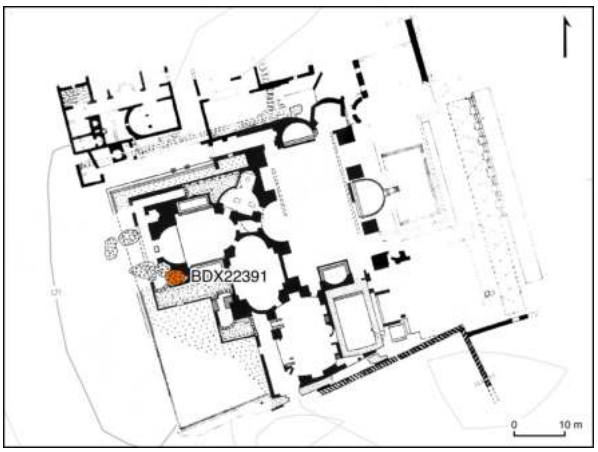

Figure 198 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22391 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur de *praefurnium*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : *Praefurnium*
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8846691992581, 7.74988110619999

L'échantillon BDX22391 a été prélevé depuis l'arc en briques, situé au-dessus du *praefurnium* qui se trouve dans le couloir de service des grands thermes du nord. Aucune trace de la campagne de consolidation réalisée par Erwan Marec en 1954 n'est visible sur le *praefurnium*.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Beige clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et possède une épaisseur d'environ 35 mm. Il présente un liant beige clair avec une texture sablo-granuleuse. Les constituants de l'échantillon sont répartis de manière homogène.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations réalisées au microscope optique révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (3 %), ainsi qu'une porosité de formes sphériques (10 %) et oblongues (1 %). La charge se compose d'un sable silico-calcaire, présentant une granularité homogène, avec des grains aux formes sub-angulaires. Ce sable est principalement constitué de cristaux de quartz, de feldspaths alcalins, de plagioclases, de micas, de calcite, et de micro-fragments de granite. De plus, parmi les inclusions observées, se trouvent des fragments pyroclastiques, caractérisés par une composition allant du trachytique au trachy-phonolitique. Ces fragments présentent des textures allant de microlithiques à porphyriques et contiennent des inclusions de phénocristaux de sanidine.

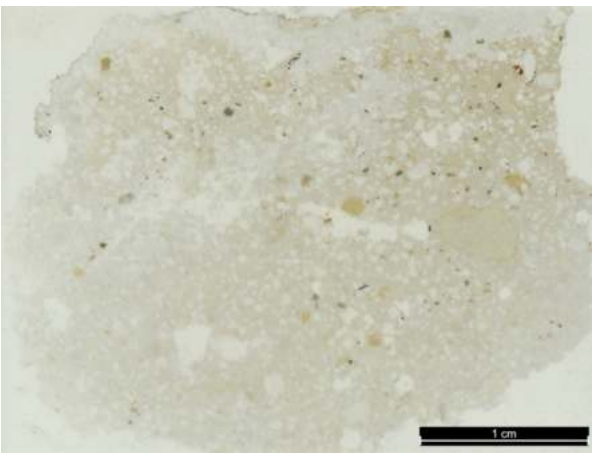

Figure 199 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22391 montrant une matrice de couleur beige clair et une charge tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	1.2 - 1.4	3	Sphérique	0.1 - 0.6	10
			Oblongue	1.3 - 3.7	1

Tableau 102 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22391

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 3.4	10	Homogène

Tableau 103 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22391

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.5	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	10	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.5 - 0.6	3	Homogène
Calcite	Sub-émoussée	0.6 - 0.7	1	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.4 - 0.6	1	Homogène
Biotite	Sub-angulaire	0.4 - 0.5	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.3 - 0.5	1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.5 - 1.0	1	Homogène

Tableau 104 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22391

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.7 - 5.5	3	Homogène

Tableau 105 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22391

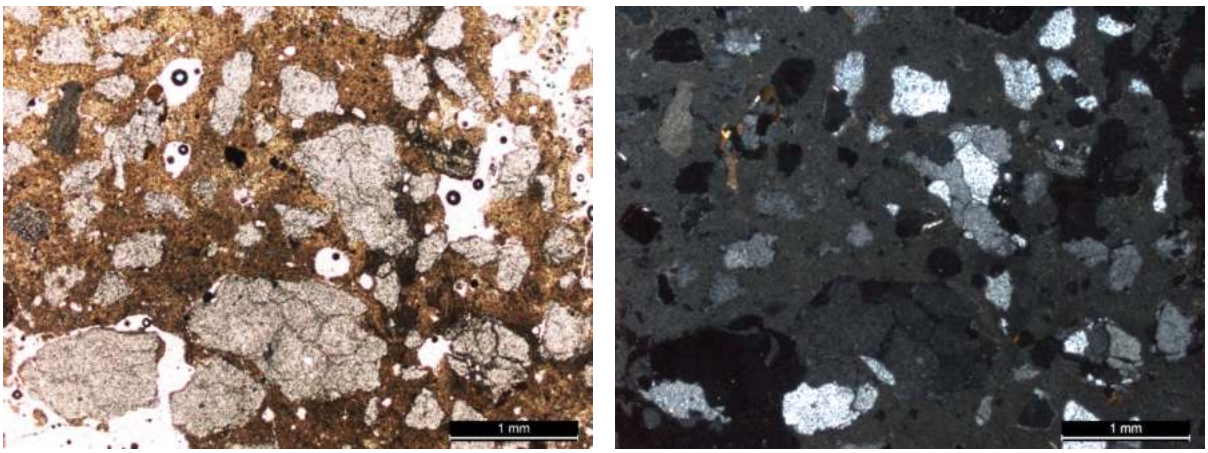

Figure 200 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des cristaux de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases de dimensions régulières (grossissement × 2.5)

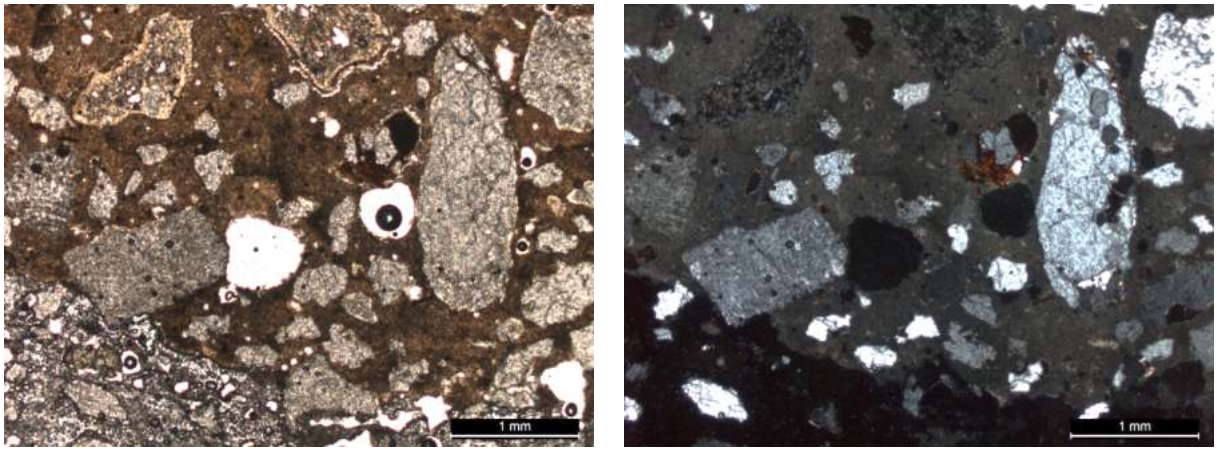

Figure 201 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des fragments lithiques plutoniques et volcaniques (grossissement × 2.5)

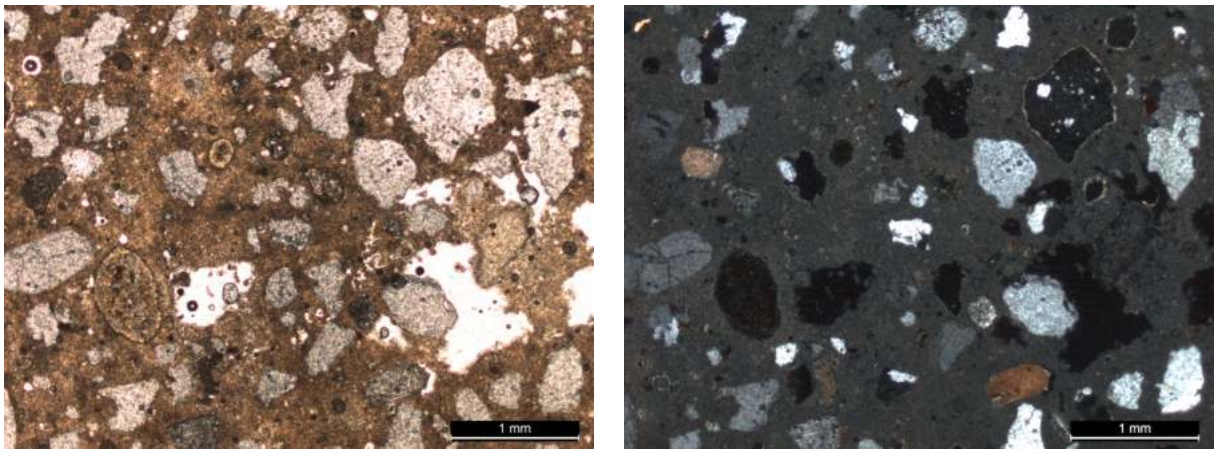

Figure 202 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

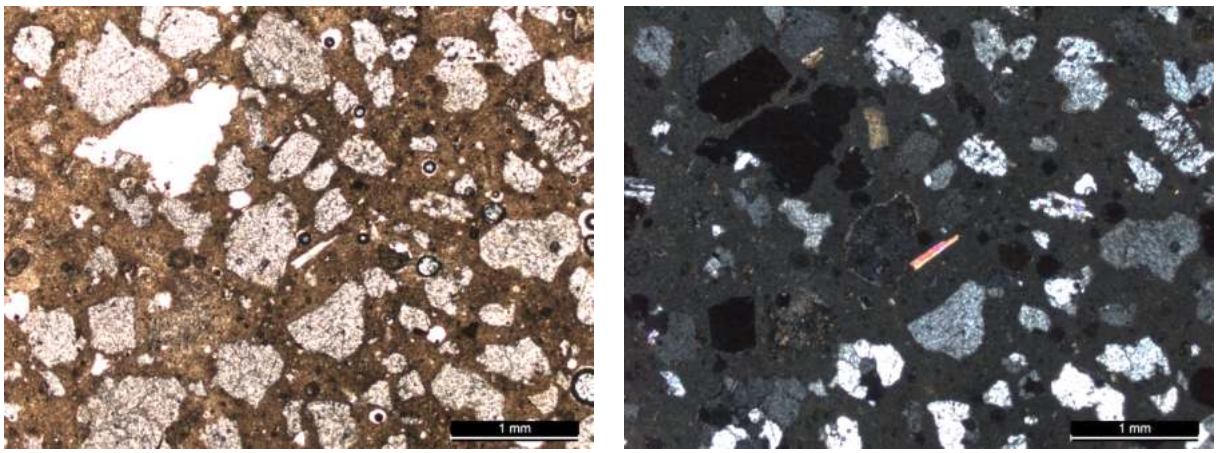

Figure 203 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des micro-fragments de granite et des micas mêlés à la charge (grossissement × 2.5)

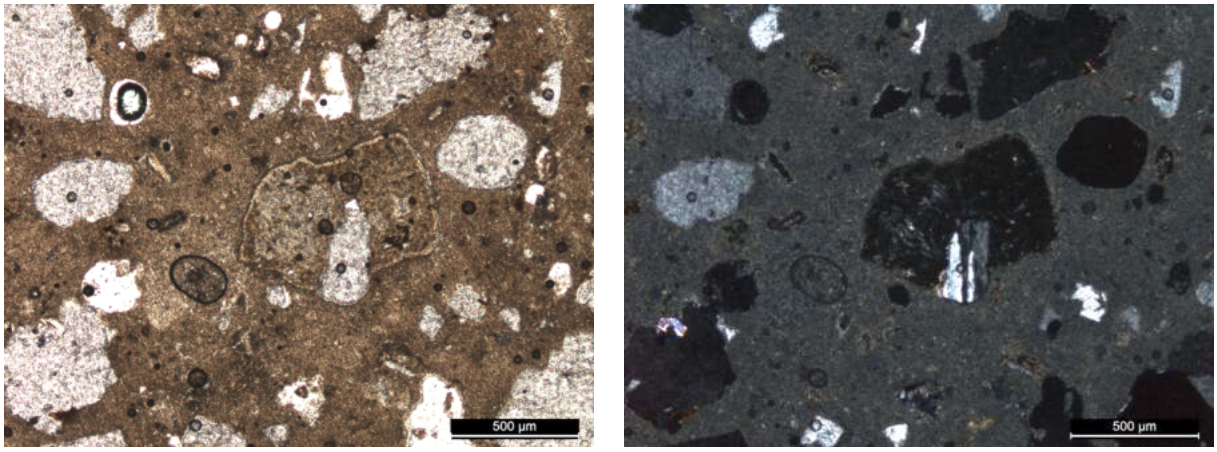

Figure 204 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant un fragment pyroclastique (trachyte) à matrice vitreuse composé d'un phénocristal de sanidine et de microlithes de feldspaths alcalins (grossissement × 5)

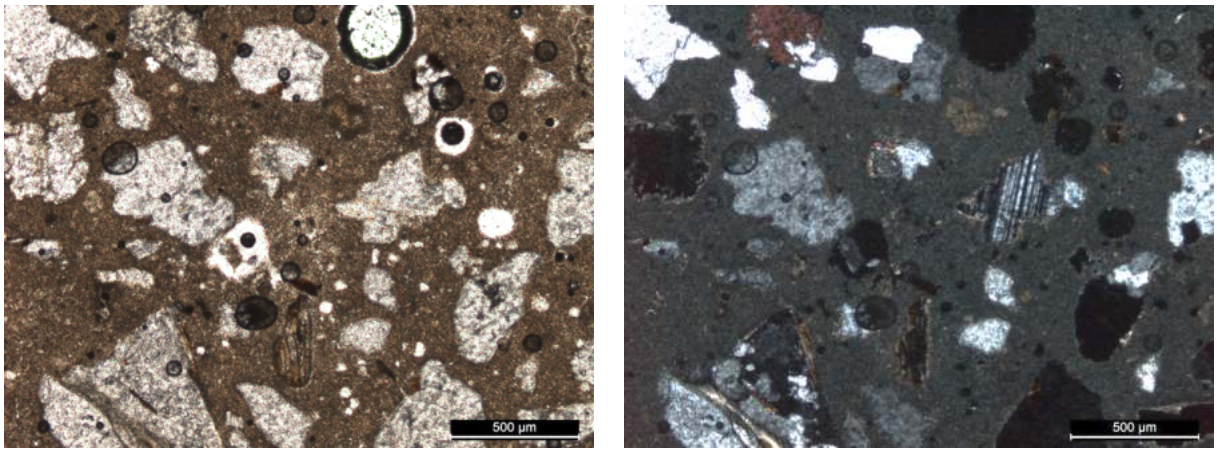

Figure 205 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des micro-fragments de granite et des feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au moyen du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène composé essentiellement de chaux carbonatée, émettant une luminescence de couleur orange, et contenant des nodules de chaux partiellement calcinés. Les cristaux et fragments lithiques qui forment la charge sont de formes sub-angulaires. Ils comprennent des cristaux de quartz (avec une luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et des plagioclases (luminescence verte), ainsi que des cristaux de calcite (luminescence orange). Les observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) révèlent la présence d'une matrice homogène pour le liant, ainsi qu'une matrice vitreuse et microporeuse pour un fragment pyroclastique. De plus, des formations de chlorure de sodium (NaCl) sont également observées au sein du liant. Les analyses élémentaires des fragments pyroclastiques, réalisées à l'aide de la microsonde EDS, indiquent des teneurs en SiO_2 oscillant entre 61,62 et 63,12 % pds, et des teneurs en $Na_2O + K_2O$ entre 13,07 et 13,95 % pds. Ceci permet d'identifier la nature des fragments de roches volcaniques à l'aide du diagramme Total Alkali Silica (TAS), allant du trachyte au trachy-phonolite.

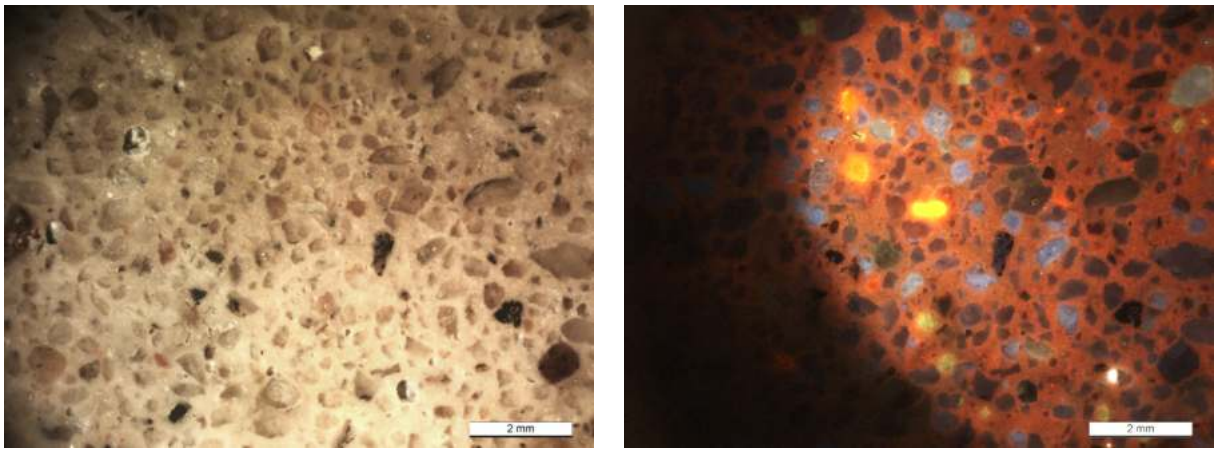

Figure 206 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22391 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

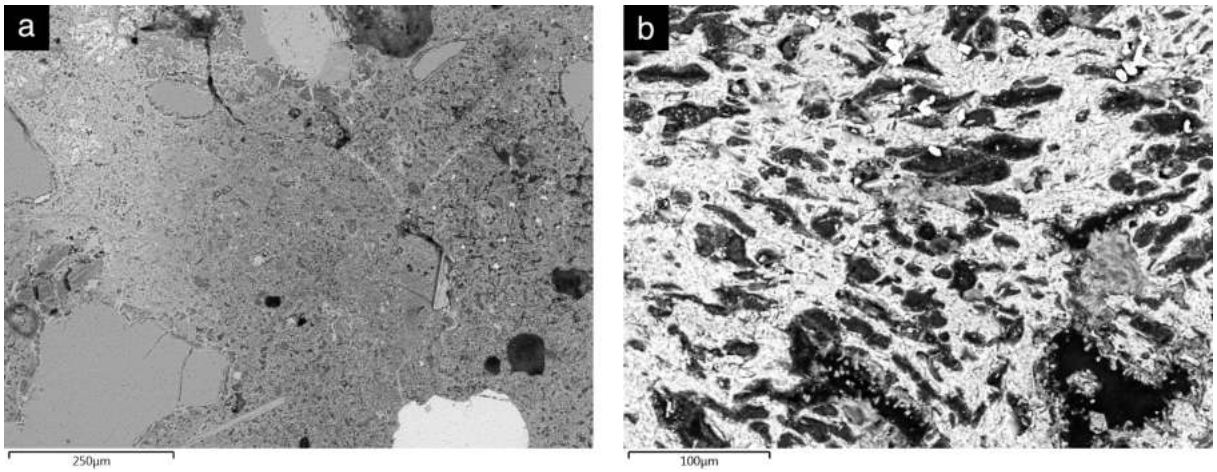

Figure 207 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22391 montrant (a) la matrice du liant à base de chaux ; (b) la matrice d'un pyroclaste trachytique à forte microporosité

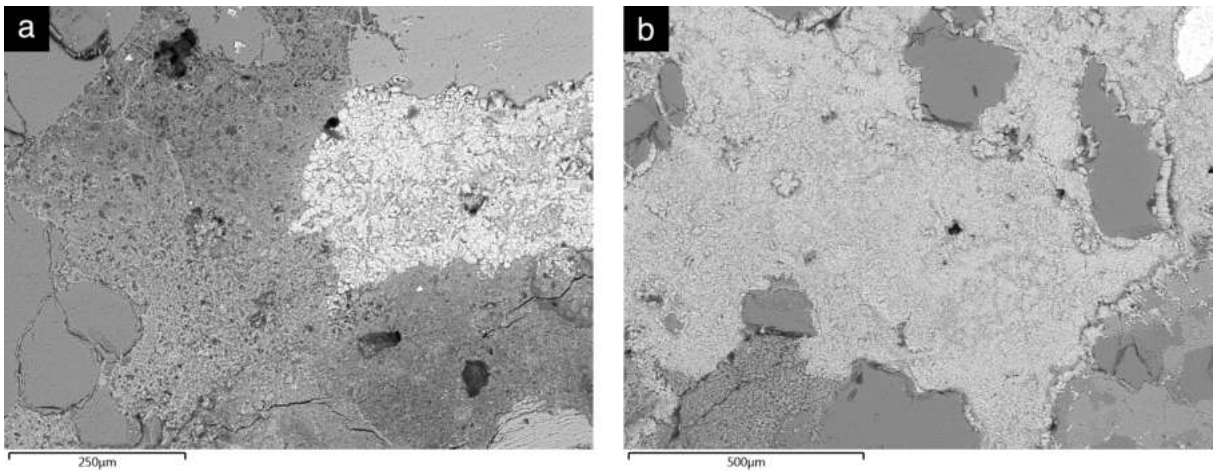

Figure 208 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22391 montrant (a) la formation de dépôts de sel (chlorure de sodium) au sein du liant à base de chaux (en gris clair) ; (b) des dépôts de cristaux de sel au tour des grains qui composent la charge

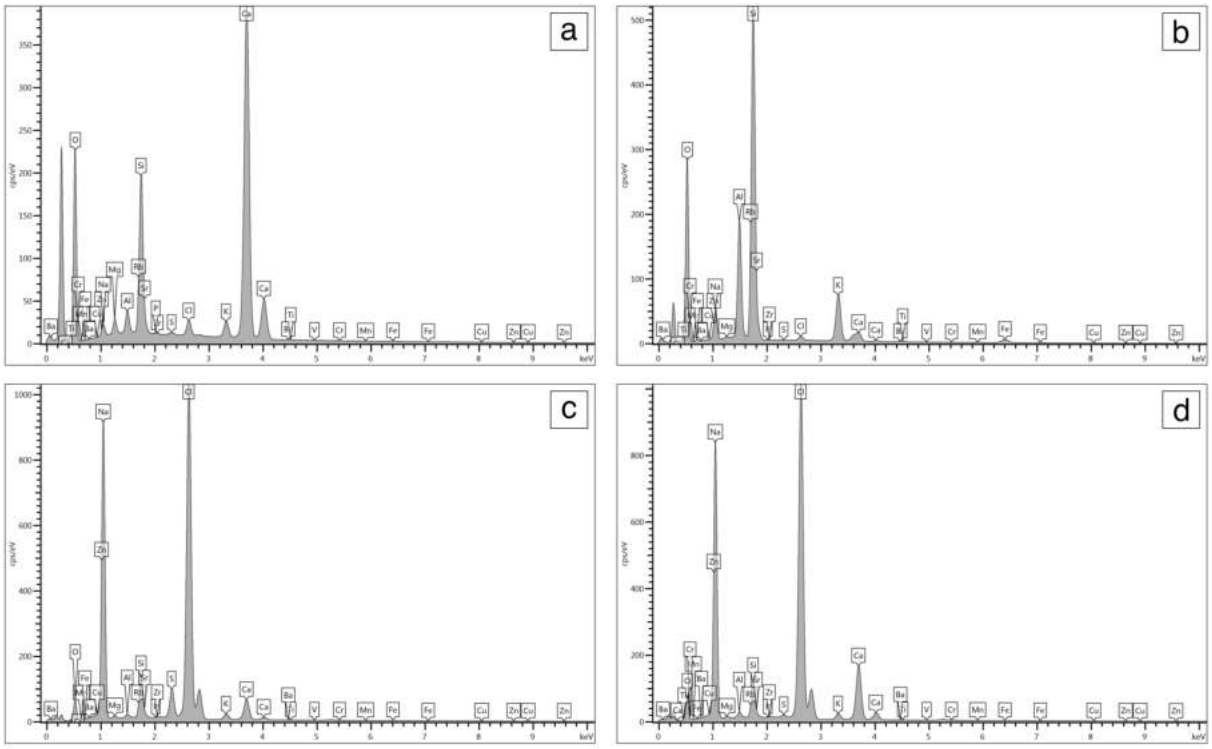

Figure 209 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22391 montrant la composition élémentaire de : (a) liant à base de chaux ; (b) la matrice du pyroclaste trachytique ; (c-d) les dépôts de sel au sein du liant avec des teneurs en Na_2O qui oscillent entre 39,7 et 40,8 % pds et des teneurs en ClO qui varient de 36,4 et 36,8 % pds

FICHE 15 BDX22392

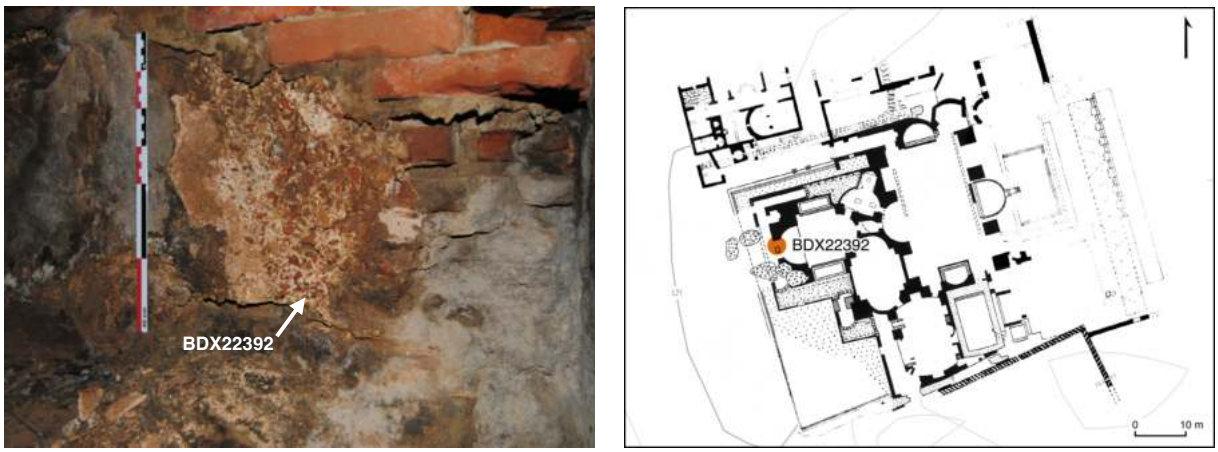

Figure 210 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22392 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur de *praefurnium*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : *Praefurnium* (*labrum*)
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8847253251638, 7.74983607113688

L'échantillon BDX22392 provient de l'enduit se trouvant sur la face intérieure du *praefurnium* de l'hypocauste, sous le *labrum* et le grand *caldarium* des grands thermes du nord. Cet enduit n'a subi aucune altération lors de la campagne de consolidation effectuée en 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit de protection
Couleur : Beige clair ; Rose foncé
Résistance apparente : Moyenne
Texture : Limono-sableuse

Le fragment d'enduit est composé de deux couches : une couche de finition, d'une épaisseur d'environ 11 mm et de couleur beige clair, ainsi qu'une couche de préparation, mesurant environ 7 mm d'épaisseur et présentant une couleur rose foncé.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations réalisées au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition hétérogène avec des nodules de chaux partiellement calcinés (5 %) et présentant une porosité modérée (5 %). La charge se compose de sable silico-calcaire contenant des cristaux de calcite et des morceaux de marbre, présentant une granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Des inclusions de tuileau, de petit calibre (jusqu'à 1,6 mm) et en proportion modérée (5 %), sont visibles dans la couche de finition. En revanche, elles sont de plus grande taille, atteignant jusqu'à 2,4 mm, et plus abondantes à hauteur de 10 % dans la couche de préparation.

Figure 211 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22392 montrant deux matrices de couleurs beige clair et rose foncé et une charge non tamisée dans les deux couches de l'enduit

BDX22392a : Couche de finition (11 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.3 - 1.1	5	Sphérique	0.2 - 0.5	5
			Oblongue	0.3 - 1.6	3

Tableau 106 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22392a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	4.3 - 7.1	1	Homogène
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.5 - 1.0	1	Homogène

Tableau 107 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22392a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.8	5	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.3	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.3 - 1.5	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.3 - 0.8	1	Homogène

Tableau 108 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22392a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 1.6	5	Homogène

Tableau 109 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22392a

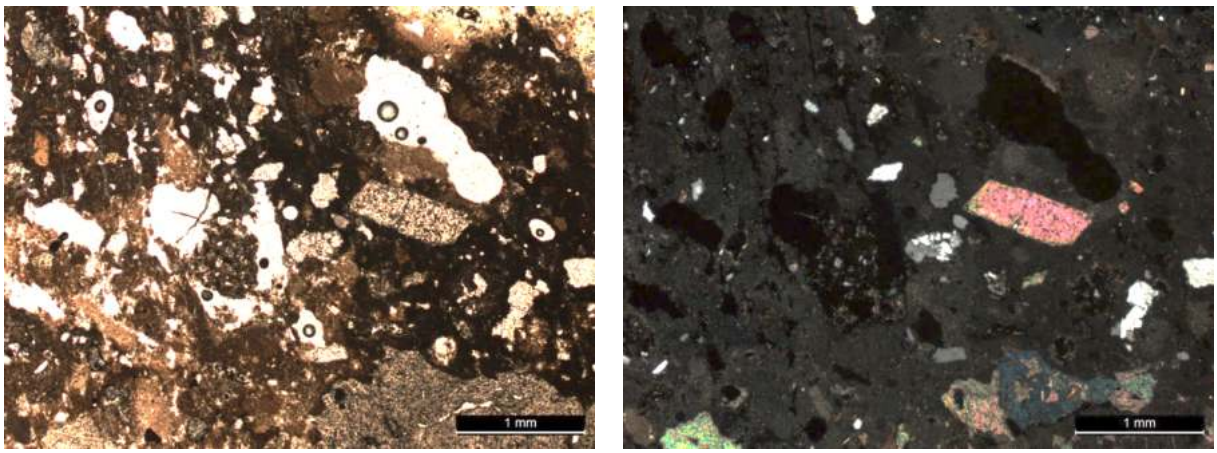

Figure 212 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392a montrant des cristaux de calcite dispersés la couche d'enduit (grossissement × 2.5)

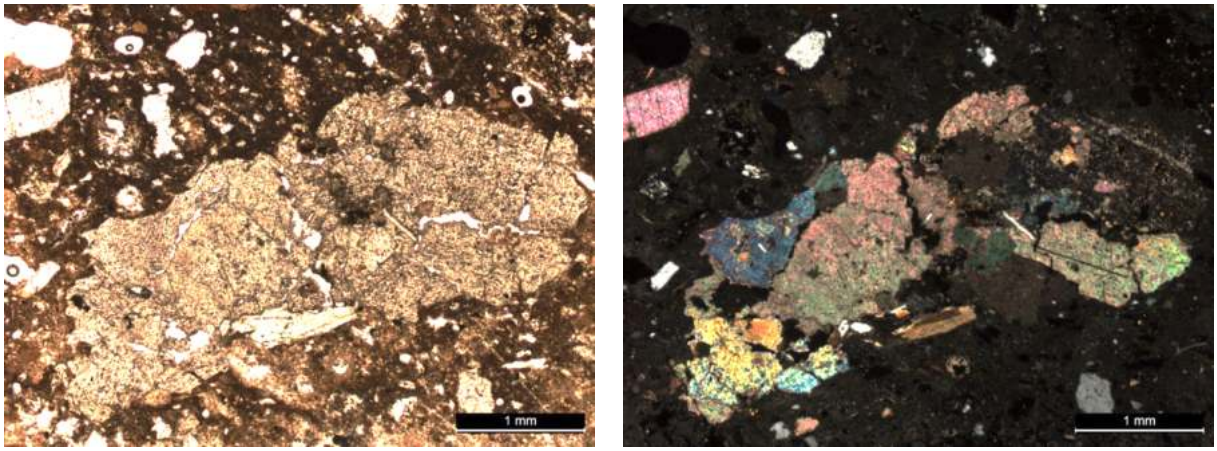

Figure 213 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392a montrant fragment de marbre inclus dans la charge (grossissement × 2.5)

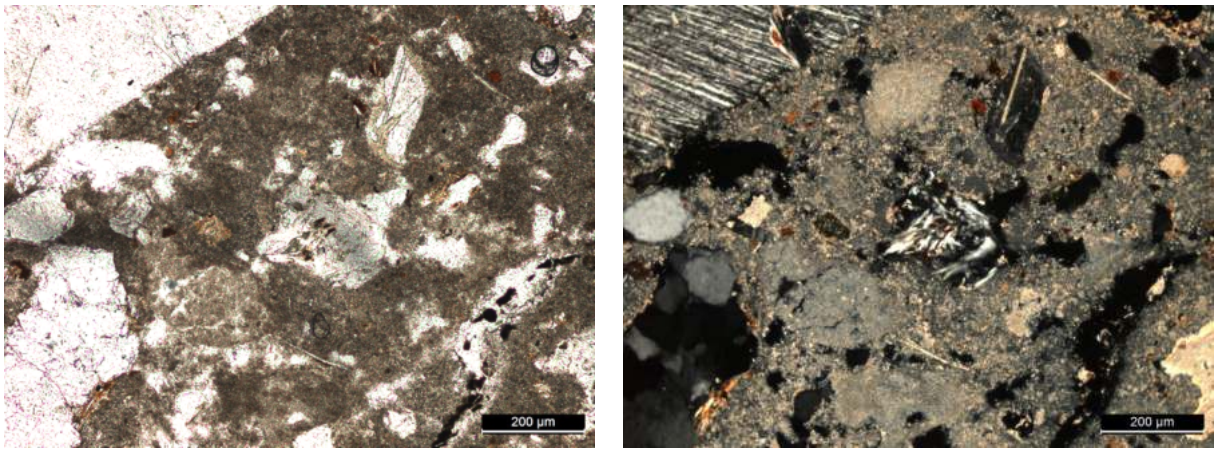

Figure 214 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392a montrant un cristal de calcédoine avec de cristallites de quartz agencés en fibres (grossissement × 10)

BDX22392b : Couche de préparation (7 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.4 - 3.7	5	Sphérique	0.2 - 0.5	3
			Oblongue	0.8 - 10	1

Tableau 110 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22392b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 0.6	1	Hétérogène
Siltite	Sédimentaire	Sub-angulaire	0.5	1	Homogène

Tableau 111 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22392b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.4	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.5	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 0.8	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.4	1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.1 - 0.5	1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.1 - 0.2	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.2	< 1	Hétérogène

Tableau 112 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22392b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 2.4	10	Homogène

Tableau 113 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22392b

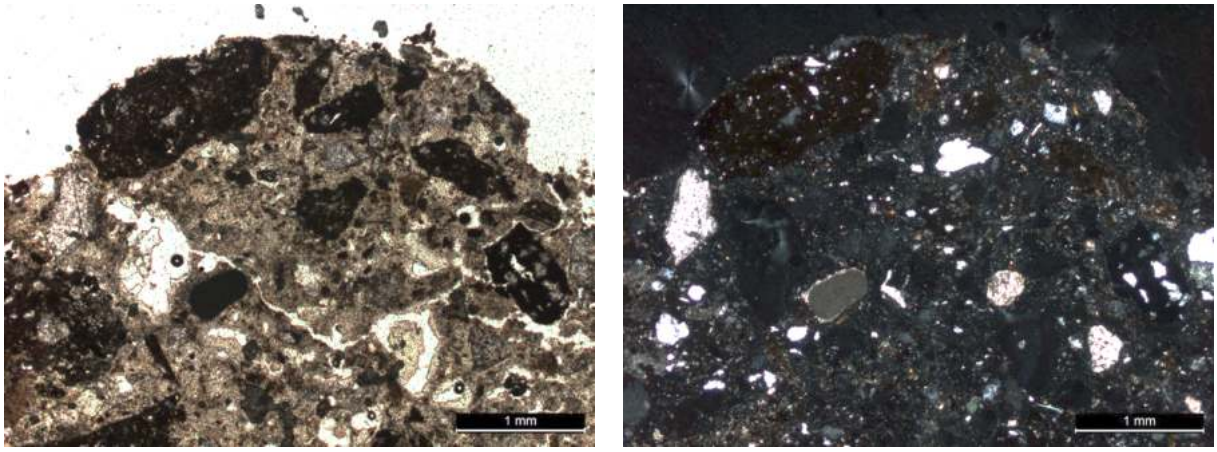

Figure 215 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant la présence de fragments de tuileau et de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

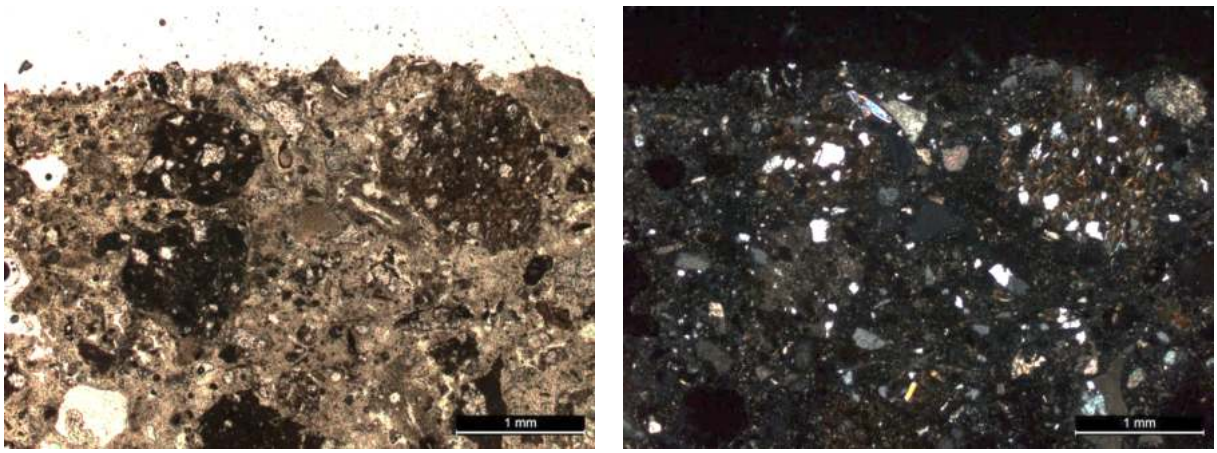

Figure 216 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant des cristaux de calcite, quartz, feldspaths et des micas (grossissement × 2.5)

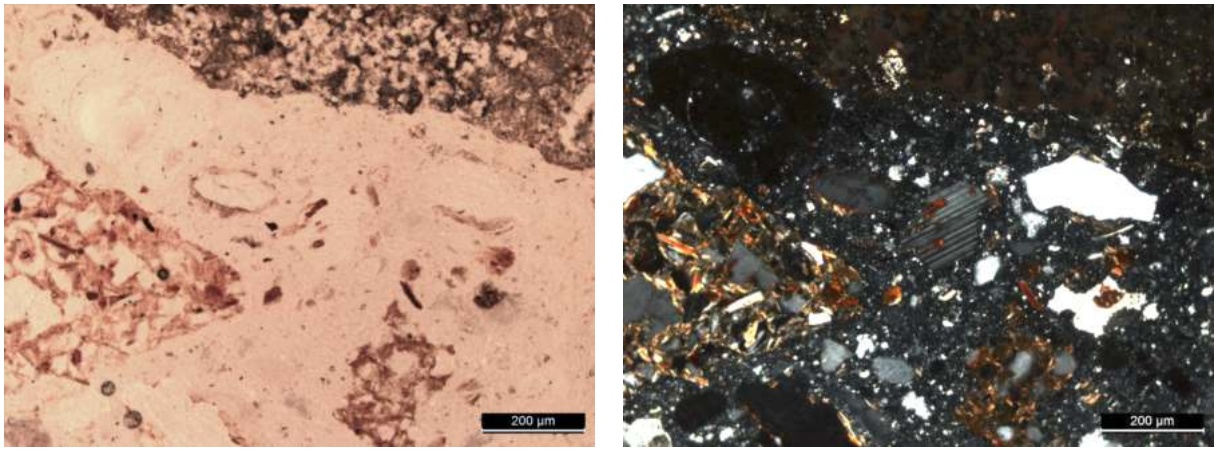

Figure 217 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant des cristaux de feldspaths alcalins et plagioclases mêlés à la charge (grossissement × 10)

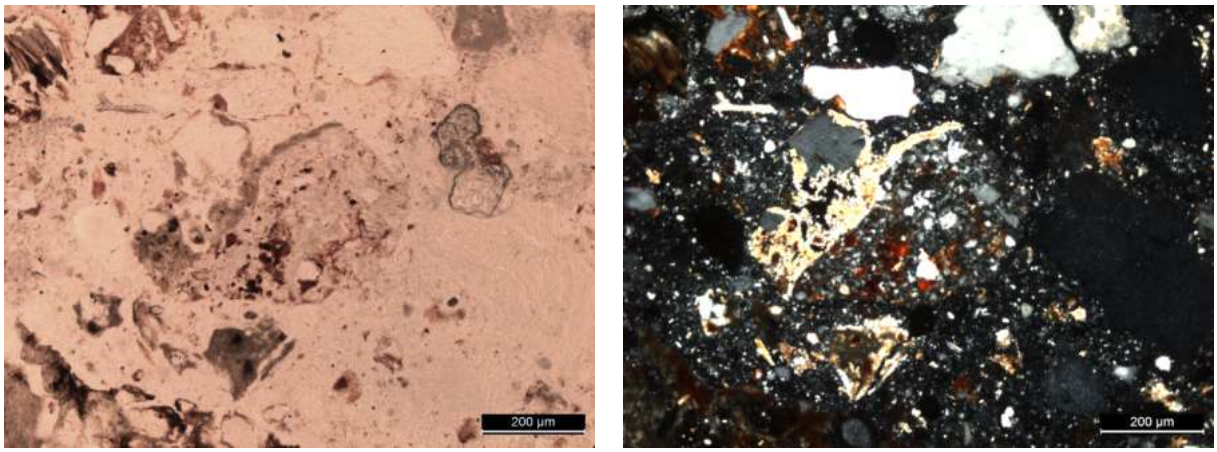

Figure 218 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant des réactions pouzzolaniques entre le liant à base de chaux et les fragments de tuileau (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

L'examen de l'échantillon au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèle un liant hétérogène composé de chaux carbonatée, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (luminescence orange), ainsi qu'avec la présence de zones présentant des compositions chimiques hétérogènes (luminescence vert clair). Les cristaux et les fragments lithiques qui composent la charge sont également observables et présentent des formes sub-angulaires. Parmi ces éléments, on retrouve des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et plagioclases (luminescence verte), ainsi que des cristaux de calcite et des fragments de marbre (luminescence orange).

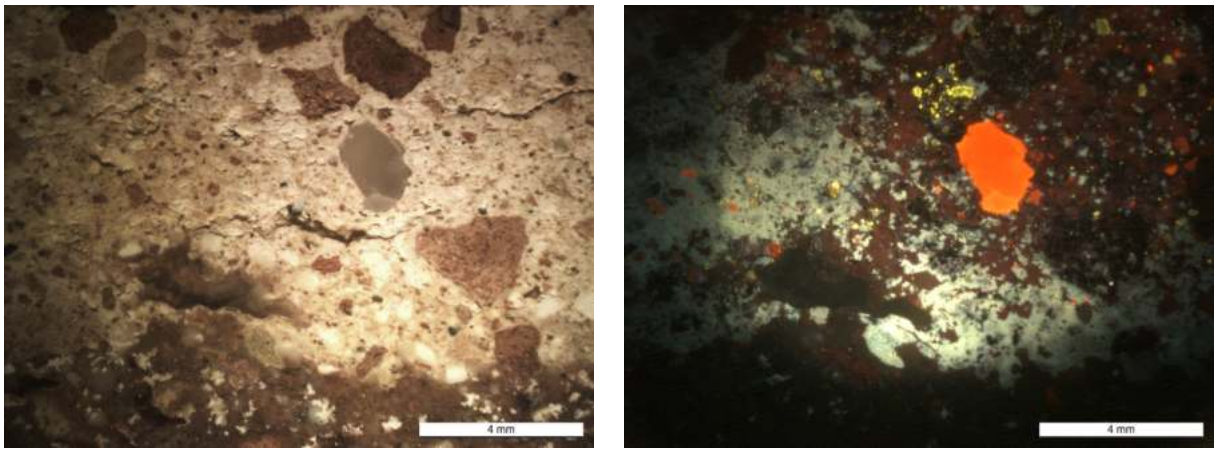

Figure 219 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22392a montrant une hétérogénéité dans la composition du liant à base de chaux et la présence de calcite et de fragments de marbre dans la charge (grossissement × 1)

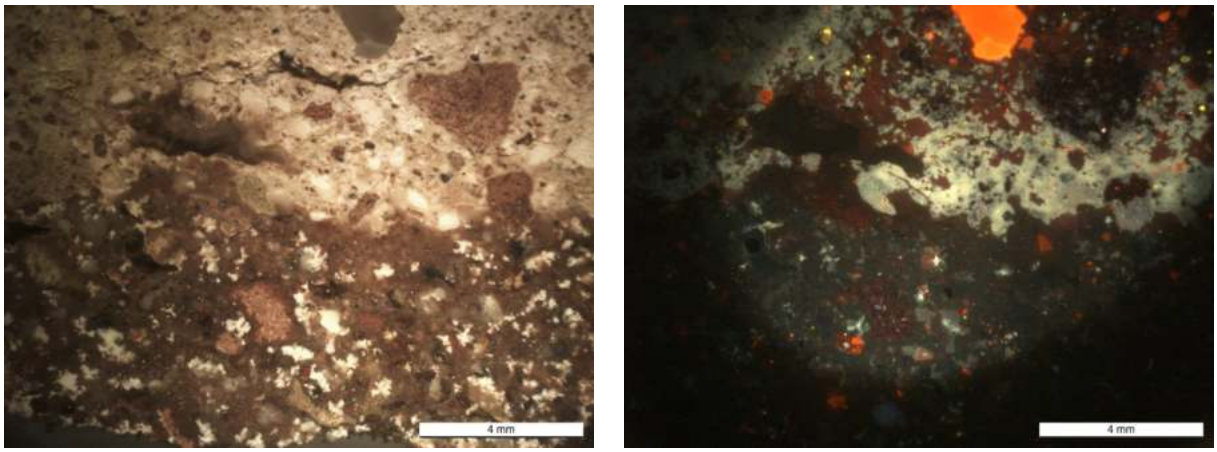

Figure 220 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22392b montrant la composition minéralogique (grossissement × 1)

FICHE 16 BDX22393

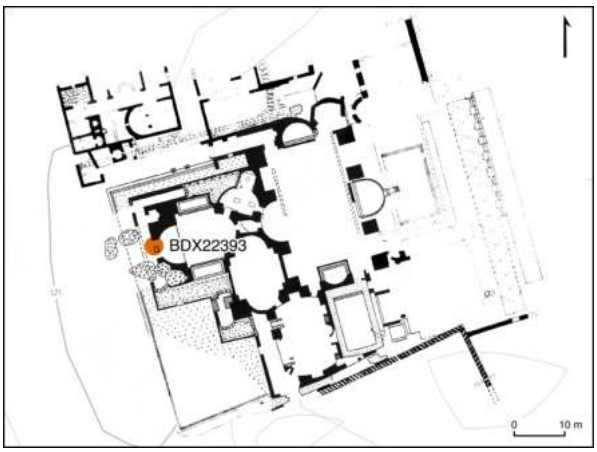

Figure 221 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22393 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur de *praefurnium*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : *Praefurnium (labrum)*
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8847236969482, 7.74983214667737

L'échantillon BDX22393 a été prélevé depuis le mur de soubassement en briques situé à l'entrée du *praefurnium* de l'hypocauste, sous le *labrum* et le grand *caldarium* des grands thermes du nord. La partie gauche du mur de *praefurnium* n'a subi aucune altération lors de la campagne de consolidation conduite en 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Rose clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Limono-sableuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 25 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose clair et une texture limono-sableuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen de l'échantillon au microscope optique polarisant révèle un liant de composition hétérogène, avec la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (5 %) constitués d'éléments bioclastiques, ainsi qu'une porosité élevée de formes sphériques (10 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, comprenant des grains de formes sub-angulaires. Cette charge inclut du quartz, des feldspaths et des micas, ainsi que des cristaux de calcite et des fragments de marbre de formes sub-angulaires. Les inclusions sont principalement des fragments de tuileau d'une granularité hétérogène (de 0,3 à 4 mm) qui sont présents en quantité modérée (5 %).

Figure 222 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22393 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.2 - 2.0	5	Sphérique	0.1 - 0.4	10
			Oblongue	0.9 - 2.1	3

Tableau 114 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22393

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 0.6	1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	3.4	< 1	Hétérogène

Tableau 115 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22393

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.3	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.5	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.6	1	Hétérogène
Bioclaste	Émoussée	0.5	< 1	Hétérogène

Tableau 116 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22393

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 4.0	5	Homogène

Tableau 117 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22393

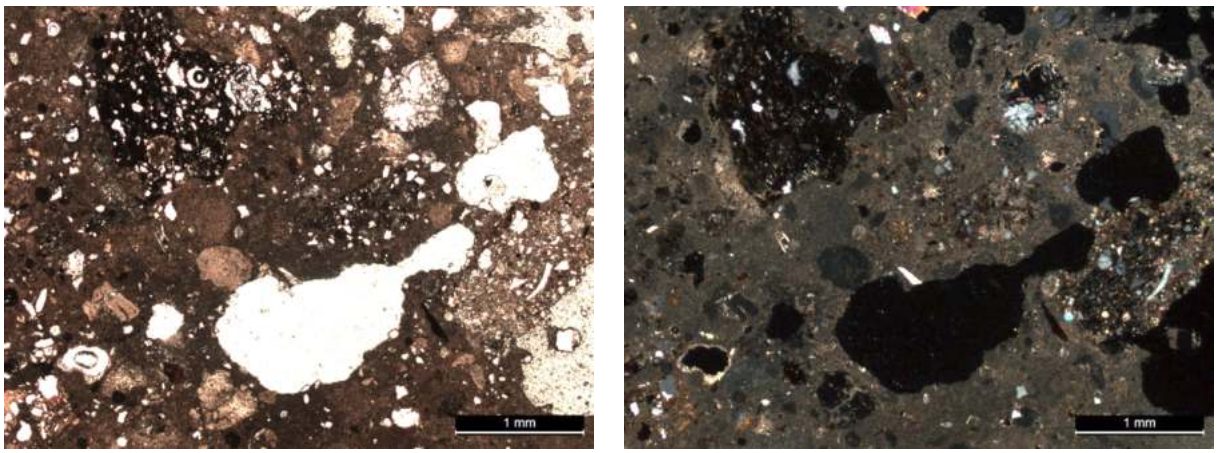

Figure 223 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22393 montrant des fragments de tuileau et des pores de formes sphériques et oblongues (grossissement × 2.5)

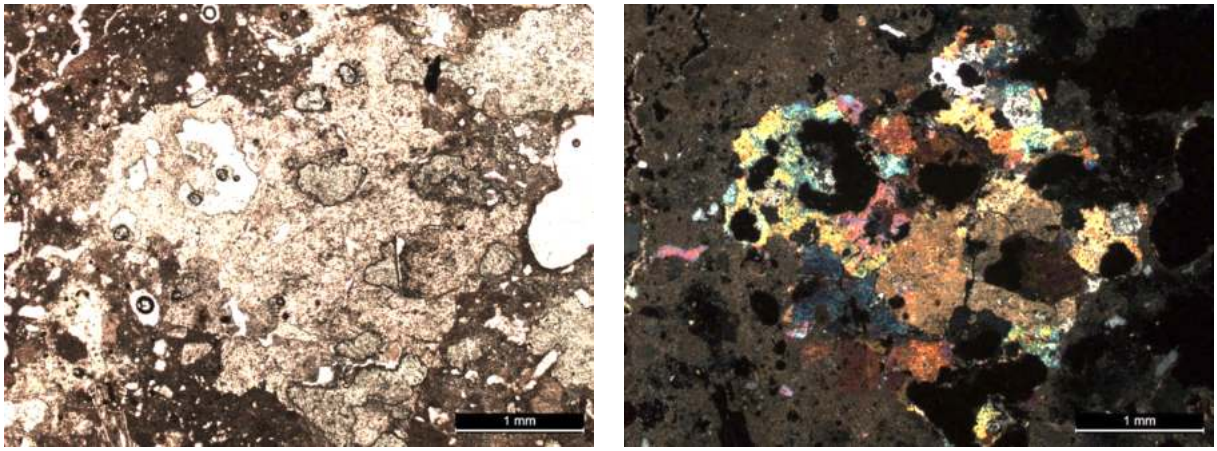

Figure 224 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22393 montrant un fragment de marbre inclus dans la charge (grossissement × 2.5)

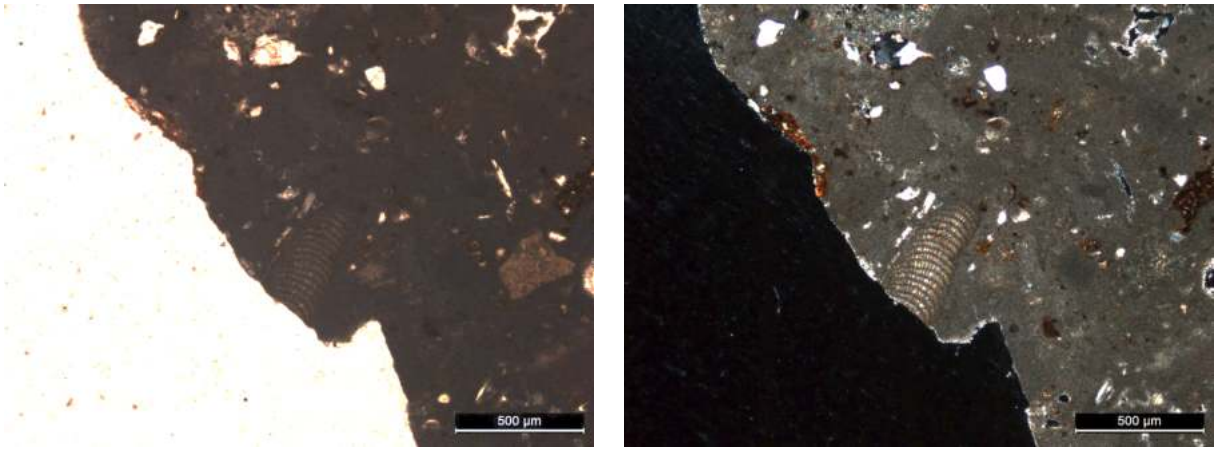

Figure 225 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22393 montrant des éléments bioclastiques constituant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées à l'aide du microscope optique à cathodoluminescence (CL) mettent en évidence l'hétérogénéité du liant à base de chaux, avec la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (luminescence orange), ainsi que des phases minérales présentant diverses compositions chimiques (luminescence vert clair). Les cristaux et les fragments lithiques de forme sub-angulaire qui constituent la charge comprennent divers éléments. On y trouve des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et des plagioclases (luminescence verte). De plus, on observe la présence de cristaux de calcite et de fragments de marbre, caractérisés par une forte luminescence de couleur orange à rouge orangé.

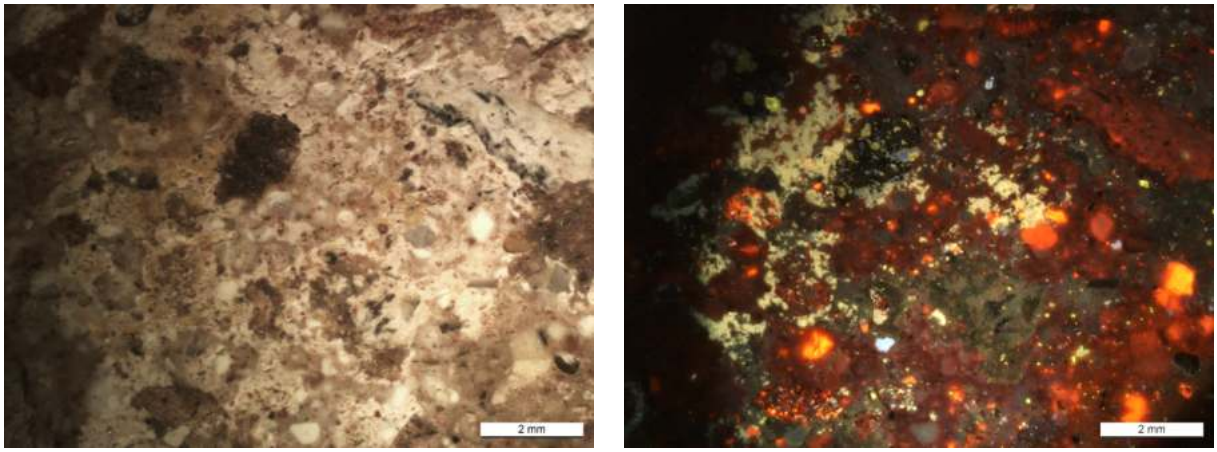

Figure 226 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22393 montrant une hétérogénéité dans la composition du liant (grossissement × 1.25)

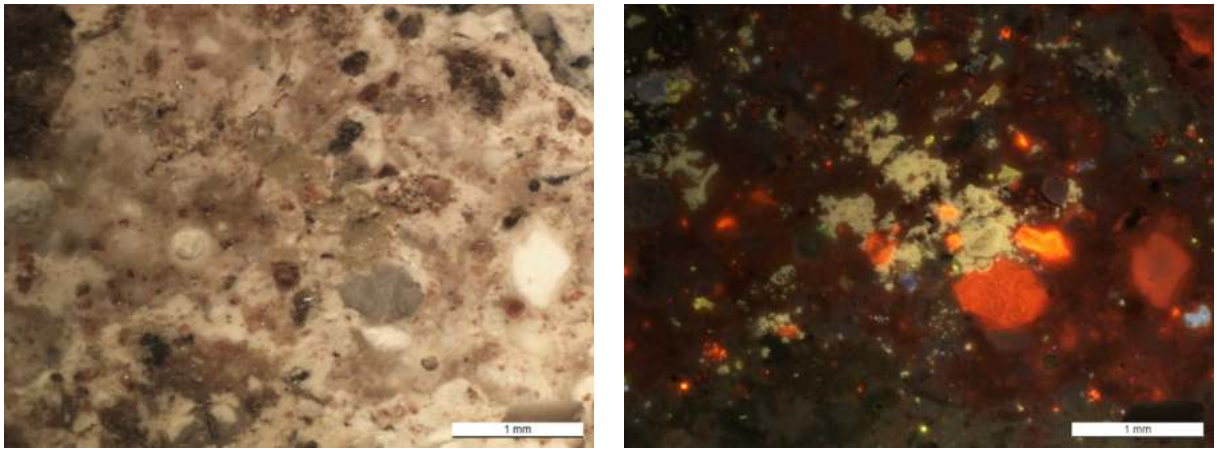

Figure 227 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22393 montrant la présence de fragments de marbre et de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 3.2)

FICHE 17 BDX22394

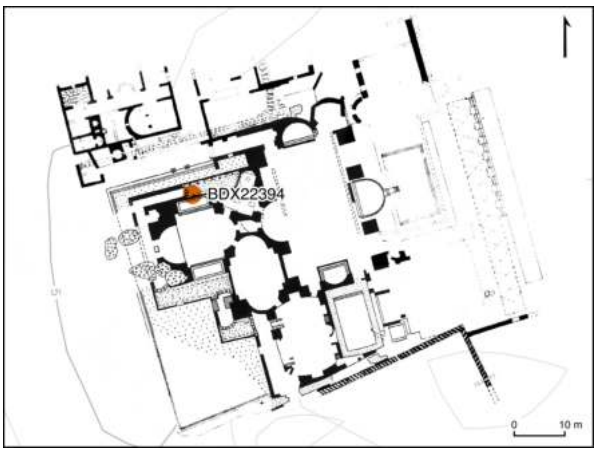

Figure 228 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22394 depuis la dalle de suspensura et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Dalle de *suspensura*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Piscine chaude (*alveus*)
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8848166159149, 7.74991557809658

L'échantillon BDX22394 a été prélevé depuis la dalle de *suspensura*, située sous la piscine chaude des grands thermes du nord. Il a été sélectionné à partir du bord visible de la dalle, qui n'a pas été touché par les travaux de consolidation effectués lors de la campagne de 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Béton
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de dallage
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Granuleuse

Le fragment de béton est monocouche et mesure environ 70 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations réalisées au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (3 %) d'origine bioclastique, tels que des fragments de lamellibranches et de gastéropodes. On observe également la présence d'une faible porosité avec des formes oblongues (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est principalement composé de cristaux de calcite, de quartz, et de feldspaths alcalins et plagioclases. Par ailleurs, une quantité significative de fragments de tuileau est remarquée, constituant plus de 50 % des inclusions. Ces fragments, de tailles variées allant de 0,3 à 24 mm, sont principalement issus de terres cuites architecturales.

Figure 229 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22394 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.2 - 1.0	3	Oblongue	0.3 - 0.8	1

Tableau 118 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22394

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 0.8	1	Homogène

Tableau 119 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22394

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.1	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.5	3	Homogène
Quartz	Sub-émoussée	0.2 - 0.7	1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.3 - 1.2	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	< 1	Homogène

Tableau 120 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22394

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 24	> 50	Homogène

Tableau 121 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22394

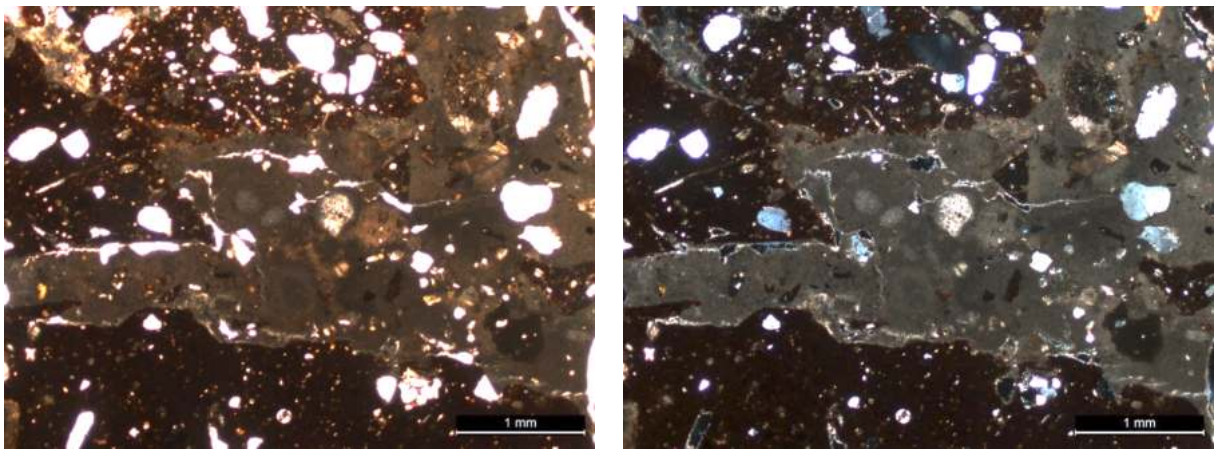

Figure 230 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant des cristaux de quartz et feldspaths de formes sub-émoussées à sub-angulaires (grossissement × 2.5)

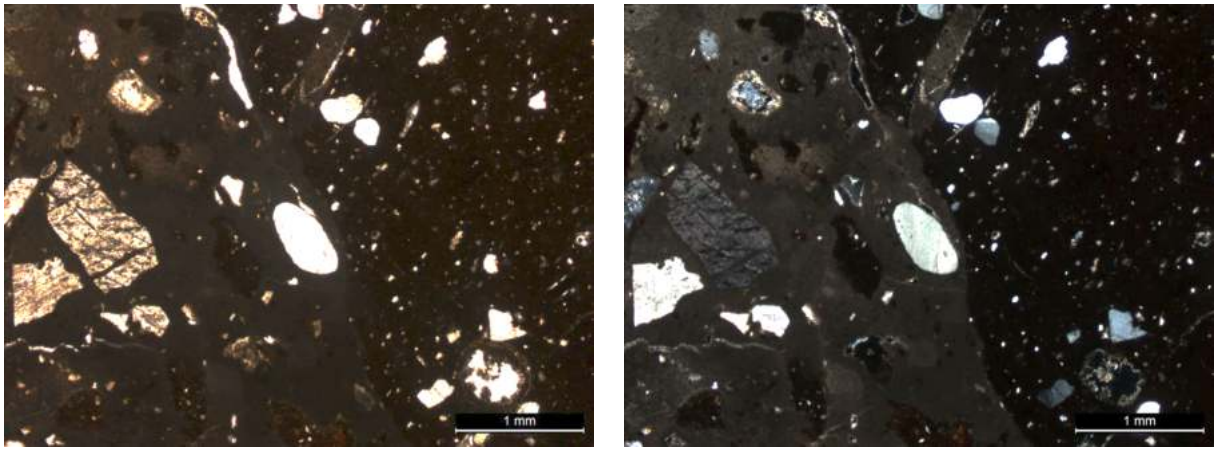

Figure 231 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

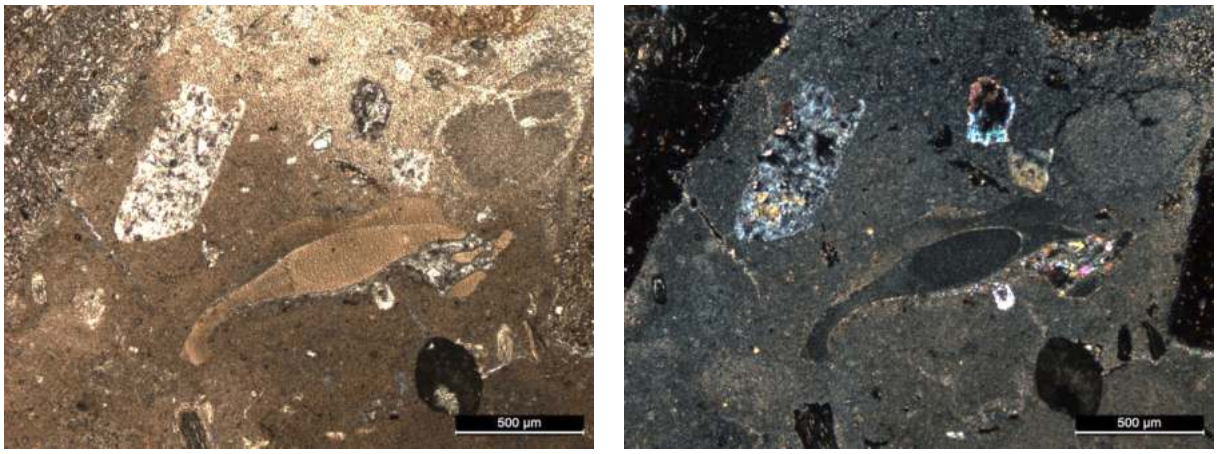

Figure 232 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant des bioclastes (Gastéropode et Bivalve) formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 5)

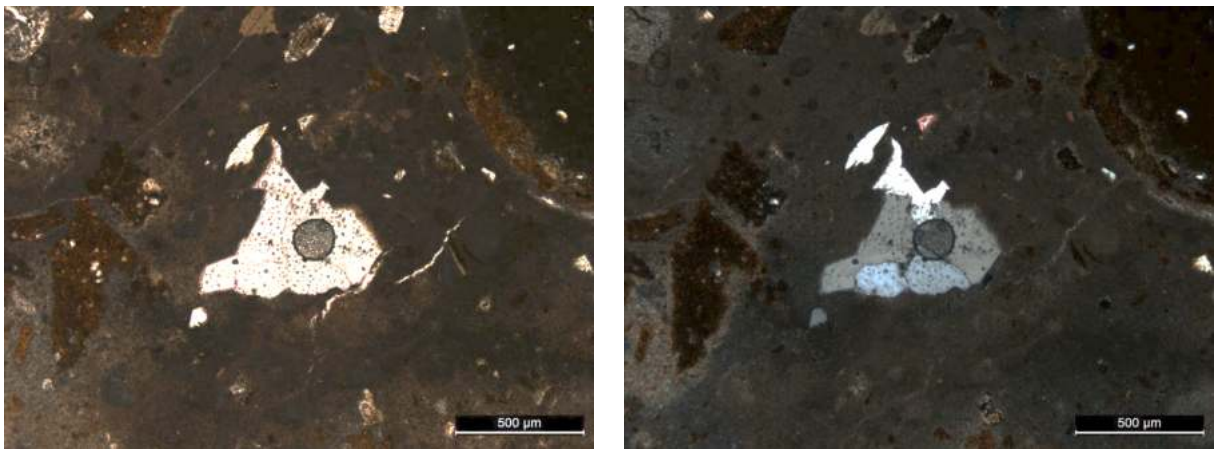

Figure 233 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant un fragment de granite de forme sub-angulaire mêlé à la charge (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations au microscope optique à CL montrent un liant homogène, avec la présence de nombreux nodules de chaux partiellement calcinés (3 %). On observe également des fragments de terres cuites de couleurs et de compositions minéralogiques différentes.

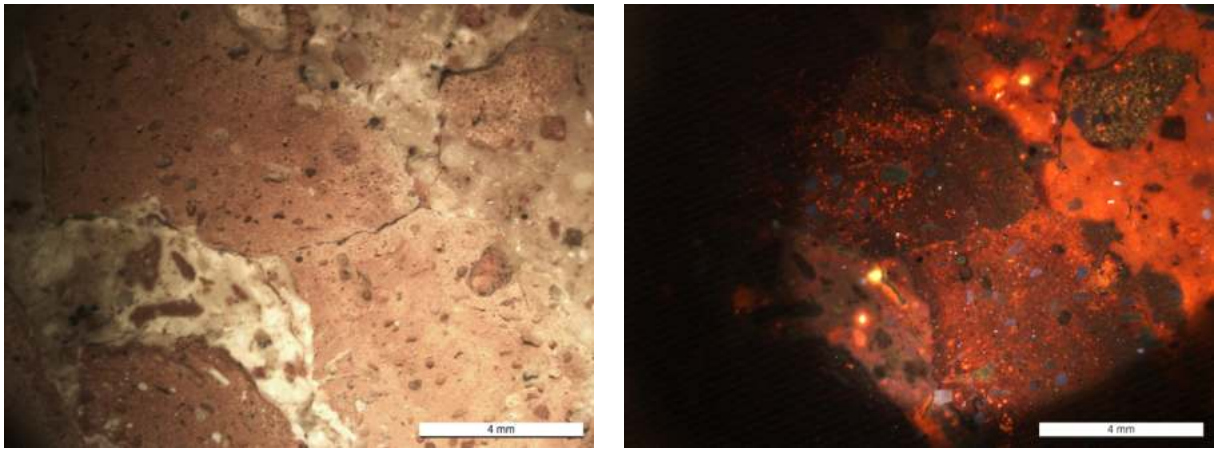

Figure 234 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22394 montrant des fragments de tuileau de compositions différentes (grossissement × 1)

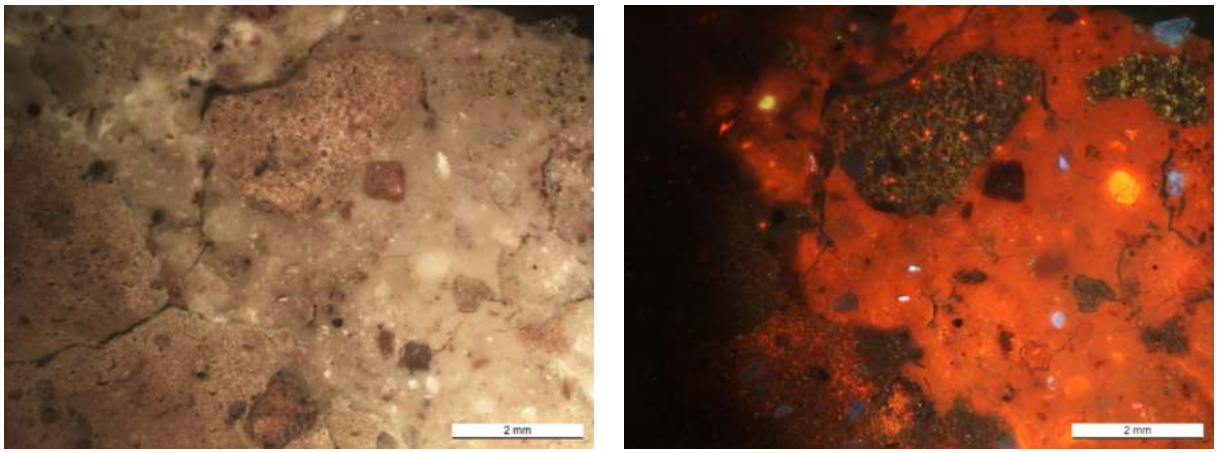

Figure 235 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22394 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.6)

FICHE 18 BDX22395

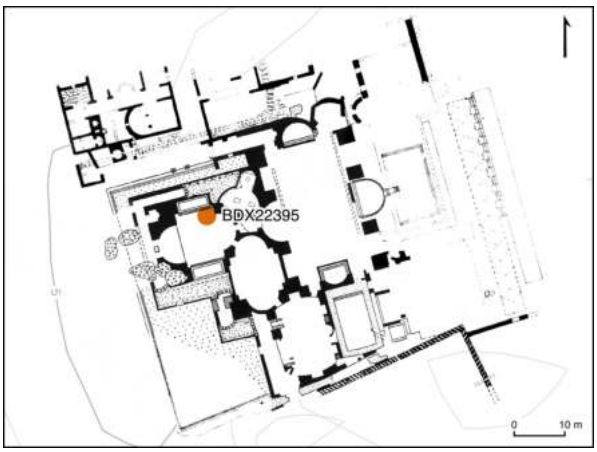

Figure 236 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22395 depuis l'hypocauste et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Pilettes d'hypocauste
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Hypocauste du c*aldarium*
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8847788760645, 7.74994846025232

L'échantillon BDX22395 a été prélevé depuis une pilette de l'hypocauste, qui se situe sous le grand *caldarium* des grands thermes du nord. Il a été choisi entre deux carreaux d'une pilette qui maintient en position la dalle de *suspensura*, laquelle n'a pas fait l'objet de travaux de consolidation lors de la campagne dirigée par Erwan Marec en 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Joint de carreaux de pilettes
Couleur : Rose clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 16 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose clair et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations réalisées au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition hétérogène, avec une importante quantité de nodules de chaux partiellement calcinés (10 %) ainsi qu'une porosité de formes sphériques (5 %) et oblongues (1 %). La charge est formée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène. Ce sable est composé de grains de formes sub-angulaires. Parmi ces grains, on retrouve des cristaux de quartz, des feldspaths, des micas, des cristaux de calcite, ainsi que de fragments lithiques d'origine plutonique, métamorphique, et détritique. Les inclusions comprennent une présence notable de fragments de tuileau (20 %), présentant une gamme variée de granularités allant de 0,2 à 2,8 mm.

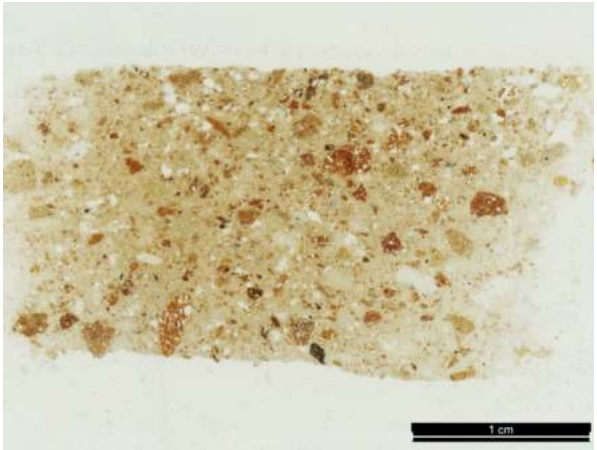

Figure 237 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22395 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.6 - 0.8	10	Sphérique	0.2 - 0.7	5
			Oblongue	0.7 - 1.0	1

Tableau 122 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22395

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 0.6	1	Hétérogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	2.4	< 1	Hétérogène
Arénite	Sédimentaire	Sub-émoussée	0.6	< 1	Hétérogène
Siltite	Sédimentaire	Émoussée	0.7	< 1	Hétérogène

Tableau 123 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22395

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.6	10	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.5	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.1 - 0.3	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.5 - 1.4	1	Homogène

Tableau 124 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22395

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 2.8	20	Homogène

Tableau 125 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22395

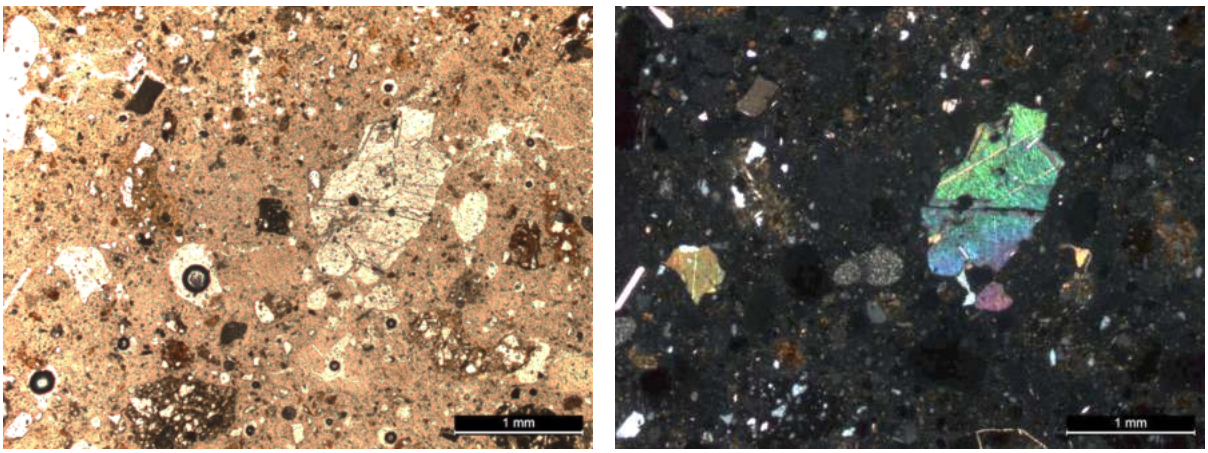

Figure 238 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant des fragments de marbre et de siltite présents dans la charge (grossissement × 2.5)

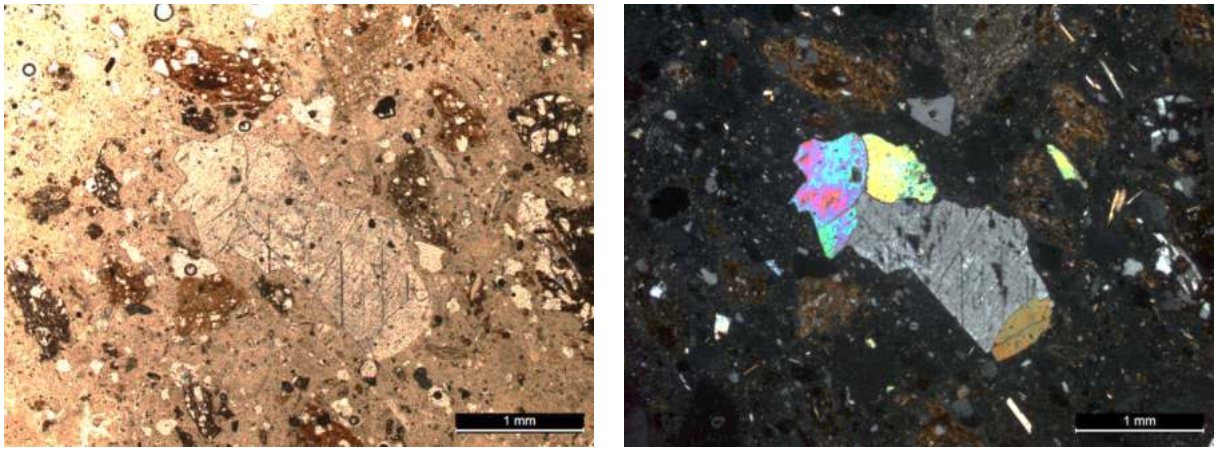

Figure 239 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant un fragment de marbre entouré de fragments de tuileau (grossissement × 2.5)

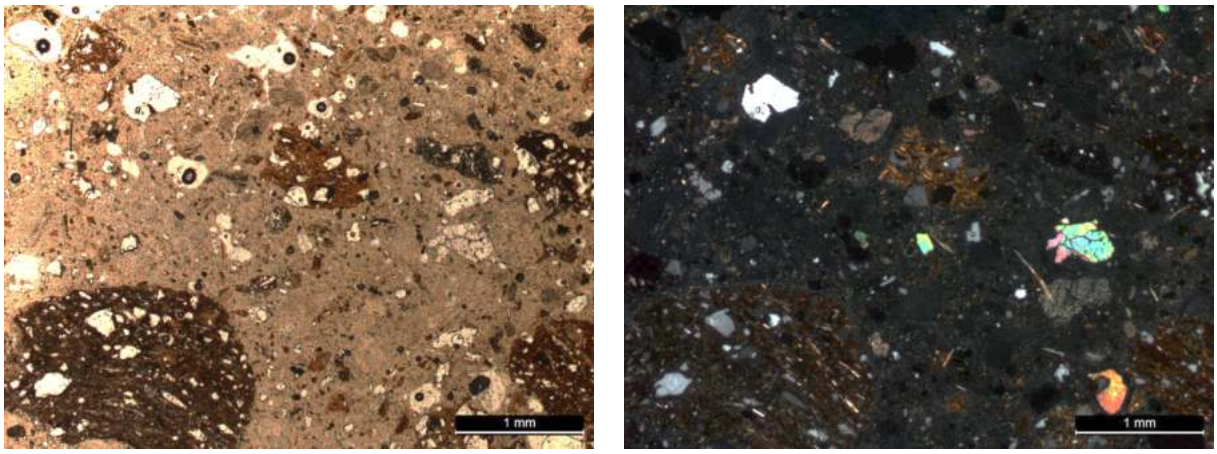

Figure 240 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant des cristaux de quartz, feldspaths, calcite et de micas dans la charge (grossissement × 2.5)

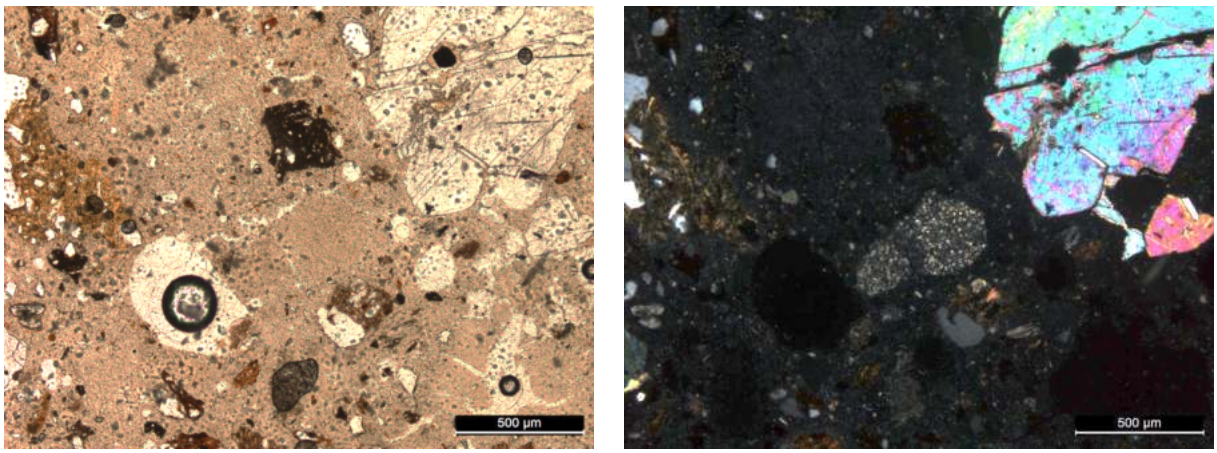

Figure 241 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant en détail un fragment de bioclaste partiellement calciné (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations au microscope optique à CL révèlent un liant hétérogène, avec une proportion significative de nodules de chaux partiellement calcinés (10 %). En outre, des fragments de terres cuites de diverses couleurs et compositions minéralogiques sont également observés.

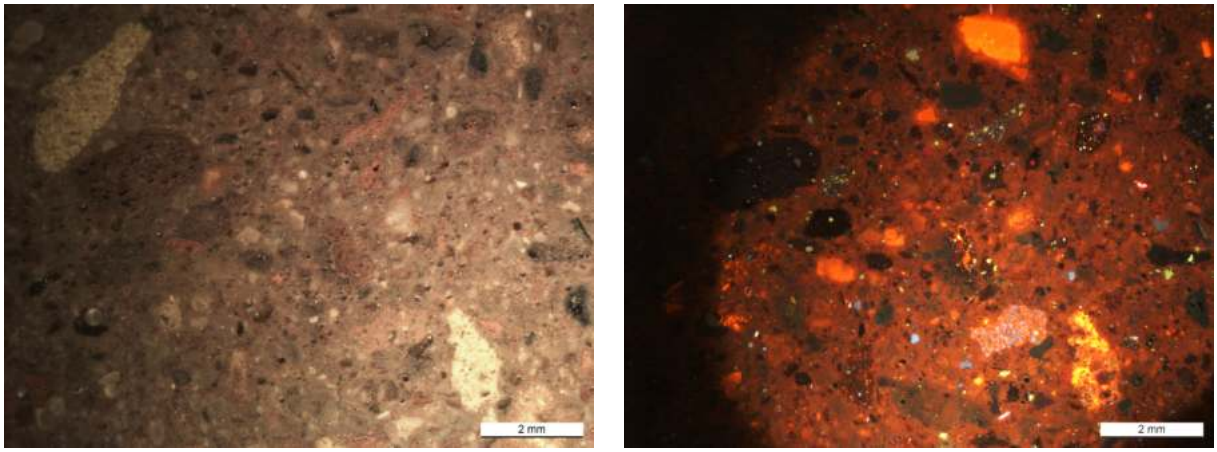

Figure 242 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22395 montrant une teneur élevée (10 %) de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 1.25)

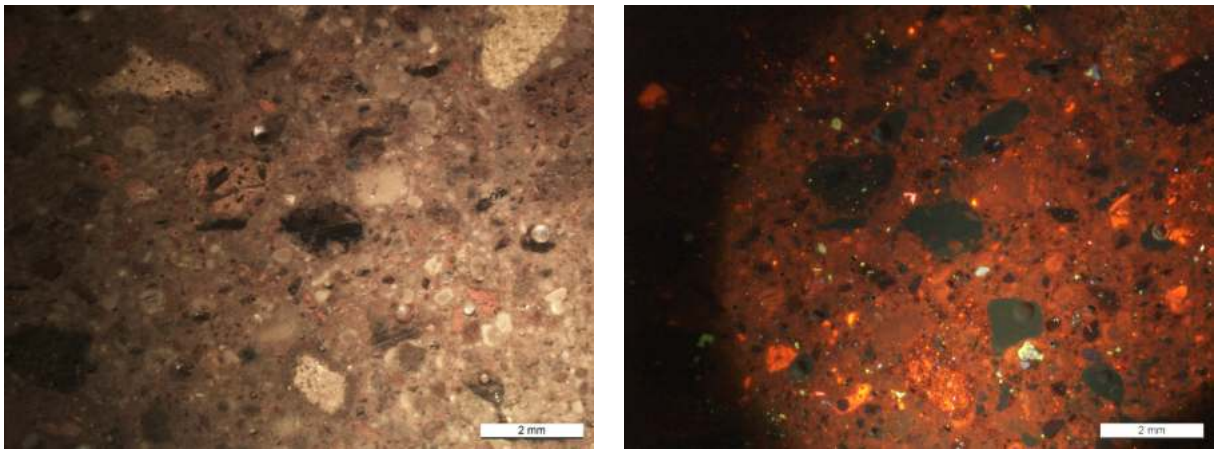

Figure 243 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22395 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

FICHE 19 BDX22396

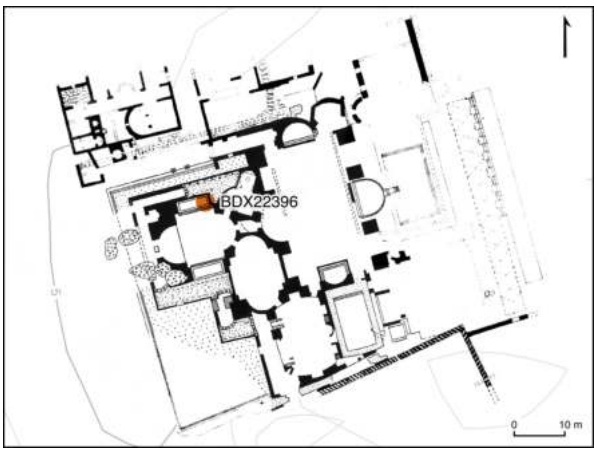

Figure 244 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22396 depuis une piscine chaude et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : *Piscina*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Piscine chaude (*alveus*)
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8848031699009, 7.74994477153559

L'échantillon BDX22396 a été prélevé depuis la piscine chaude, située au nord du grand caldarium des grands thermes du nord. Le prélèvement a été réalisé dans le bourrelet d'étanchéité qui n'a subi aucune altération lors de la campagne de consolidation conduite en 1954 sous la direction d'Erwan Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Bourrelet d'étanchéité
Couleur : Rose clair
Résistance apparente : Moyenne
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est composé d'une seule couche et possède une épaisseur d'environ 40 mm. Il présente un liant de couleur rose clair et une texture sablo-granuleuse, avec une distribution hétérogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen au microscope optique révèle un liant de composition hétérogène, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (3 %), ainsi qu'une porosité se manifestant sous des formes oblongues (5 %) et sphériques (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, comportant des grains de formes sub-angulaires. Ces grains sont principalement des quartz, des feldspaths, des cristaux de calcite, ainsi que des fragments lithiques d'origines plutonique et métamorphique. Les fragments de tuileau, fortement présents dans le mélange (20 %), présentent une gamme variée de granularité, s'étendant de 0,3 à 6 mm.

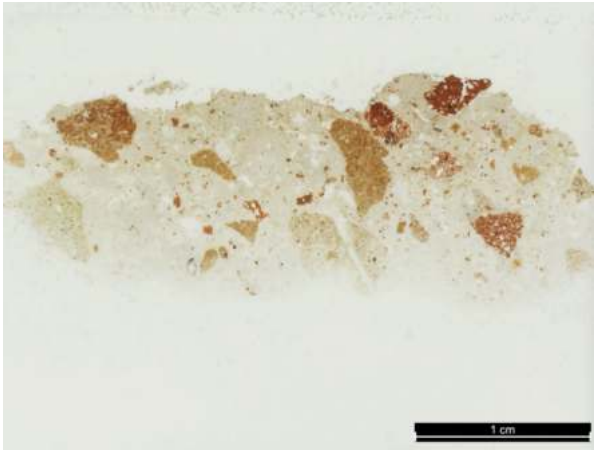

Figure 245 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22396 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.3 - 1.0	3	Oblongue	0.2 - 1.4	5
			Sphérique	0.1 - 0.4	3

Tableau 126 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22396

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 0.6	< 1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	1.2	< 1	Hétérogène

Tableau 127 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22396

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 1.5	5	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.2	3	Homogène

Tableau 128 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22396

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 6.0	20	Homogène

Tableau 129 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22396

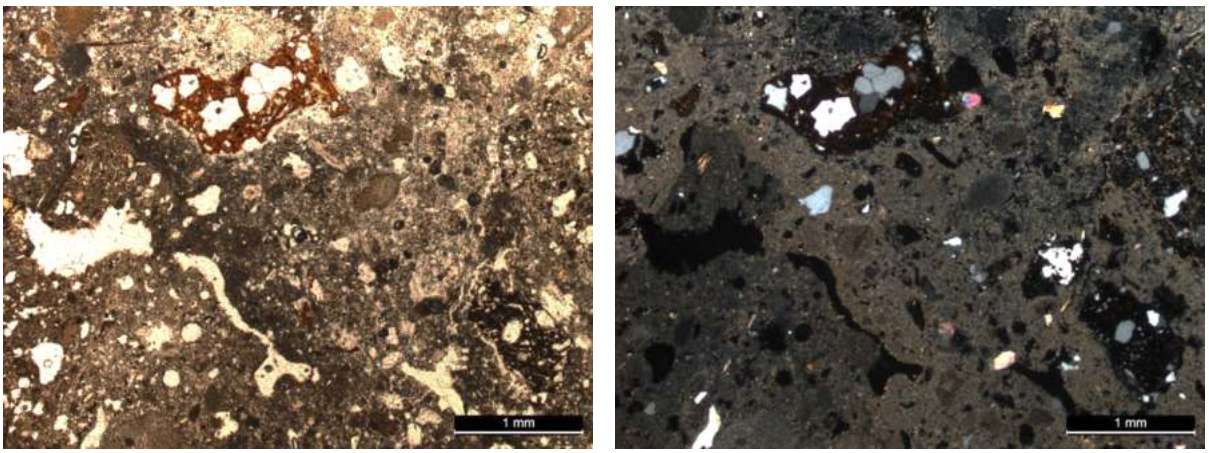

Figure 246 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22396 montrant la présence d'une porosité élevée (10 %) dans le liant (grossissement × 2.5)

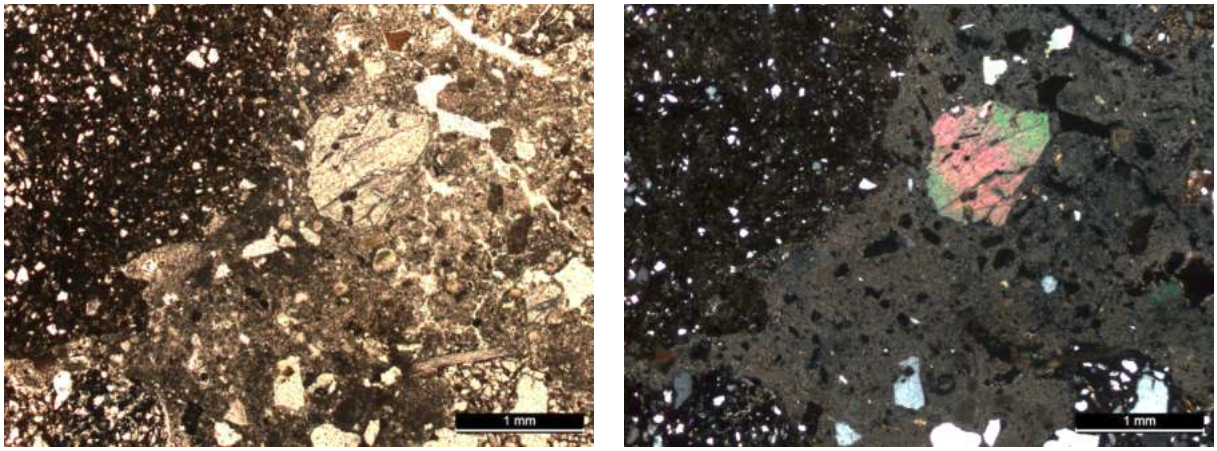

Figure 247 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22396 montrant un phénocristal de calcite présent dans la charge (grossissement × 2.5)

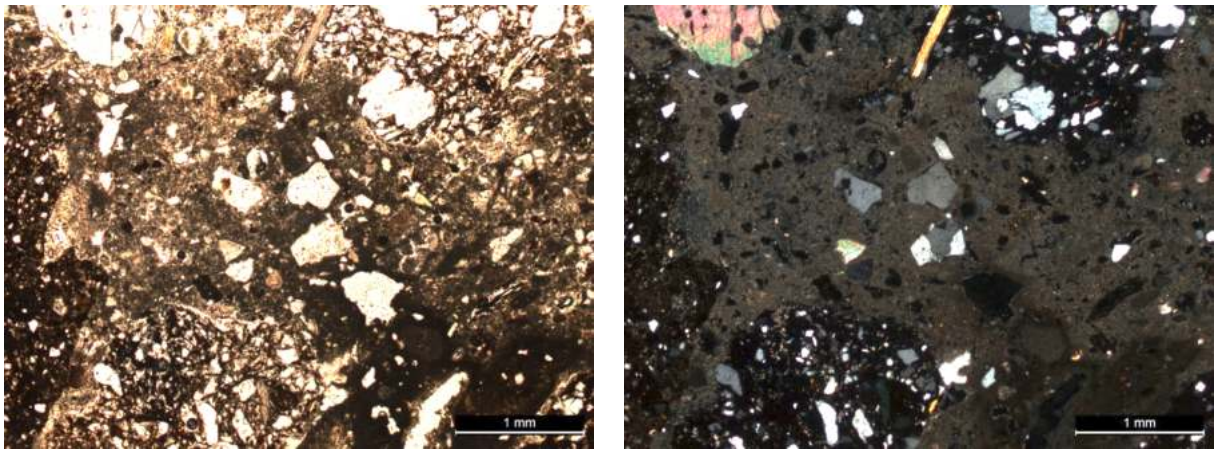

Figure 248 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22396 montrant des cristaux de quartz, de calcite et de feldspaths alcalins ainsi que des micro-fragments de granite présents dans la charge (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de nature hétérogène, ponctué par de nombreux nodules de chaux partiellement calcinés (3 %). Des fragments de terres cuites sont également observés, lesquels montrent des matrices argileuses aux couleurs variées (allant du rose clair au rouge brique) et aux compositions minéralogiques hétérogènes. Certains fragments présentent un dégraissant riche en cristaux très fins de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et de calcite (luminescence orange), tandis que d'autres fragments révèlent un dégraissant riche en fins cristaux de feldspaths plagioclases (luminescence verte).

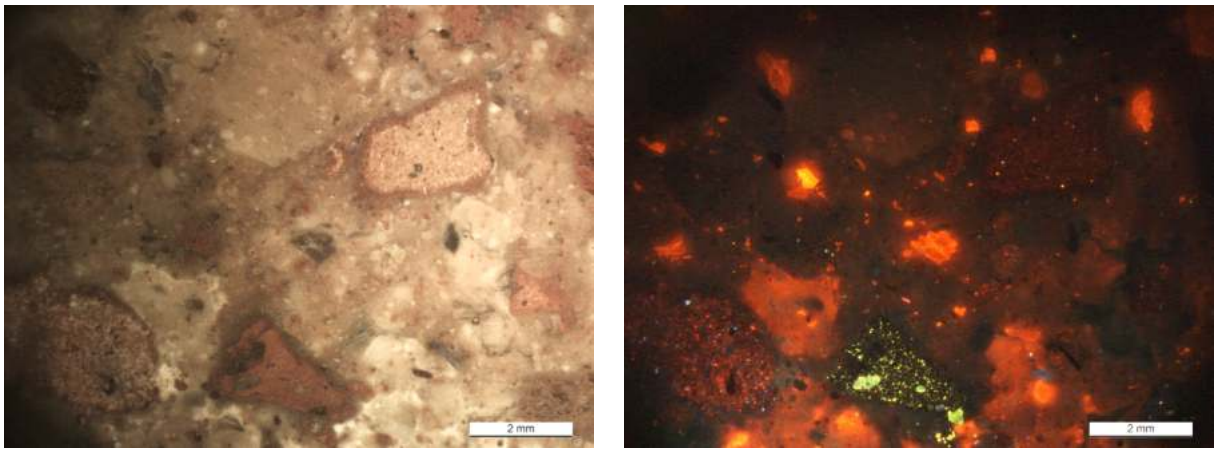

Figure 249 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22396 montrant des fragments de tuileau de compositions différentes (grossissement × 1.25)

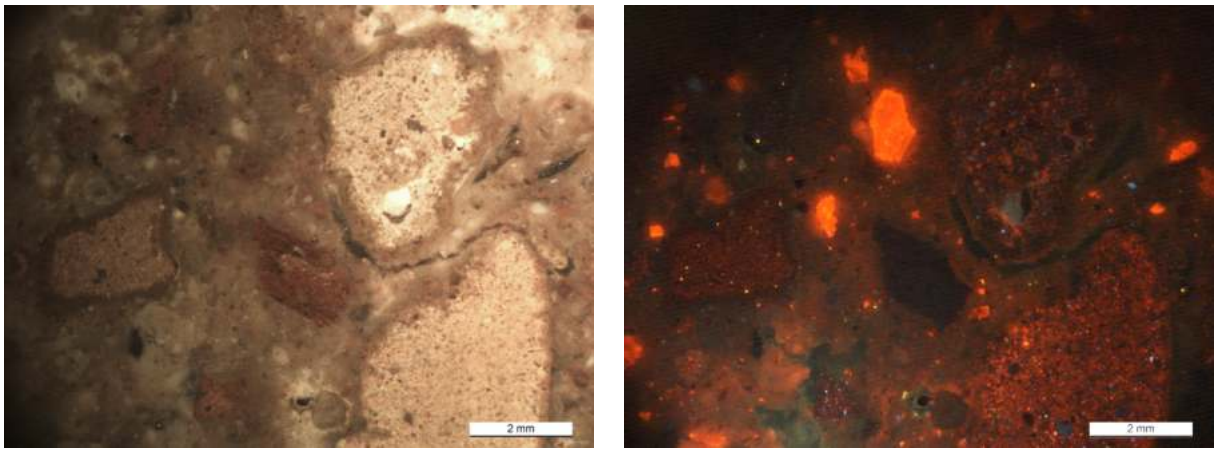

Figure 250 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22396 montrant des nodules de chaux partiellement calcinés et des cristaux de calcite (grossissement × 1.25)

FICHE 20 BDX22397

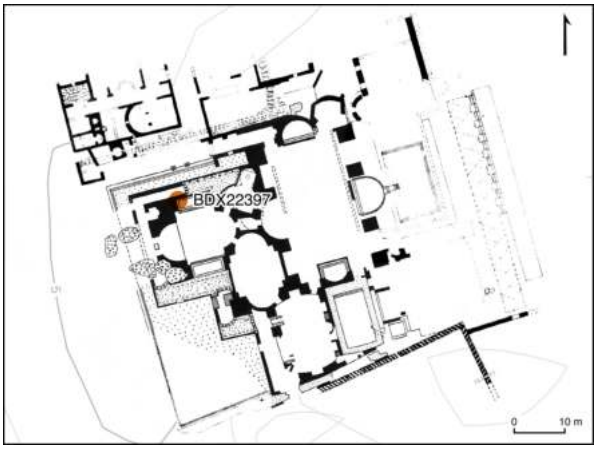

Figure 251 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22397 depuis une piscine chaude et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : *Piscina*
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Piscine chaude (*alveus*)
Date de prélèvement : 14/11/2018
Coordonnées : 36.8848014746867, 7.7498842168773

L'échantillon BDX22397 a été prélevé depuis l'enduit mural de la piscine chaude, au nord du grand *caldarium* des grands thermes du nord. L'enduit romain est authentique et n'a pas été altéré lors de la campagne de consolidation dirigée par Erwan Marec en 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit d'étanchéité
Couleur : Rose clair ; Beige clair
Résistance apparente : Faible
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment d'enduit est composé de deux couches : une couche de finition, d'une épaisseur d'environ 8 mm et présentant une teinte rose clair, et une couche de préparation, mesurant environ 22 mm d'épaisseur avec une couleur beige clair.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen au microscope optique polarisant révèle un liant de composition hétérogène, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (5 %), ainsi qu'une porosité de formes sphériques (5 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire, avec des grains de formes sub-angulaires. Les composants principaux du sable incluent des cristaux de quartz, des feldspaths alcalins, des cristaux de calcite et des fragments lithiques. Les inclusions de tuileau, quant à elles, sont de petit calibre (allant jusqu'à 2,3 mm) et abondantes (20 %) dans la couche de finition, tandis qu'elles sont de calibre plus important (jusqu'à 11 mm) et sont moins présentes (10 %) dans la couche de préparation.

Figure 252 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22397 montrant deux matrices de couleurs rose clair et beige clair et une charge non tamisée dans les deux couches de l'enduit

BDX22397a : Couche de finition (8 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.4 - 2.3	5	Sphérique	0.1 - 0.5	5
			Oblongue	0.1 -0.5	3

Tableau 130 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22397a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	1.3	< 1	Hétérogène
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 131 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22397a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Sub-angulaire	0.1 - 1.7	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	3	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.3	1	Homogène

Tableau 132 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22397a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.1 - 2.3	20	Homogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	2.2 - 2.5	1	Hétérogène

Tableau 133 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22397a

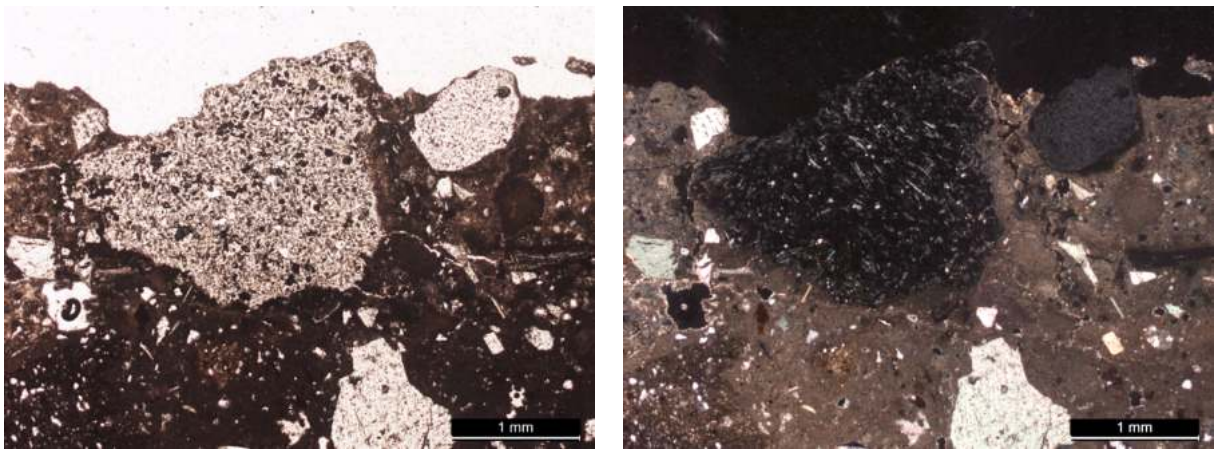

Figure 253 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant un pyroclaste trachytique composé de microlithes alcalins inclus dans une matrice vitreuse (grossissement × 2.5)

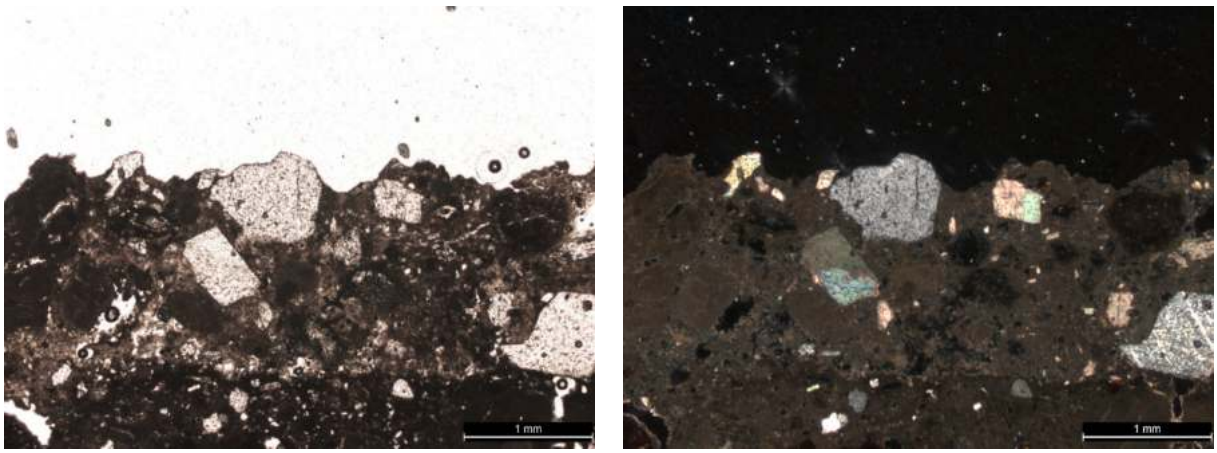

Figure 254 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant des cristaux de calcite, feldspaths et quartz présents dans la charge (grossissement × 2.5)

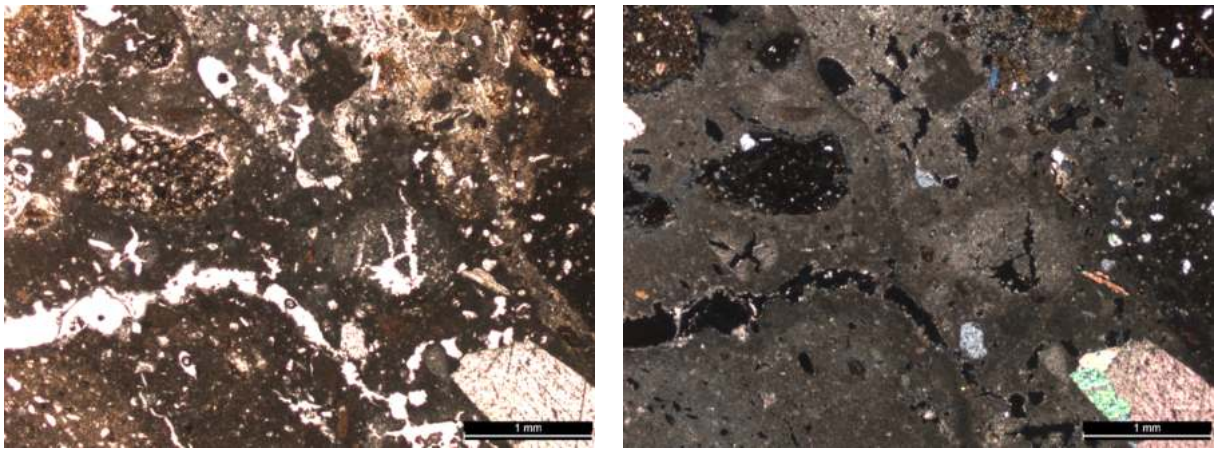

Figure 255 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant (grossissement × 2.5)

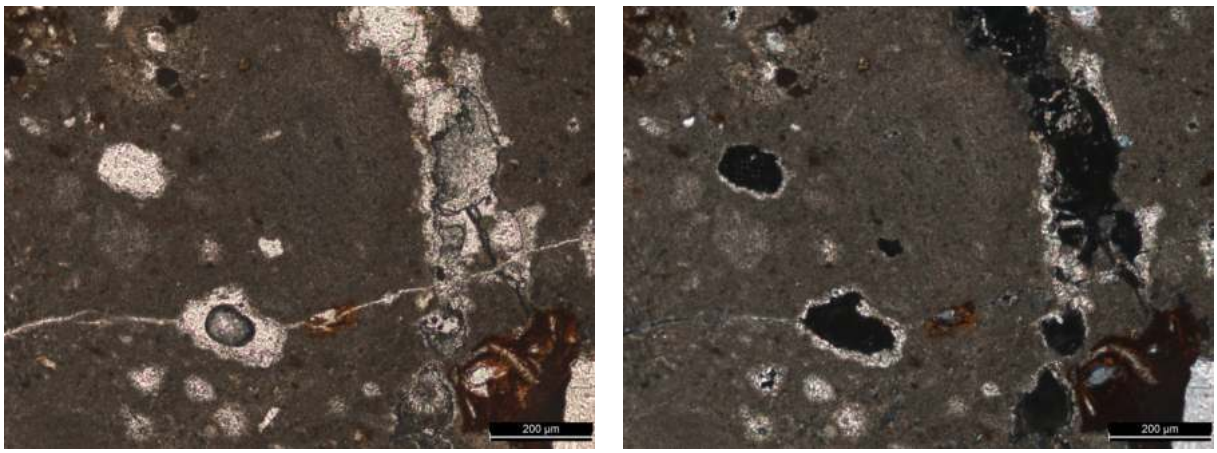

Figure 256 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant des dépôts secondaires de cristaux de calcite dans les pores (grossissement × 10)

BDX22397b : Couche de préparation (22 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.1 - 0.7	5	Sphérique	0.1 - 2.0	5
			Oblongue	0.3 - 1.7	3

Tableau 134 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22397b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.3	< 1	Hétérogène

Tableau 135 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22397b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 0.8	3	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.5	1	Homogène

Tableau 136 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22397b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.5 - 11	10	Homogène
Fragment de mortier		3.6	< 1	Hétérogène

Tableau 137 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22397b

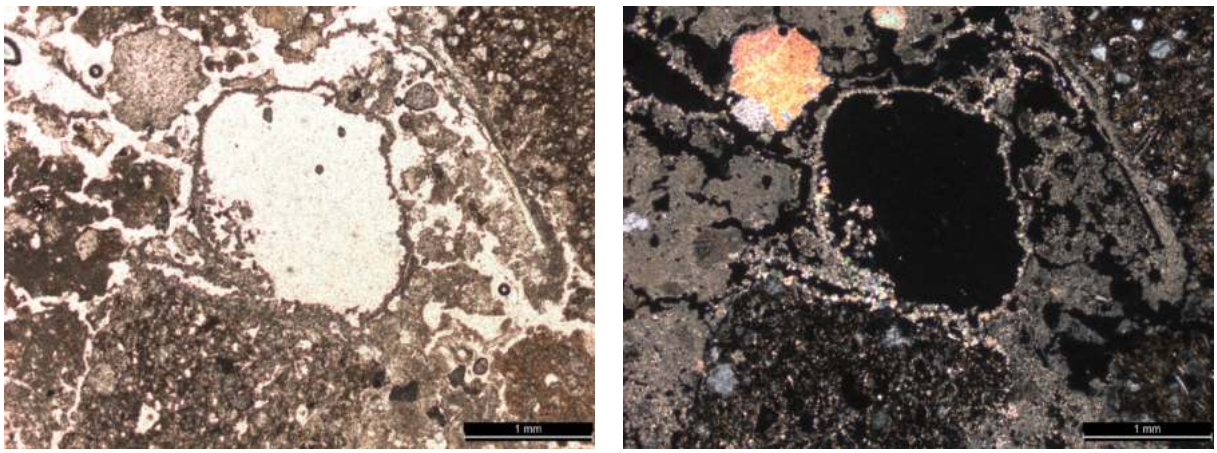

Figure 257 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant un phénocristal de calcite et des interstices de forme sphérique (grossissement × 2.5)

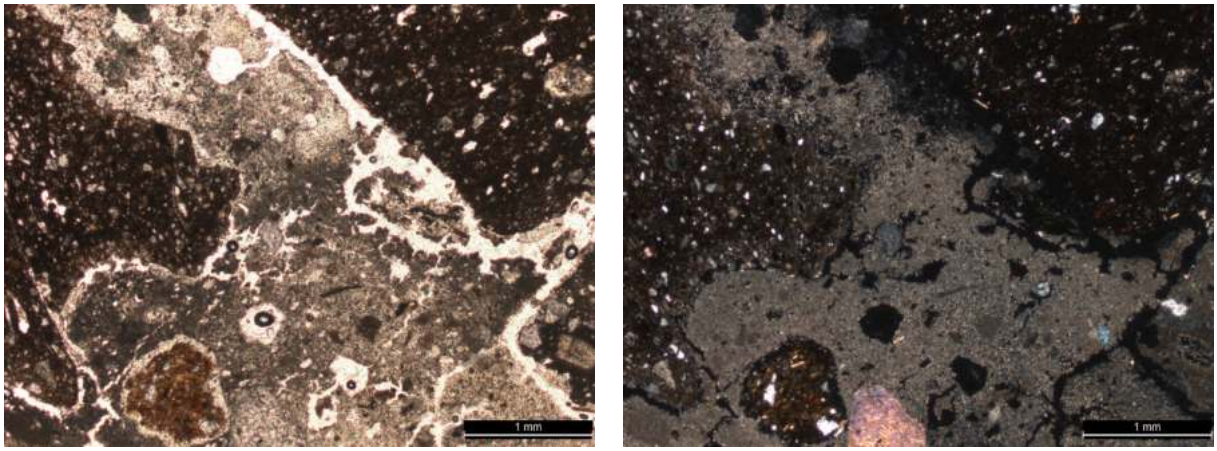

Figure 258 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant la présence d'une porosité moyenne (5 %) de forme sphérique (grossissement × 2.5)

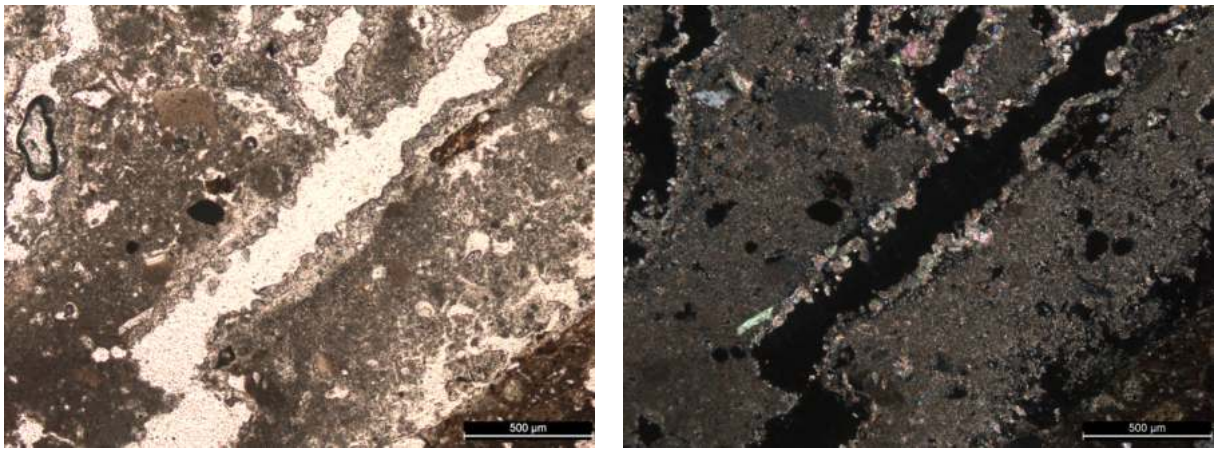

Figure 259 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant des dépôts secondaires de calcite dans les pores (grossissement × 5)

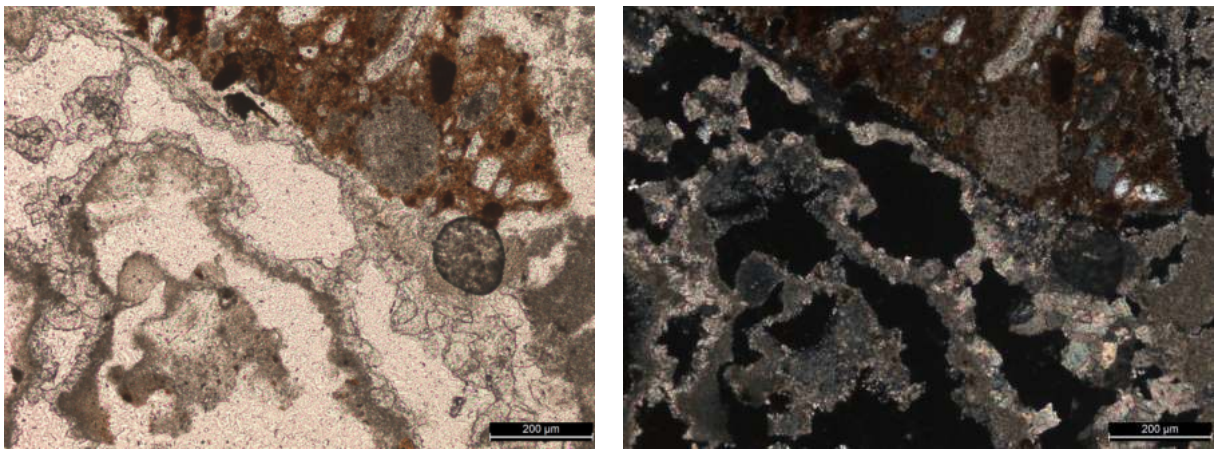

Figure 260 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant en détail les dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à CL révèlent un liant hétérogène composé de chaux carbonatée (une luminescence orange), avec des nodules de chaux partiellement calcinés. Les observations révèlent également la présence de cristaux et de fragments lithiques dans la charge, caractérisés par des formes sub-angulaires. On observe notamment des cristaux de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et des cristaux de calcite (luminescence orange). Ces derniers sont particulièrement abondants (10 %) dans la couche de finition. D'autre part, l'examen de l'échantillon au microscope électronique à balayage (MEB) met en évidence des fragments pyroclastiques dans la couche de finition, qui sont caractérisés par une matrice vitreuse fortement microporeuse. Les analyses élémentaires de ces fragments pyroclastiques, réalisées avec la microsonde EDS, indiquent des concentrations de SiO_2 variant entre 61,12 et 61,56 % pds et des concentrations de $Na_2O + K_2O$ oscillant entre 12,08 et 12,48 % pds. Ces données nous ont permis d'identifier la nature trachytique des fragments de roches volcaniques grâce au diagramme Total Alkali Silica (TAS).

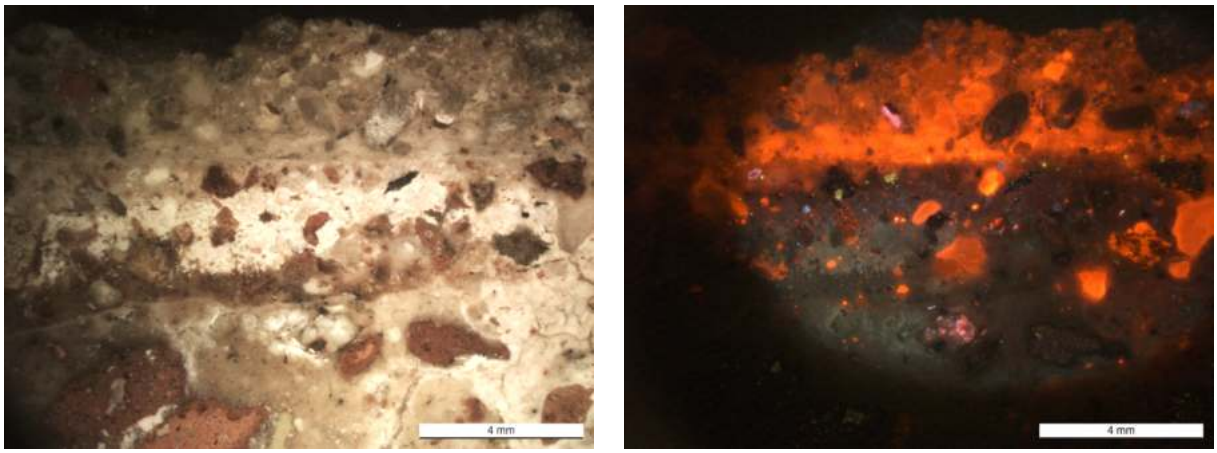

Figure 261 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22397 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

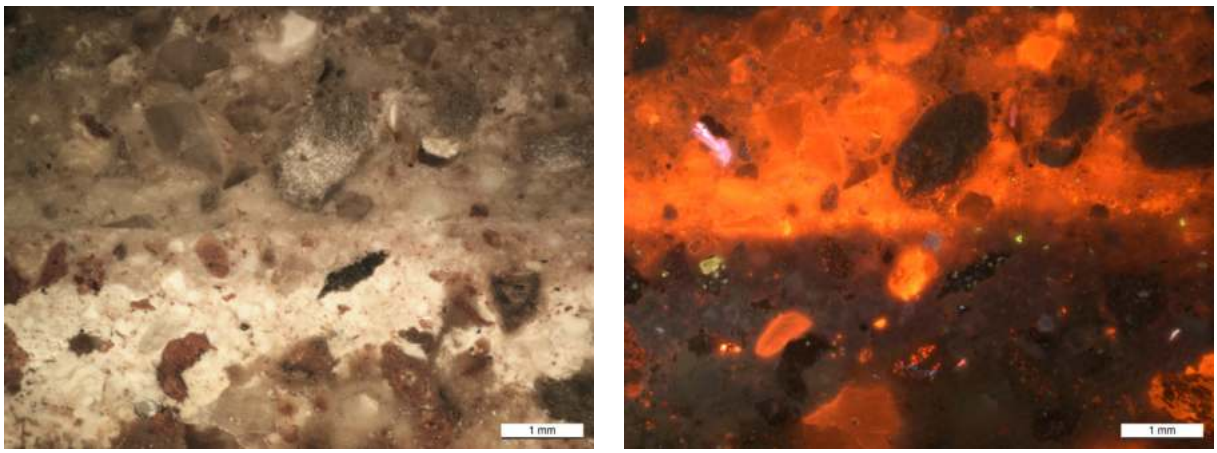

Figure 262 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22397a montrant un pyroclaste trachytique et une répartition hétérogène des carbonates (grossissement × 2)

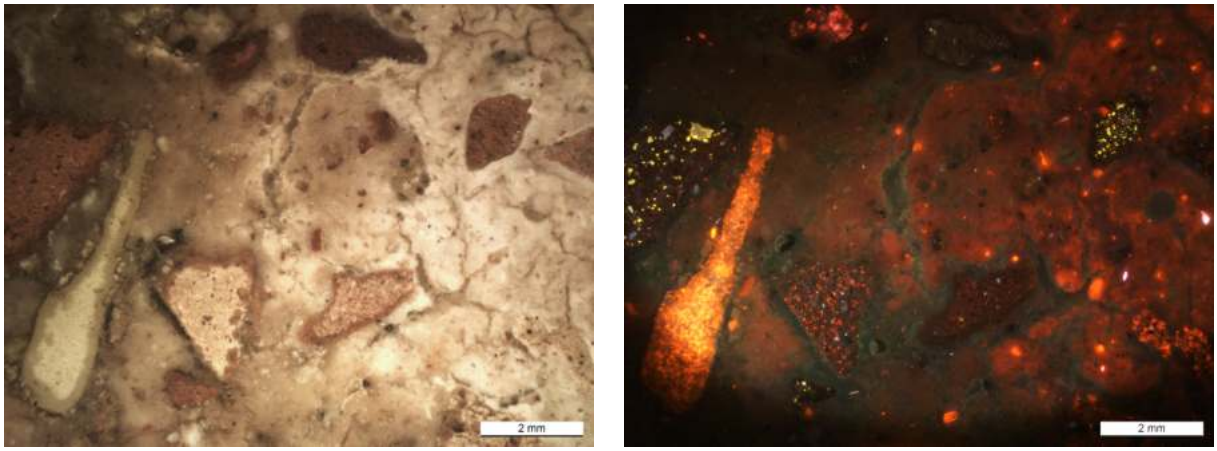

Figure 263 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22397b des fragments de tuileau de compositions minéralogiques différentes (grossissement × 1.25)

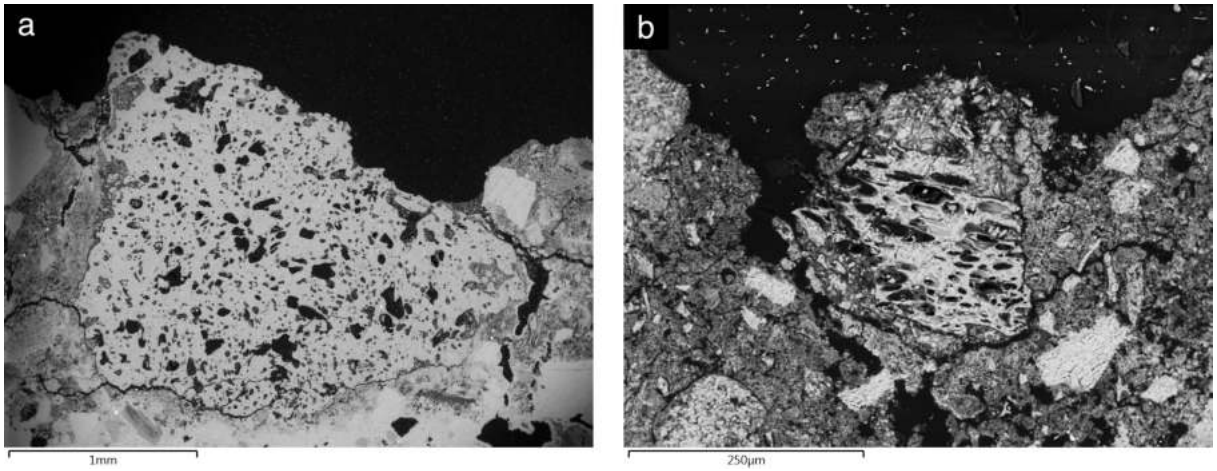

Figure 264 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22397 montrant (a) un fragment de roche volcanique (trachyte) avec une microporosité sphérique ; (b) un fragment pyroclastique trachytique avec une microporosité oblongue

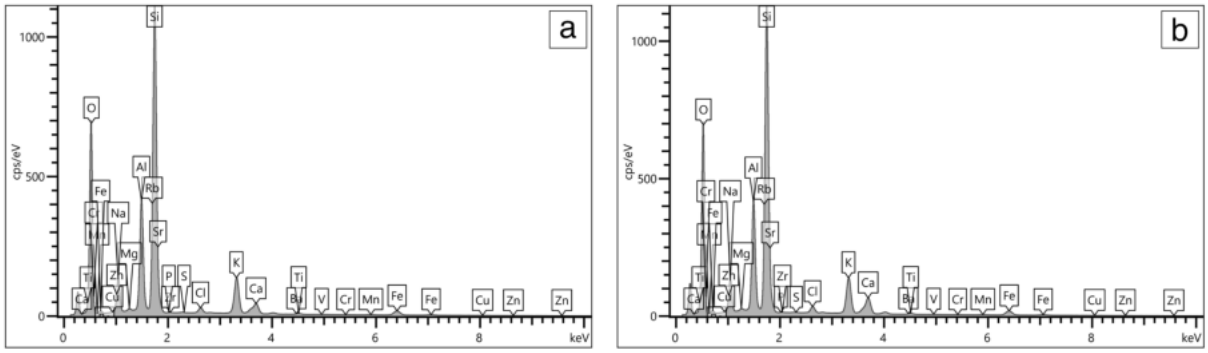

Figure 265 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22397 montrant la composition élémentaire de : (a) fragment de roche volcanique avec une teneur en SiO_2 de 61,56 % pds et une teneur en NaO_2 + K_2O de 12,48 % pds ; (b) un fragment de ponce trachytique avec une teneur en SiO_2 de 61,12 % pds et une teneur en NaO_2 + K_2O de 12,08 % pds

FICHE 21 BDX22398

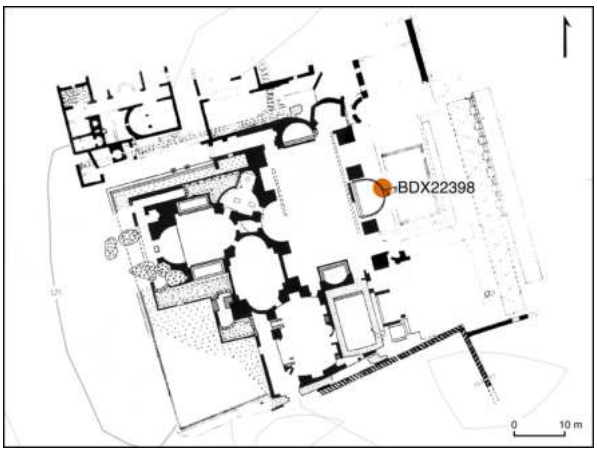

Figure 266 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22398 depuis la piscine froide et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius* **Élément :** *Piscina*
Structure : Grands thermes du nord **Datation :** 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Piscine froide dallée de marbre **Date de prélèvement :** 15/11/2018
Coordonnées : 36.8849034669785, 7.75039009554726

L'échantillon BDX22398 a été prélevé à partir du bourrelet d'étanchéité de la piscine froide dallée de marbre, située dans les grands thermes du nord. Ce prélèvement a été réalisé sur un fragment qui n'a pas été altéré lors de la campagne de consolidation conduite en 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier **Nature du liant :** Chaux
Fonction : Bourrelet d'étanchéité **Couleur :** Rose clair
Résistance apparente : Élevée **Texture :** Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 80 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose clair et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope optique révèlent un liant de composition hétérogène, avec une quantité relativement importante de nodules de chaux non mélangés (20 %) et partiellement calcinés (3 %), ainsi qu'une porosité présentant des formes sphériques (5 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est principalement composé de quartz, de feldspaths, de cristaux de calcite et de fragments de granite. Parmi les inclusions, on observe une présence significative de fragments de tuileau (10 %), avec une granularité variée (0,1 à 7 mm), ainsi que des fragments pyroclastiques (5 %) de nature trachytique, qui sont accompagnés de phénocristaux de sanidine, certains étant dispersés au sein de la charge.

Figure 267 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22398 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.5 - 2.6	20	Sphérique	0.1 - 0.7	5
Partiellement calcinés	0.8 - 1.2	3	Oblongue	0.8 - 1.7	3

Tableau 138 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22398

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.5 - 1.2	1	Homogène

Tableau 139 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22398

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	5	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 0.8	3	Homogène
Sanidine	Sub-angulaire	0.3 - 0.9	1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.3 - 0.7	1	Homogène

Tableau 140 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22398

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.1 - 7.0	10	Homogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.9 - 4.9	5	Homogène

Tableau 141 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22398

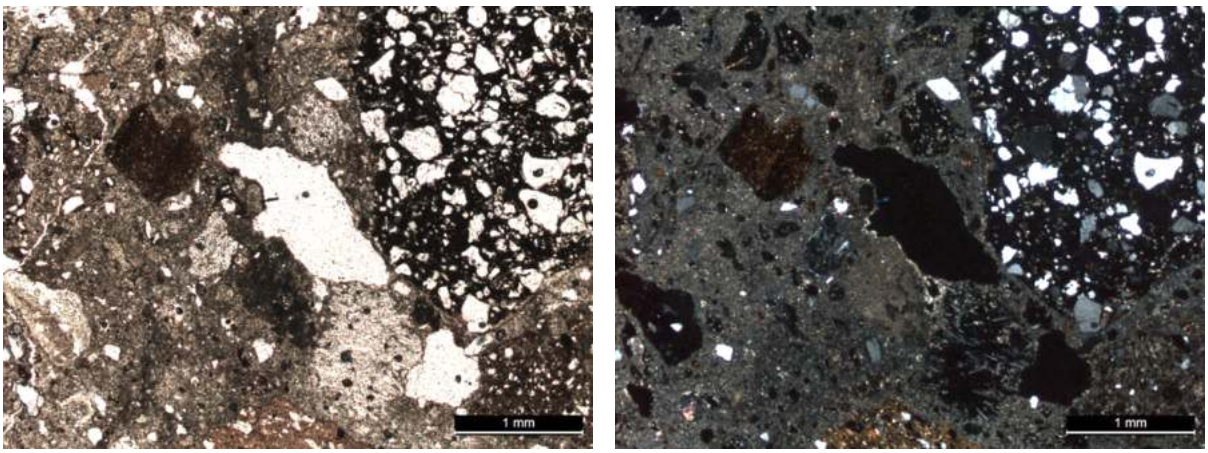

Figure 268 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant des fragments de tuileau et de pyroclastes trachytiques (grossissement × 2.5)

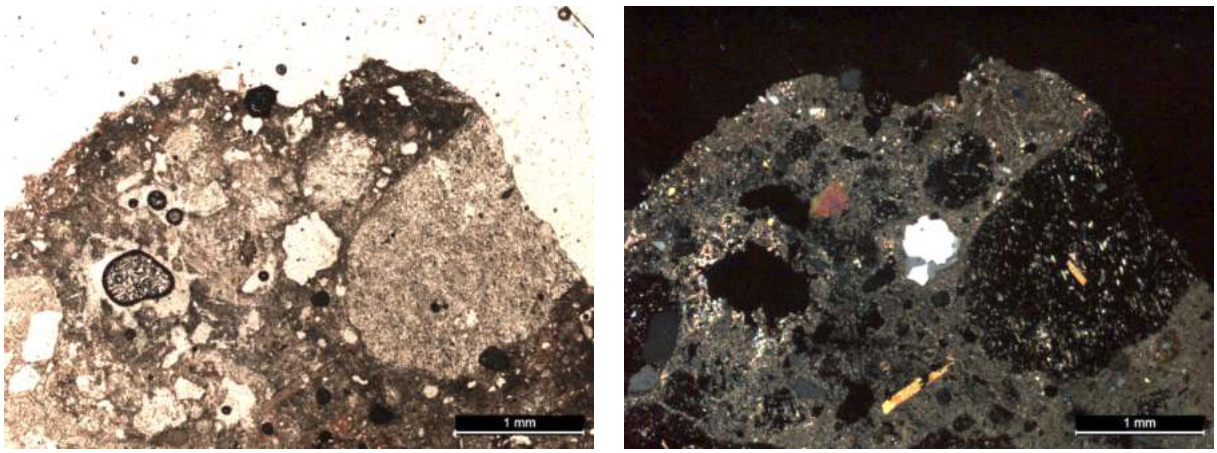

Figure 269 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant une charge constituée d'un sable silico-calcaire avec la présence de cristaux de quartz, feldspaths, micas (biotite) et des cristaux de calcite (grossissement × 2.5)

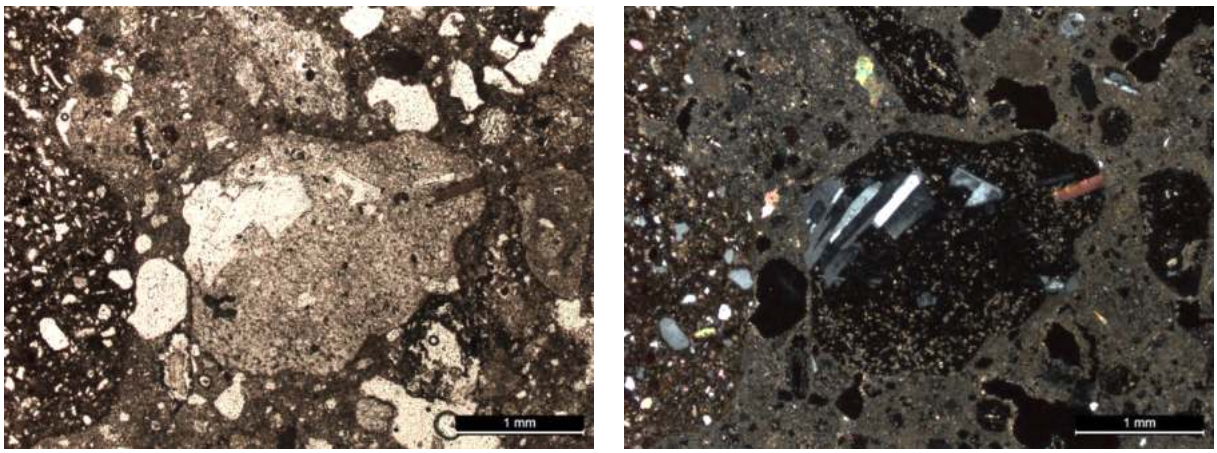

Figure 270 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant un pyroclaste trachytique de forme émoussée présentant une matrice vitreuse avec des inclusions de phénocristaux de sanidine (grossissement × 2.5)

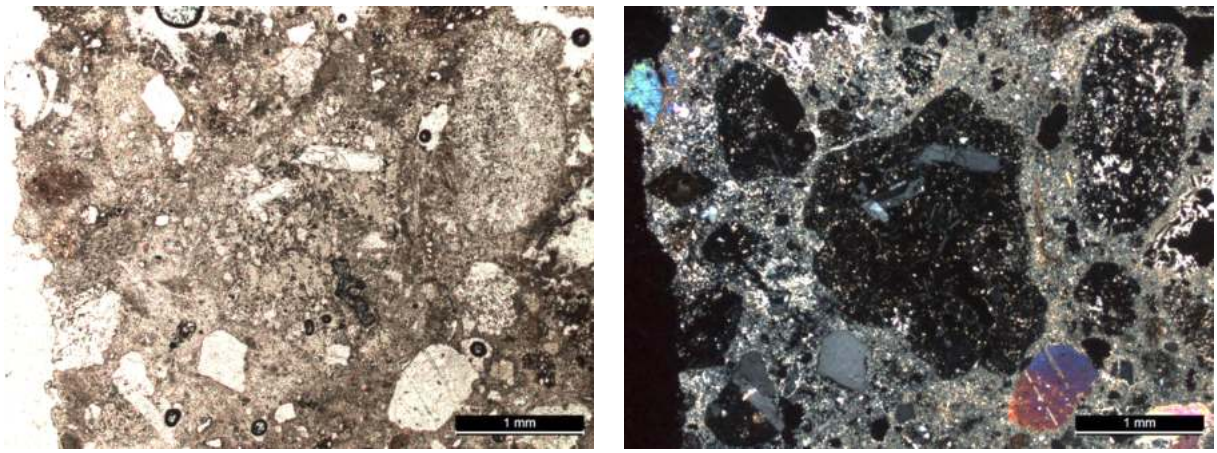

Figure 271 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant plusieurs fragments de roches pyroclastiques avec des phénocristaux de sanidine et des microlithes inclus dans une matrice vitreuse (grossissement × 2.5)

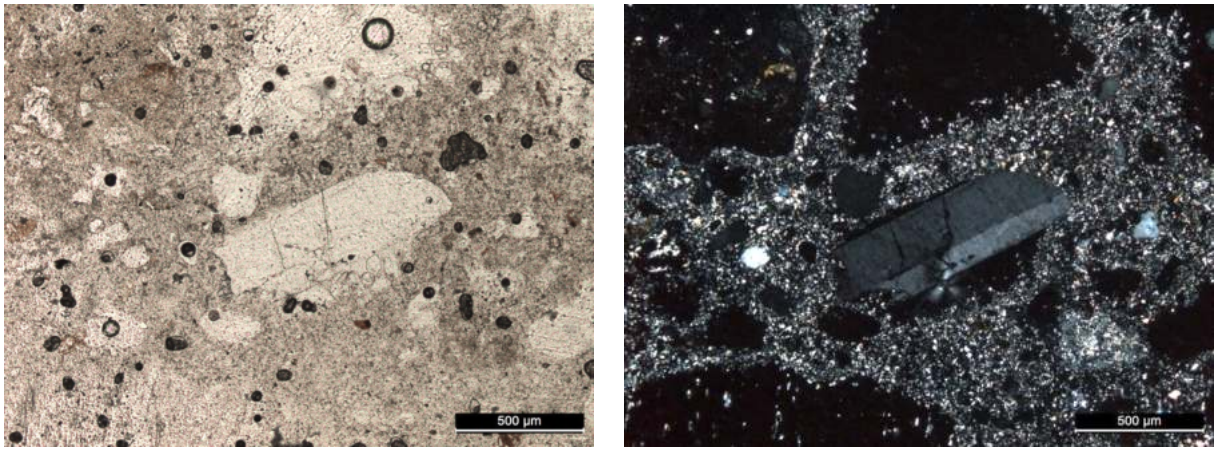

Figure 272 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant un phénocristal de sanidine dispersé dans la charge (grossissement × 5)

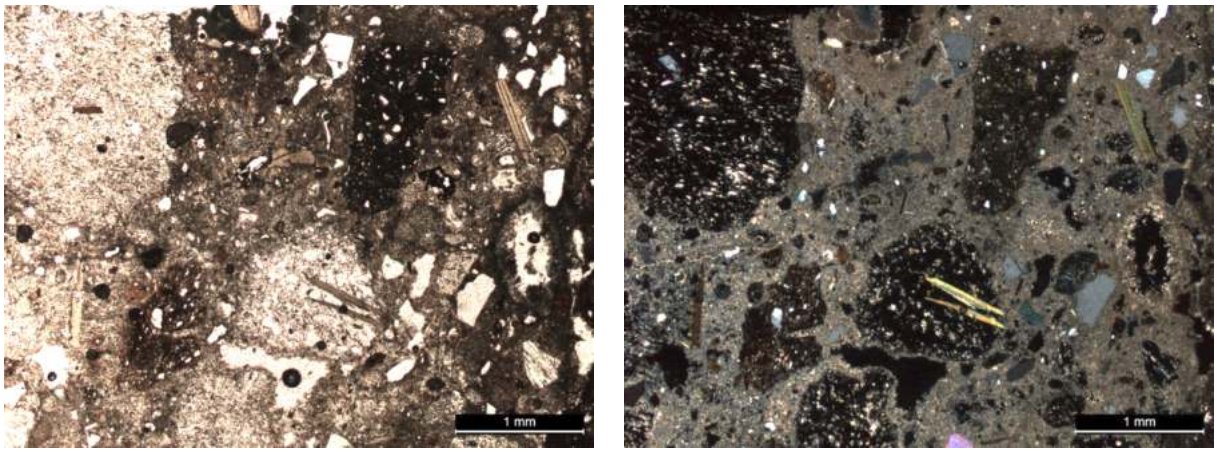

Figure 273 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant la présence d'une porosité élevée (10 %) dans le liant avec des pores de formes sphériques et oblongues (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de composition hétérogène (luminescence orange), avec des nodules de chaux non mélangés (20 %) et partiellement calcinés (3 %). Parmi les éléments constitutifs du sable silico-calcaire, on note la présence de cristaux de quartz (luminescence mauve), de cristaux de calcite (luminescence orange), ainsi que des feldspaths alcalins et des phénocristaux de sanidine (luminescence bleu clair). Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) permettent de voir en détail les fragments pyroclastiques. Ces derniers sont constitués d'une matrice vitreuse présentant une microporosité élevée et incluant des phénocristaux de sanidine. Les analyses élémentaires des fragments pyroclastiques, réalisées avec la microsonde EDS, montrent des concentrations en SiO_2 variant entre 60,73 et 65,48 % pds et des concentrations en Na_2O + K_2O comprises entre 12,12 et 12,92 % pds. Ceci nous a permis de déterminer la nature trachytique des fragments de roches volcaniques à l'aide du diagramme Total Alkali Silica (TAS).

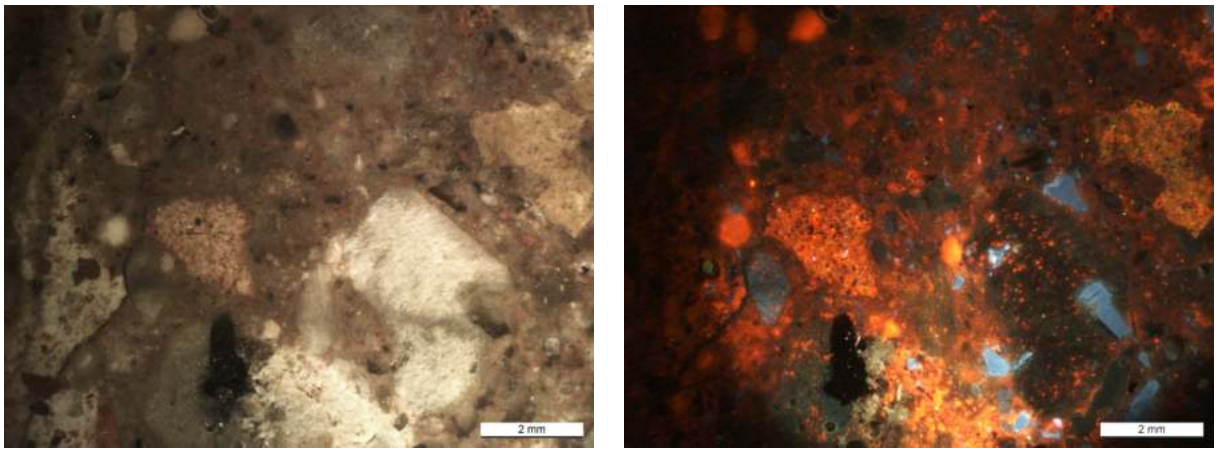

Figure 274 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22398 montrant des phénocristaux de sanidine dispersés dans le liant entièrement carbonaté (grossissement × 1.25)

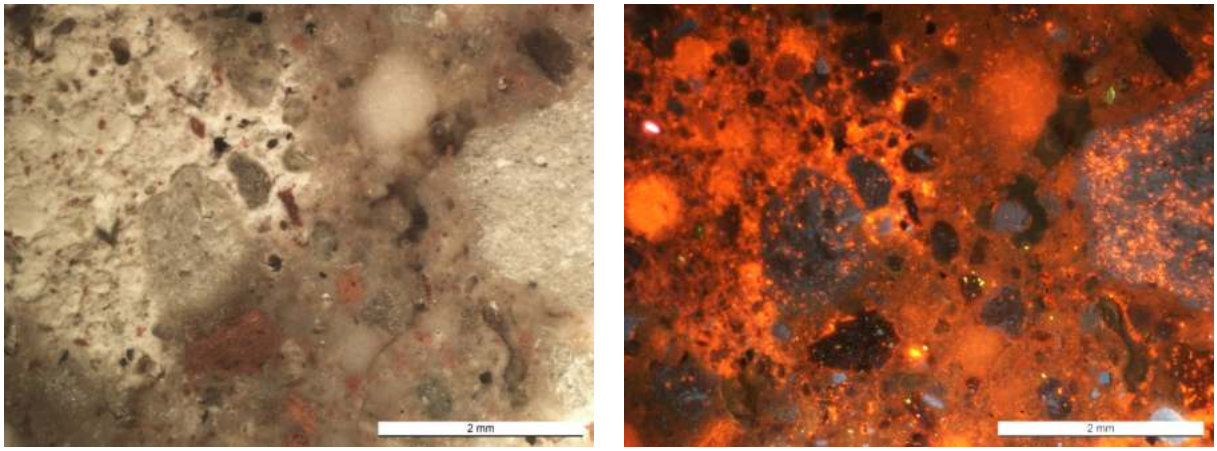

Figure 275 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22398 montrant des fragments pyroclastiques à microporosité élevée avec des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores (grossissement × 2.5)

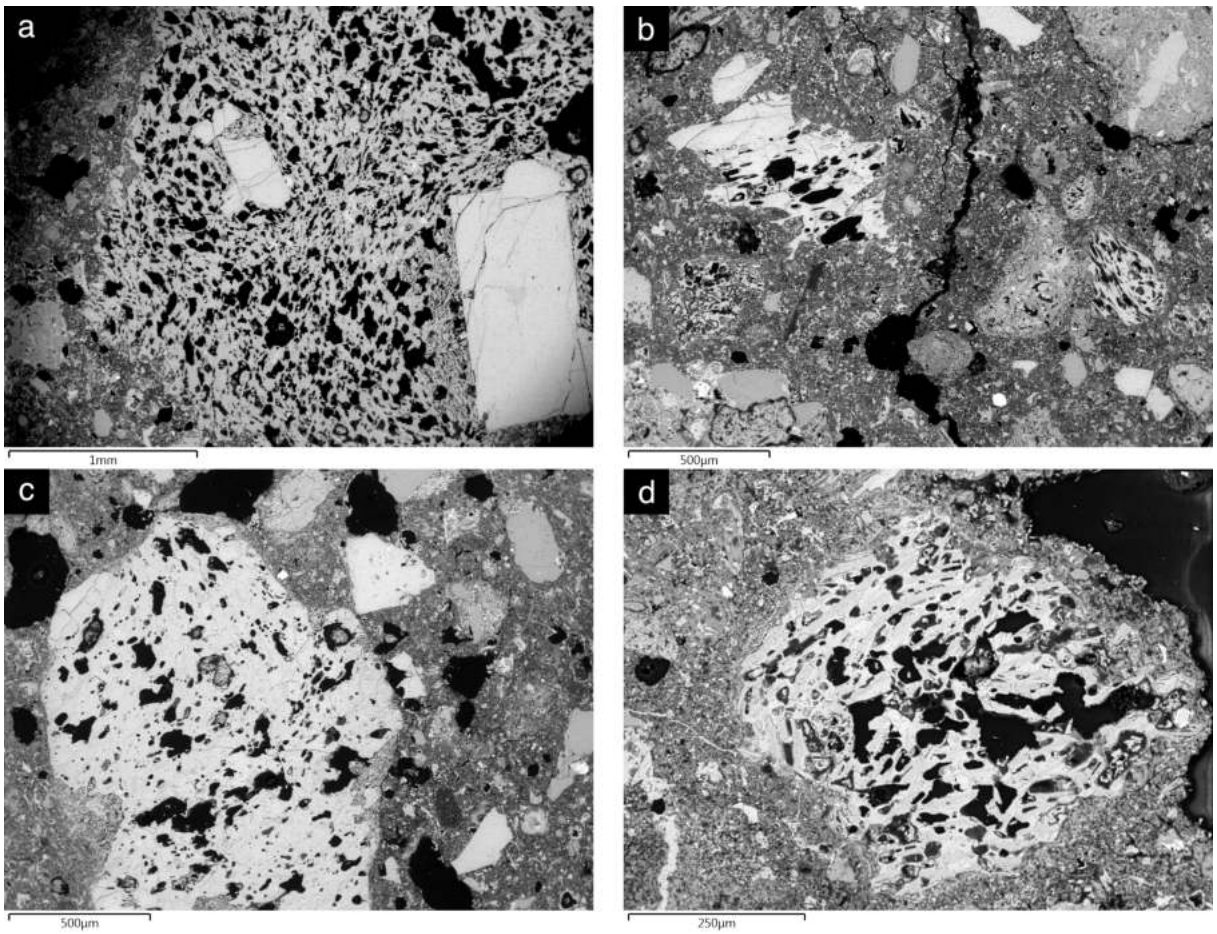

Figure 276 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22398 montrant (a) un fragment de roche pyroclastique présentant une microporosité élevée et orientée avec des inclusions de phénocristaux (texture porphyrique) ; (b-d) des fragments pyroclastiques de formes sub-angulaires à très émoussées

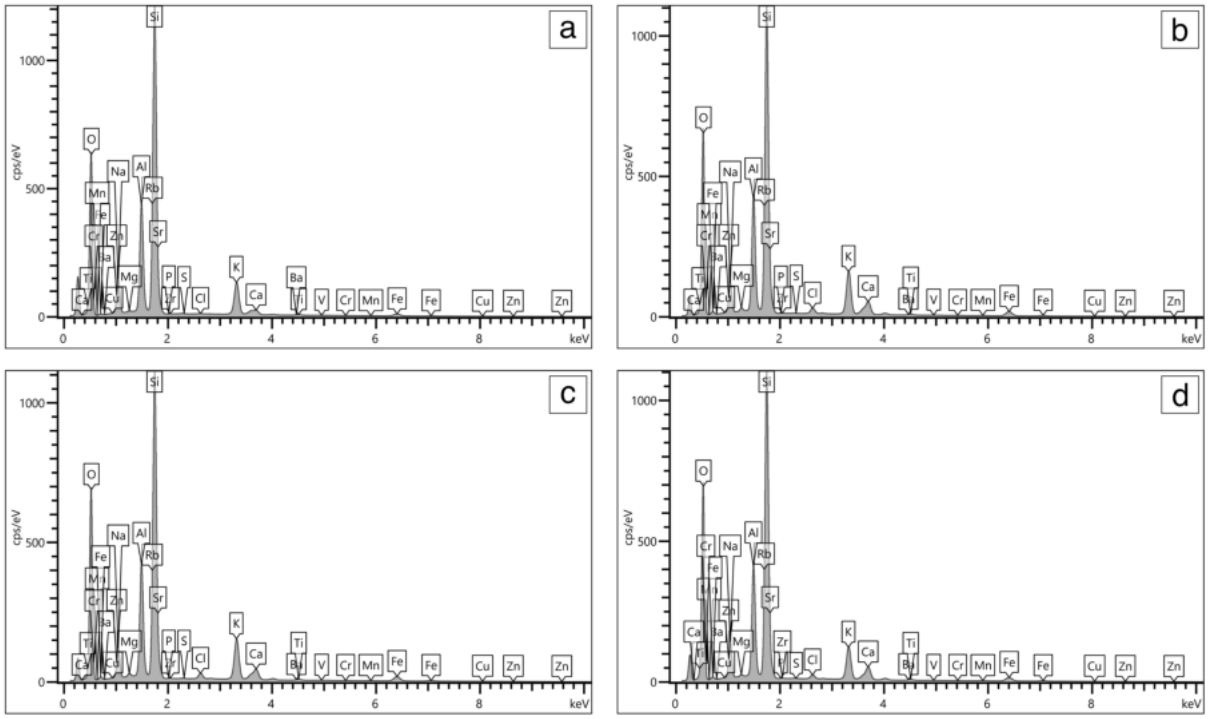

Figure 277 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22398 montrant la composition élémentaire des fragments de roche pyroclastique (trachyte)

FICHE 22 BDX22399

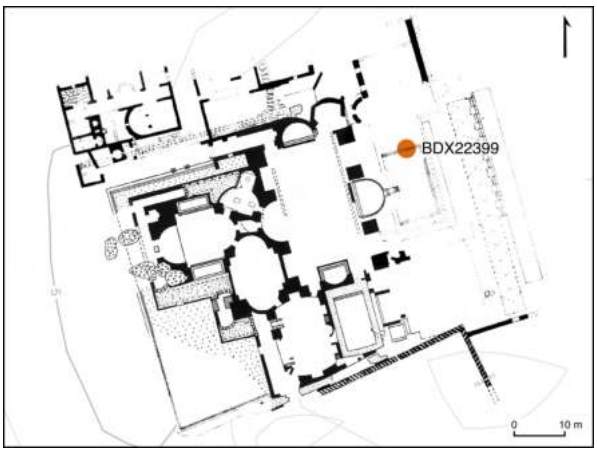

Figure 278 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22399 depuis le grand bassin et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Grand bassin
Structure : Grands thermes du nord
Datation : 211 à 217 apr. J.-C.
Localisation : Piscine froide dallée de marbre
Date de prélèvement : 15/11/2018
Coordonnées : 36.8830770825079, 7.75159938038433

L'échantillon BDX22399 a été prélevé depuis le support de dallage en marbre du grand bassin (piscine froide) des grands thermes du nord. Il a été choisi depuis une cassure du revêtement qui n'a pas été affectée par les travaux lors de la campagne de consolidation conduite en 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de dallage en marbre
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 30 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope optique révèlent un liant de composition hétérogène, avec une présence significative de nodules de chaux non mélangés (10 %) et une porosité de formes sphériques (10 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, comportant des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est principalement constitué de quartz, de feldspaths, de cristaux de calcite ainsi que de fragments de granite et de micaschiste. Les inclusions comprennent une proportion élevée de tuileaux (20 %) présentant une granularité hétérogène, ainsi que des fragments pyroclastiques (3 %) de type trachytique. Ces derniers sont accompagnés d'inclusions de phénocristaux de sanidine, dont quelques-uns sont dispersés dans la charge.

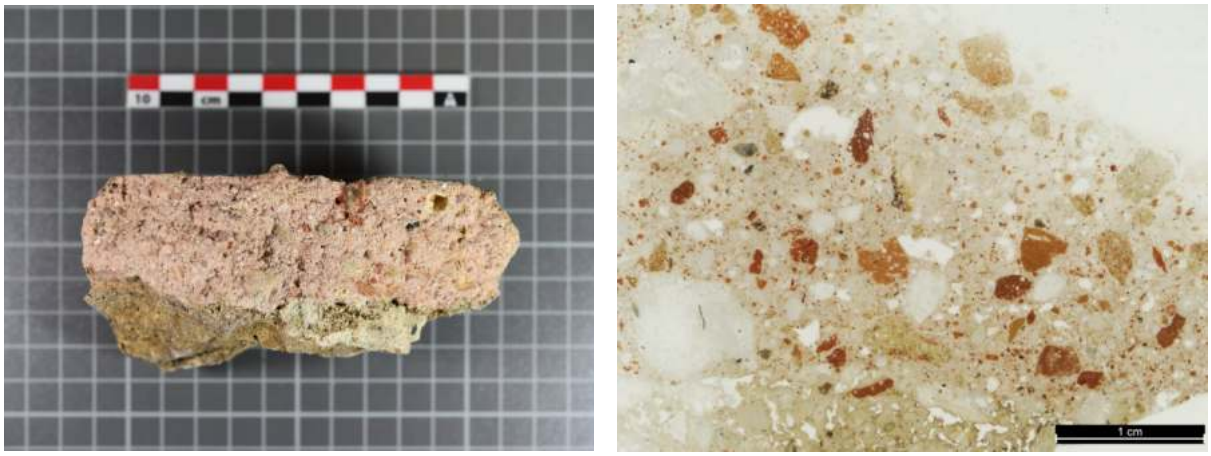

Figure 279 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22399 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 1.3	10	Sphérique	0.1 - 1.3	10
			Oblongue	0.7 - 4.6	3

Tableau 142 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22399

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	1.7 - 4.0	1	Homogène
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.5 - 1.9	1	Homogène

Tableau 143 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22399

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.5	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.8	3	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	1	Homogène
Sanidine	Sub-angulaire	0.4 - 0.9	1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.6	< 1	Homogène
Hornblende	Sub-émoussée	0.3	< 1	Hétérogène

Tableau 144 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22399

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 4.0	20	Homogène
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	1.4 - 10	3	Homogène

Tableau 145 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22399

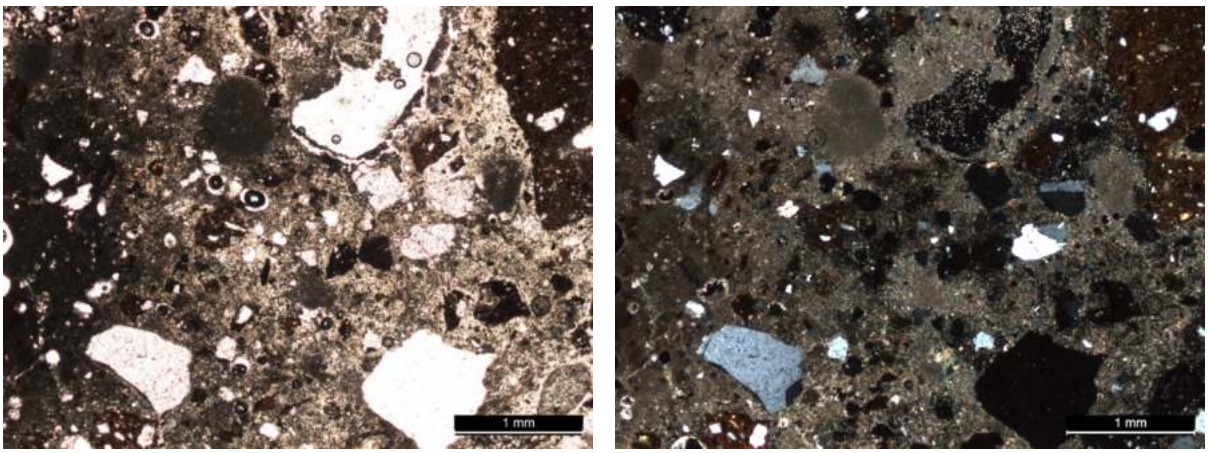

Figure 280 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant la présence de nodules de chaux non mélangés et une porosité élevée (grossissement × 2.5)

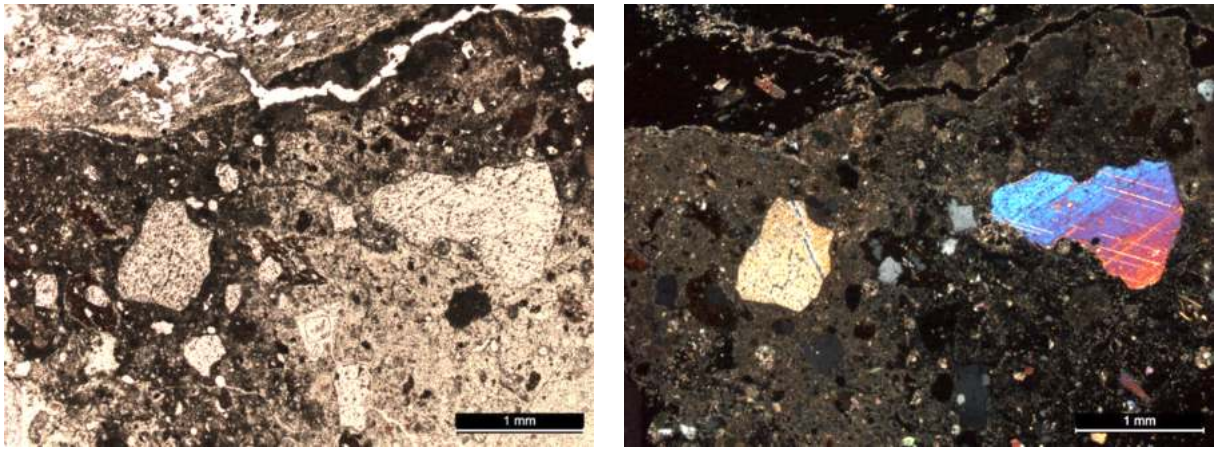

Figure 281 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant la présence de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 2.5)

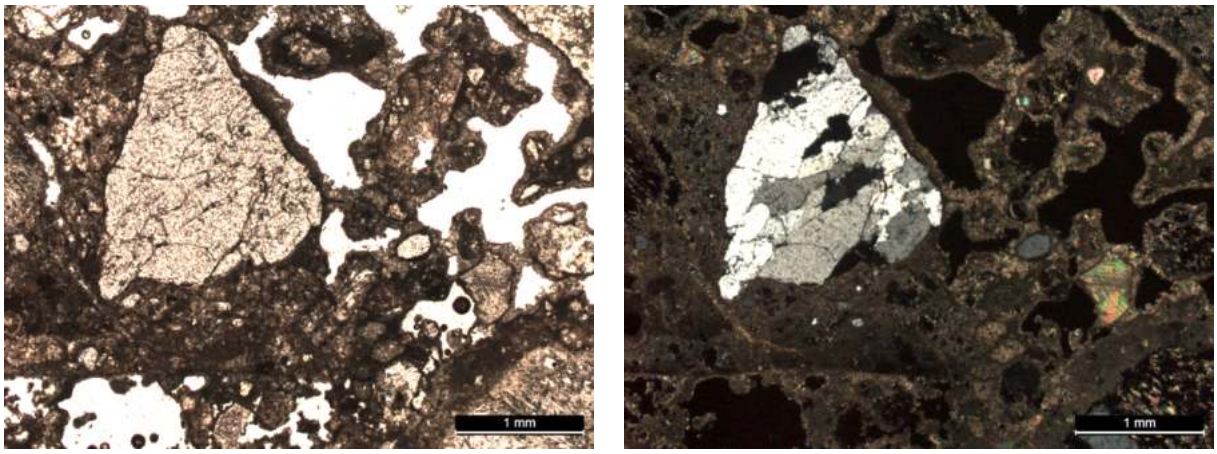

Figure 282 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant in fragment de granite de forme sub-angulaire mêlé à la charge (grossissement × 2.5)

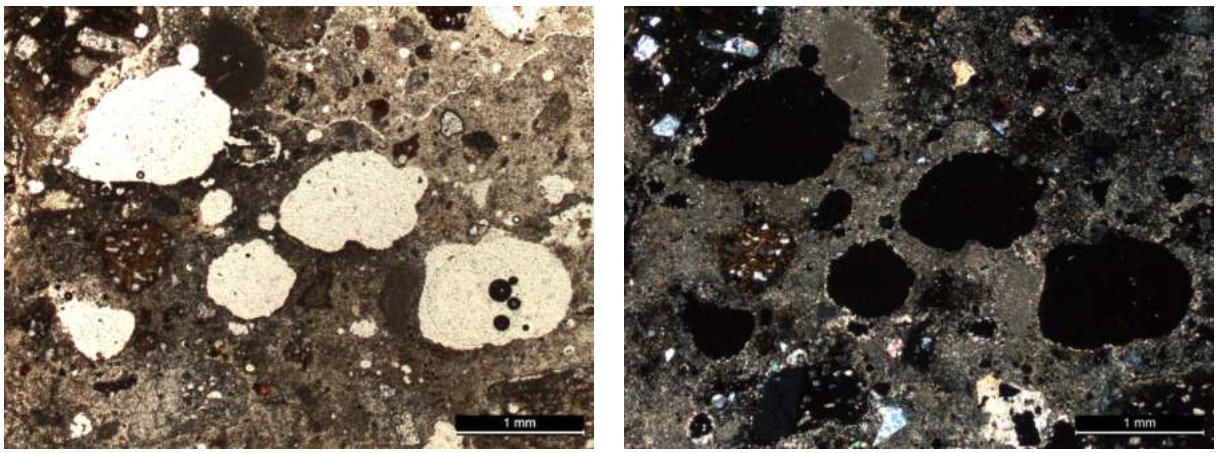

Figure 283 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant des pores de formes sphériques avec des dépôts secondaires de calcite (grossissement × 2.5)

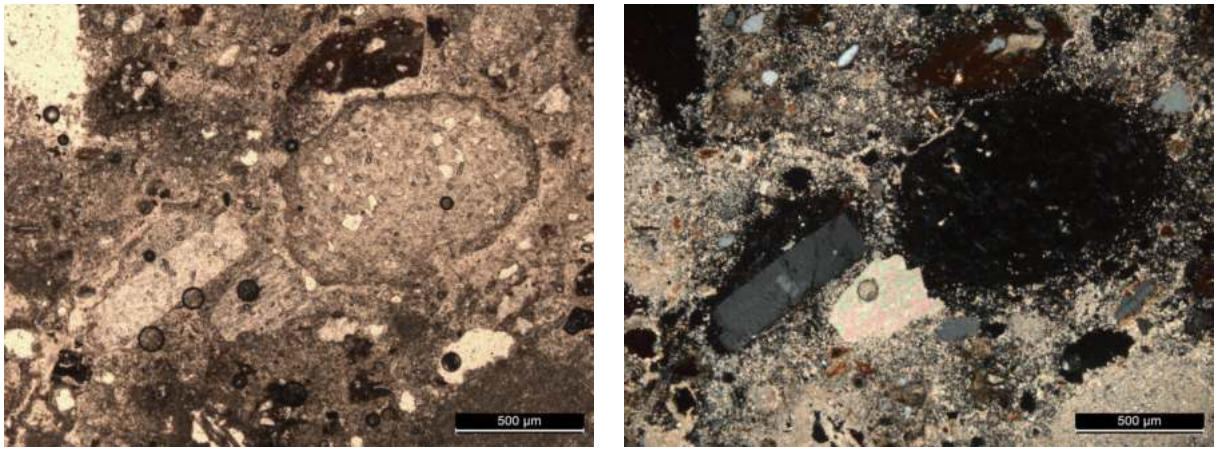

Figure 284 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant des fragments de roche pyroclastique avec des inclusions microlithes et des phénocristaux de sanidine dans une matrice vitreuse (grossissement × 5)

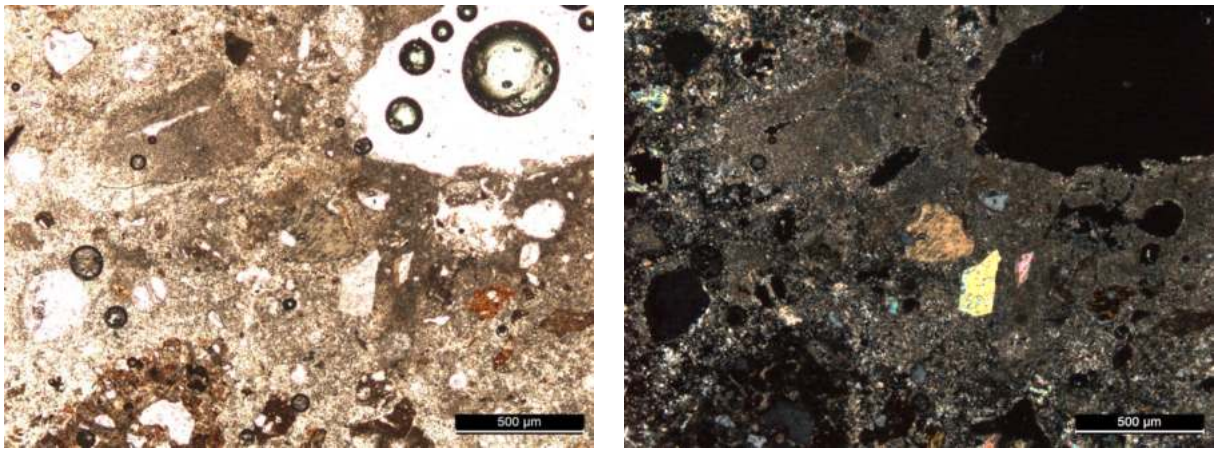

Figure 285 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant des nodules de chaux non mélangés et des cristaux de calcite dans le liant (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

L'examen de l'échantillon au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèle un liant qui est carbonaté de manière hétérogène (émettant une luminescence orange), avec des nodules de chaux non mélangés (10 %) et partiellement calcinés (5 %). Les constituants du sable silico-calcaire sont principalement des cristaux de quartz (émettant une luminescence mauve), des cristaux de calcite (avec une luminescence orange) ainsi que des feldspaths alcalins et des phénocristaux de sanidine (luminescence bleu clair). Les observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) offrent un aperçu détaillé des fragments pyroclastiques : ils sont composés d'une matrice vitreuse avec microporosité élevée des inclusions de phénocristaux de sanidine. Les dépôts secondaires de cristaux de calcite sont également visibles à l'intérieur des pores. Par ailleurs, les analyses élémentaires réalisées avec la microsonde EDS sur les fragments pyroclastiques révèlent des teneurs en SiO_2 oscillant entre 59,83 et 61,68 % pds et des teneurs en Na_2O + K_2O variant de 11,80 à 12,56 % pds, permettant d'identifier la nature trachytique des fragments de roches volcaniques grâce au diagramme Total Alkali Silica (TAS).

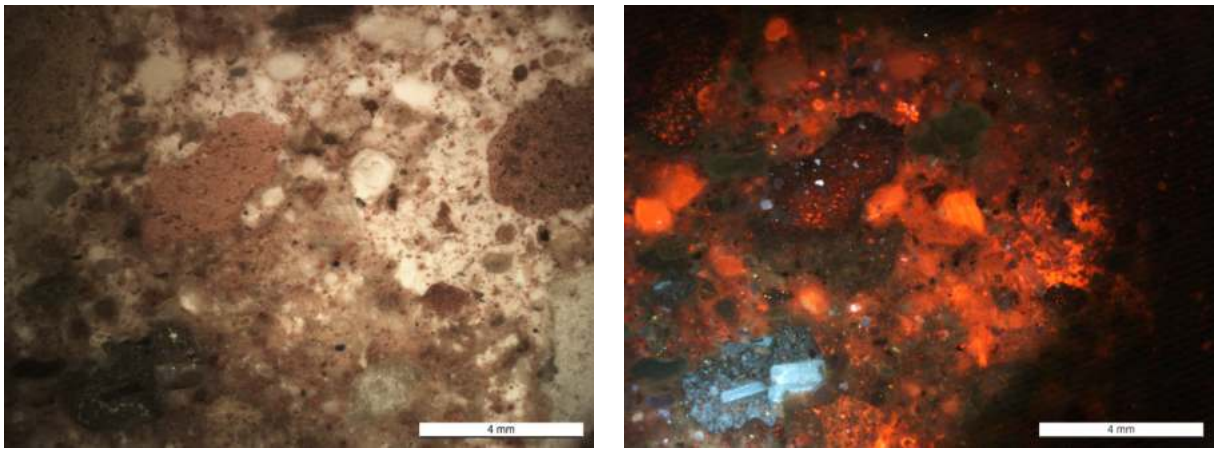

Figure 286 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22399 montrant des nodules de chaux non mélangés et des cristaux de calcite dans le mélange ainsi que des fragments de pyroclastes à texture porphyrique (grossissement × 1)

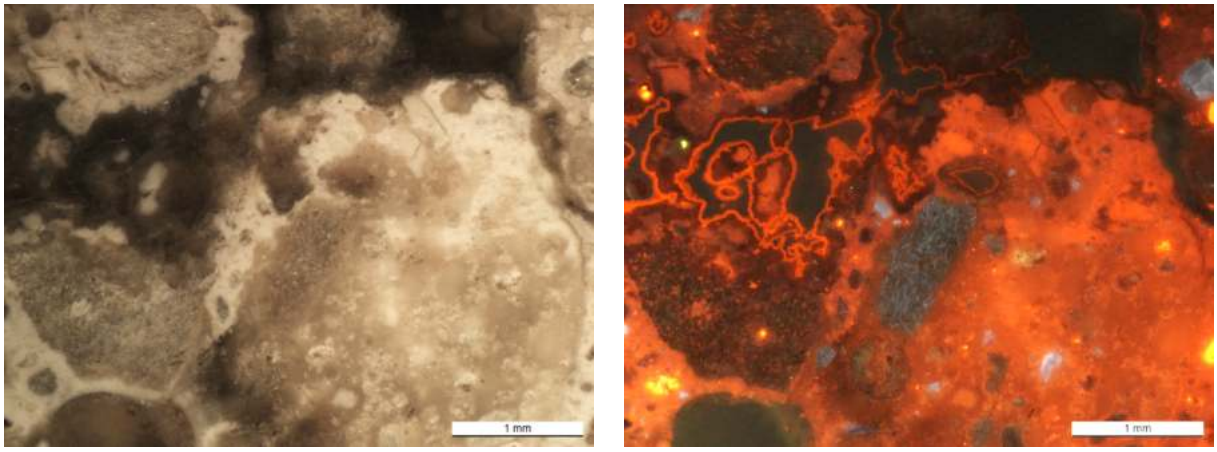

Figure 287 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22399 montrant des fragments pyroclastiques à texture microlithique ainsi que les dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 3.2)

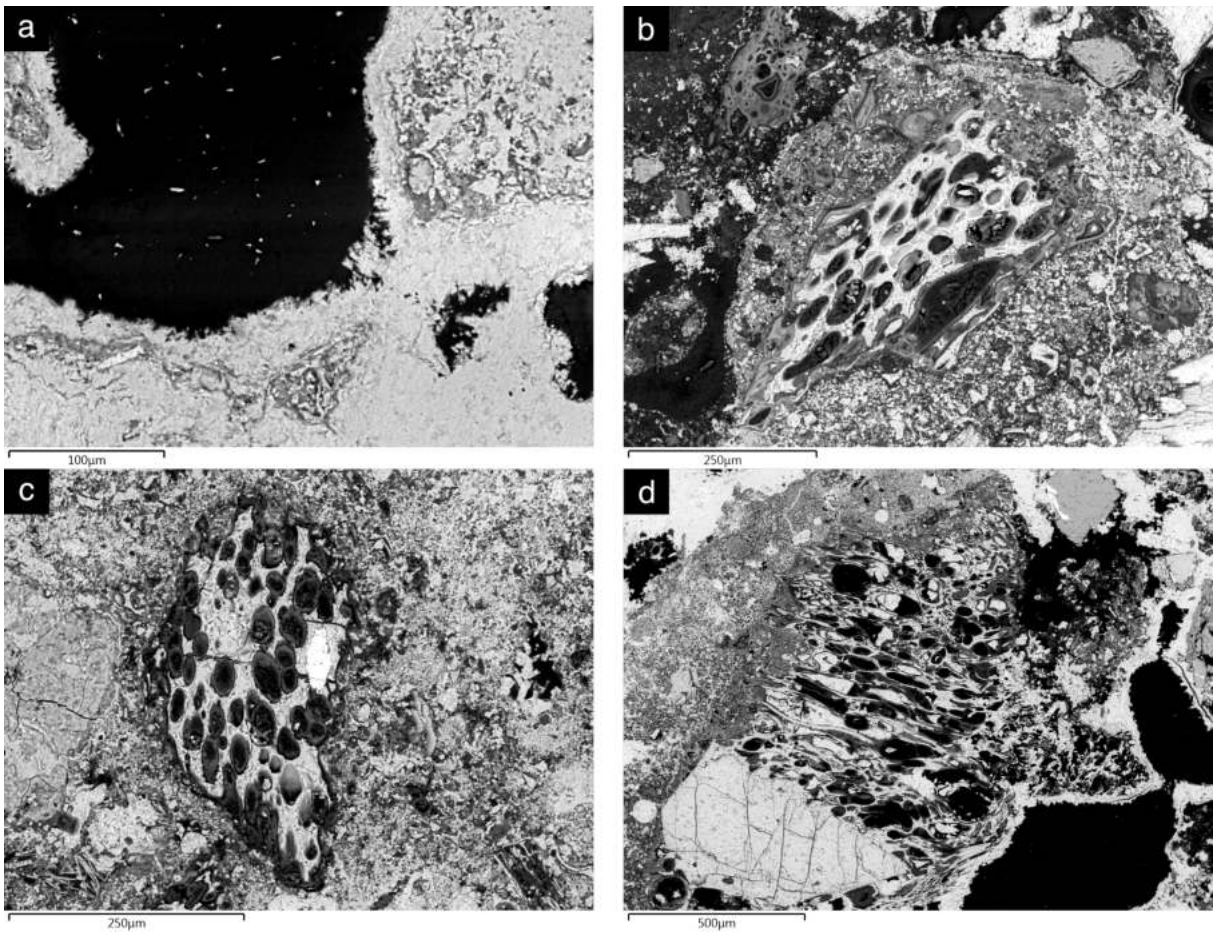

Figure 288 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22399 montrant (a) des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores ; (b-d) des fragments de pyroclastes trachytiques

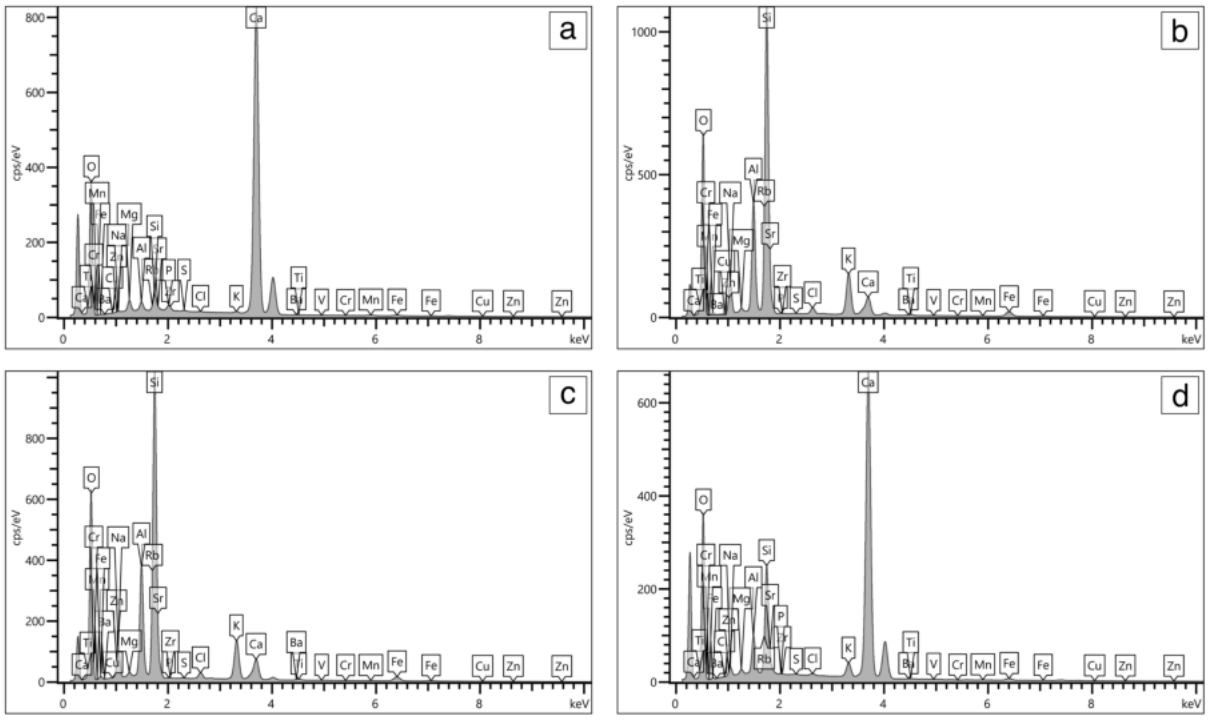

Figure 289 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22399 montrant la composition élémentaire des : (a) dépôts secondaires de calcite ; (b-c) fragments de pyroclastes (les teneurs en SiO_2 et $Na_2O + K_2O$) indiquent la nature trachytique de la roche ; (d) dépôts secondaires de calcite à l'intérieur de la microporosité des fragments pyroclastiques

FICHE 23 BDX22400

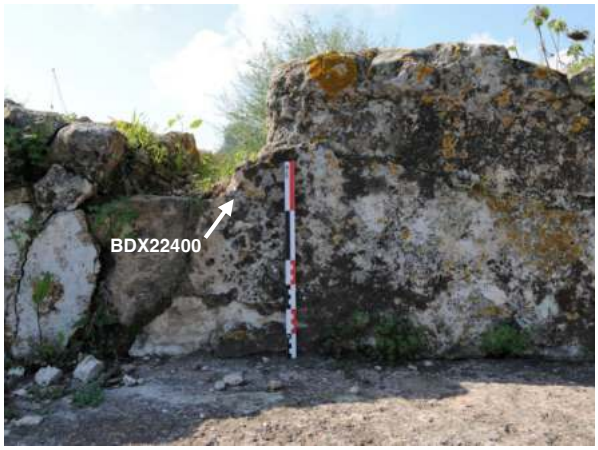

Figure 290 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22400 depuis le presbyterium et indication de sa localisation sur le plan de la grande basilique

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Décor mural peint
Structure : Grande basilique
Datation : Seconde moitié du IVe s. apr. J.-C.
Localisation : *Presbyterium*
Date de prélèvement : 16/11/2018
Coordonnées : 36.883113135723, 7.75062617093425

L'échantillon BDX22400 a été prélevé depuis l'enduit situé sur la face intérieure du chevet de la grande basilique. Cette section du presbyterium n'a pas été affectée par les travaux réalisés durant la campagne de restauration de 1951 sous l'initiative d'Erwan Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit de décoration
Couleur : Beige foncé ; Gris ; Beige clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Limono-sableuse

Le fragment d'enduit est composé de quatre couches : une couche d'épiderme (*intonachino*) épaisse de 1,6 mm, une couche de finition (*intonaco*) d'environ 5,4 mm d'épaisseur, une couche intermédiaire (*arrico*) de 7 mm d'épaisseur et une couche de préparation (*rinzaffo*) épaisse d'environ 20 mm.

Caractéristiques pétrographiques

Les examens pétrographiques révèlent un liant de composition homogène incluant quelques nodules de chaux (1 à 3 %). La charge est constituée de sables calcaires dans les trois premières couches et d'un sable silico-calcaire dans la couche de préparation. La charge est caractérisée par des grains principalement anguleux, comprenant des cristaux de calcite (jusqu'à 30 %), des cristaux de quartz, ainsi que des feldspaths alcalins, des plagioclases et des micas. Les inclusions de tuileau sont de granularité hétérogène (0,7 à 5 mm) et leur teneur est variable selon les couches (environ 1 % dans la couche de finition).

Figure 291 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22400 montrant des matrices de couleurs différentes (beige foncé à beige clair) marquant une nette différenciation entre les couches qui composent l'enduit

BDX22400a : Couche d'épiderme - *intonachino* (1.6 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.8 - 1.2	< 1	Sphérique	0.1 - 0.3	1
			Oblongue	0.3 - 0.5	< 1

Tableau 146 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche d'épiderme BDX22400a

Charge

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Angulaire	0.1 - 0.8	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-émoussée	0.2	< 1	Hétérogène
Muscovite	Angulaire	0.5	< 1	Hétérogène
Biotite	Angulaire	0.4	< 1	Hétérogène

Tableau 147 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22400a

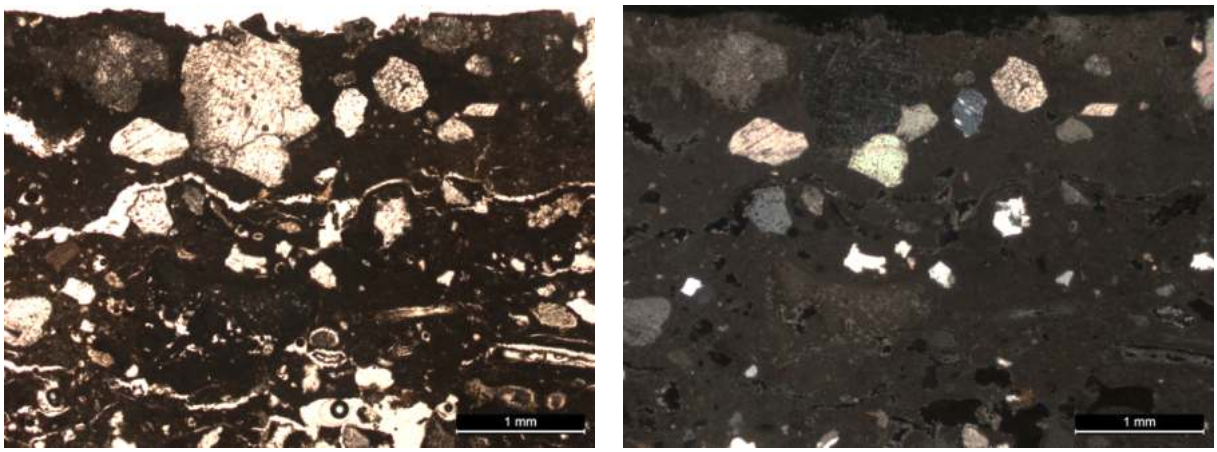

Figure 292 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400a montrant des cristaux de calcite dispersés en abondance (5 %) dans le liant (grossissement × 2.5)

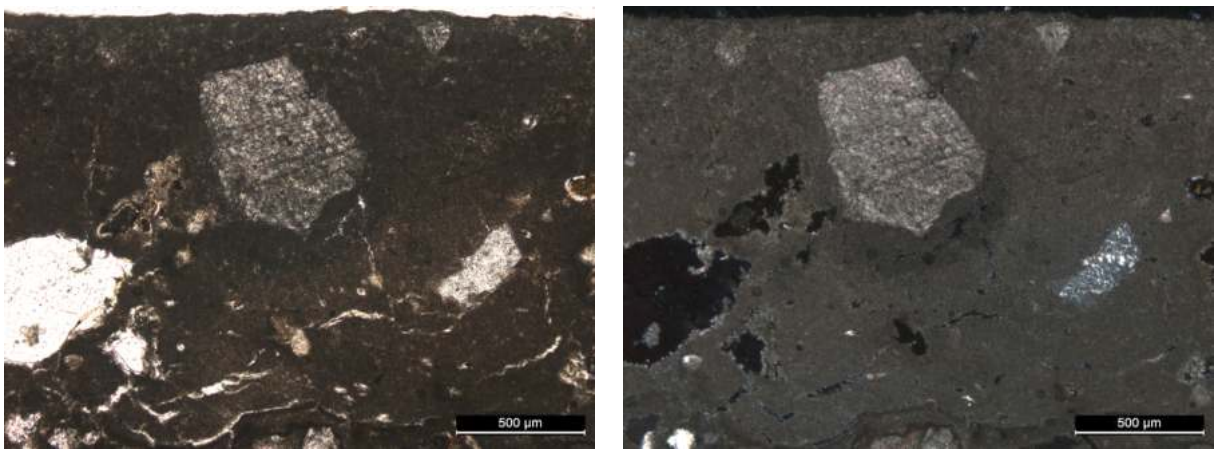

Figure 293 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400a montrant des cristaux de calcite de forme angulaire en surface de la couche (grossissement × 5)

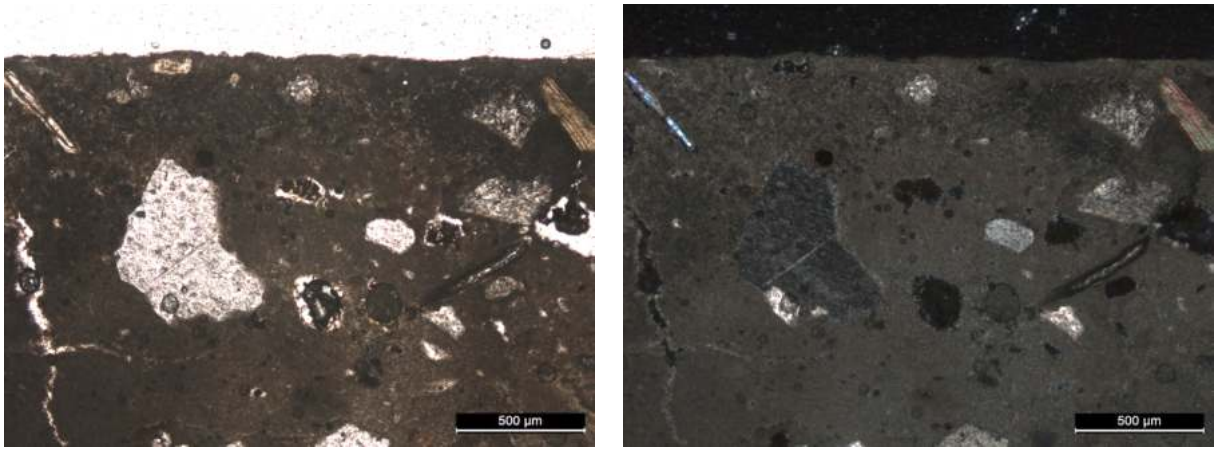

Figure 294 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400a montrant les principaux composants de la charge, dont de la calcite et des micas (grossissement × 5)

BDX22400b : Couche de finition - *intonaco* (5.4 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.2 - 1.0	3	Sphérique	0.1 - 0.5	3
Non mélangés	0.4 -1.7	1	Oblongue	0.6 - 3.1	3

Tableau 148 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22400b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.4 - 1.0	1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	3.6	< 1	Hétérogène

Tableau 149 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22400b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Angulaire	0.3 - 1.3	20	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.3 - 0.8	3	Homogène
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.6	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.3 - 0.5	< 1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.4	< 1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.1 - 0.5	< 1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.6 - 0.8	< 1	Hétérogène

Tableau 150 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22400b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	1.0 - 5.0	1	Homogène

Tableau 151 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22400b

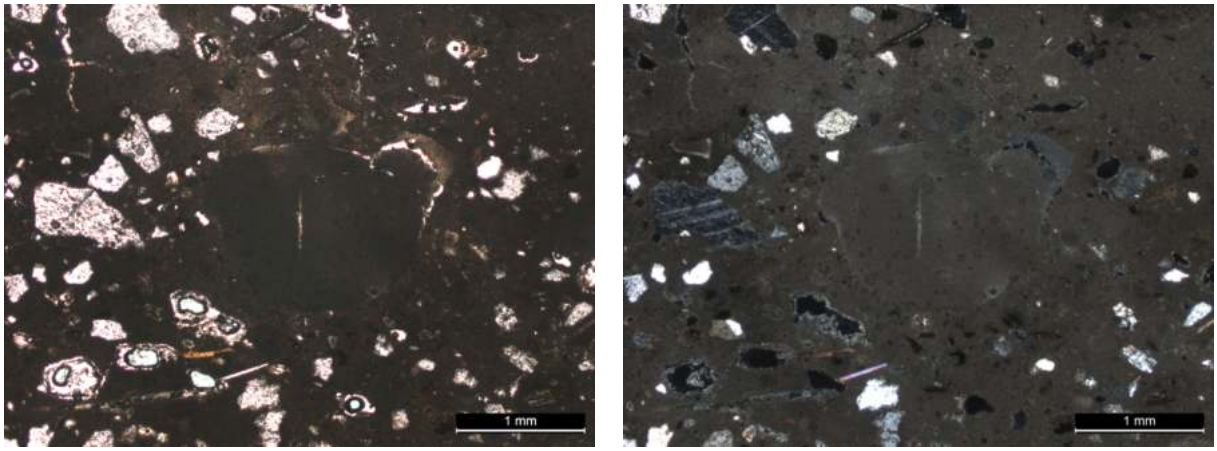

Figure 295 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant un nodule de chaux non mélangé (grossissement × 2.5)

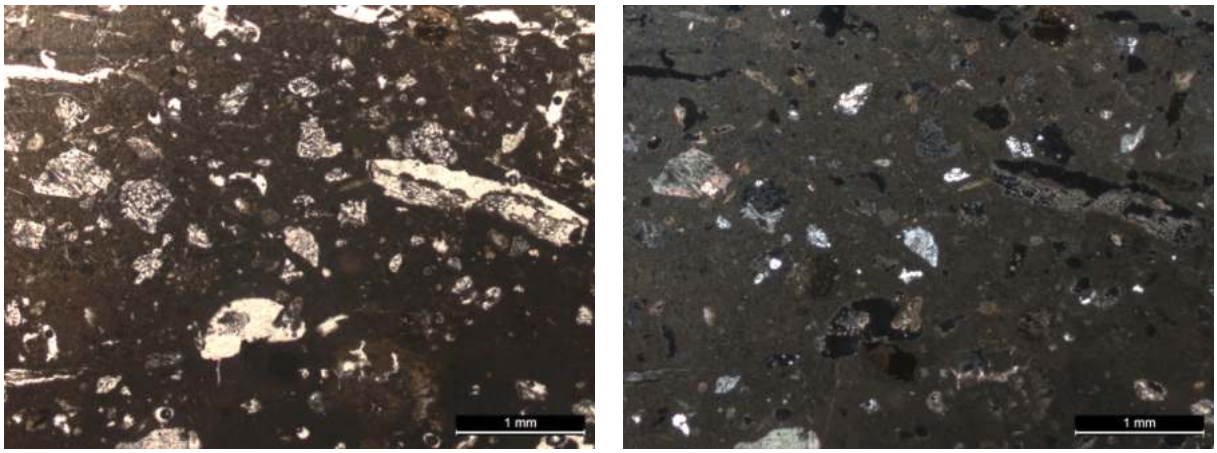

Figure 296 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant des minéraux constituant la charge, dont des quartz, feldspaths et calcite (grossissement × 2.5)

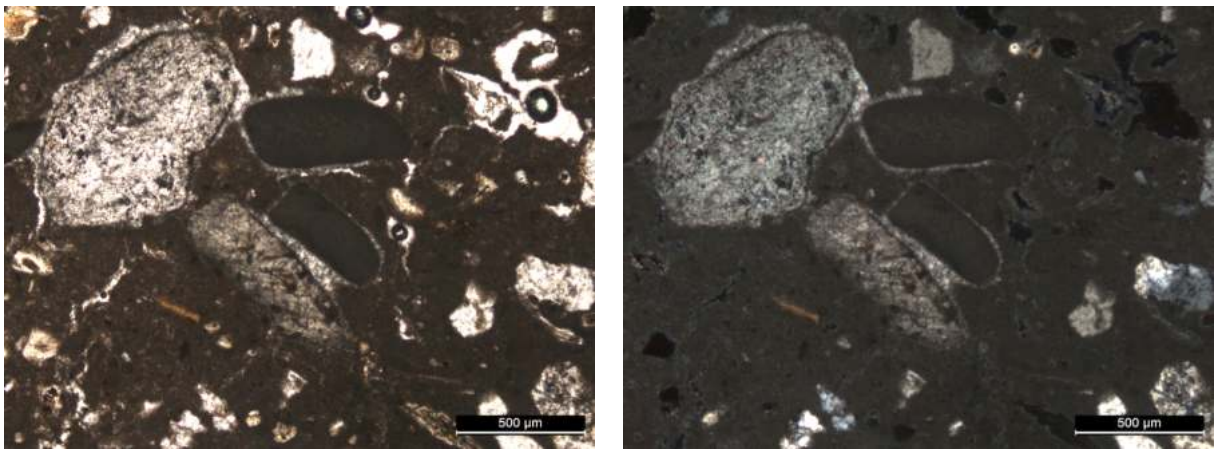

Figure 297 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant des nodules de chaux partiellement calcinés formés par des bioclastes (grossissement × 5)

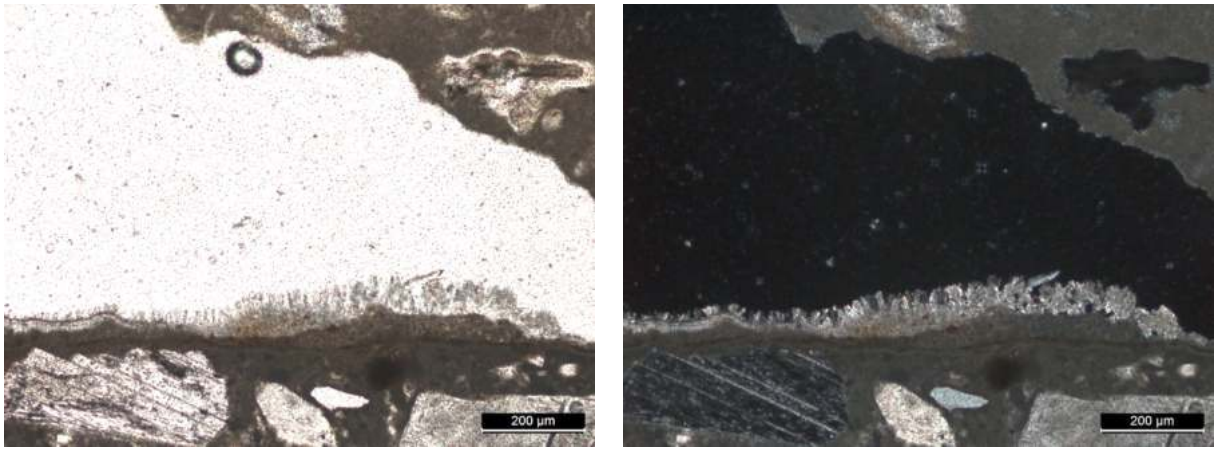

Figure 298 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 10)

BDX22400c : Couche intermédiaire - *arrico* (7 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.3 - 0.4	< 1	Oblongue	0.4 - 1.1	5
			Sphérique	0.2 - 0.8	3

Tableau 152 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22400c

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.3 - 0.9	3	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	0.8 - 2.3	3	Homogène

Tableau 153 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22400c

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Angulaire	0.2 - 0.5	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.7	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.2 - 0.7	5	Homogène
Quartz	Angulaire	0.1 - 1.1	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.3 - 0.6	1	Homogène

Tableau 154 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22400c

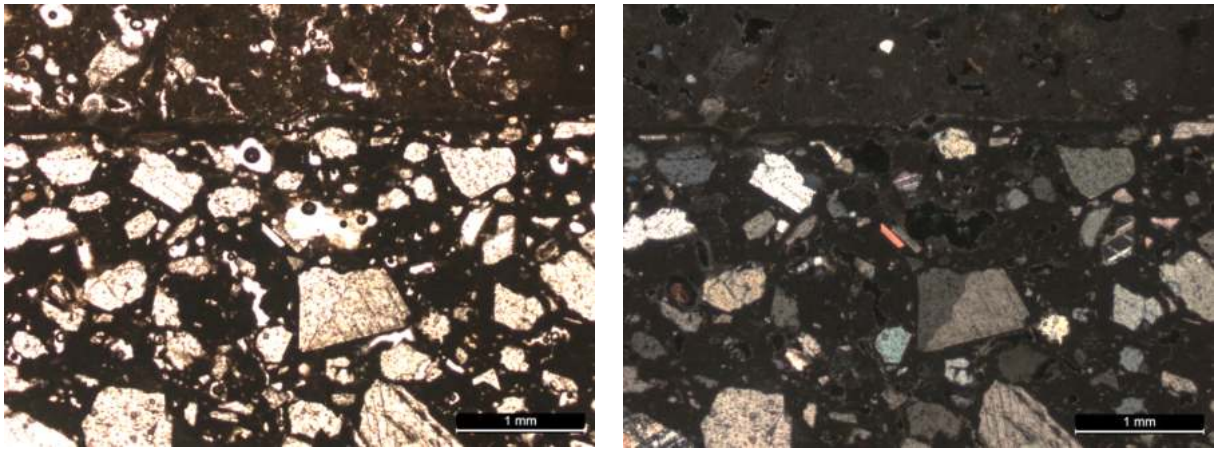

Figure 299 : Microphotographies en LPNA et LPA montrant la séparation entre les couches BDX22400b et BDX22400c (grossissement × 2.5)

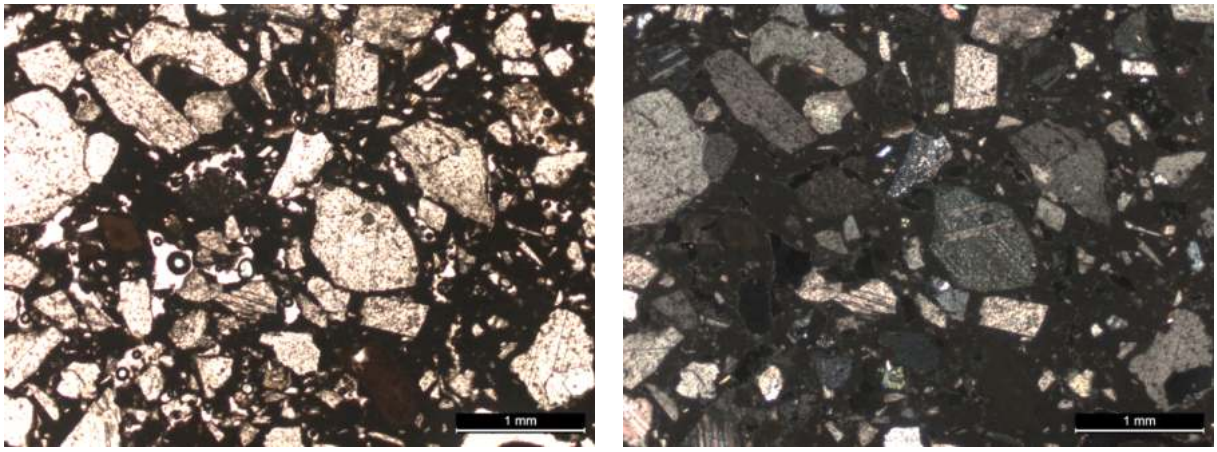

Figure 300 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400c montrant une forte présence (30 %) de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 2.5)

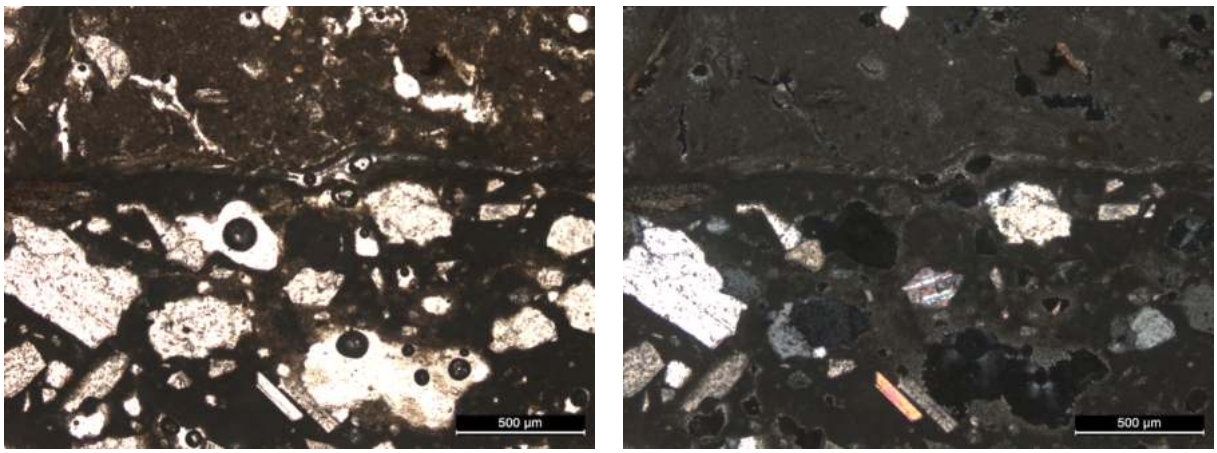

Figure 301 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400c montrant une porosité élevée (10 %) de formes sphériques et oblongues (grossissement × 5)

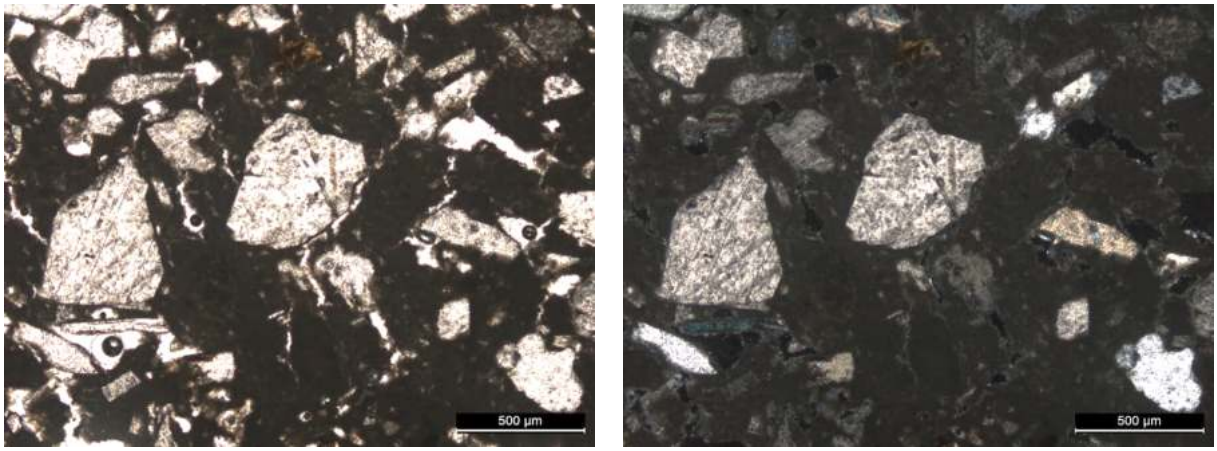

Figure 302 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400c montrant la présence (<1 %) de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 5)

BDX22400d : Couche de préparation - *rinzaffo* (20 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.5 - 2.6	1	Sphérique	0.1 - 0.5	3
			Oblongue	0.3 - 0.6	1

Tableau 155 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22400d

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.3 - 2.2	5	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	24.5	< 1	Hétérogène
Micaschiste	Métamorphique	Angulaire	1.2 - 20	1	Homogène

Tableau 156 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22400d

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.6	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 1.1	20	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.4 - 0.6	10	Homogène
Calcite	Angulaire	0.5 - 1.4	3	Homogène
Hornblende	Angulaire	0.4 - 0.9	1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.9	1	Homogène
Biotite	Angulaire	0.3 - 0.5	1	Homogène

Tableau 157 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22400d

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.7 - 0.9	< 1	Homogène

Tableau 158 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22400d

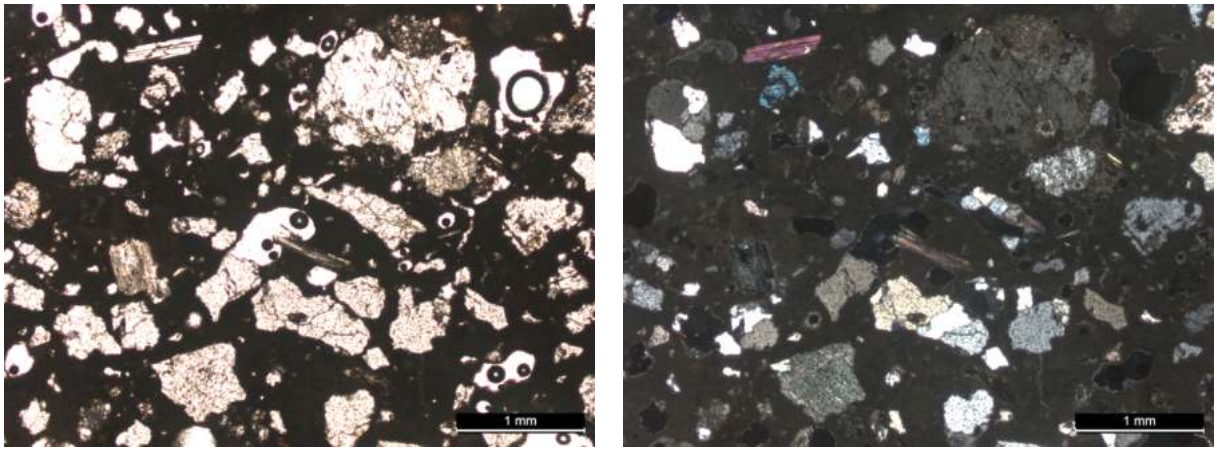

Figure 303 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant une charge composée d'une charge silico-calcaire (grossissement × 2.5)

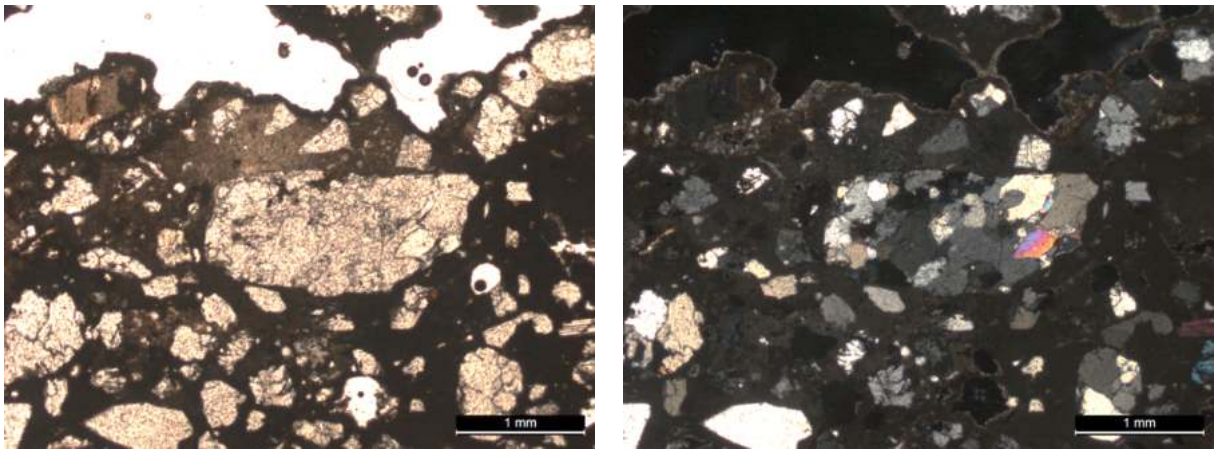

Figure 304 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant des fragments de granite mêlés à la charge (grossissement × 2.5)

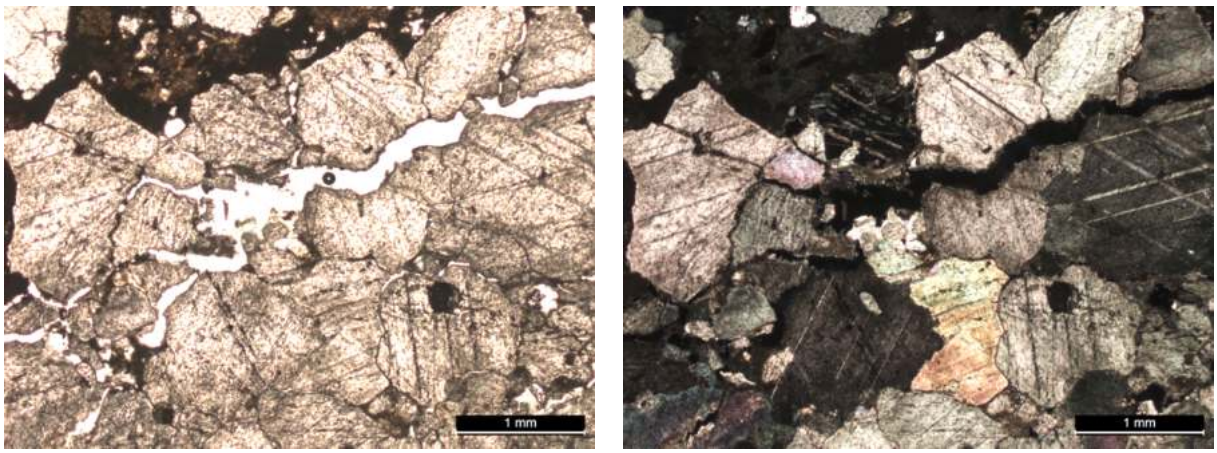

Figure 305 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant la présence d'un fragment de marbre dans la couche d'enduit (grossissement × 2.5)

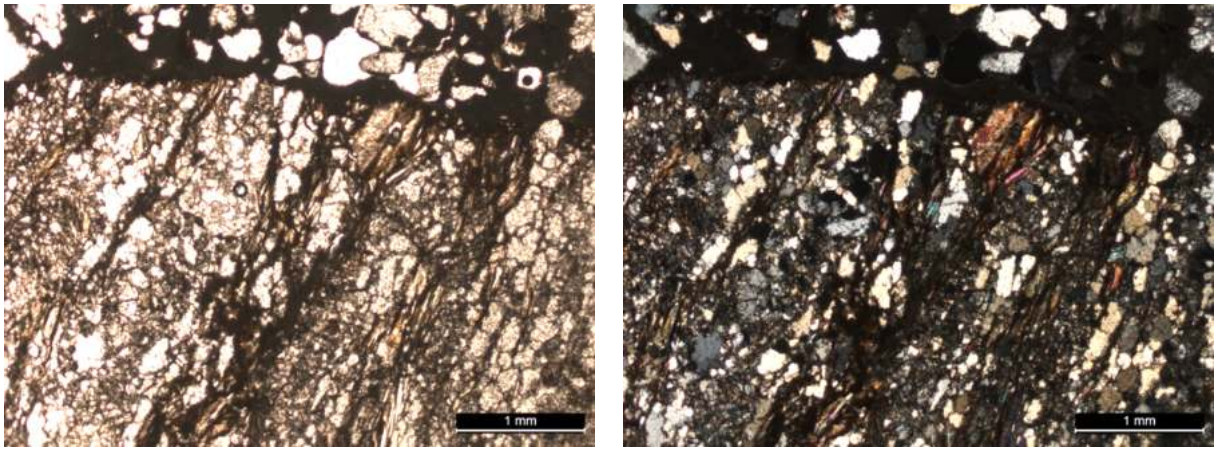

Figure 306 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant la présence d'un fragment de micaschiste dans la couche d'enduit (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les analyses réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène constitué de chaux carbonatée (luminescence orange), avec d'occasionnels nodules de chaux partiellement calcinés (3 %) et non mélangés (1 %). Les cristaux et les fragments lithiques qui composent la charge sont de formes angulaires. Parmi les éléments de la charge, on observe la présence de cristaux de calcite (luminescence orange), de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et de feldspaths plagioclases (luminescence verte). Les cristaux de calcite et les fragments de marbre, tous de formes angulaires, rentrent dans la composition de la charge avec une présence variable suivant les couches : 5 % dans la couche d'épiderme, 20 % dans la couche de finition, 30 % dans la couche intermédiaire, et 3 % dans la couche de préparation, où la charge est principalement constituée d'un sable silico-calcaire. Enfin, on note également la présence de dépôts secondaires de cristaux de calcite (luminescence orange) dans les espaces interstitiels qui séparent les quatre couches de l'enduit, ainsi qu'une forte luminescence de couleur orange au niveau de la couche picturale qui témoigne d'une concentration élevée en carbonate de calcium.

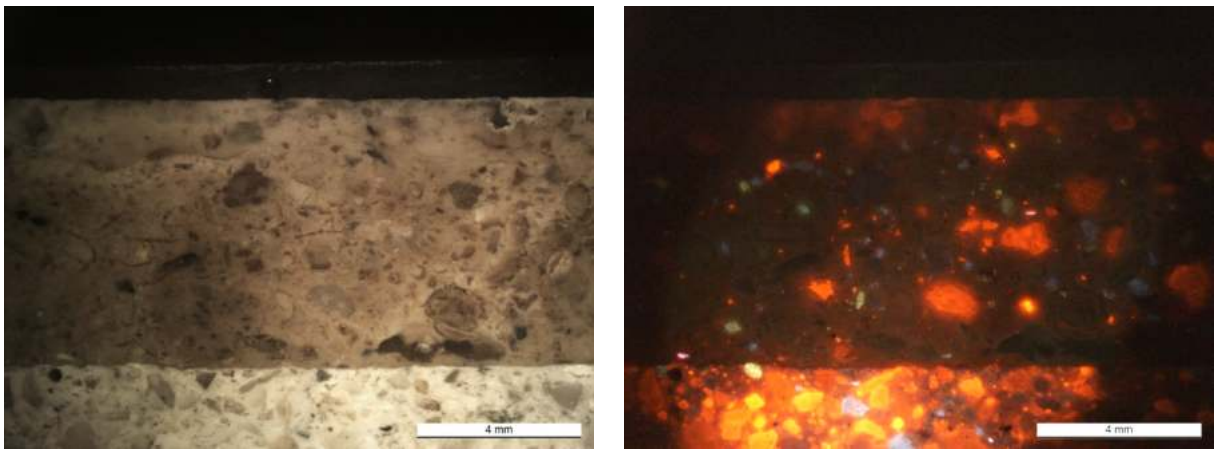

Figure 307 : Microphotographies en lumière naturelle et CL montrant la carbonatation en surface de la couche pigmentaire la couche BDX22400a (grossissement × 1)

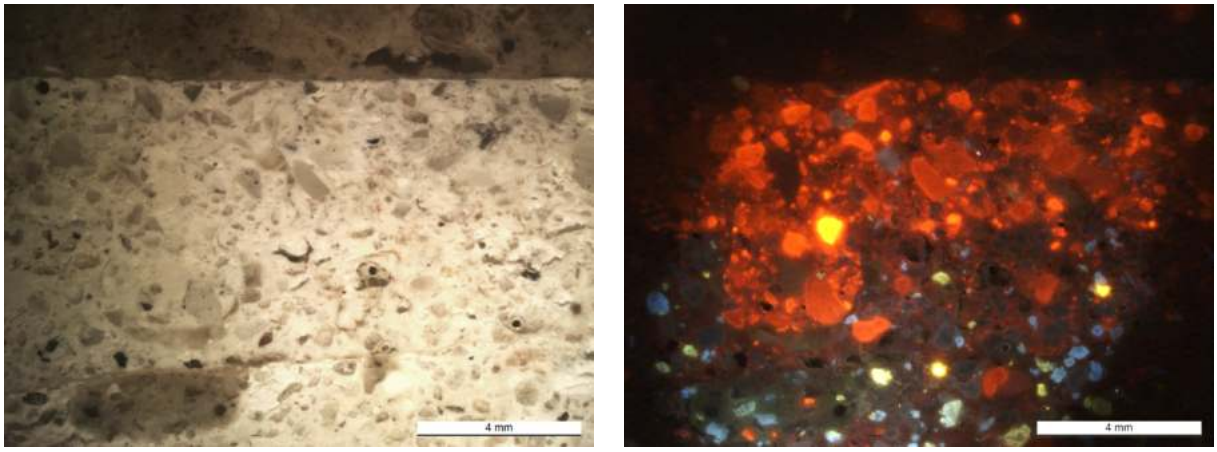

Figure 308 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22400c montrant la concentration de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 1)

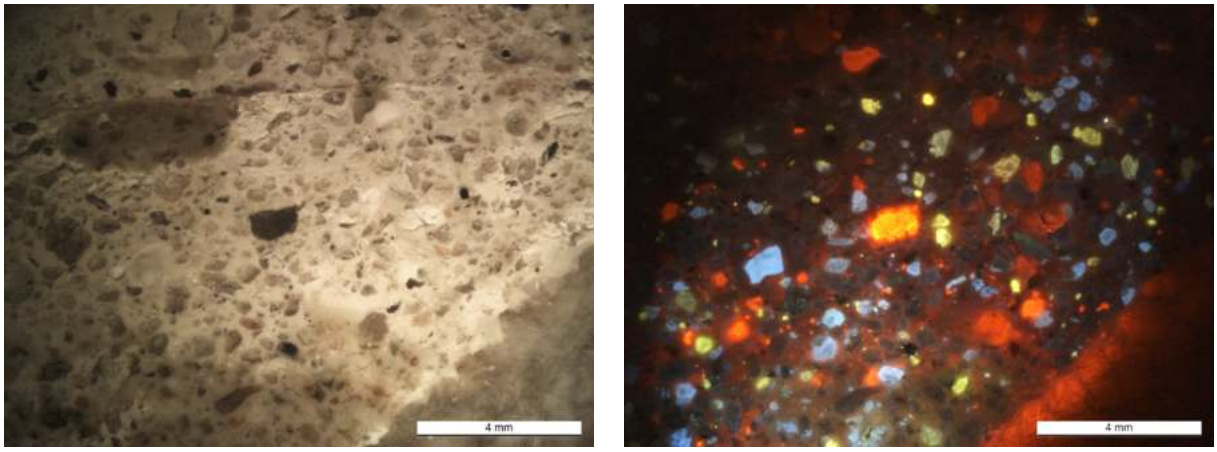

Figure 309 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22400d montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

FICHE 24 BDX22401

Figure 310 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22401 depuis une mosaïque de la salle D1 et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mosaïque ornementale
Structure : Ensemble baptismal
Datation : Première moitié du IVe s. apr. J.-C.
Localisation : Salle D1
Date de prélèvement : 16/11/2018
Coordonnées : 36.8831380439382, 7.75100191571404

L'échantillon BDX22401 a été prélevé depuis une mosaïque ornementale située en bordure de la salle D1, dans le complexe baptismal du quartier chrétien. La zone de prélèvement de l'échantillon n'a pas été soumise à des travaux de consolidation durant les campagnes de 1951 qui ont été dirigées par Erwan Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de mosaïque
Couleur : Gris clair ; Beige clair ; Rose clair
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mosaïque est composé de trois couches : un lit de pose épais de 6 mm de couleur gris clair, une couche intermédiaire d'environ 8 mm d'épaisseur et une couche de préparation d'environ 16 mm de couleur rose clair.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux non mélangés (5 %) et partiellement calcinés (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire de granulométrie hétérogène, avec des grains de formes angulaires. Les tesselles qui composent la mosaïque présentent le faciès de roches calcaires fossilifères. Concernant les inclusions, on observe la présence de fragments de tuileau avec une teneur d'environ 5 % et une granulométrie variable principalement dans la couche de préparation.

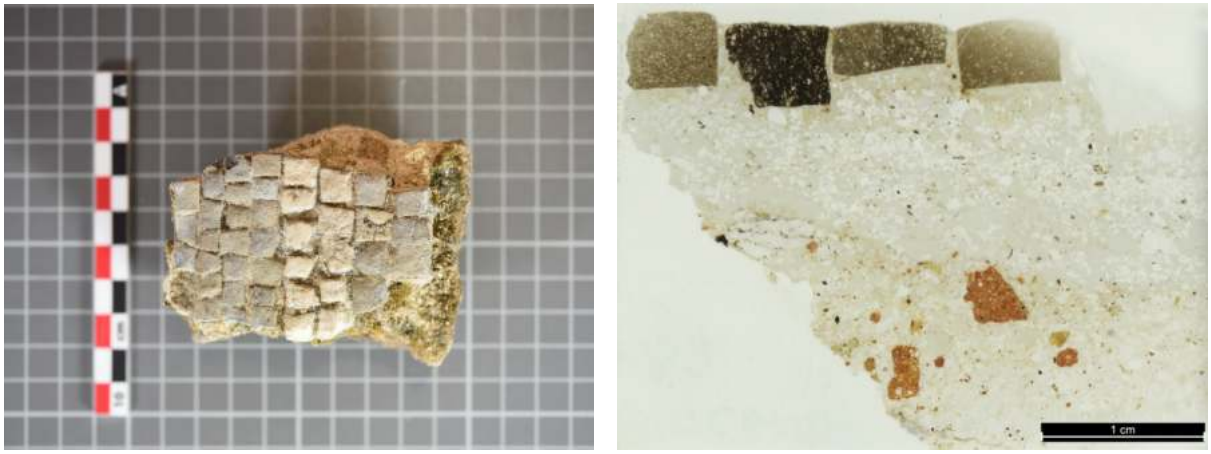

Figure 311 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22401 montrant deux matrices de couleurs gris clair et rose clair avec des inclusions de tuileau

BDX22401a : Lit de pose (6 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 0.5	5	Oblongue	0.2 - 0.6	5
Partiellement calcinés	0.2 - 0.3	1	Sphérique	0.1 - 0.8	3

Tableau 159 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du lit de pose BDX22401a

Charge

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Angulaire	0.1 - 0.3	1	Homogène
Quartz	Angulaire	0.1 - 0.2	< 1	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.1 - 0.3	< 1	Homogène

Tableau 160 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22401a

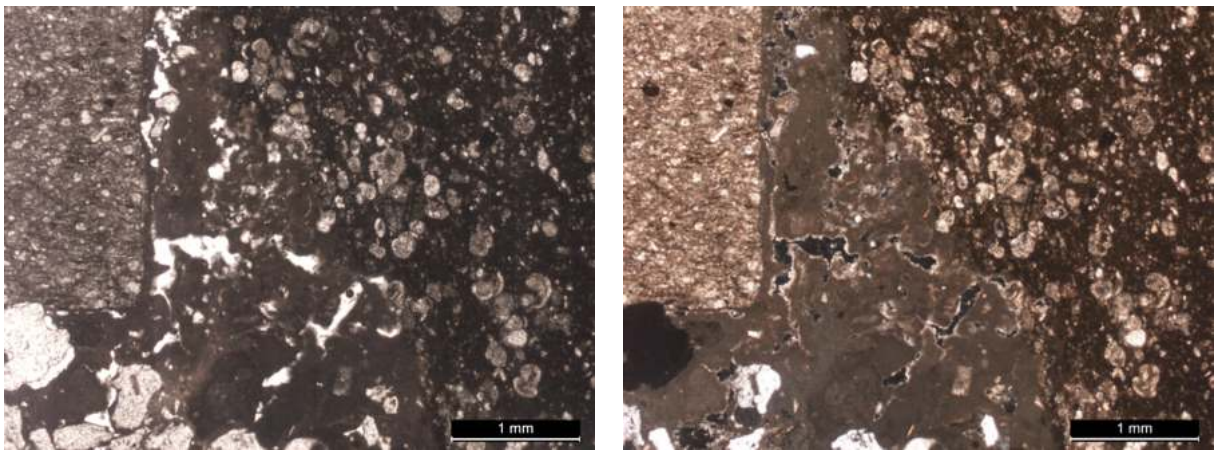

Figure 312 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401a montrant des fragments roches calcaires (à gauche un grainstone et à droite un packstone à globigérines) qui composent les tesselles noires de la mosaïque (grossissement × 2.5)

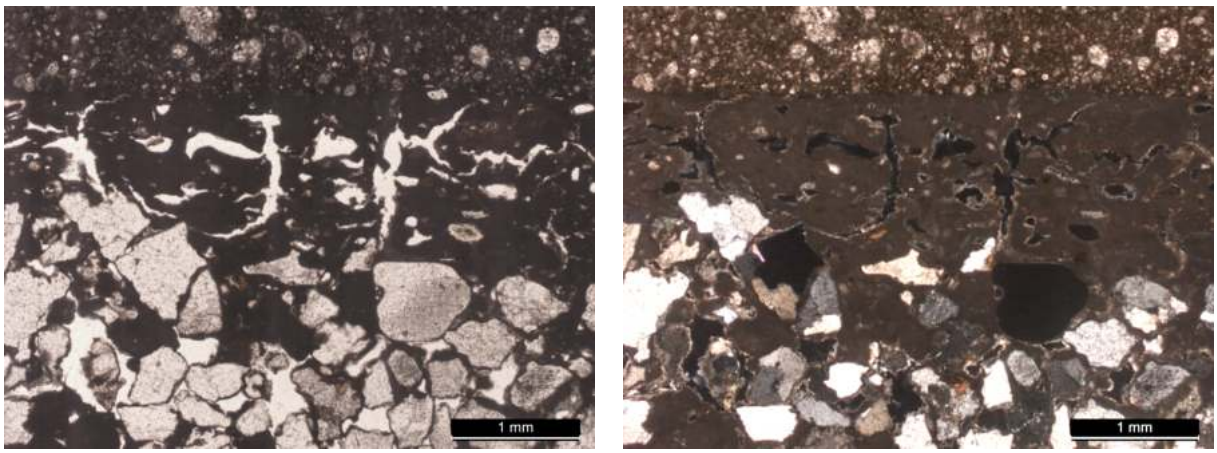

Figure 313 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401a montrant une porosité élevée (5 %) de forme oblongue dans le liant (grossissement × 2.5)

BDX22401b : Couche intermédiaire - *nucleus* (8 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.6 - 1.0	5	Oblongue	0.4 - 0.8	20
Partiellement calcinés	0.4 - 0.6	< 1	Sphérique	0.2 - 0.4	10

Tableau 161 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22401b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.4 - 0.8	5	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	1.0 - 1.3	< 1	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Angulaire	1.1	< 1	Homogène

Tableau 162 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22401b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.7	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.7	10	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.4 - 0.7	5	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.6 - 1.0	3	Homogène
Hornblende	Angulaire	0.5 - 0.7	1	Homogène
Calcite	Angulaire	0.4 - 0.7	< 1	Homogène

Tableau 163 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22401b

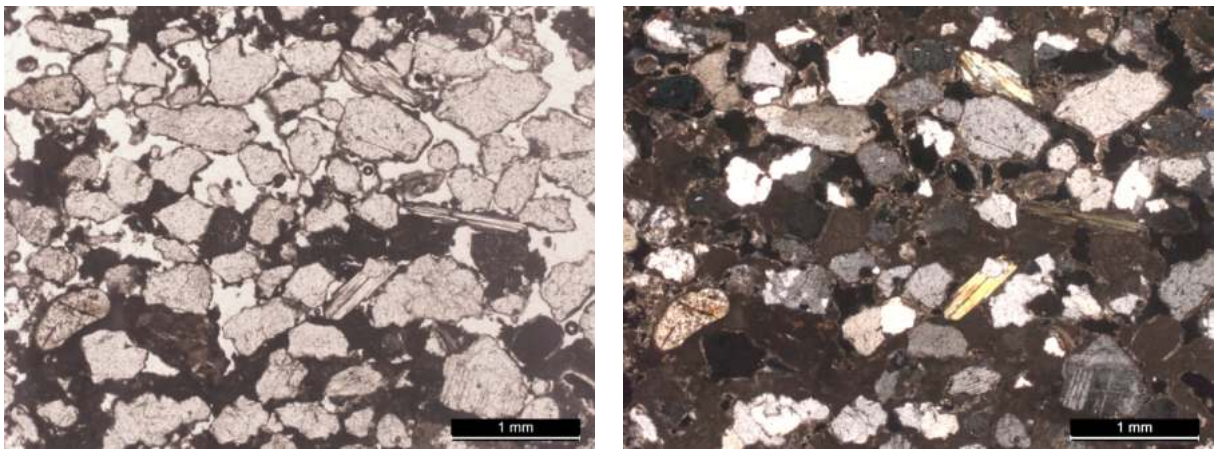

Figure 314 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant une charge composée de quartz, de feldspaths, de micas et de calcite (grossissement × 2.5)

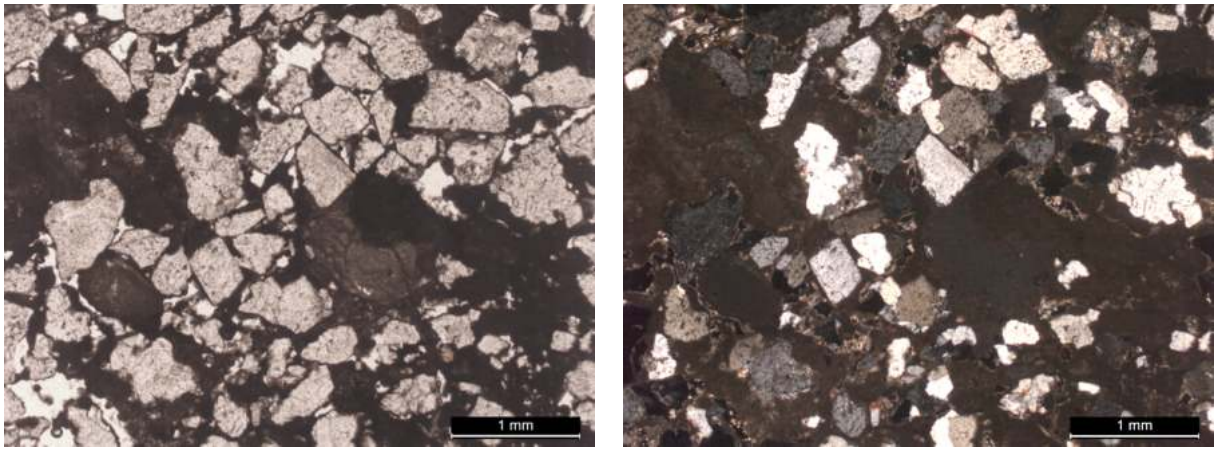

Figure 315 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

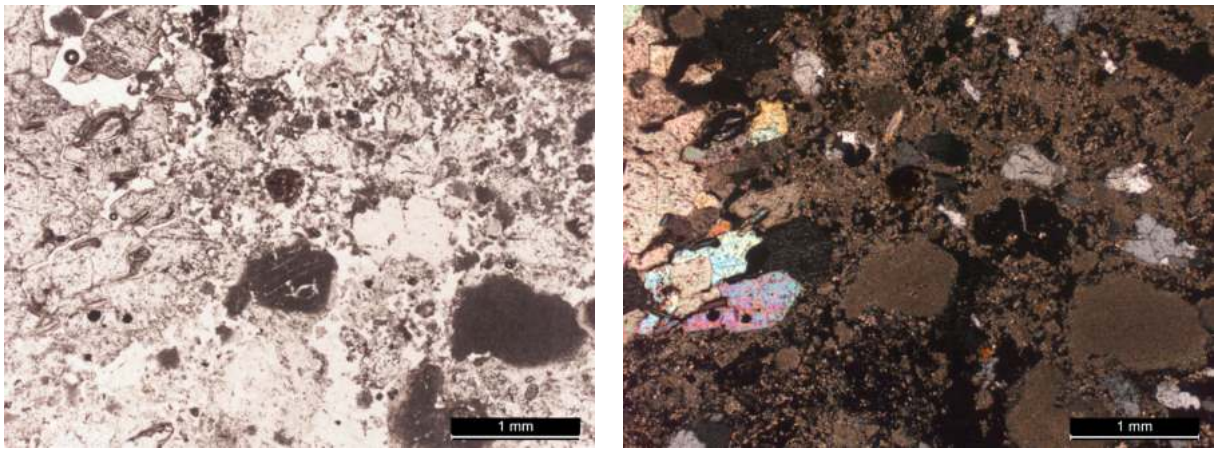

Figure 316 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant la présence de nodules de chaux entièrement carbonatée (grossissement × 2.5)

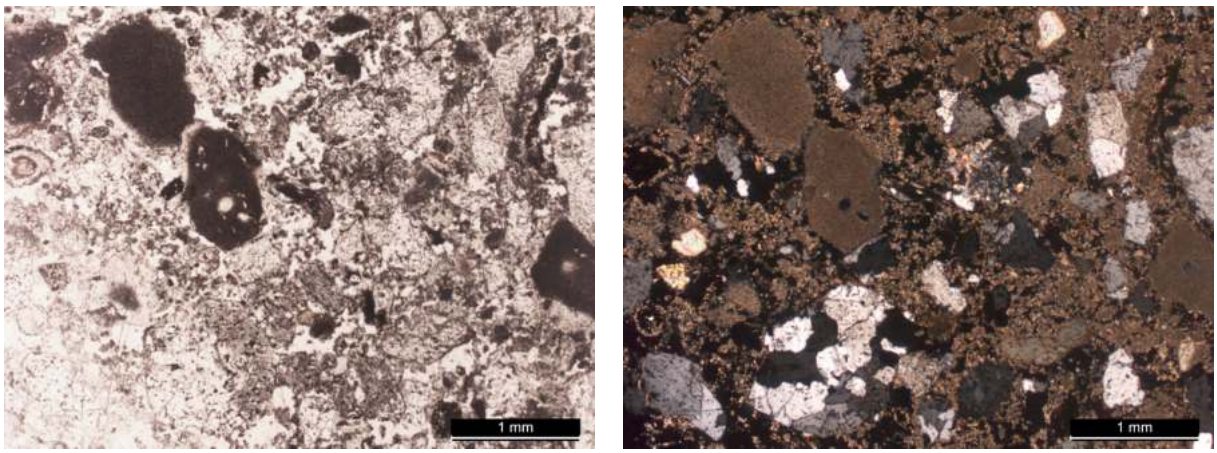

Figure 317 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant des fragments de granite mêlés à la charge (grossissement × 2.5)

BDX22401c : Couche de préparation - *rudus* (16 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 1.0	5	Sphérique	0.2 - 0.4	5
Partiellement calcinés	0.4 - 0.7	1	Oblongue	0.2.- 0.8	5

Tableau 164 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22401c

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.4 - 1.4	5	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Émoussée	5.4	1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	5.0	1	Homogène

Tableau 165 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22401c

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.4	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.4	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.4	3	Homogène
Calcite	Angulaire	0.4 - 0.7	1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène

Tableau 166 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22401c

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 4.0	5	Homogène

Tableau 167 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22401c

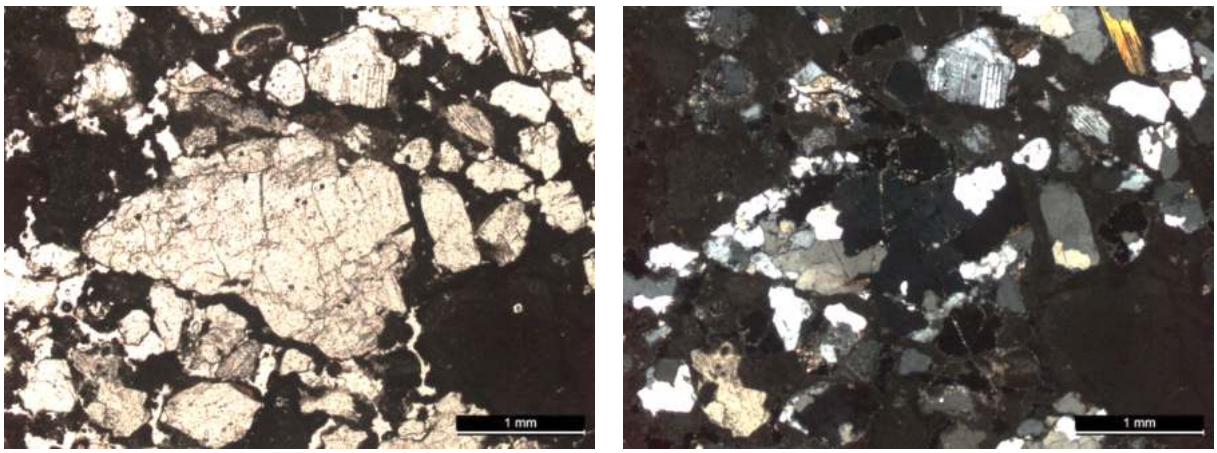

Figure 318 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401c montrant un fragment de granite entouré de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases et de muscovite (grossissement × 2.5)

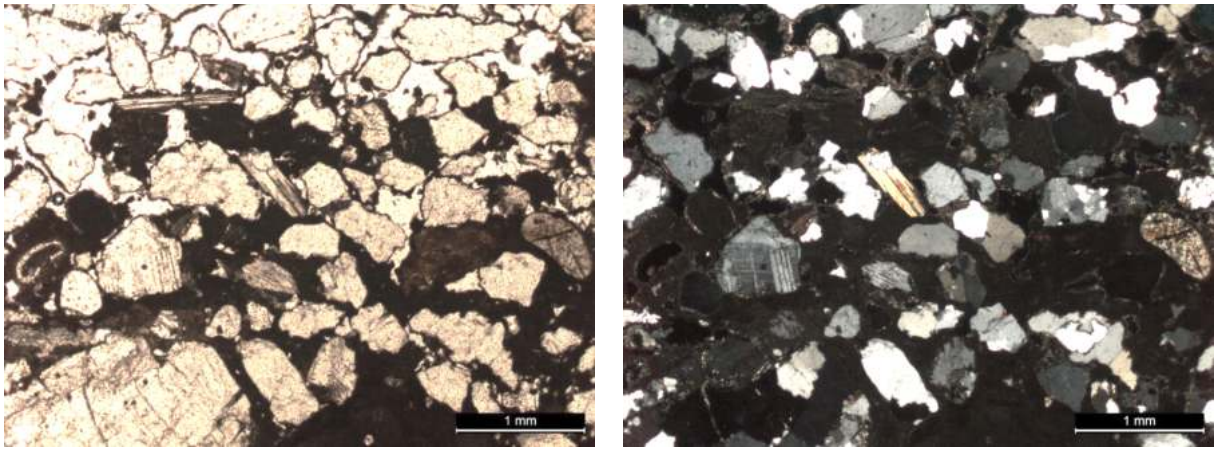

Figure 319 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401c montrant une charge composée de grains principalement de formes angulaires (grossissement × 2.5)

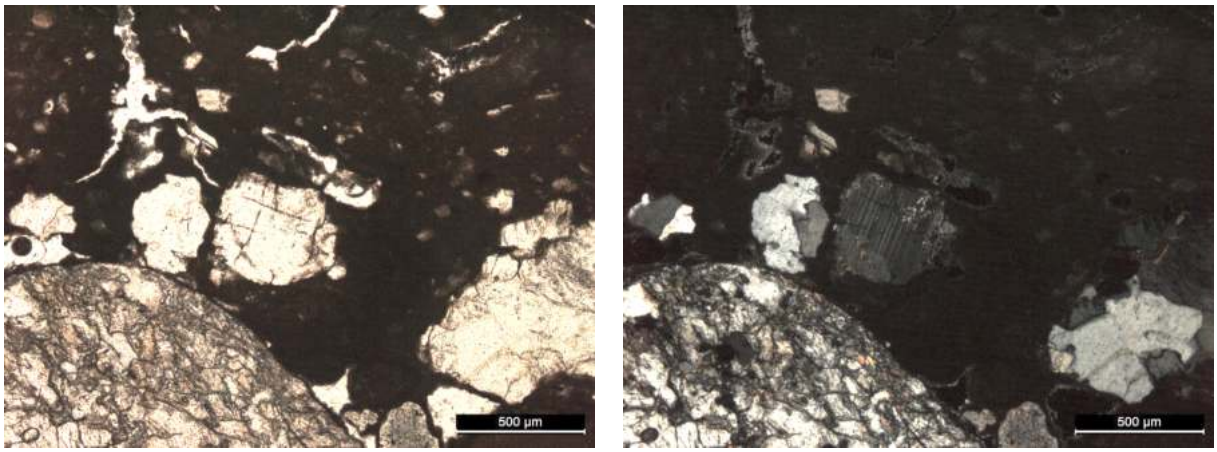

Figure 320 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401c montrant des micro-fragments de granite et un cristal de feldspath plagioclase (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

L'examen à la microscopie optique en cathodoluminescence (CL) révèle un liant homogène à base de chaux carbonatée (manifestant une luminescence orange), avec des nodules de chaux, à la fois non mélangés et partiellement calcinés. La charge est constituée de cristaux et de fragments lithiques de formes angulaires. Parmi ces éléments, on observe la présence de cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), ainsi que feldspaths plagioclases (luminescence verte). Les tesselles, composées de roches calcaires, comportent des pièces de couleur blanche qui présentent une luminescence rouge intense, révélant une matrice micritique contenant des inclusions de foraminifères.

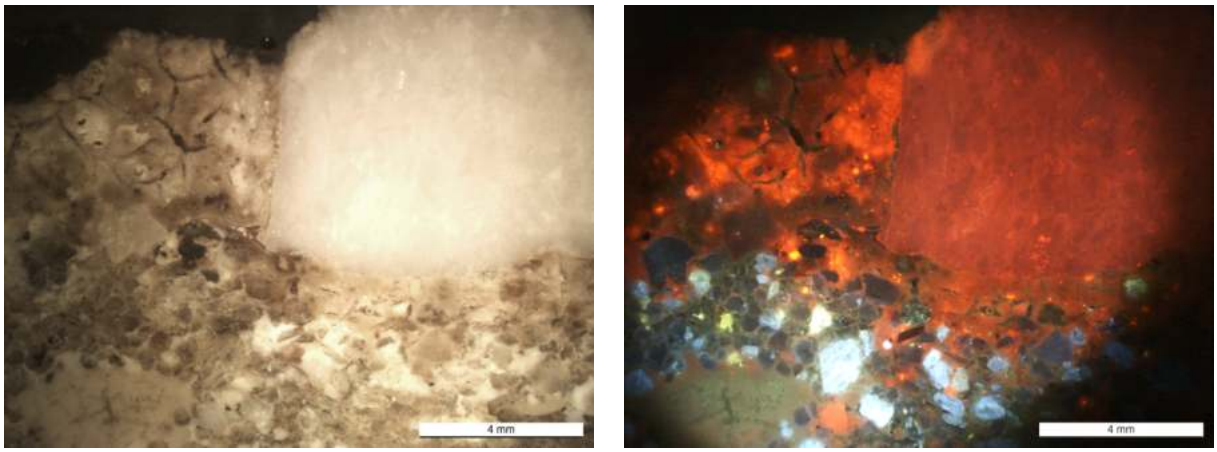

Figure 321 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22401a montrant une tesselle en roche calcaire (biomicrite) à microfossiles (grossissement × 1)

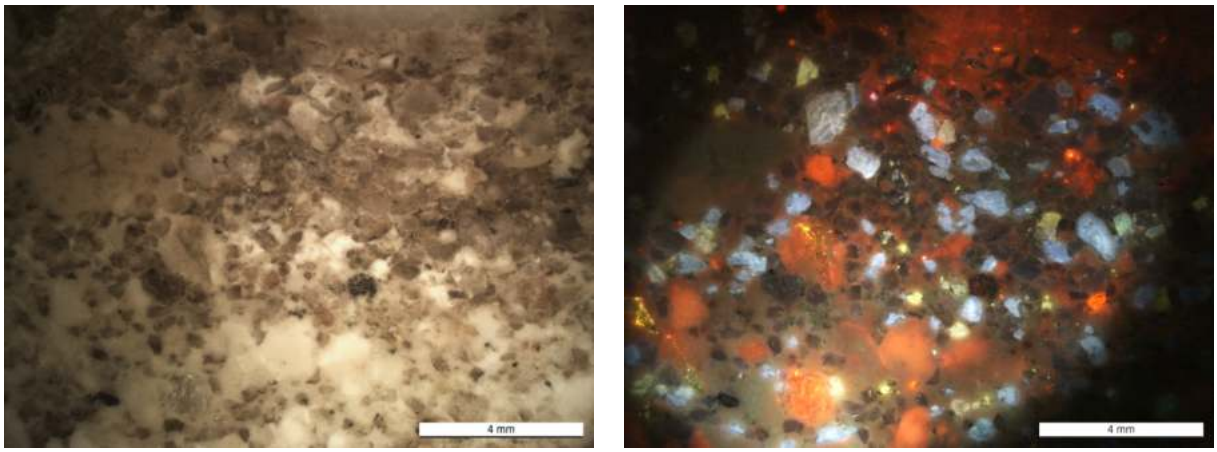

Figure 322 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22401b montrant la composition lithique et minéralogique de la charge (grossissement × 1)

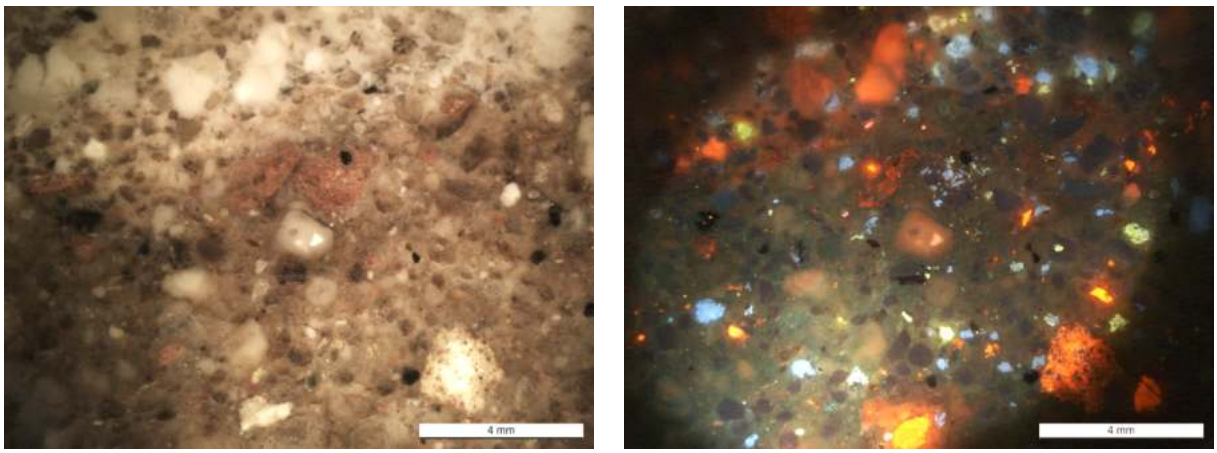

Figure 323 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22401c montrant la composition lithique et minéralogique de la charge (grossissement × 1)

FICHE 25 BDX22402

Figure 324 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22402 depuis la cuve baptismale et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Cuve baptismale
Structure : Ensemble baptismal
Datation : Seconde moitié du IVe s. apr. J.-C.
Localisation : Baptistère
Date de prélèvement : 16/11/2018
Coordonnées : 36.8831556920972, 7.7511424736821

L'échantillon BDX22402 a été prélevé depuis l'enduit de la face externe de la cuve baptismale, située dans le quartier chrétien. L'enduit extérieur du baptistère n'a pas été restauré pendant la campagne menée en 1951, sous la direction d'Erwan Marec.

Caractéristiques morphologiques

Type : Enduit
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit d'étanchéité
Couleur : Rose foncé ; Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment d'enduit est composé de deux couches : une couche de finition épaisse d'environ 4 mm de couleur rose foncé et une couche de préparation d'environ 14 mm d'épaisseur, présentant une couleur beige foncé.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations pétrographiques révèlent un liant de composition hétérogène, comportant des nodules de chaux non mélangés (3 %) et partiellement calcinés (1 %), ainsi qu'une porosité présentant des formes sphériques (10 %) et oblongues (5 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire de granularité homogène, avec des grains de formes angulaires. Ce sable est principalement composé de cristaux de calcite, de quartz, de feldspaths alcalins, de feldspaths plagioclases et de micas. Les inclusions de tuileau sont fines et abondantes (30 %) dans la couche de finition, tandis qu'elles sont de plus grande taille et moins présentes (10 %) dans la couche de préparation.

Figure 325 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22402 montrant deux matrices de couleurs rose foncé et beige foncé

BDX22402a : Couche de finition (4 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 0.4	3	Sphérique	0.1 - 0.3	10
Partiellement calcinés	0.2 - 0.3	1	Oblongue	0.3 - 0.8	5

Tableau 168 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22402a

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.3 - 0.4	1	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	1.3	< 1	Hétérogène

Tableau 169 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22402a

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.5	5	Homogène
Calcite	Angulaire	0.4 - 1.3	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.6	3	Homogène

Tableau 170 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22402a

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 0.6	30	Homogène

Tableau 171 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22402a

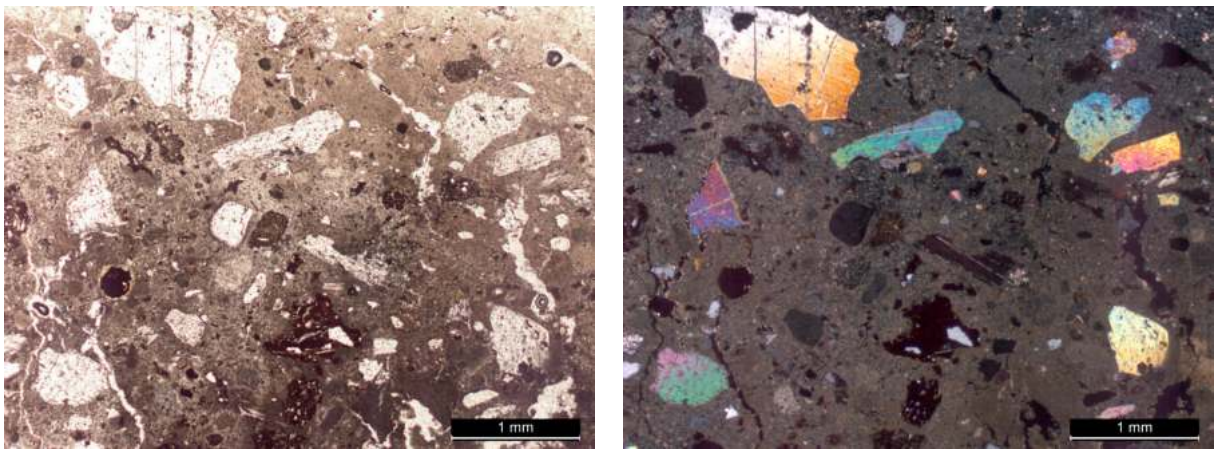

Figure 326 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402a montrant des cristaux de calcite de forme angulaire inclus dans la charge (grossissement × 2.5)

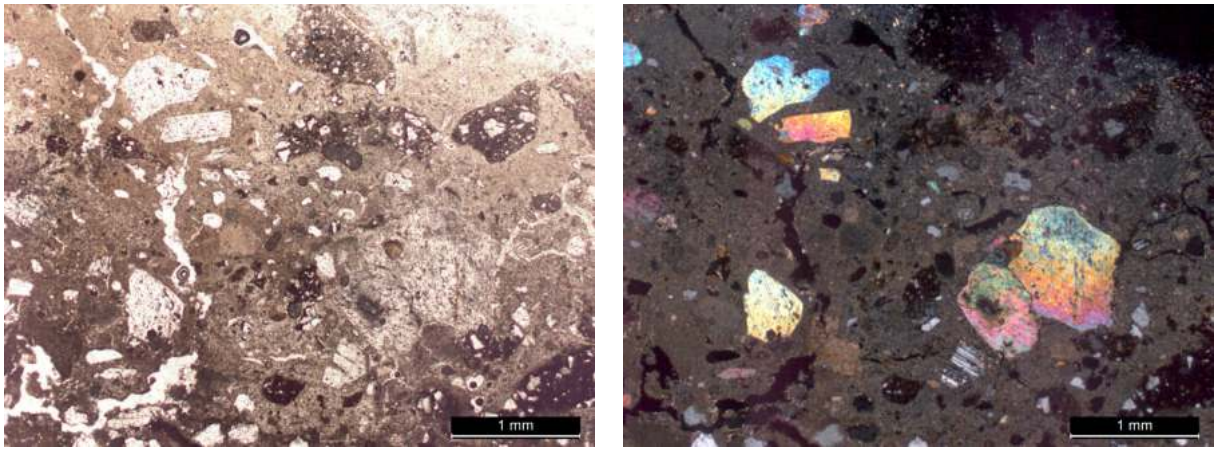

Figure 327 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402a montrant une porosité élevée (20 %) de formes sphériques et oblongues (grossissement × 2.5)

BDX22402b : Couche de préparation (14 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 0.9	3	Sphérique	0.2 - 1.9	10
Partiellement calcinés	0.3 - 0.4	1	Oblongue	0.5 - 1.9	5

Tableau 172 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22402b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Angulaire	0.3 - 0.5	5	Homogène
Marbre	Métamorphique	Angulaire	1.5	3	Homogène

Tableau 173 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22402b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.4	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.2 - 0.4	10	Homogène
Calcite	Angulaire	0.1 - 0.9	10	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.2 - 0.4	5	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.3 -0.9	3	Homogène
Biotite	Angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène

Tableau 174 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22402b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.6 - 7.0	10	Homogène

Tableau 175 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22402b

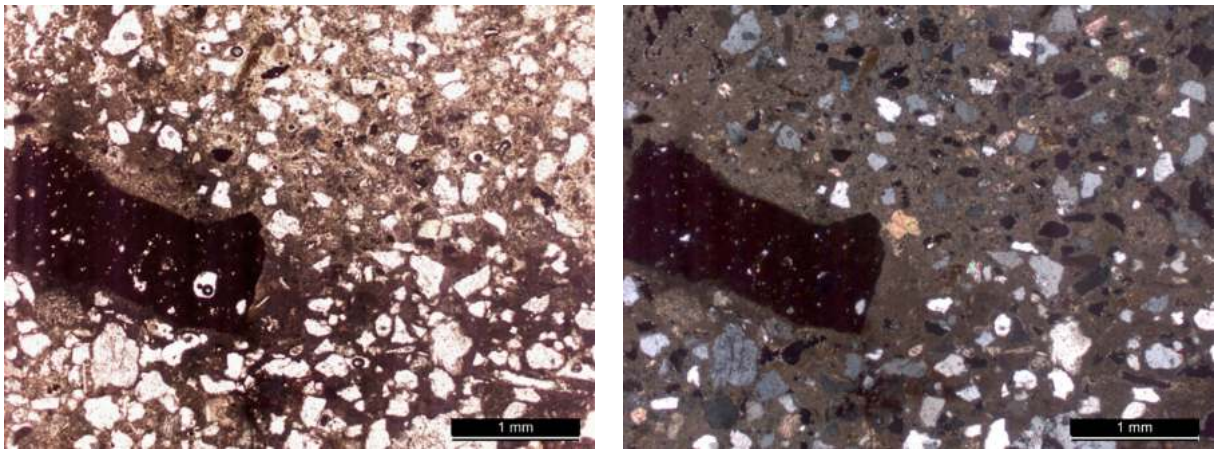

Figure 328 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant une charge constituée d'un sable silico-calcaire de granularité homogène (grossissement × 2.5)

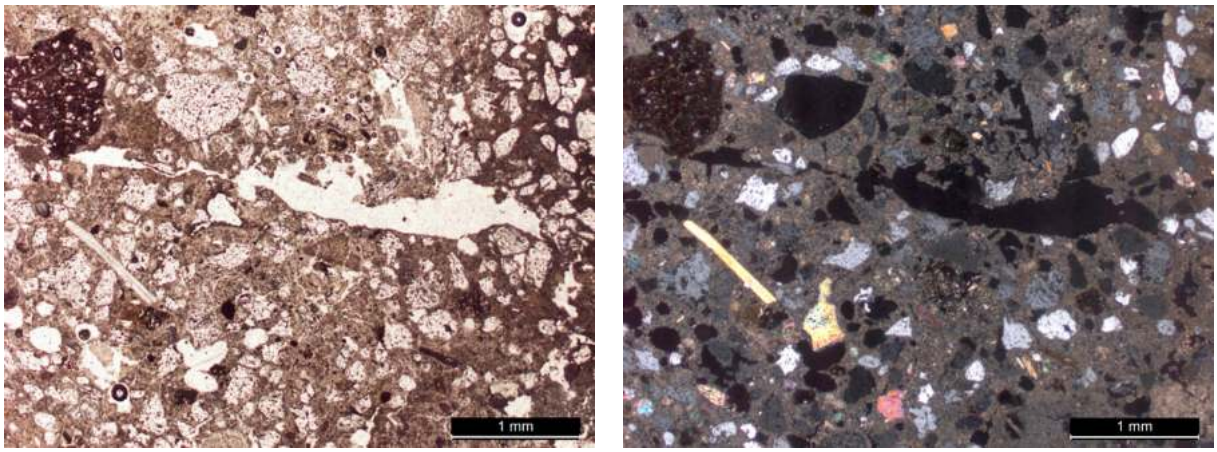

Figure 329 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant des cristaux de quartz, feldspaths, calcite et de micas dans la charge (grossissement × 2.5)

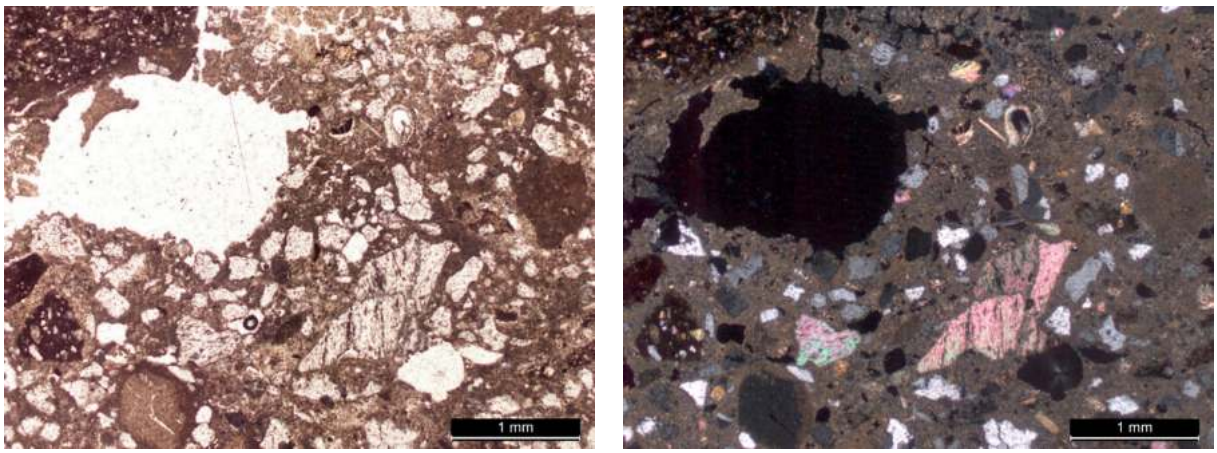

Figure 330 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant la présence de nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

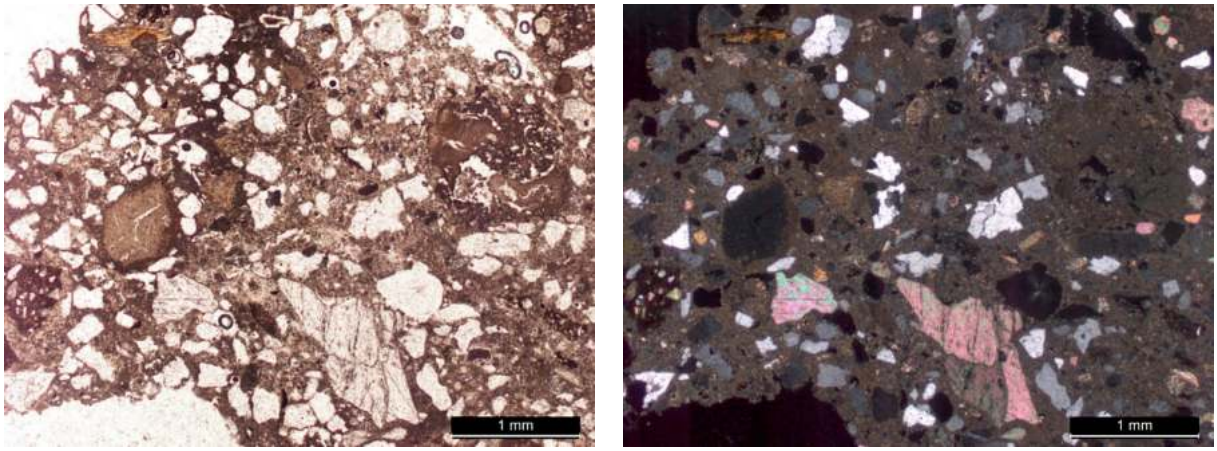

Figure 331 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant des fragments de marbre dispersés dans le liant (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant constitué de chaux carbonatée, présentant de manière hétérogène une luminescence de couleur orange. Ce liant comporte des inclusions de nodules de chaux, à la fois non mélangés et partiellement calcinés. On observe également la présence de cristaux et de fragments lithiques de formes angulaires qui constituent la charge. Parmi ces éléments, on retrouve des cristaux de calcite et des fragments de marbre (une luminescence orange), des cristaux de quartz (luminescence mauve), ainsi que des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), ainsi que des feldspaths plagioclases (luminescence verte). Concernant les inclusions, il s'agit essentiellement de fragments de terre cuite qui présentent des matrices argileuses aux couleurs et compositions minéralogiques variées.

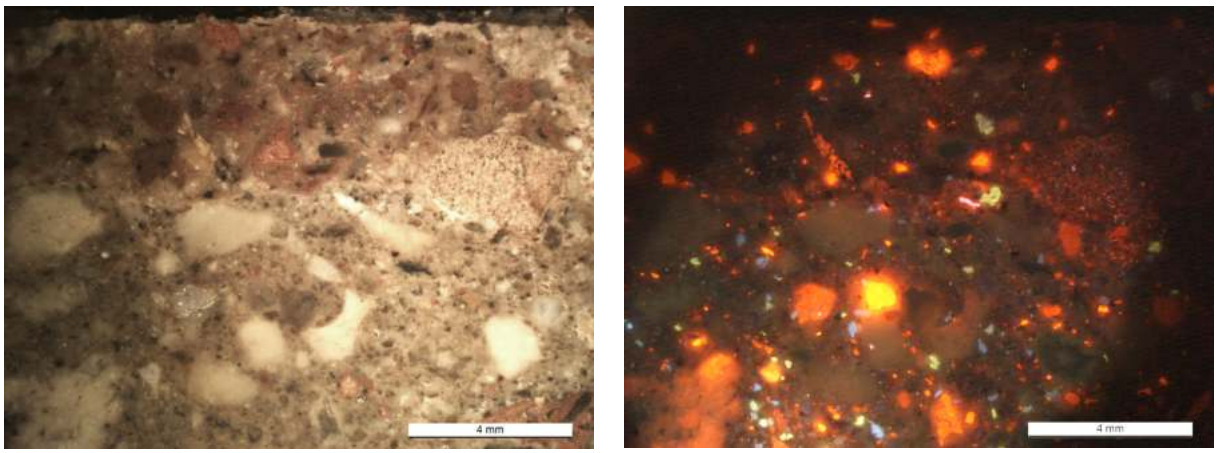

Figure 332 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22402 montrant les nodules de chaux présents dans le liant des deux couches (grossissement × 1)

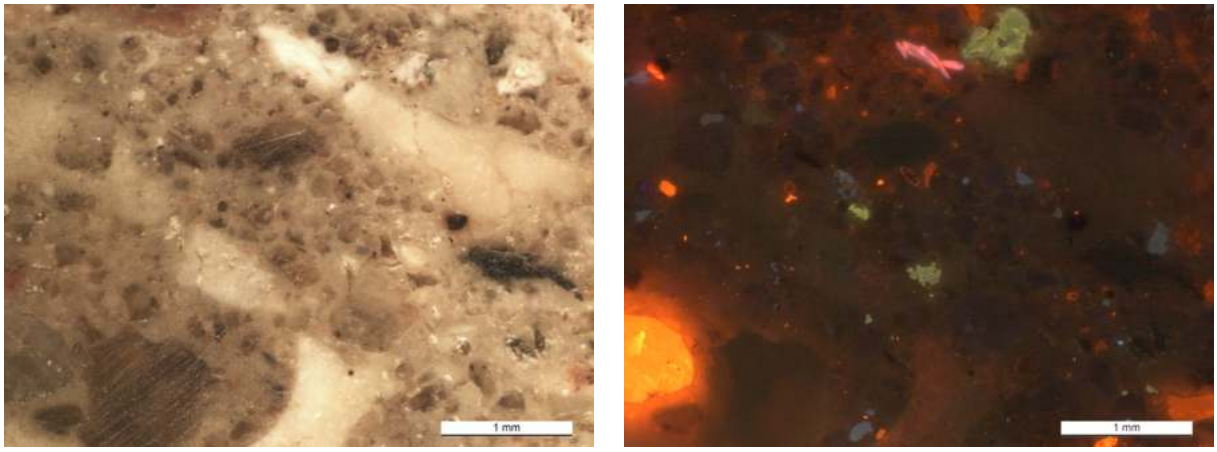

Figure 333 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22402b montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 3.2)

FICHE 26 BDX22403

Figure 334 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22403 depuis la mosaïque de la salle C et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mosaïque ornementale
Structure : Ensemble baptismal
Datation : Seconde moitié du IVe s. apr. J.-C.
Localisation : Salle C
Date de prélèvement : 16/11/2018
Coordonnées : 36.8831154544623, 7.751061797295

L'échantillon BDX22403 a été prélevé depuis une mosaïque ornementale (en bordure), située dans la salle C qui fait partie du complexe baptismal du quartier chrétien. La zone de prélèvement n'a fait l'objet d'aucune intervention lors des campagnes de 1951, dirigées par Erwan Marec, ni pendant celles menées sous la direction de Xavier Delestre, entre 2002 et 2005.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de mosaïque
Couleur : Gris clair ; Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mosaïque est composé de trois couches : un lit de pose épais de 7 mm de couleur blanche, une couche intermédiaire de 13 mm d'épaisseur et une couche de préparation d'environ 34 mm de couleur rose foncé.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition homogène, comportant une proportion significative de nodules de chaux non mélangés (jusqu'à 20 %) et partiellement calcinés (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. S'agissant des inclusions, des fragments de tuileau sont présents dans la couche intermédiaire (jusqu'à 20 %) ainsi que dans la couche de préparation (jusqu'à 40 %). Les tesselles sont formées à partir de roches calcaires de types grainstone et de microsparite.

Figure 335 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22403 montrant deux matrices de couleurs gris clair et rose foncé

BDX22403a : Lit de pose (7 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 1.1	10	Oblongue	0.2 - 0.5	5
Partiellement calcinés	0.2 - 0.3	1	Sphérique	0.1 - 0.2	1

Tableau 176 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du lit de pose BDX22403a

Charge

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.2	< 1	Hétérogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.1 - 0.2	< 1	Hétérogène
Calcite	Sub-angulaire	0.1 - 0.2	< 1	Hétérogène

Tableau 177 : Caractéristiques des fragments minéraux dans la couche BDX22403a

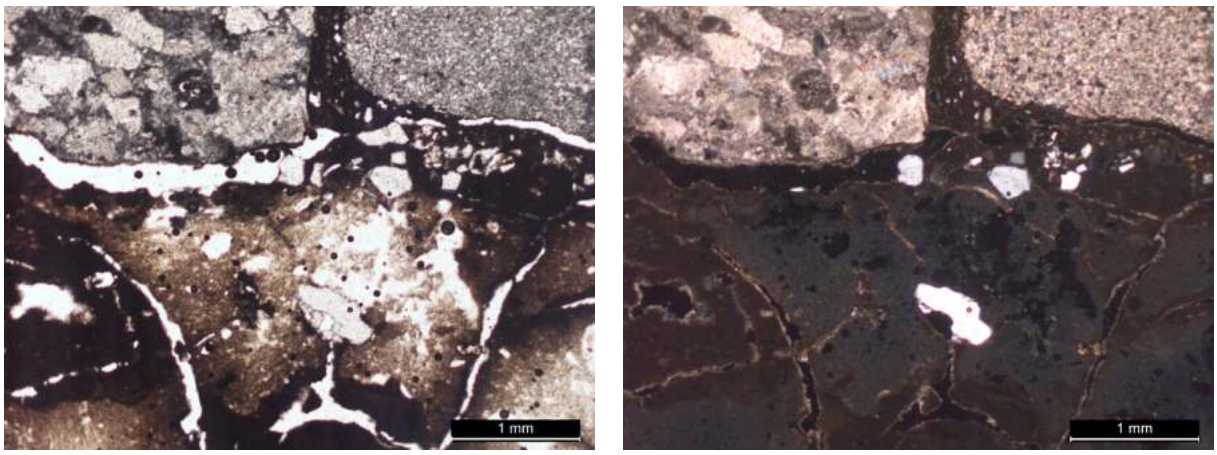

Figure 336 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403a montrant des fragments de tesselles calcaires (microsparite et grainstone) ainsi que la présence élevée (10 %) de nodules de chaux dans le liant du lit de pose (grossissement × 2.5)

BDX22403b : Couche intermédiaire - *nucleus* (13 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 0.7	20	Oblongue	0.2 - 0.5	5
Partiellement calcinés	0.2 - 0.4	1	Sphérique	0.1 - 0.7	1

Tableau 178 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22403b

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.2 - 1.2	5	Homogène

Tableau 179 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22403b

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	5	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	3	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.5 - 0.8	1	Homogène
Biotite	Sub-angulaire	0.3 - 0.5	1	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.5 - 0.9	< 1	Homogène

Tableau 180 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22403b

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 2.3	20	Homogène

Tableau 181 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22403b

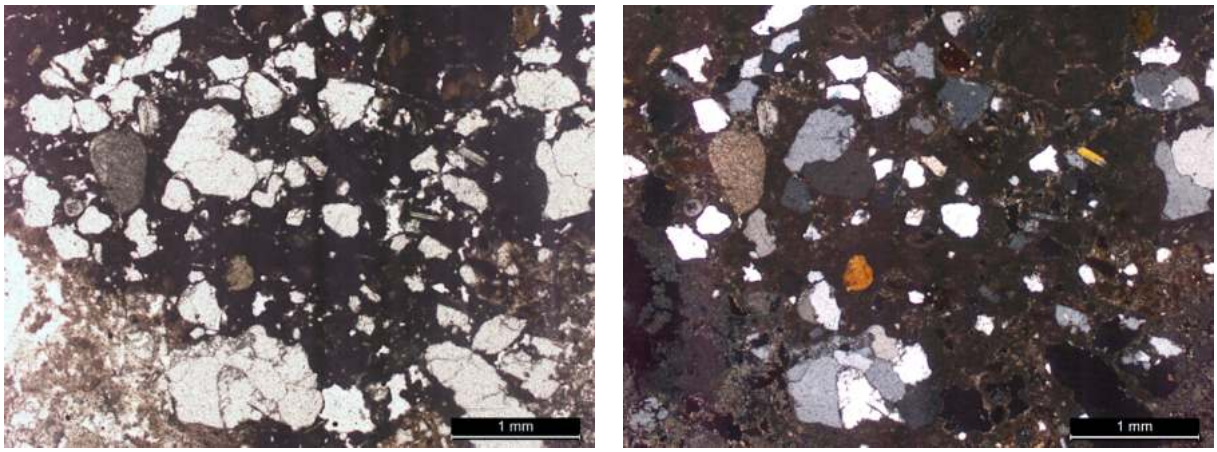

Figure 337 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403b montrant une charge composée d'un sable silico-calcaire avec la présence de nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés dans le liant (grossissement × 2.5)

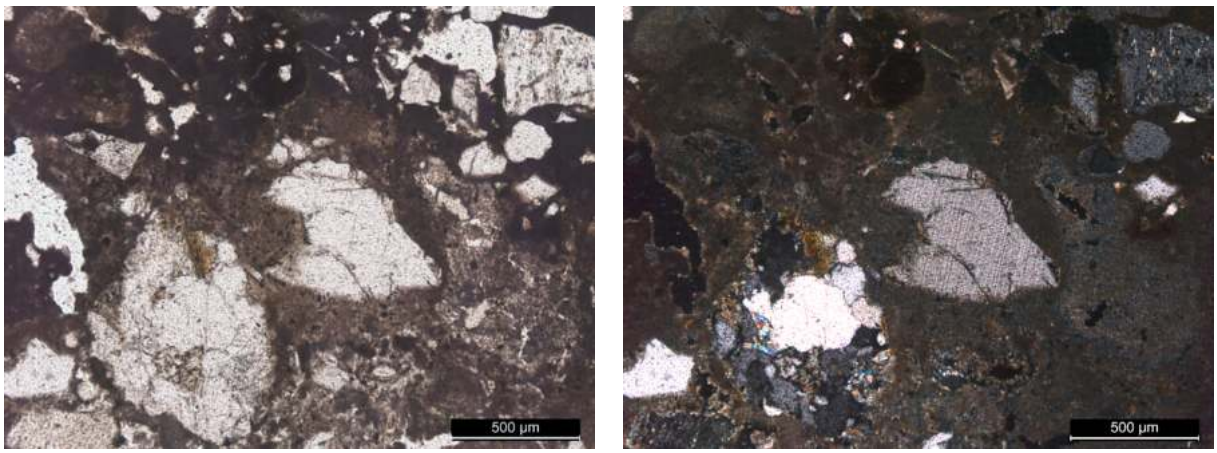

Figure 338 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403b montrant un micro-fragment de granite et un cristal de feldspath plagioclase (grossissement × 2.5)

BDX22403c : Couche de préparation - *rudus* (34 mm)

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.2 - 1.4	20	Oblongue	0.4 - 1.2	20
Partiellement calcinés	0.2 - 0.4	1	Sphérique	0.1 - 0.5	5

Tableau 182 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22403c

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 1.2	10	Homogène

Tableau 183 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22403c

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	10	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.5 - 1.3	3	Homogène
Muscovite	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	3	Homogène
Biotite	Sub-angulaire	0.3 - 1.4	1	Homogène

Tableau 184 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22403c

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.4 - 7.0	40	Homogène

Tableau 185 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22403c

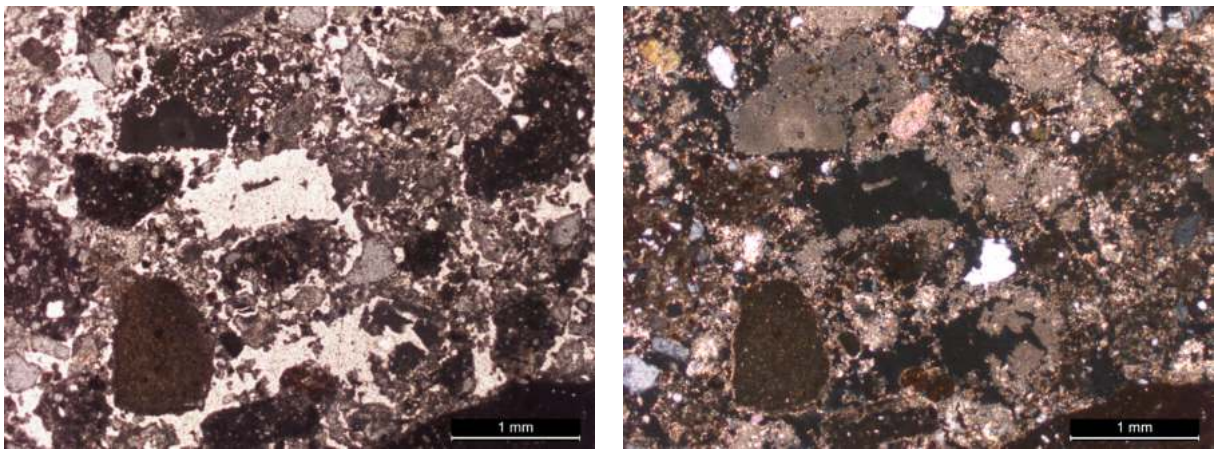

Figure 339 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403c montrant des bioclastes formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

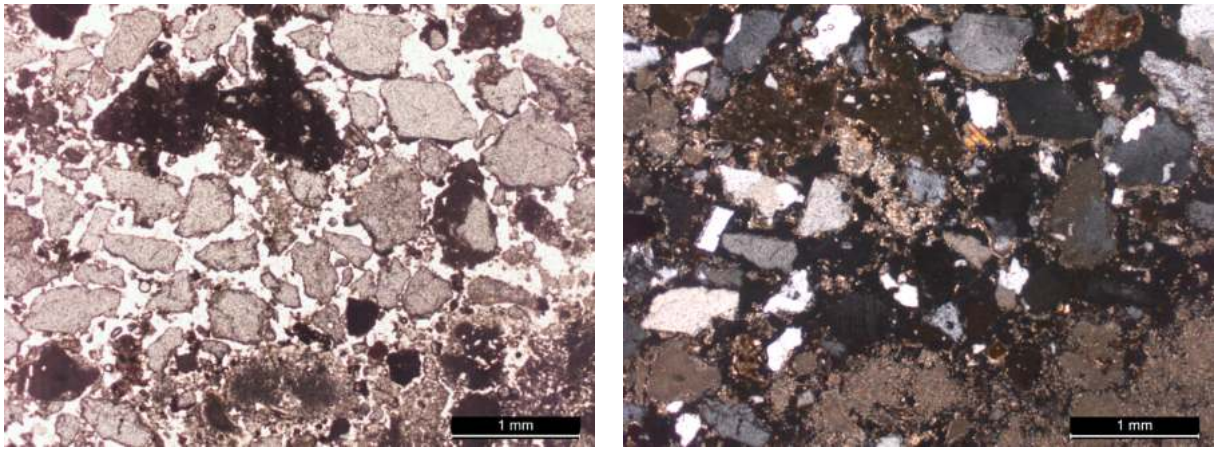

Figure 340 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403c montrant des inclusions de fragments de céramique dans le mélange (grossissement × 2.5)

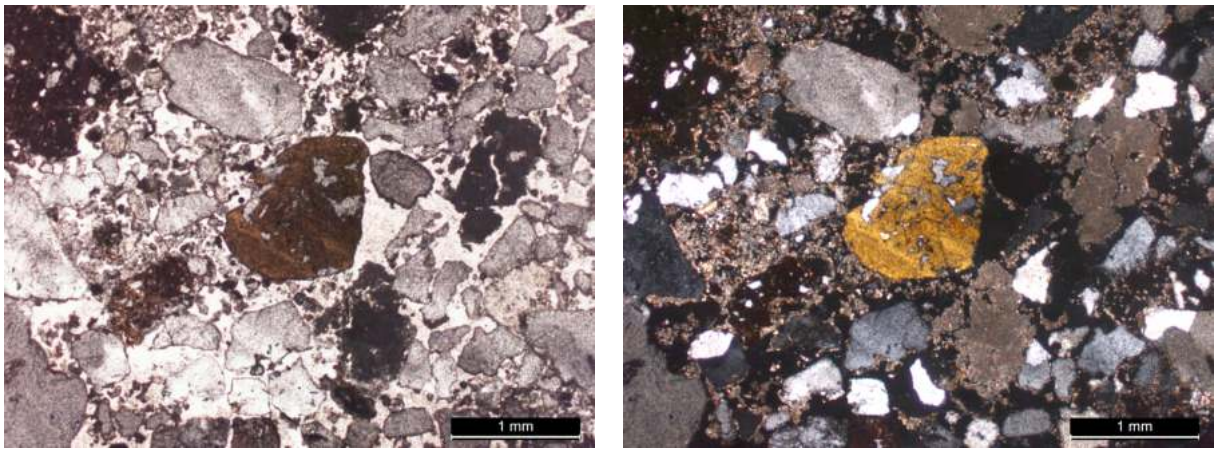

Figure 341 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403c montrant les composants de la charge, dont un fragment de biotite au centre (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène, avec la présence de nodules de chaux à la fois non mélangés et partiellement calcinés. La charge est composée de cristaux et de fragments lithiques de formes sub-angulaires

et à la granularité hétérogène. Parmi ces éléments, on distingue des cristaux de quartz (présentant une luminescence mauve), de feldspaths alcalins (avec une luminescence bleu clair), ainsi que des feldspaths plagioclases (avec une luminescence verte). En outre, les tesselles de couleur rouge sont constituées d'une roche calcaire (microsparite à bioclastes), dont la matrice carbonatée émet une intense luminescence de couleur orange.

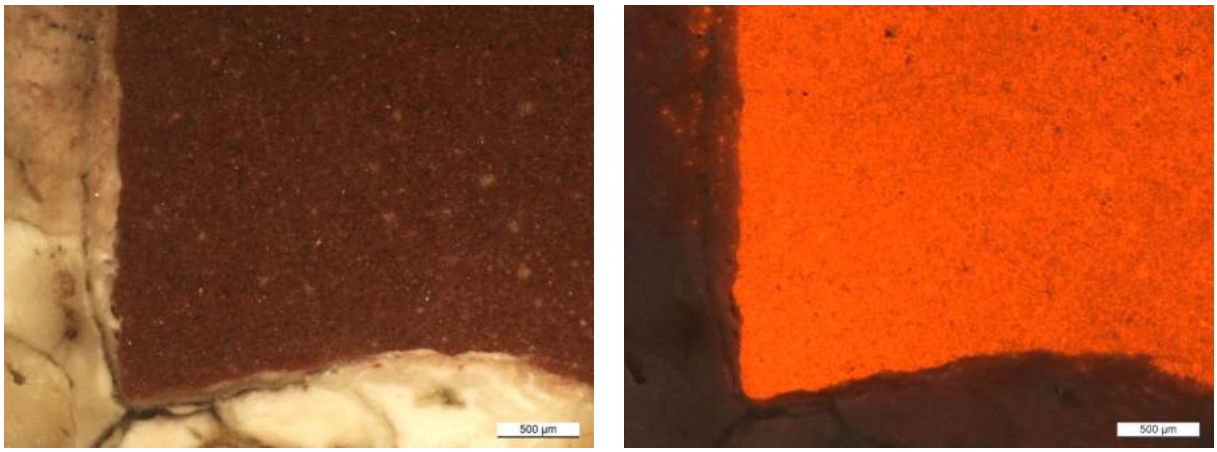

Figure 342 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22403a montrant la matrice de roche carbonatée d'une tesselle rouge (grossissement × 4)

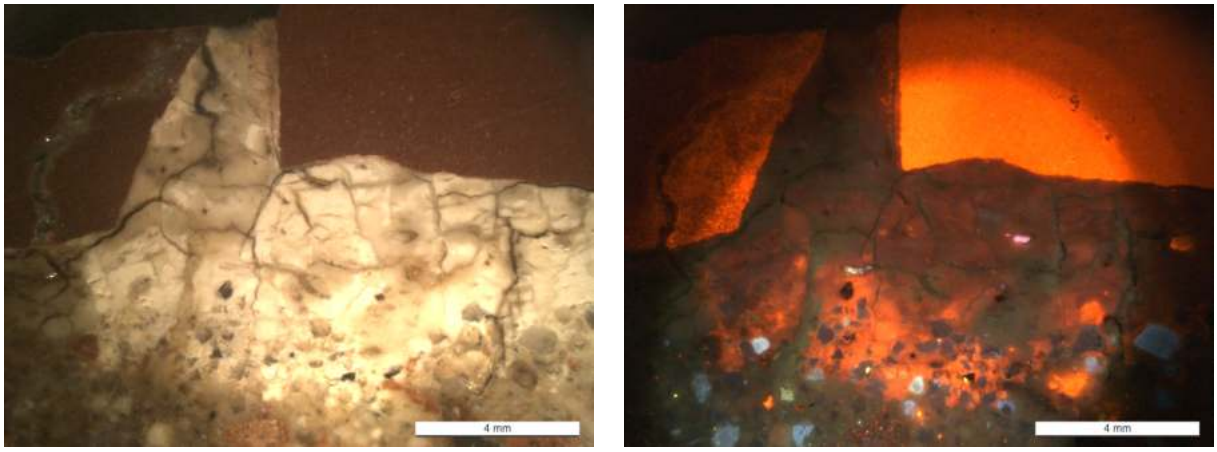

Figure 343 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22403a montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant (grossissement × 1)

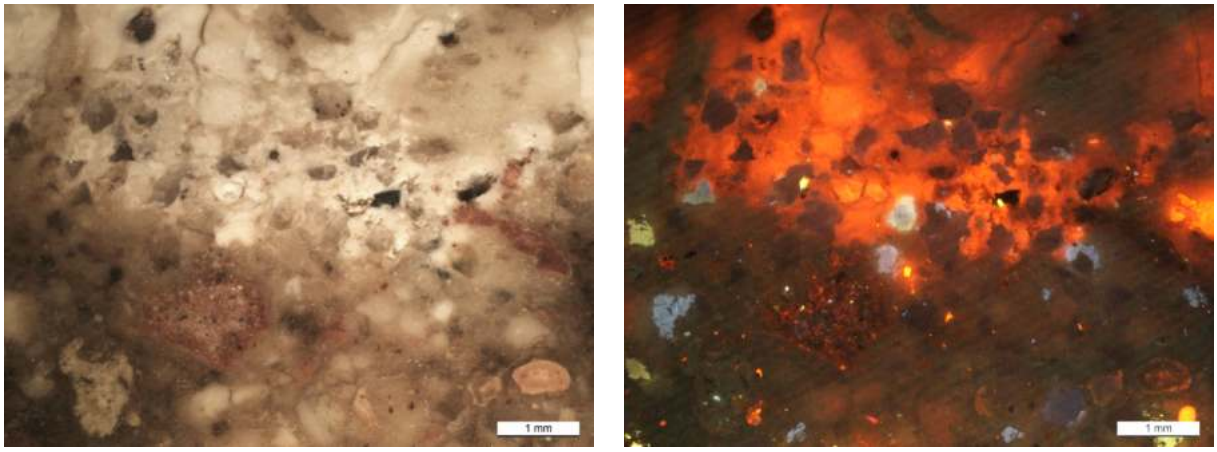

Figure 344 : Microphotographies en lumière naturelle et CL des couches BDX22403b et BDX22403c montrant la composante minéralogique de la charge (grossissement × 2)

FICHE 27 BDX22404

Figure 345 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22404 depuis la cuve de la salle e3 et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Cuve ovale
Structure : Habitation (groupe E)
Datation : IIe siècle apr. J.-C.
Localisation : Salle e3
Date de prélèvement : 16/11/2018
Coordonnées : 36.8828553407987, 7.75103368497719

L'échantillon BDX22404 a été prélevé depuis l'enduit de la cuve ovale, située dans la salle e3 au sein du groupe résidentiel du quartier chrétien. L'échantillon a été spécifiquement sélectionné dans une partie marginale de l'enduit, qui n'a pas été consolidée avec du ciment Portland lors des travaux de restauration réalisés en 1951.

Caractéristiques morphologiques

Type : Béton
Nature du liant : Chaux
Fonction : Enduit d'étanchéité
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de béton est monocouche et mesure environ 35 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations pétrographiques révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux non mélangés (10 %) et partiellement calcinés (3 %), ainsi qu'une porosité présentant des formes sphériques (3 %) et oblongues (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène et dont les grains présentent des formes sub-angulaires. Ce sable est majoritairement constitué de quartz et de feldspaths alcalins, avec quelques rares cristaux de calcite et de bioclastes. En ce qui concerne les inclusions, une présence importante de fragments de tuileau (> 50 %) a été observée dans l'enduit. Ceux-ci présentent une granularité hétérogène (allant de 0,2 à 8 mm) et une répartition homogène dans le mélange.

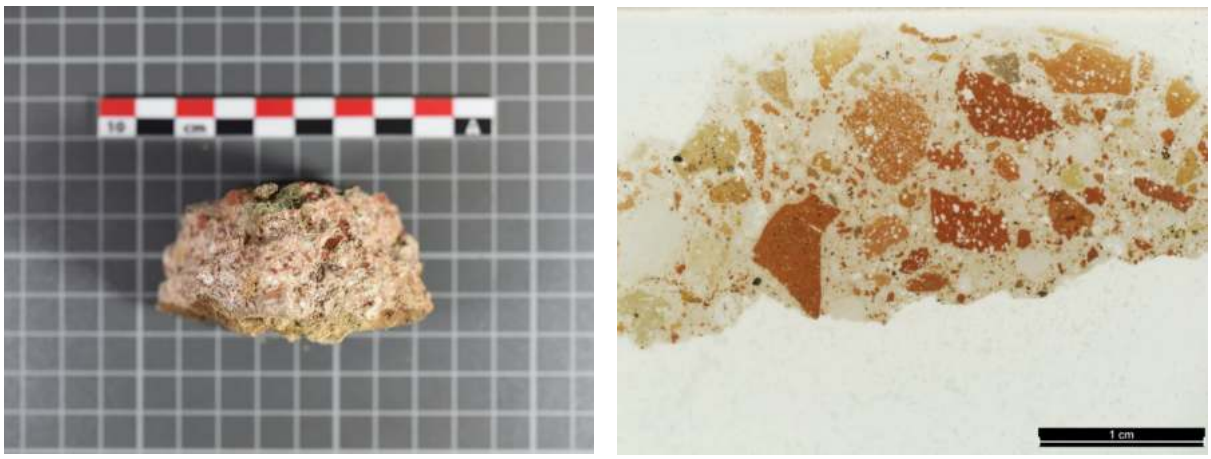

Figure 346 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22404 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.4 - 6.0	10	Oblongue	0.2 - 0.6	3
Partiellement calcinés	0.2 - 0.5	3	Sphérique	0.3 - 0.6	1

Tableau 186 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22404

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.6	< 1	Hétérogène
Arénite	Sédimentaire	Émoussée	0.8	< 1	Hétérogène

Tableau 187 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22404

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Quartz	Sub-angulaire	0.3 - 0.7	3	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.7	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.2 - 0.5	1	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 0.7	< 1	Hétérogène

Tableau 188 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22404

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 8.0	> 50	Homogène

Tableau 189 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22404

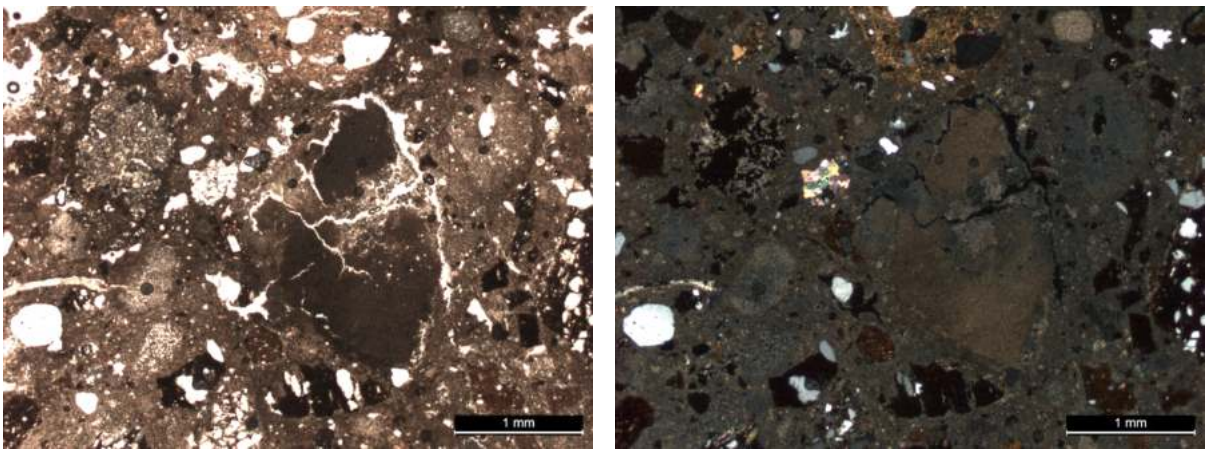

Figure 347 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22404 montrant des nodules de chaux non mélangés présentant des microfissures (grossissement × 2.5)

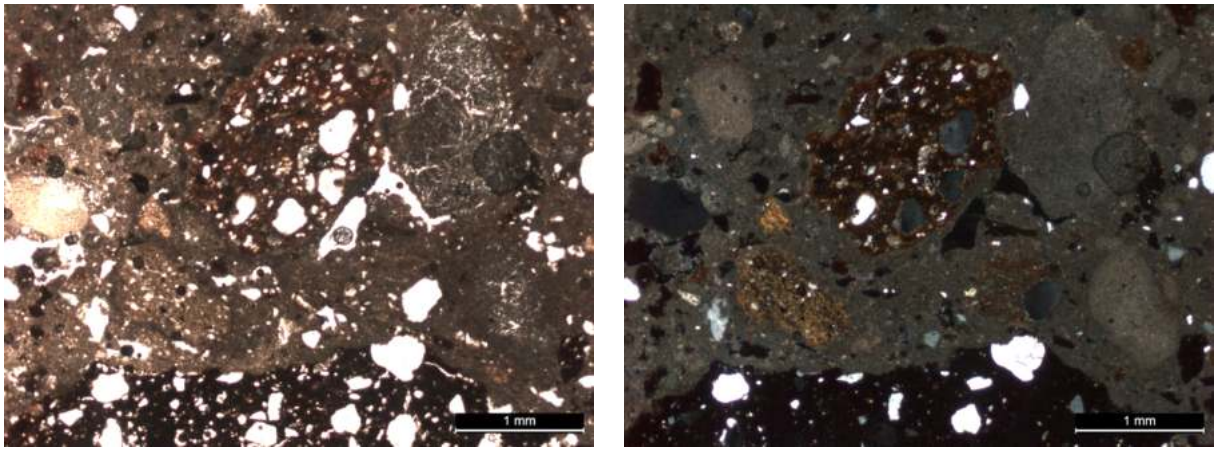

Figure 348 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22404 montrant des inclusions de fragments de céramique dans le mélange (grossissement × 2.5)

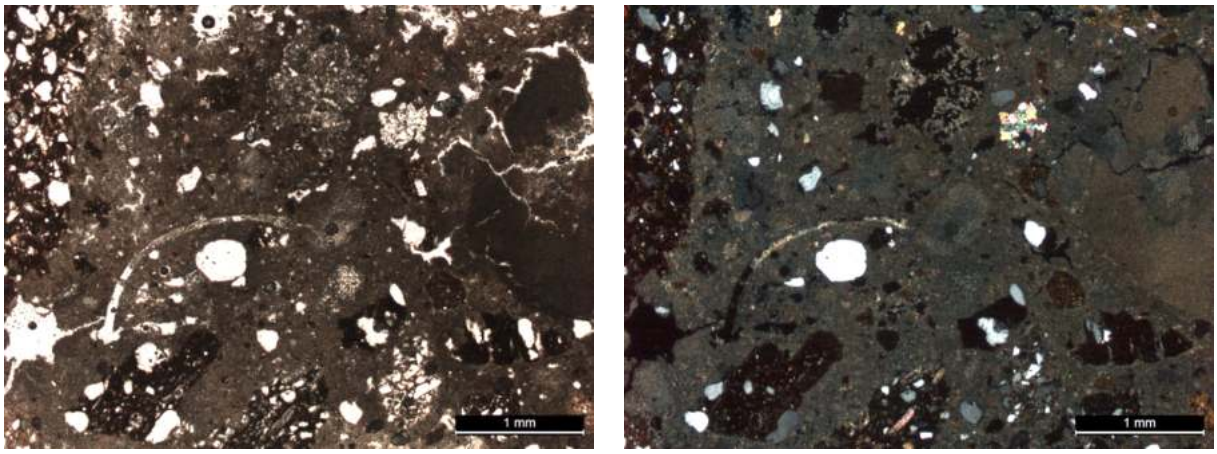

Figure 349 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22404 montrant des cristaux de quartz et feldspaths qui composent la charge ainsi que des fragments de roche calcaire et de fragments de Bivalves présents dans le liant (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les analyses réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant à base de chaux carbonatée (luminescence orange), avec une présence significative de nodules de chaux, à la fois non mélangés et partiellement calcinés. Les cristaux et les fragments lithiques qui constituent la charge sont de formes sub-angulaires et incluent des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), ainsi que des fragments de roche plutonique (granite) et détritique (arénite quartzeuse). En ce qui concerne les inclusions, les fragments de terres cuites (TCA) présentent des matrices argileuses et des compositions minéralogiques variées. Certains fragments contiennent un dégraissant riche en feldspaths plagioclases, tandis que d'autres contiennent des dégraissants riches en quartz, feldspaths alcalins et en cristaux de calcite de granularité très fine.

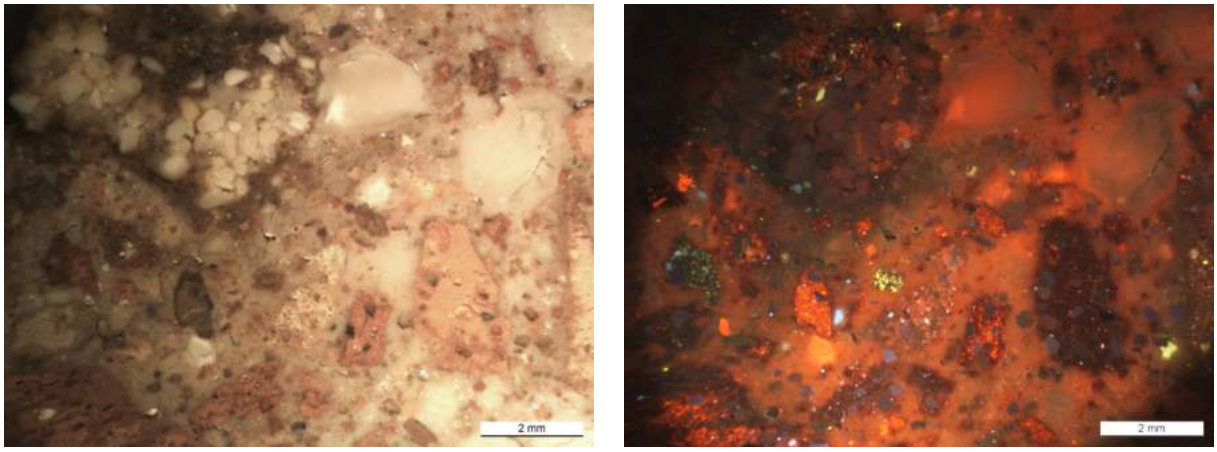

Figure 350 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22404 montrant des inclusions de fragments de céramique (tuileau) de compositions différentes (grossissement × 1.25)

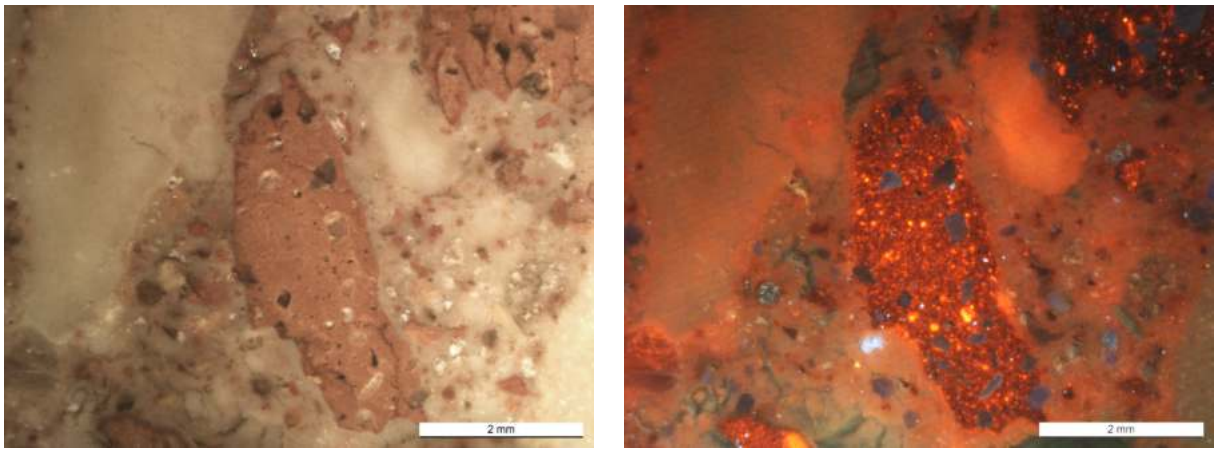

Figure 351 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22404 montrant la composante minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

FICHE 28 BDX22405

Figure 352 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22405 depuis le sol de la salle e4 et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Sol (*opus signinum*)
Structure : Habitation (groupe E)
Datation : IIe siècle apr. J.-C.
Localisation : Salle e4
Date de prélèvement : 16/11/2018
Coordonnées : 36.8828328122525, 7.75097069316218

L'échantillon BDX22405 a été prélevé depuis le revêtement de sol de la salle e4 qui se situe au sein du groupe d'habitation du quartier chrétien. Il provient d'une portion de bordure qui n'a pas fait l'objet de travaux de consolidation pendant la campagne de 1951.

Caractéristiques morphologiques

Type : Béton
Nature du liant : Chaux
Fonction : Revêtement de sol
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Granuleuse

Le fragment de béton est monocouche et mesure environ 60 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

L'analyse pétrographique révèle un liant de composition hétérogène, avec une forte présence de nodules de chaux partiellement calcinés (20 %), principalement des éléments bioclastiques cimentés (calcarénite), ainsi que d'une porosité de formes sphériques (3 %) et oblongues (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène, comportant des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est majoritairement composé de cristaux de calcite, de quartz, de feldspaths alcalins et de fragments de roche détritique (arénite quartzeuse). Parmi les inclusions, on observe une forte présence (> 50 %) de fragments de tuileau, de granularité hétérogène (entre 0,3 et 20 mm), dont la distribution est homogène au sein du mélange.

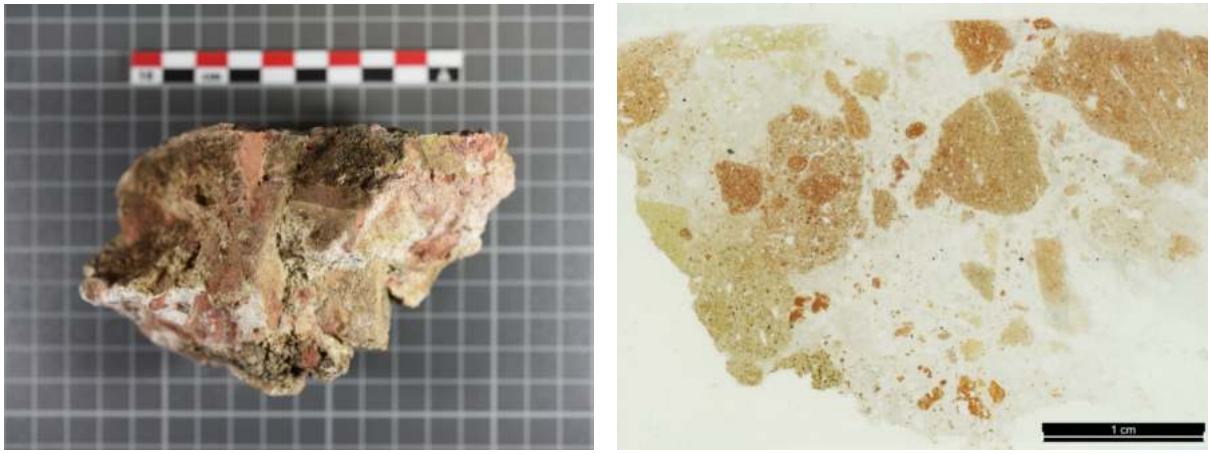

Figure 353 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22405 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.7 - 1.0	20	Oblongue	0.3 - 0.9	3
			Sphérique	0.1 - 0.4	1

Tableau 190 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22405

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Arénite	Sédimentaire	Sub-angulaire	0.4	< 1	Hétérogène

Tableau 191 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22405

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.4	10	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.2 - 0.7	5	Hétérogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	1	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.3	< 1	Homogène

Tableau 192 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22405

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 20	> 50	Homogène

Tableau 193 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22405

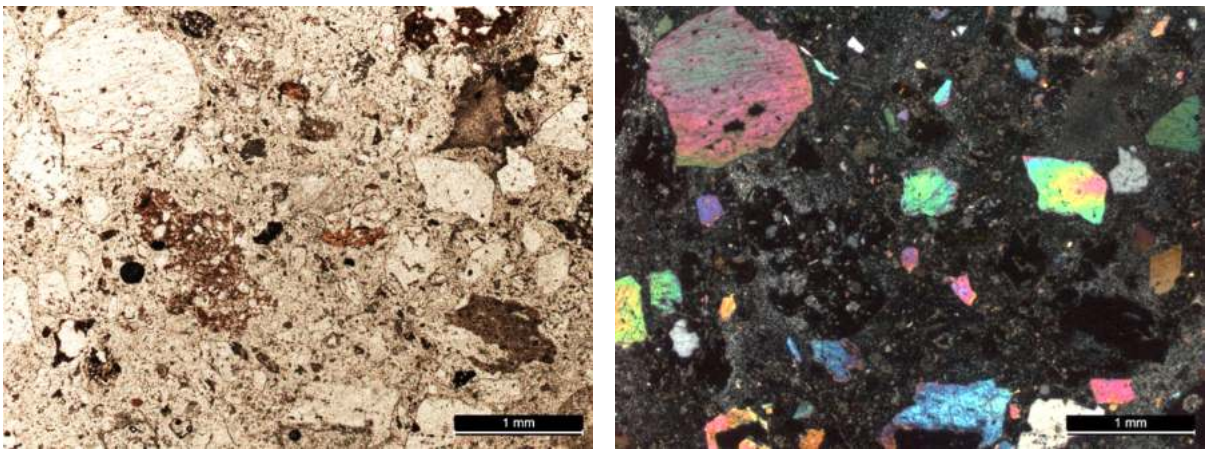

Figure 354 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22405 montrant la présence de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 2.5)

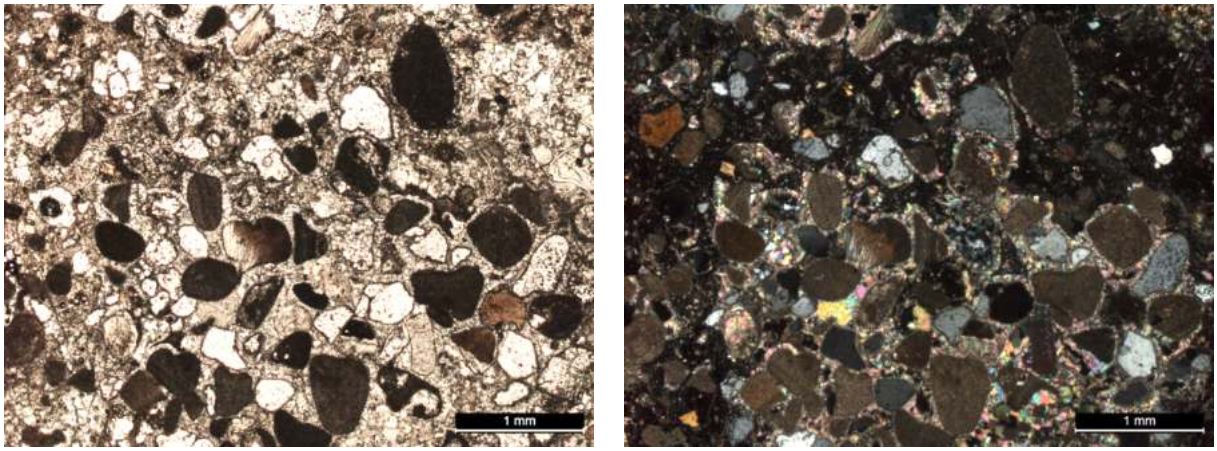

Figure 355 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22405 montrant des fragments de roche calcaire (calcarénite) fossilifère (grossissement × 2.5)

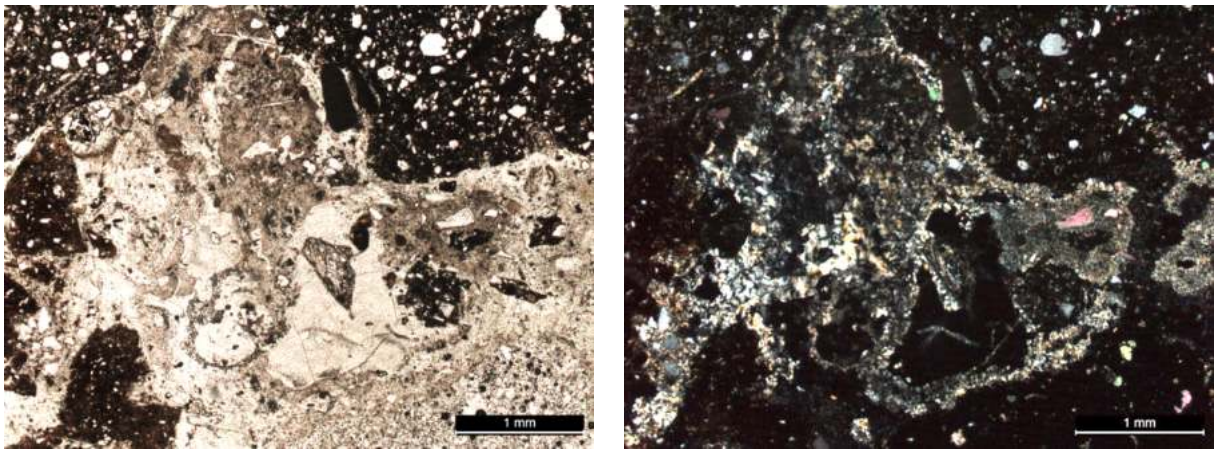

Figure 356 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22405 montrant des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant hétérogène, composé de chaux carbonatée de manière (luminescence de couleur orange), avec des dépôts secondaires de calcite au sein des interstices. On y observe également des nodules de chaux, non mélangés et partiellement calcinés, caractérisés par des formes de bioclastes cimentés. La charge est composée de cristaux et de fragments lithiques de formes sub-angulaires, incluant des cristaux de calcite (luminescence orange), de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), ainsi que des fragments de roche détritique telle que l'arénite quartzeuse. Les fragments de terre cuite présentent des matrices argileuses avec des compositions minéralogiques variées ; certains fragments contiennent un dégraissant riche en feldspaths plagioclases, tandis que d'autres contiennent des dégraissants riches en quartz, en feldspaths alcalins et en cristaux de calcite de granularité très fine. Enfin, une forte luminescence de couleur rouge orangé est observée dans les zones se trouvant entre les fragments de tuileau et le liant à base de chaux. Ces zones correspondent aux formations d'aluminosilicates de calcium hydratés (phases minérales produites par les réactions pouzzolaniques).

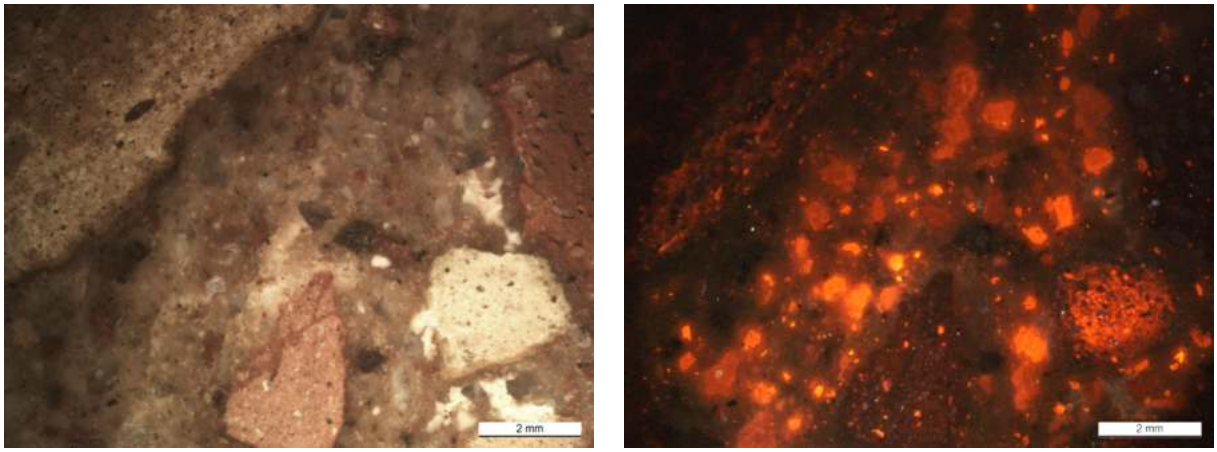

Figure 357 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22405 montrant les cristaux de calcite dispersés dans la charge (grossissement × 1.25)

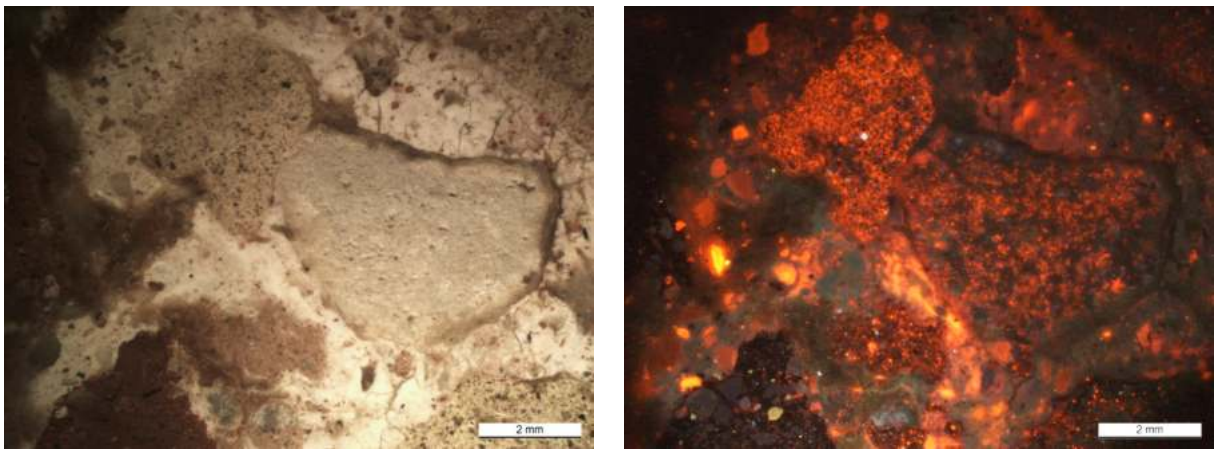

Figure 358 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22405 montrant les réactions pouzzolaniques (formations de C-A-S-H) entre les fragments de tuileau et le liant à base de chaux (grossissement × 1.25)

FICHE 29 BDX22406

Figure 359 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22406 depuis une pilette d'hypocauste et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Pilettes d'hypocauste
Structure : Ensemble thermal (groupe F)
Datation : IIe siècle apr. J.-C.
Localisation : Hypocauste
Date de prélèvement : 17/11/2018
Coordonnées : 36.8830882081469, 7.75050360447041

L'échantillon BDX22406 a été prélevé depuis l'une des pilettes de l'hypocauste qui se trouve sous le complexe thermal du quartier chrétien. Le prélèvement a été réalisé entre deux carreaux d'une pilette destinée à soutenir la dalle de *suspensura*, désormais absente. L'ensemble n'a pas fait l'objet de travaux de restauration lors de la campagne de 1951.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Joint de carreaux de pilettes
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 15 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen pétrographique de l'échantillon révèle un liant de composition hétérogène, comprenant une proportion importante de nodules de chaux non mélangés (30 %) et partiellement calcinés (5 %), ainsi qu'une porosité aux formes sphériques (5 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène et dont les grains présentent des formes sub-angulaires. Ce sable comprend des cristaux de quartz, de feldspaths, de micas et de calcite, ainsi que des fragments lithiques de nature plutonique et détritique. S'agissant des inclusions, une forte présence de fragments de tuileau est à noter (40 %), ceux-ci affichant une granularité hétérogène (de 0,2 à 3,8 mm).

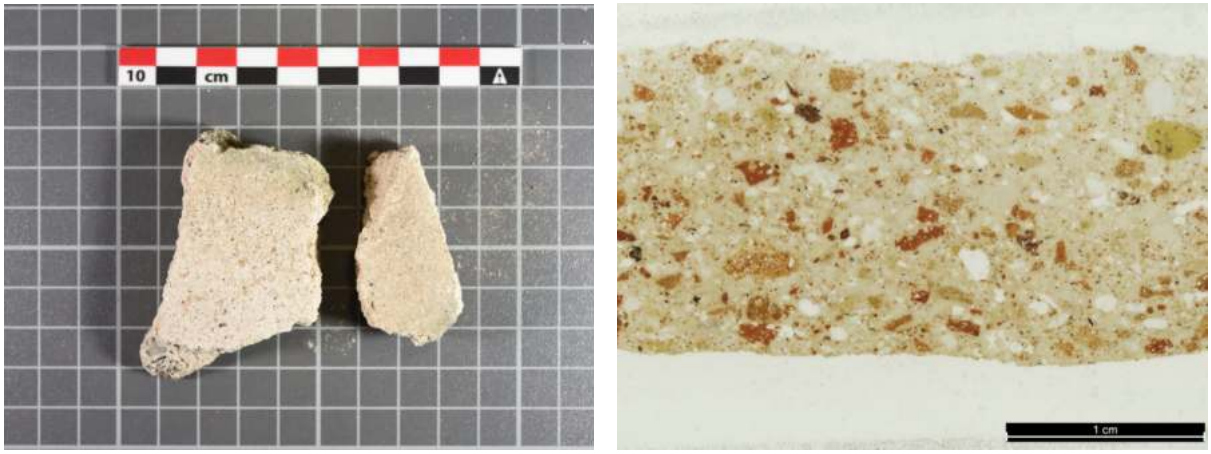

Figure 360 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22406 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.4 - 1.5	30	Sphérique	0.1 - 1.9	5
Partiellement calcinés	0.4 - 0.8	5	Oblongue	0.4 - 2.0	3

Tableau 194 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22406

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.3 - 1.0	5	Homogène
Arénite	Sédimentaire	Sub-émoussée	0.7 - 1.3	1	Homogène

Tableau 195 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22406

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	10	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	5	Homogène
Calcite	Angulaire	0.2 - 1.9	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.2 - 0.7	3	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.4 - 0.6	1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.4 - 0.8	1	Homogène

Tableau 196 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22406

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 3.8	40	Homogène

Tableau 197 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22406

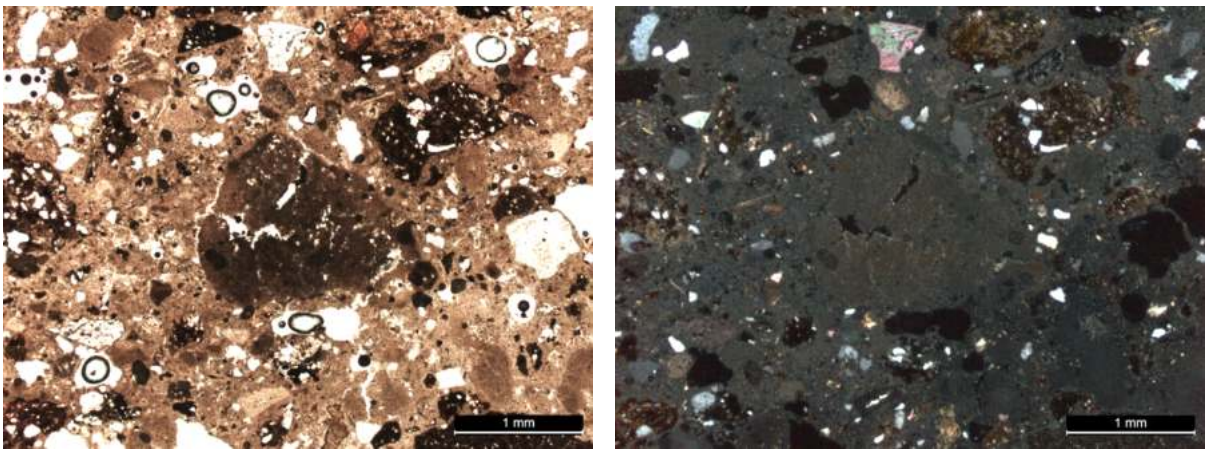

Figure 361 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22406 montrant un nodule de chaux non mélangé présentant des microfissures (grossissement × 2.5)

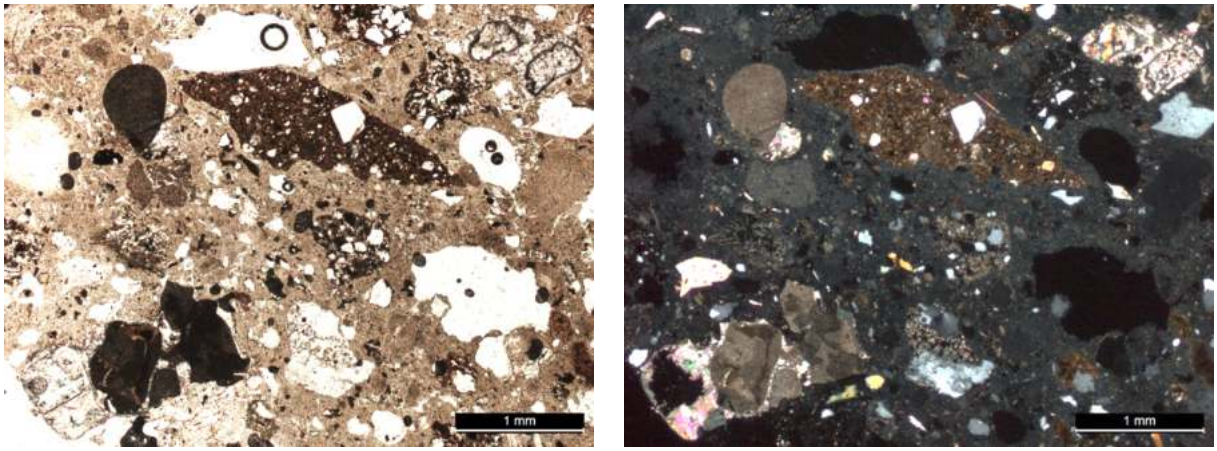

Figure 362 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22406 montrant des éléments bioclastiques qui forment des nodules de chaux partiellement calcinés ainsi que des inclusions de fragments de céramique (grossissement × 2.5)

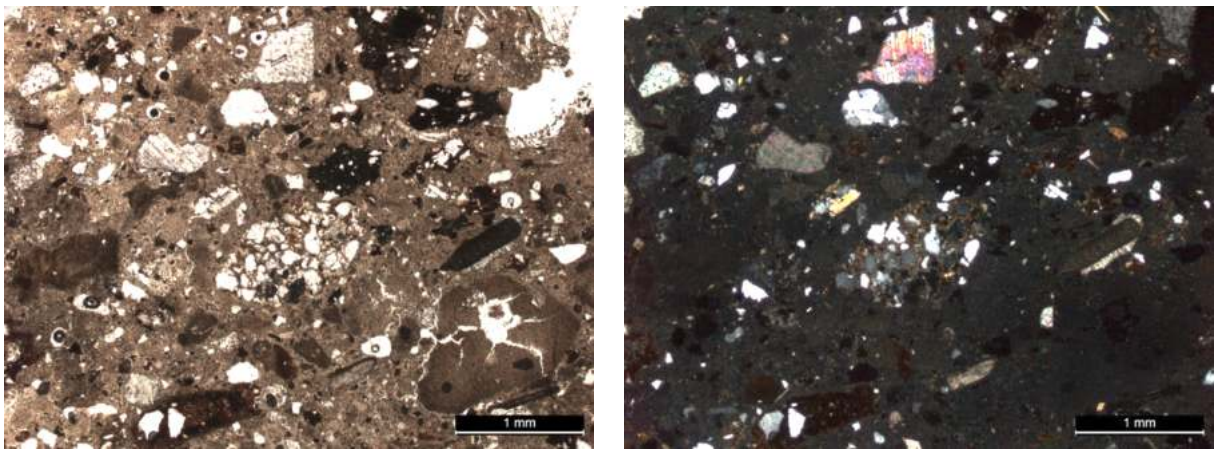

Figure 363 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22406 montrant des fragments lithiques (arénite quartzeuse et granite) qui composent la charge ainsi que des bioclastes (algues rouges) dispersés dans le mélange (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de composition hétérogène, caractérisé par une forte présence de nodules de chaux non mélangés (30 %) et partiellement calcinés (5 %), émettant une luminescence intense de couleur rouge orangé. En outre, les cristaux et les fragments lithiques qui constituent la charge sont essentiellement de formes sub-angulaires. Parmi ces éléments, on distingue des cristaux de quartz (affichant une luminescence mauve), des feldspaths alcalins (avec une luminescence bleu clair), ainsi que des feldspaths plagioclases (présentant une luminescence verte). En ce qui concerne les inclusions de tuileau, les fragments de terres cuites présentent des matrices argileuses de couleurs variées ainsi que des compositions minéralogiques différentes.

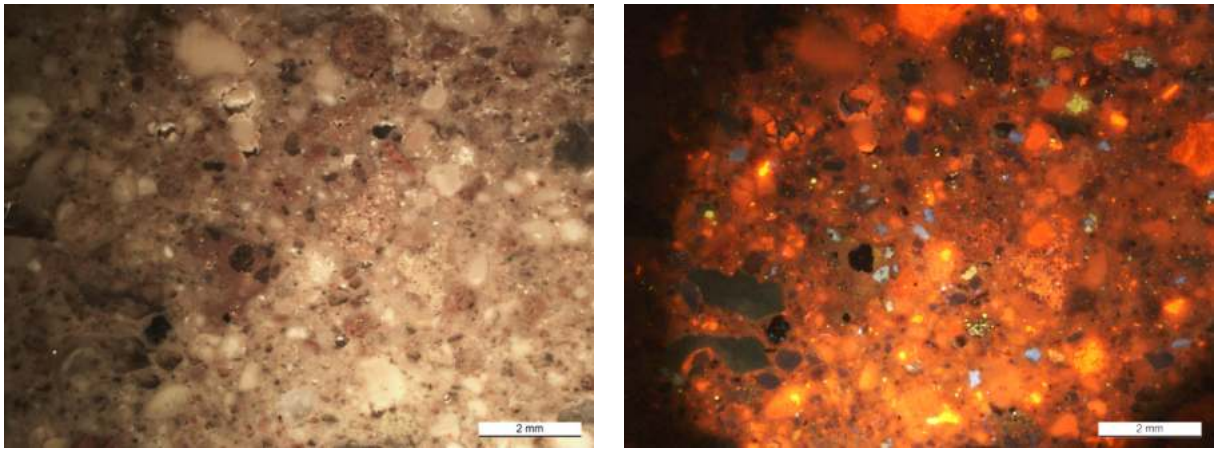

Figure 364 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22406 la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

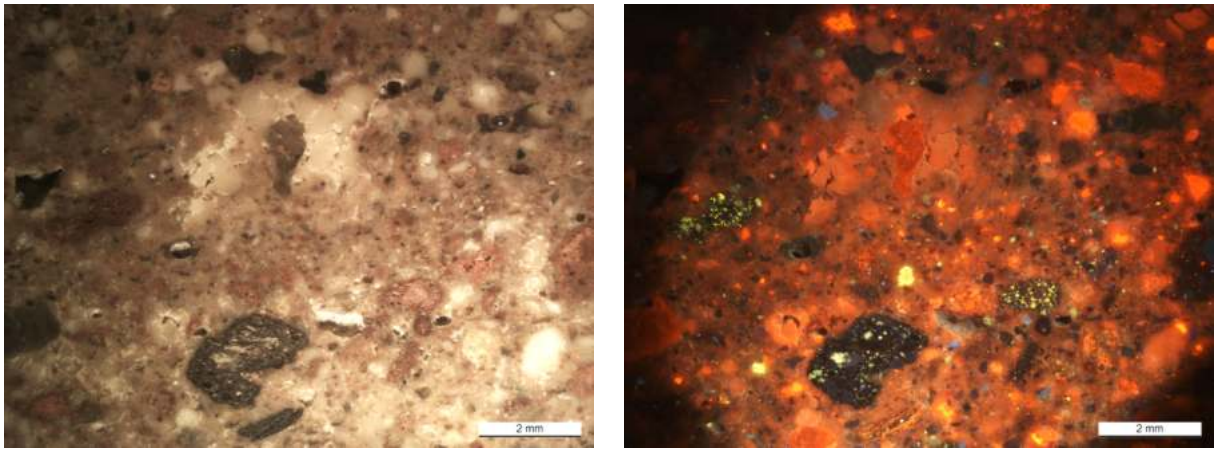

Figure 365 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22406 montrant des nodules de chaux non mélangés et des nodules partiellement calcinés (grossissement × 1.25)

FICHE 30 BDX22407

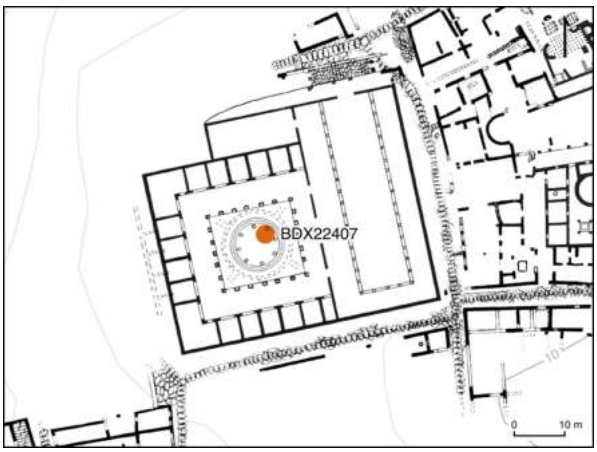

Figure 366 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22407 depuis le sol en marbre de la tholos et indication de sa localisation sur le plan du macellum

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Sol
Structure : *Macellum*
Datation : Ier siècle apr. J.-C.
Localisation : *Tholos*
Date de prélèvement : 11/11/2018
Coordonnées : 36.8827281648037, 7.74975460193679

L'échantillon BDX22407 a été prélevé depuis le support de dallage en marbre, situé à l'intérieur de la *tholos* du *macellum*. Il a été choisi dans une zone de bordure, où les fragments de dalles font défaut. Le sol de la *tholos* n'a pas a été altéré durant la campagne de travaux réalisés en 1951, destinée à la consolidation des structures du quartier chrétien et de ses environs.

Caractéristiques morphologiques

Type : Béton
Nature du liant : Chaux
Fonction : Support de dallage en marbre
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de béton est monocouche et mesure environ 30 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture sablo-granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

L'examen pétrographique révèle un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (5 %) et une porosité élevée qui se présente sous des formes tant sphériques (10 %) qu'oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire de granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable se compose majoritairement de cristaux de quartz, de feldspaths alcalins, de plagioclases, de micas et de cristaux de calcite. En ce qui concerne les inclusions, on observe une teneur élevée en fragments de tuileau (> 50 %), avec une granularité hétérogène (de 0,3 à 5,5 mm) et dont la distribution est homogène dans le mélange.

Figure 367 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22407 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.4 - 1.2	5	Sphérique	0.1 - 1.3	10
			Oblongue	0.4 - 5.0	3

Tableau 198 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22407

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 0.9	10	Homogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	1.0 - 1.1	< 1	Hétérogène

Tableau 199 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22407

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Sub-angulaire	0.3 - 0.7	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.9	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.2 - 1.2	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.1 - 0.5	3	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.4 - 0.9	1	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.4 - 0.7	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.2 - 0.5	< 1	Hétérogène

Tableau 200 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22407

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 5.5	> 50	Homogène

Tableau 201 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22407

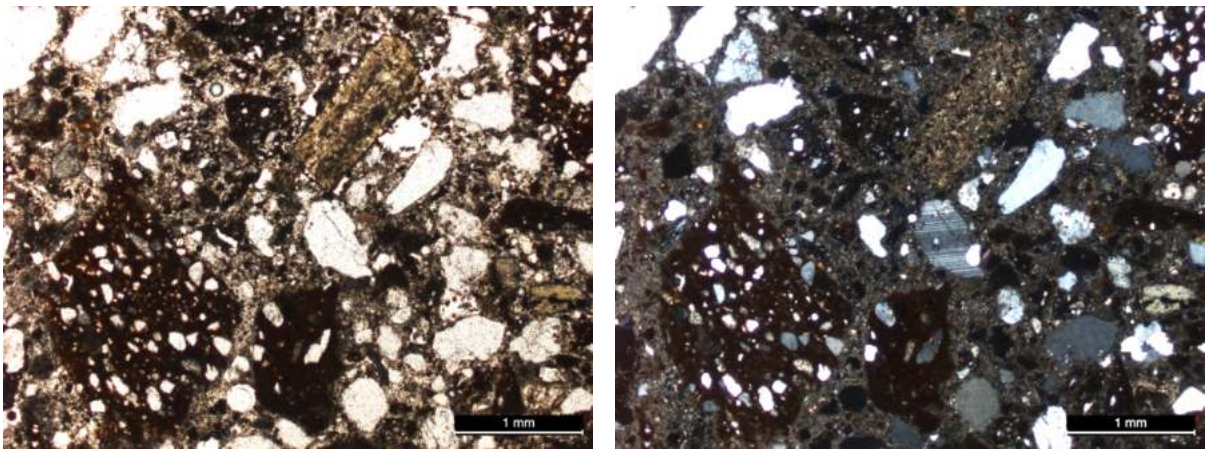

Figure 368 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant une charge constituée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène (grossissement × 2.5)

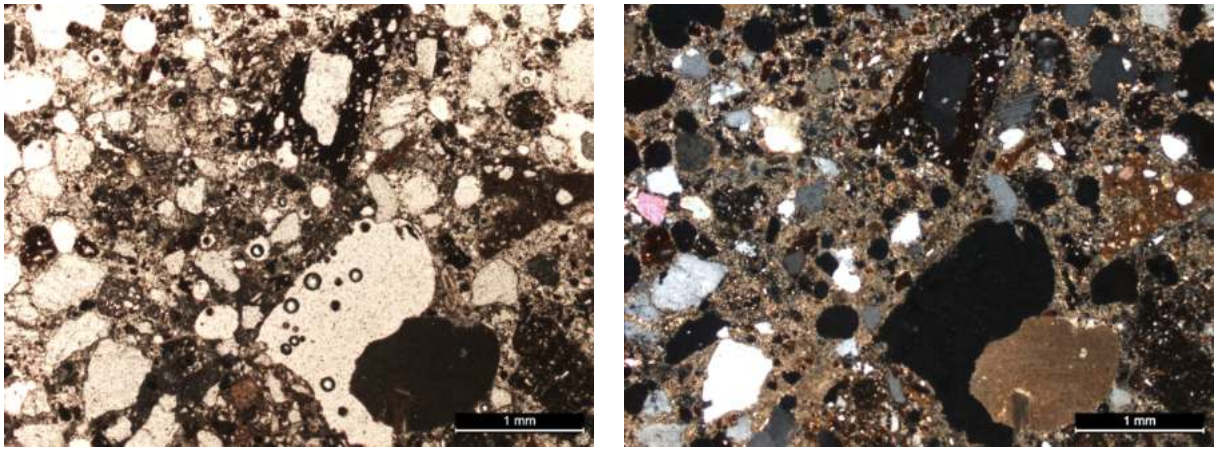

Figure 369 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant une porosité élevée (10 %) de forme sphérique dans le liant (grossissement × 2.5)

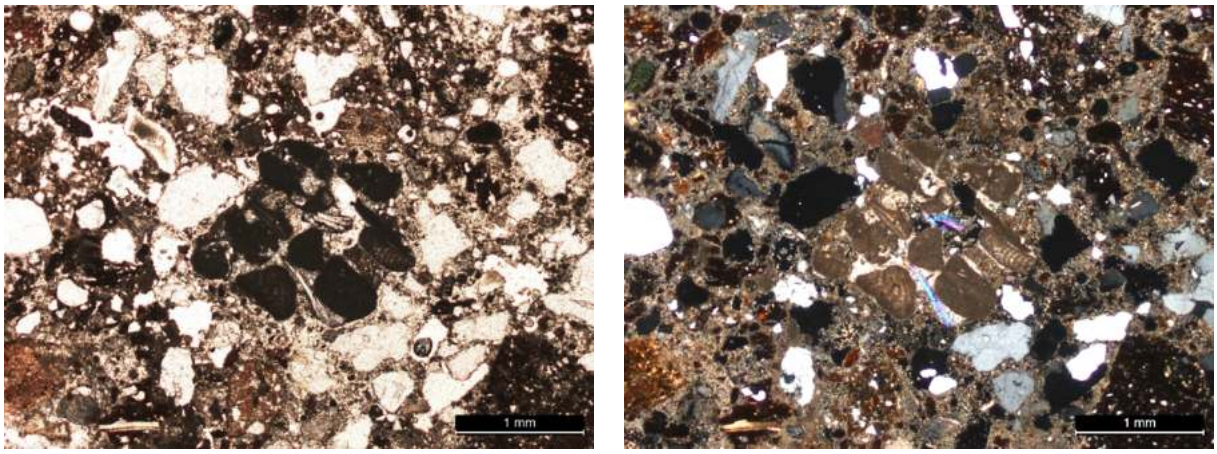

Figure 370 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des fragments de roche calcaire (calcarénite) contenant des bioclastes d'algues rouges (Rhodophycées) et de lamellibranches (grossissement × 2.5)

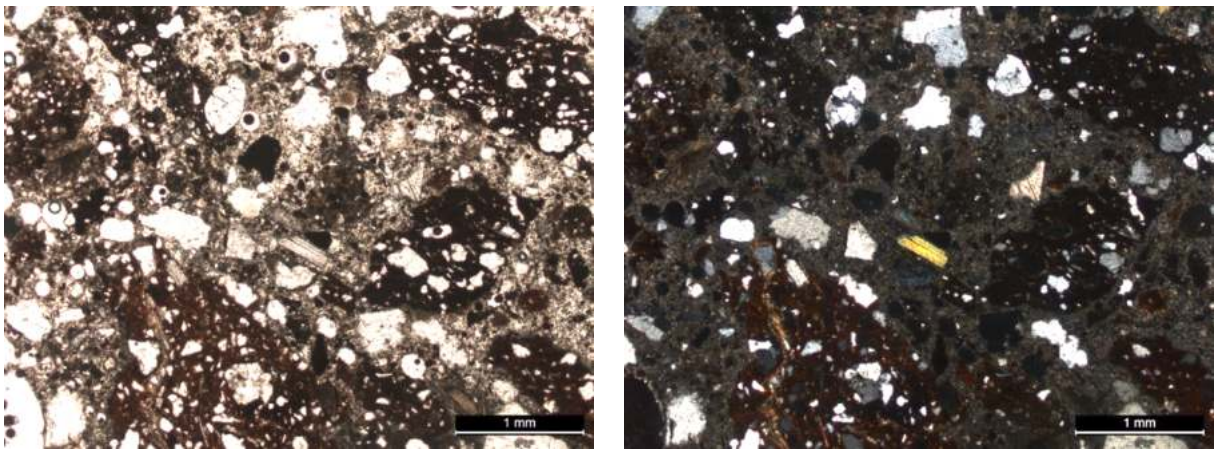

Figure 371 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des inclusions de fragments de céramique dans le mélange (grossissement × 2.5)

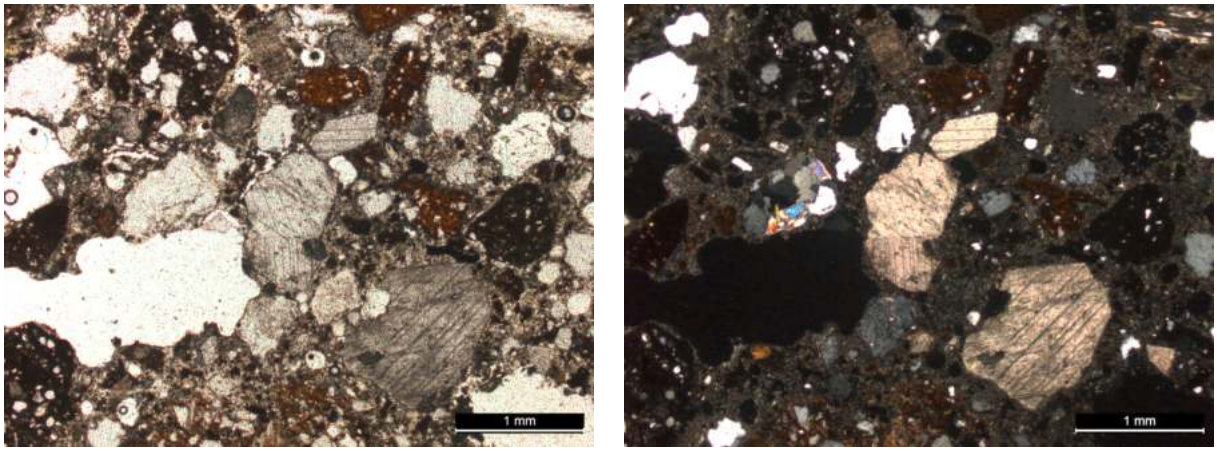

Figure 372 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des fragments de calcite de formes sub-angulaires (grossissement × 2.5)

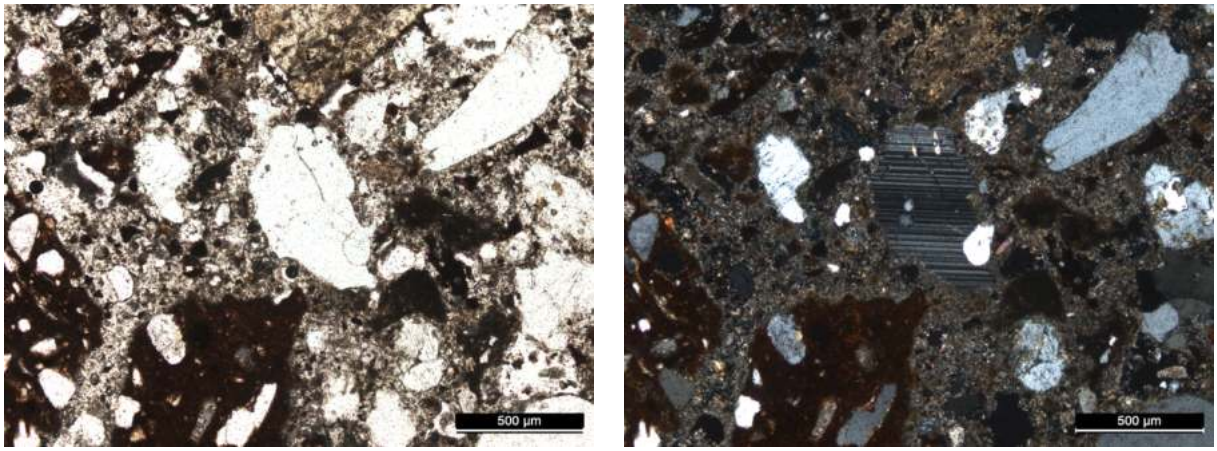

Figure 373 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des cristaux de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases qui composent la charge (grossissement × 5)

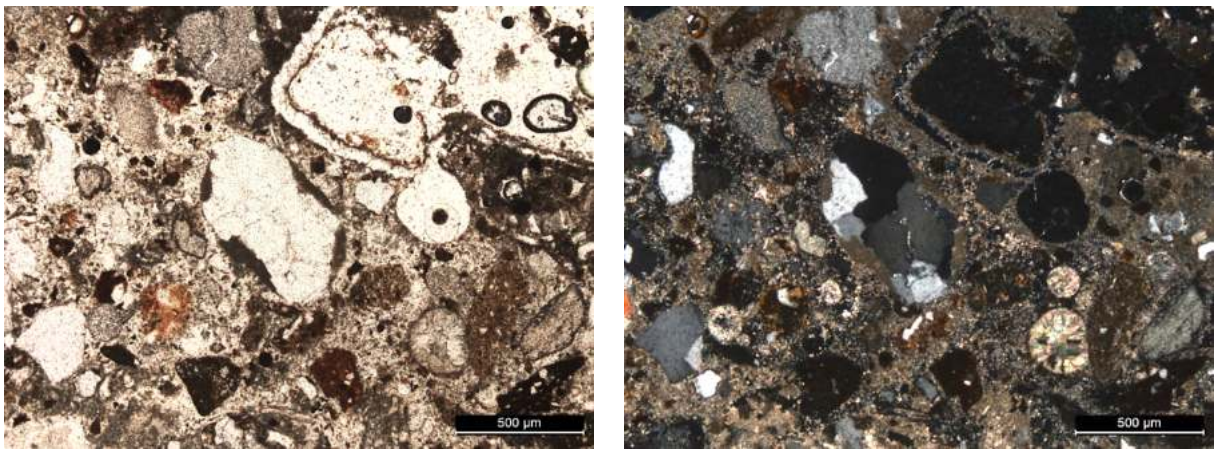

Figure 374 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des éléments bioclastiques (oolithes) qui constituent des nodules de chaux partiellement calcinés dispersés dans la matrice (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

L'analyse au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèle un liant de composition homogène (luminescence de couleur rouge orangé). Celui-ci contient des nodules de chaux partiellement calcinés, qui sont principalement des fossiles d'Échinides, de Gastéropodes et d'algues rouges (Rhodophycées). La charge, constituée de cristaux et de fragments lithiques de formes sub-angulaires, inclut des cristaux de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), de feldspaths plagioclases (luminescence verte), ainsi que des cristaux de calcite et des fragments de marbre (luminescence orange intense). Quant aux inclusions, elles consistent en des fragments de terres cuites, lesquels sont caractérisés par des matrices argileuses et des compositions minéralogiques variées.

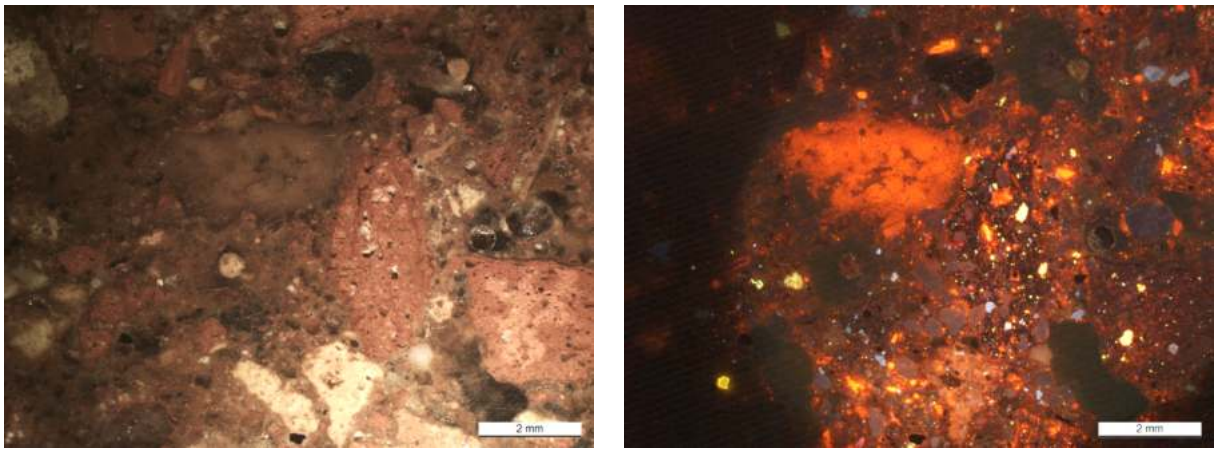

Figure 375 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22407 montrant la composante minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

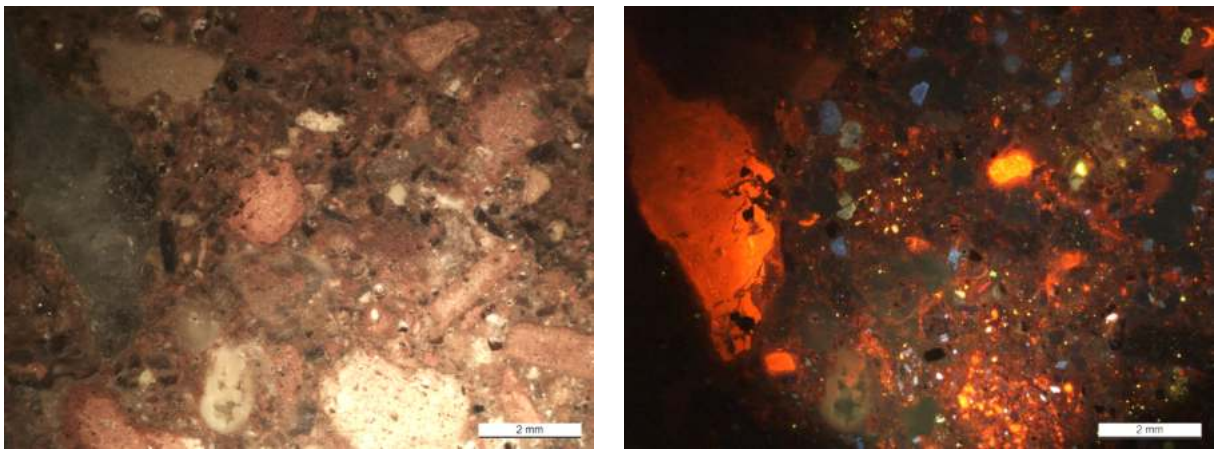

Figure 376 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22407 montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 1.25)

FICHE 31 BDX22408

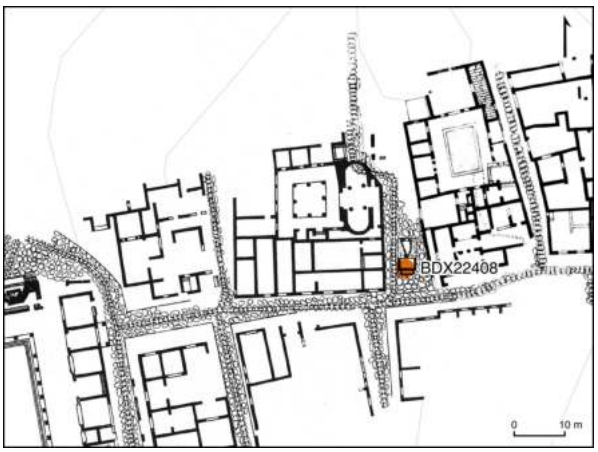

Figure 377 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22408 depuis la structure en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan de la Fontaine à la Gorgone

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur (*opus testaceum)*
Structure : Fontaine à la Gorgone
Datation : Fin du Ier siècle apr. J.-C.
Localisation : Soubassement de l'édifice
Date de prélèvement : 17/11/2018
Coordonnées : 36.8820212729694, 7.74906485056285

L'échantillon BDX22408 a été prélevé entre deux couches de briques du mur en *opus testaceum*, qui sert de soubassement à la fontaine à la Gorgone. Cet édifice n'a pas fait l'objet de travaux de consolidation ou de restauration au cours des campagnes de 1951 et 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sablo-granuleuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 30 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur beige foncé et une texture sablo-granuleuse avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations réalisées au microscope optique polarisant révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux partiellement calcinés (3 %), ainsi qu'une porosité caractérisée par des formes sphériques (3 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire de granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est principalement constitué de quartz, de feldspaths alcalins, de feldspaths plagioclases, ainsi que de micas. En ce qui concerne les inclusions, on observe une présence significative de fragments pyroclastiques (20 %), de nature trachytique et affichant des textures vitrophyriques à porphyriques avec des inclusions de phénocristaux de sanidine. En outre, on note une présence discrète de fragments de tuileau (< 1 %) au sein de l'échantillon de mortier.

Figure 378 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22408 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.7 - 1.8	3	Sphérique	0.2 - 0.7	3
			Oblongue	0.3 - 1.2	3

Tableau 202 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22408

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.5	< 1	Hétérogène
Marbre	Métamorphique	Sub-angulaire	2.1	< 1	Hétérogène

Tableau 203 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22408

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.4 - 1.5	5	Homogène
Biotite	Angulaire	0.4 - 1.0	3	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.3 - 0.8	1	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.3 - 0.4	1	Homogène
Sanidine	Angulaire	0.4 - 0.9	1	Homogène
Hornblende	Sub-angulaire	0.5	1	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.7 - 1.2	< 1	Hétérogène

Tableau 204 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22408

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane naturelle	Pyroclastes	0.8 - 15	20	Homogène
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.9 - 1.5	< 1	Hétérogène

Tableau 205 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22408

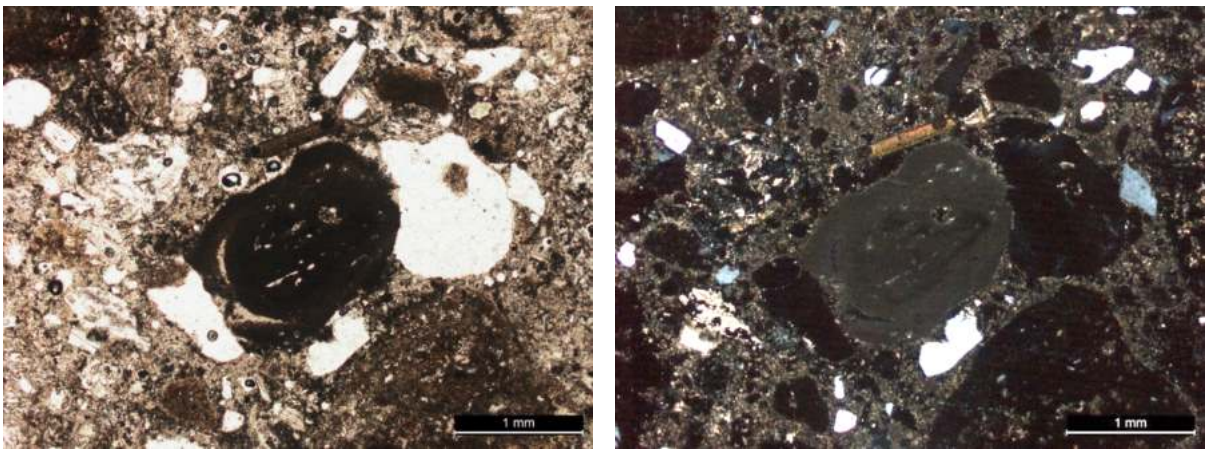

Figure 379 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant un fragment d'algue Mélobésiée formant un nodule de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

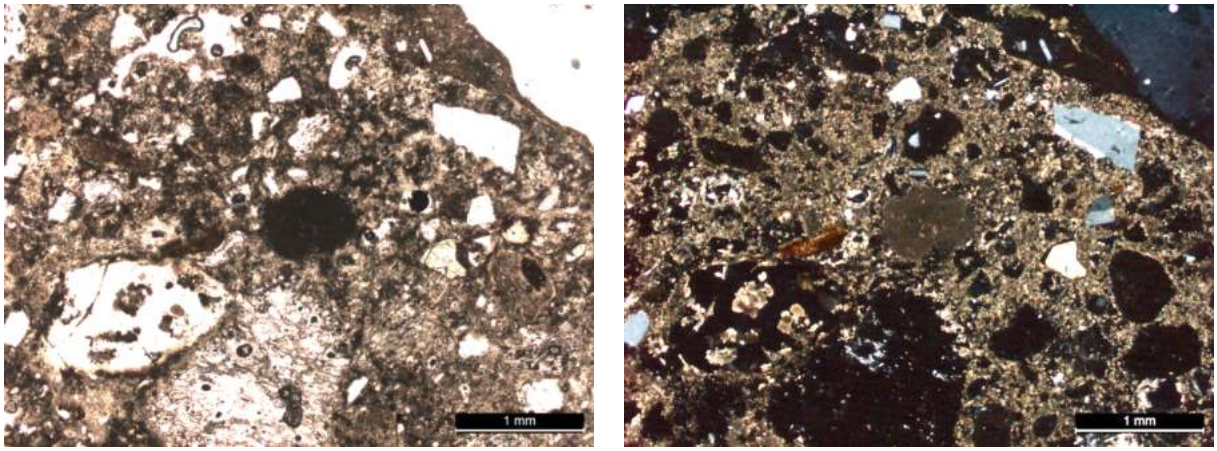

Figure 380 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des fragments pyroclastiques dispersés dans la charge silico-calcaire (grossissement × 2.5)

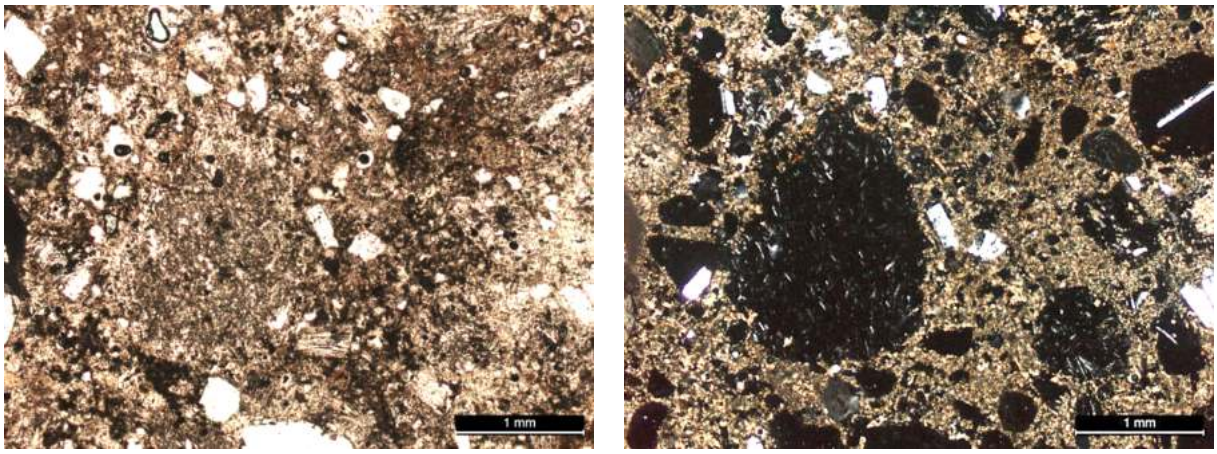

Figure 381 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des fragments de roches volcaniques (trachyte) à texture microlithique (grossissement × 2.5)

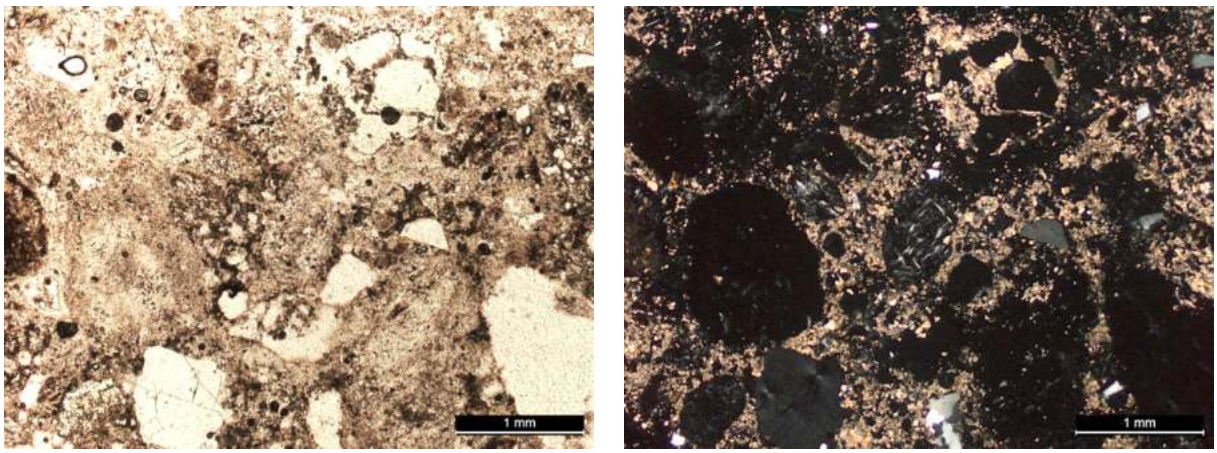

Figure 382 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des pyroclastes à texture aphanitique dispersés dans la charge (grossissement × 2.5)

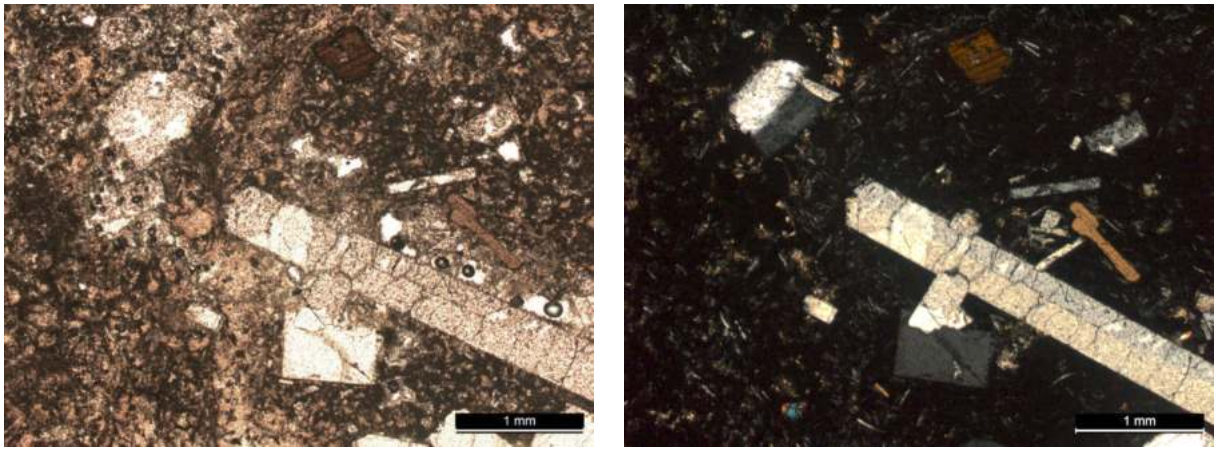

Figure 383 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant en détail un pyroclaste trachytique avec des inclusions de phénocristaux de sanidine dans une matrice vitreuse à microlithes de feldspaths alcalins (grossissement × 2.5)

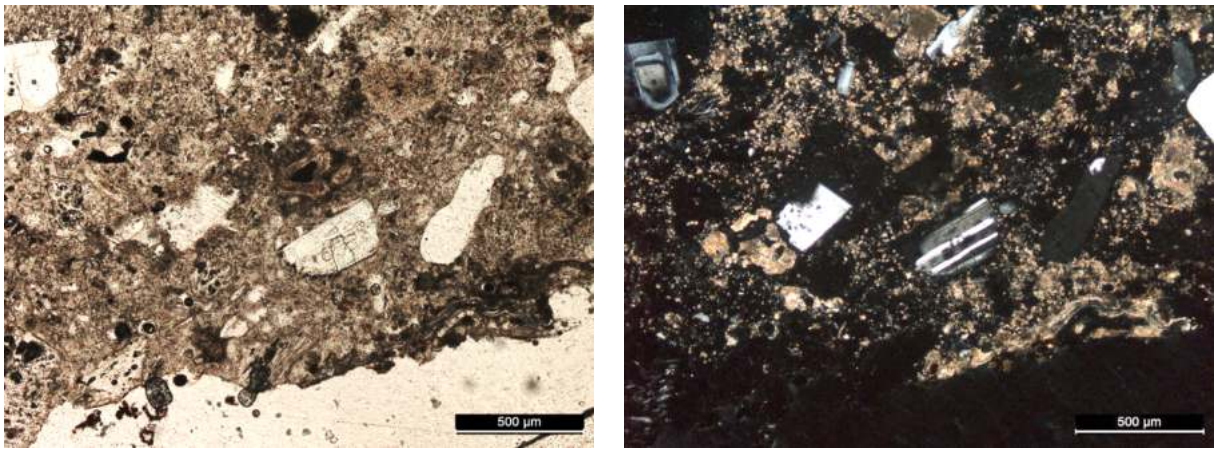

Figure 384 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des constituants de la charge, dont des cristaux de quartz et de feldspaths plagioclases (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au moyen du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de composition homogène, composé de chaux carbonatée. Le liant inclut des nodules de chaux partiellement calcinés qui émettent une luminescence de couleur orange. On observe également des cristaux et des fragments lithiques qui constituent la charge et qui présentent des formes sub-angulaires. Parmi ces éléments, on distingue des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), ainsi que des feldspaths plagioclases (luminescence verte). Les observations complémentaires, réalisées à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB), mettent en évidence des fragments pyroclastiques caractérisés par une matrice vitreuse et microporeuse. Ces fragments intègrent des inclusions de microlithes de feldspaths et de phénocristaux de sanidine. Les analyses élémentaires des fragments pyroclastiques, réalisées au moyen de la microsonde EDS, indiquent des teneurs en SiO_2 fluctuant entre 60,79 et 64,44 % pds et des teneurs en Na_2O + K_2O oscillant entre 10,14 et 11,51 % pds. Ces résultats permettent d'identifier la nature trachytique des fragments de roches volcaniques grâce au diagramme Total Alkali Silica (TAS).

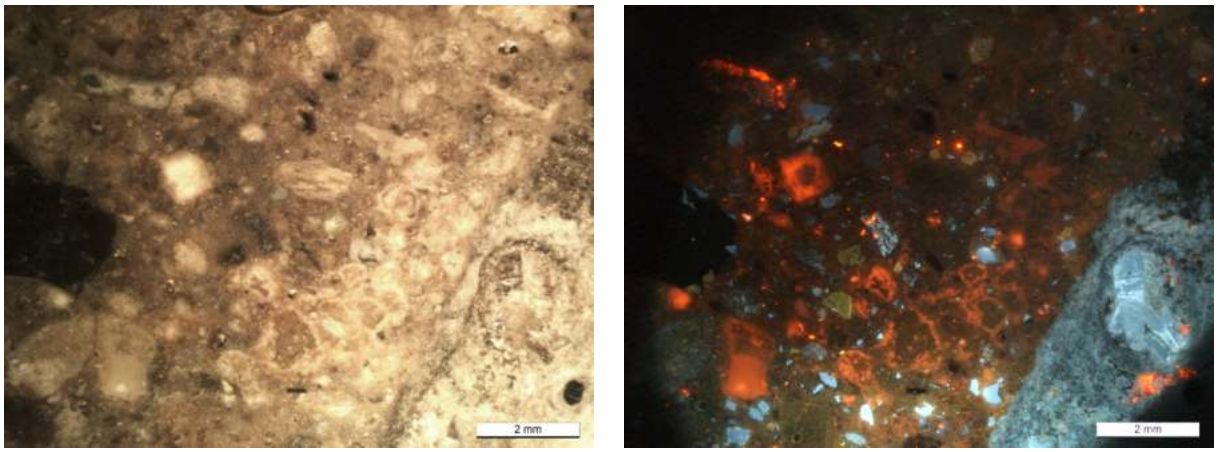

Figure 385 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22408 montrant les fragments trachytiques et les cristaux de sanidine dispersés dans la charge (grossissement × 1.25)

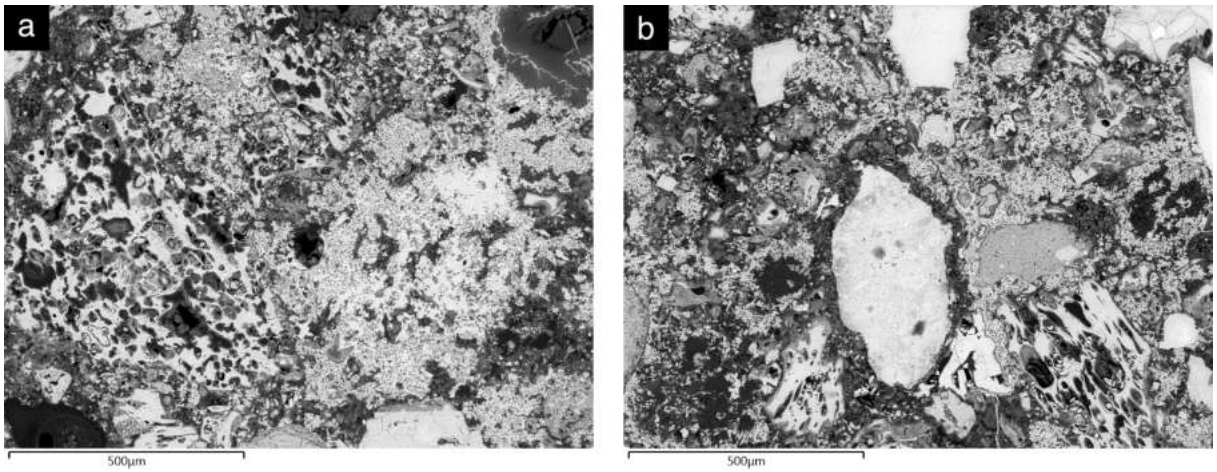

Figure 386 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22408 montrant (a) des pyroclastes trachytiques ; (b) les réactions pouzzolaniques entre le liant et les pyroclastes

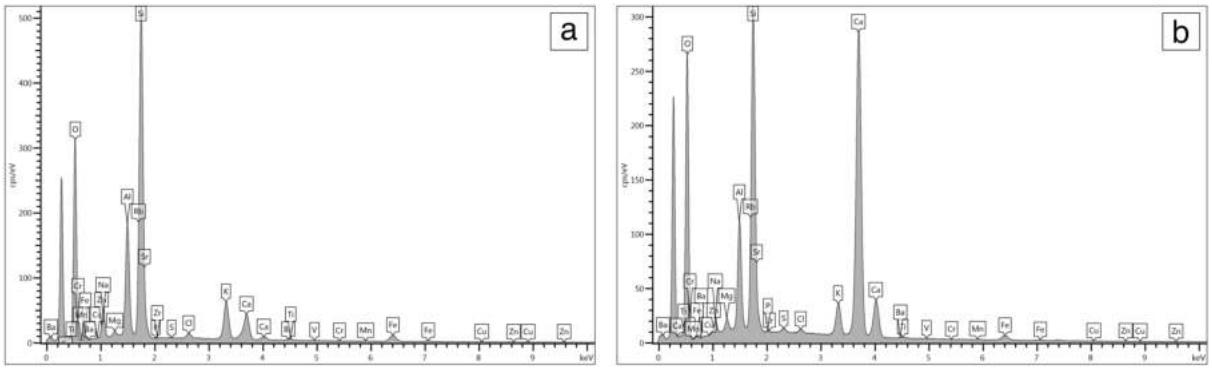

Figure 387 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22408 montrant la composition élémentaire de : (a) matrice vitreuse d'un fragment trachytique ; (b) formations des aluminosilicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique)

FICHE 32 BDX22409

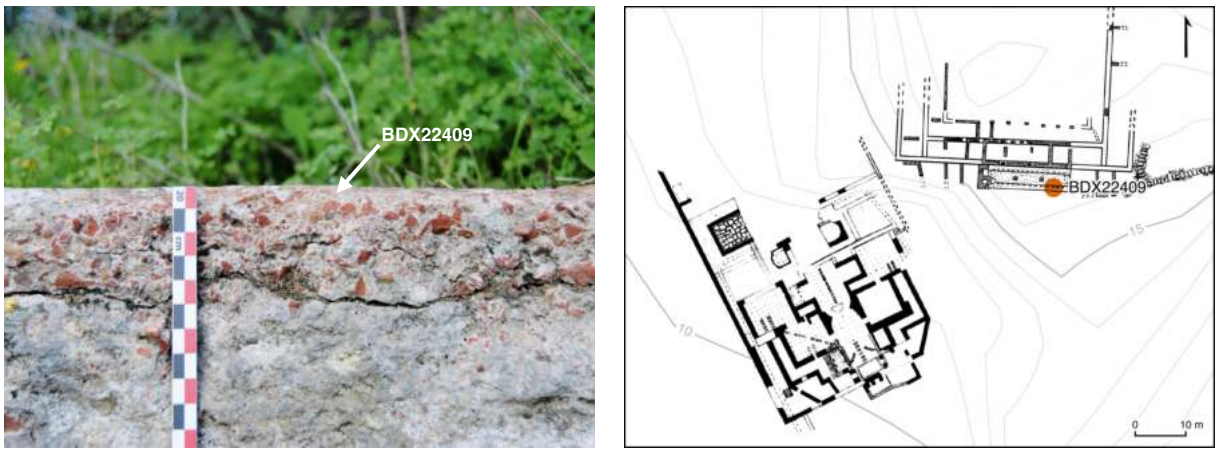

Figure 388 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22409 depuis la chape de la citerne et indication de sa localisation sur le plan du Sanctuaire des Dii Consentes

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Chape (*opus signinum*)
Structure : Sanctuaire des *Dii Consentes*
Datation : 164 à 167 apr. J.-C.
Localisation : Citerne
Date de prélèvement : 17/11/2018
Coordonnées : 36.8808855061979, 7.75140909906322

L'échantillon BDX22409 a été prélevé à partir de la couche de béton de tuileau qui recouvre la citerne se trouvant à proximité du sanctuaire des *Dii Consentes*. Aucune intervention n'a été réalisée sur cette partie du site archéologique lors des campagnes de travaux de 1951 et 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Béton
Nature du liant : Chaux
Fonction : Chape d'étanchéité
Couleur : Rose foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Granuleuse

Le fragment de béton est monocouche et mesure environ 55 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur rose foncé et une texture granuleuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les examens pétrographiques révèlent un liant de composition homogène, avec la présence de nodules de chaux non mélangés (3 %) et partiellement calcinés (1 %), ainsi que d'une porosité présentant des vides de formes sphériques (5 %) et oblongues (1 %). La charge est principalement constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable est majoritairement formé de cristaux de quartz, de feldspaths, de micas ainsi que de fragments lithiques de natures plutonique et métamorphique. S'agissant des inclusions, on observe une forte présence de fragments de tuileau (> 50 %), dont la granularité est hétérogène (allant de 0,1 à 11 mm). Ces derniers présentent une distribution homogène au sein du mélange.

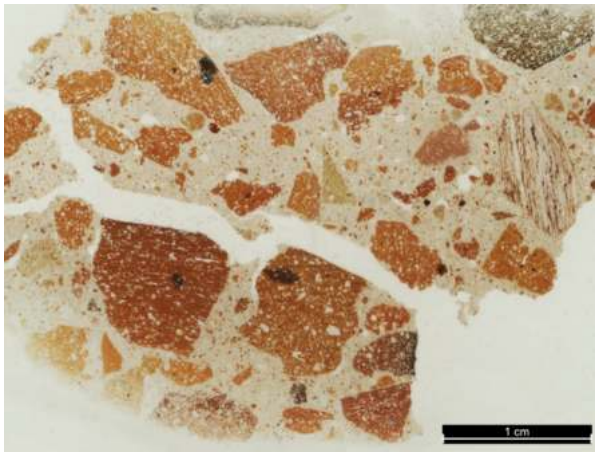

Figure 389 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22409 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.3 - 0.8	3	Sphérique	0.2 - 0.7	5
Partiellement calcinés	0.6 - 0.8	1	Oblongue	0.6 - 1.5	1

Tableau 206 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22409

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.4 - 1.5	1	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	8.0	< 1	Hétérogène

Tableau 207 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22409

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.3 - 0.5	3	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	1	Homogène
Calcite	Angulaire	0.5 - 1.1	< 1	Hétérogène
Muscovite	Angulaire	0.2 - 0.3	< 1	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 208 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22409

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.1 - 11	> 50	Homogène

Tableau 209 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22409

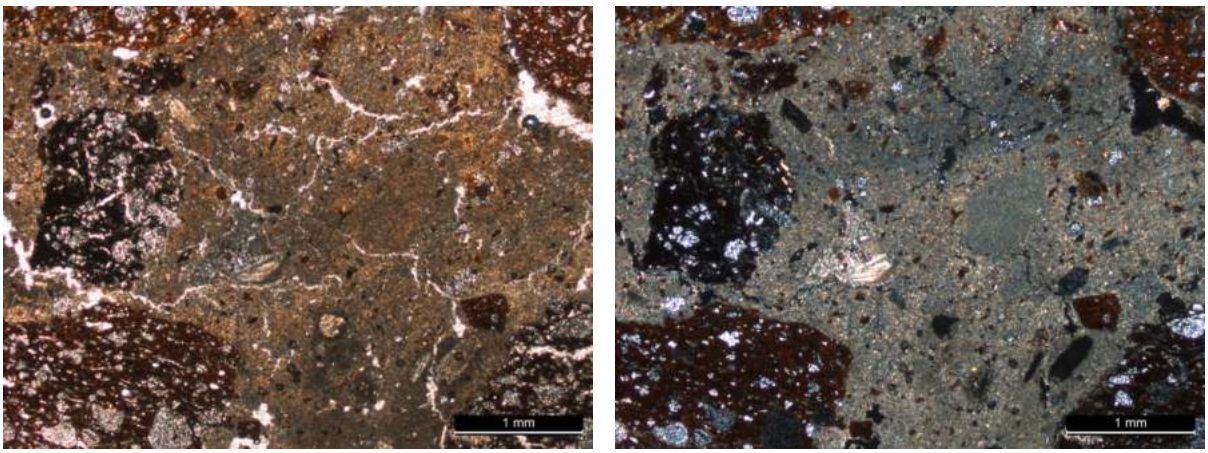

Figure 390 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22409 la présence de nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

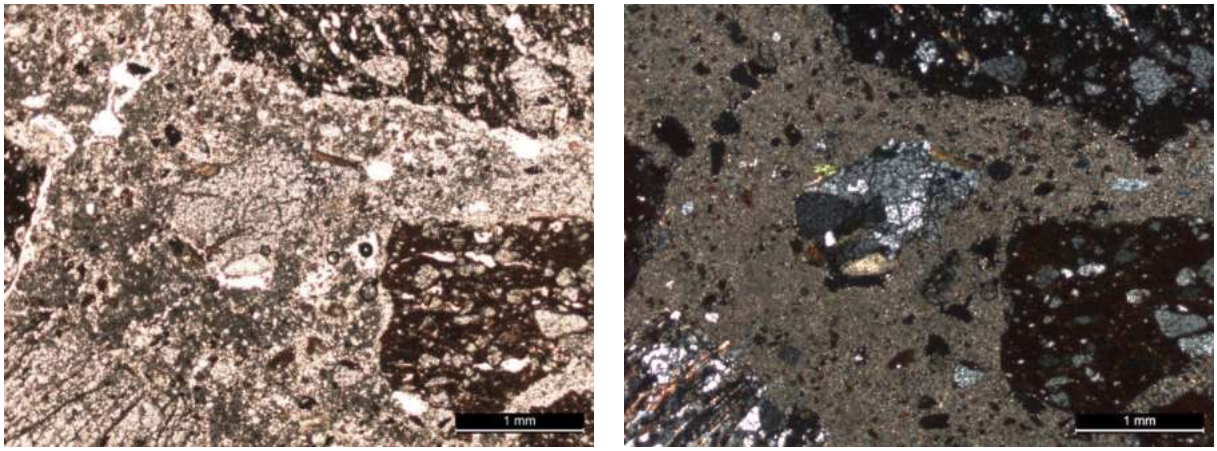

Figure 391 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22409 un fragment de granite mêlé à la charge (grossissement × 2.5)

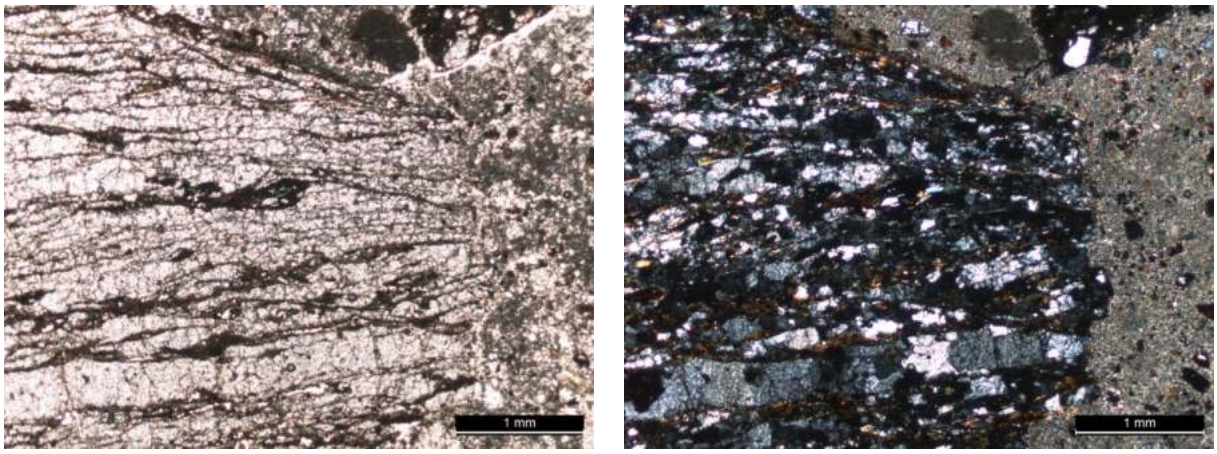

Figure 392 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22409 un fragment de micaschiste mêlé à la charge (grossissement × 2.5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les analyses réalisées au microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant homogène constitué de chaux carbonatée, dans lequel on observe la présence de nodules de chaux partiellement calcinés. Parmi les constituants de la charge, on distingue des cristaux et des fragments lithiques, de formes sub-angulaires, dont des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et occasionnellement, des cristaux de calcite et des fragments de granite et de micaschiste. En ce qui concerne les inclusions, on note la présence de fragments de terres cuites caractérisés par des matrices argileuses et des compositions minéralogiques variées. En outre, certains fragments de tuileau présentent un dégraissant riche en feldspaths alcalins, tandis que d'autres fragments sont riches en cristaux de calcite de granularité très fine.

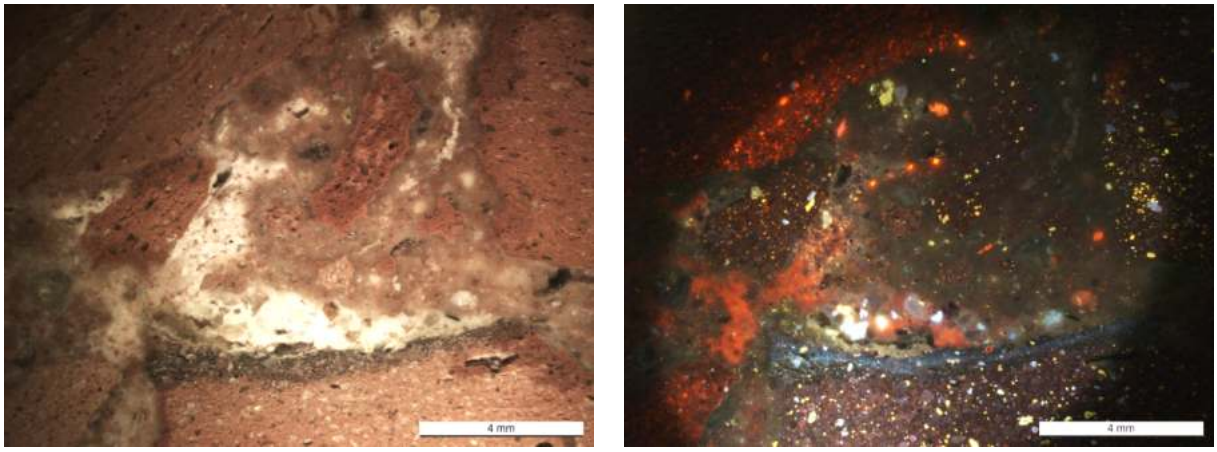

Figure 393 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22409 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)

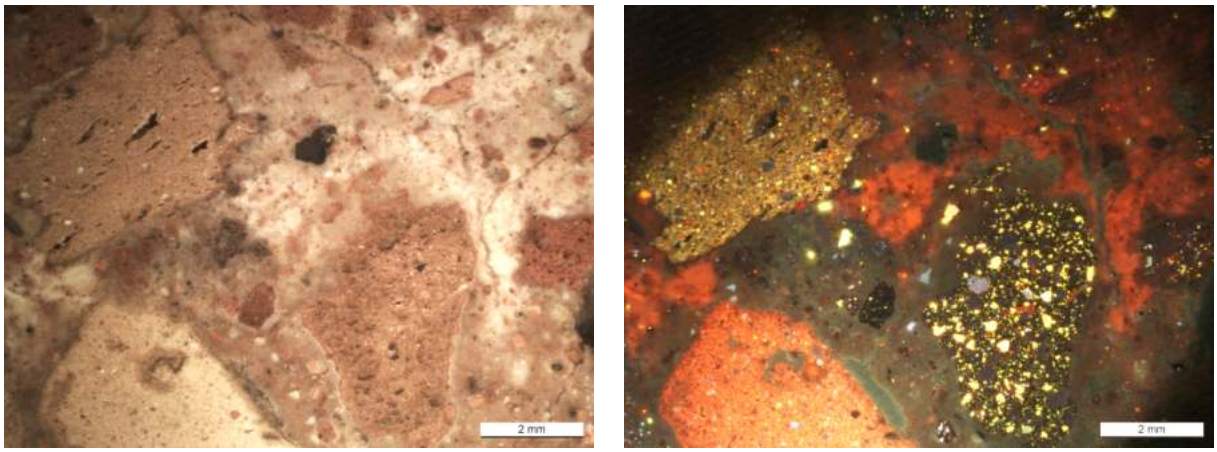

Figure 394 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22409 montrant des fragments de céramique de compositions différentes (grossissement × 1.25)

FICHE 33 BDX22410

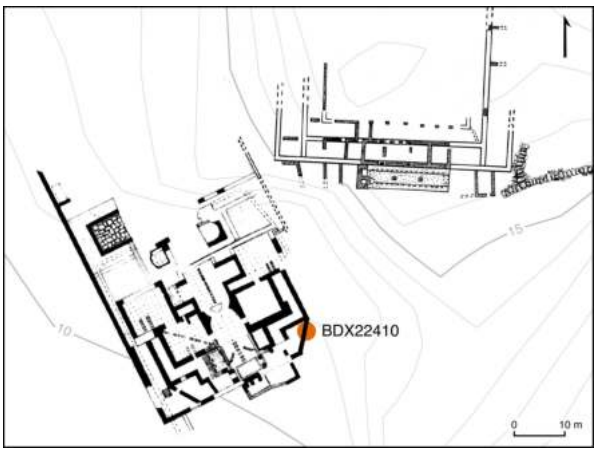

Figure 395 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22410 depuis le mur en opus incertum et indication de sa localisation sur le plan des thermes du sud

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Mur (*opus incertum*)
Structure : Thermes du sud
Datation : 198 apr. J.-C.
Localisation : Mur extérieur sud-est
Date de prélèvement : 17/11/2018
Coordonnées : 36.8806263187839, 7.75113314255744

L'échantillon BDX22410 a été prélevé à partir du mur en *opus incertum*, situé à l'est du mur périphérique des thermes du sud. Il a été sélectionné entre deux rangées de moellons à mi-hauteur du mur, lequel n'a pas fait l'objet d'interventions lors des campagnes de travaux dirigés par Erwan Marec entre 1951 et 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Mortier de maçonnerie
Couleur : Beige foncé
Résistance apparente : Élevée
Texture : Sableuse

Le fragment de mortier est constitué d'une seule couche et présente une épaisseur d'environ 40 mm. Il révèle un liant de couleur beige foncé et une texture sableuse, avec une distribution homogène de ses composants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations pétrographiques révèlent un liant de composition homogène, avec des nodules de chaux, à la fois non mélangés (5 %) et partiellement calcinés (3 %), ainsi qu'une porosité élevée présentant des vides avec des formes sphériques (10 %) et oblongues (3 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire à la granularité homogène, avec des grains de formes angulaires. Ce sable est principalement composé de cristaux de quartz, de feldspaths alcalins, de feldspaths plagioclases, de micas, et de cristaux de calcite. S'agissant des inclusions, on distingue des fragments de tuileau peu nombreux (< 1 %) et de granularité variable (0,2 à 2,6 mm) qui sont dispersés de manière hétérogène dans le mélange.

Figure 396 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22410 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge tamisée

Liant

Nodules de chaux			**Porosité**		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Non mélangés	0.7 - 5.0	5	Sphérique	0.1 - 0.6	10
Partiellement calcinés	0.4 - 0.7	3	Oblongue	1.5 - 6.0	3

Tableau 210 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22410

Charge

Composante lithique	**Nature**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Granite	Plutonique	Angulaire	0.4 - 0.9	3	Homogène
Arénite	Sédimentaire	Sub-émoussée	0.2 - 0.5	1	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Angulaire	0.4 - 0.6	< 1	Homogène

Tableau 211 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22410

Composante minéralogique	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Quartz	Angulaire	0.2 - 0.5	30	Homogène
Feldspaths alcalins	Angulaire	0.3 - 0.5	20	Homogène
Feldspaths plagioclases	Angulaire	0.3 - 0.5	5	Homogène
Muscovite	Angulaire	0.4 - 1.2	5	Homogène
Biotite	Angulaire	0.3 - 0.7	3	Homogène
Calcite	Sub-angulaire	0.3 - 1.6	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.4 - 0.7	3	Homogène

Tableau 212 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22410

Inclusions

Nature	**Type**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Répartition**
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.2 - 2.6	< 1	Hétérogène

Tableau 213 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22410

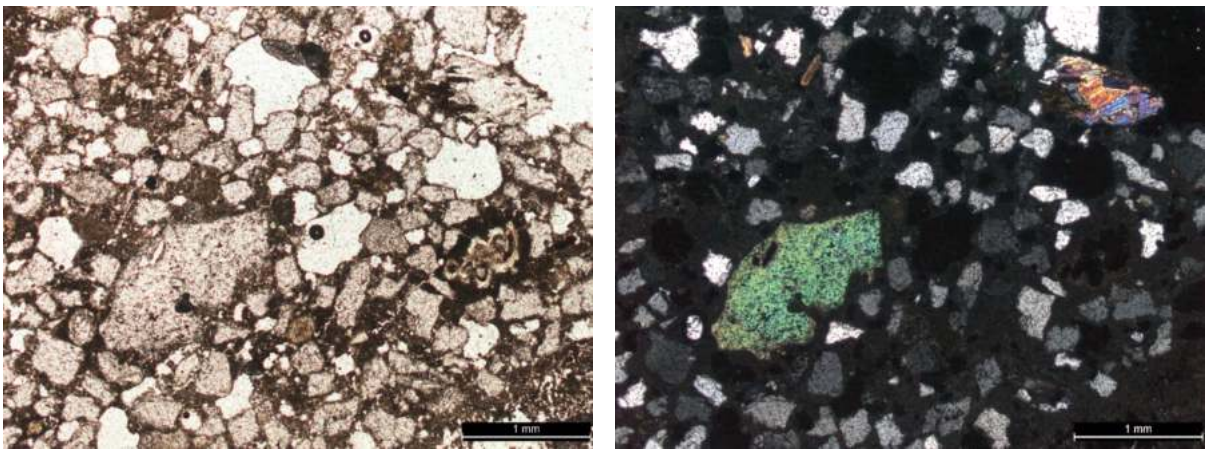

Figure 397 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des cristaux de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases dans la charge (grossissement × 2.5)

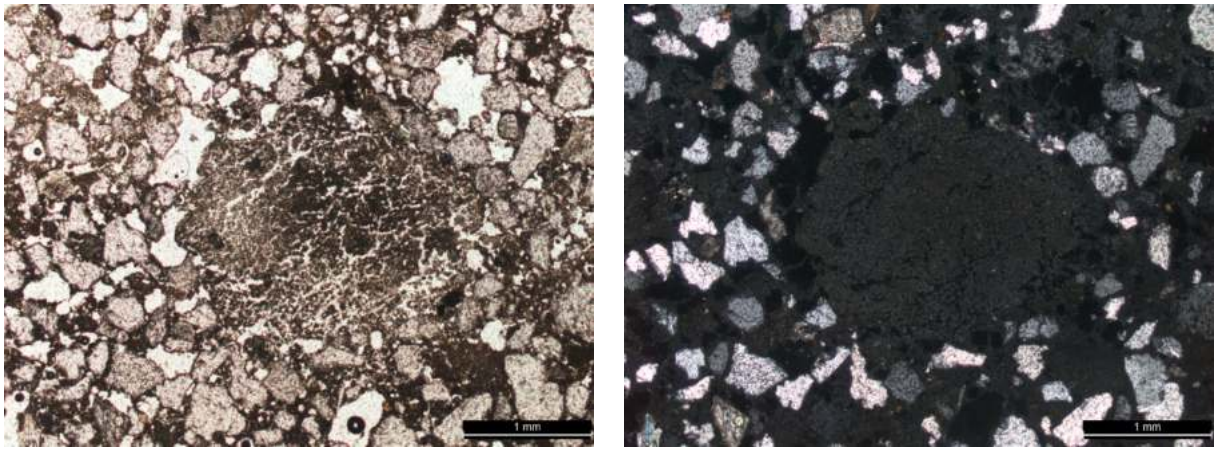

Figure 398 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant un nodule de chaux non mélangé dans le liant (grossissement × 2.5)

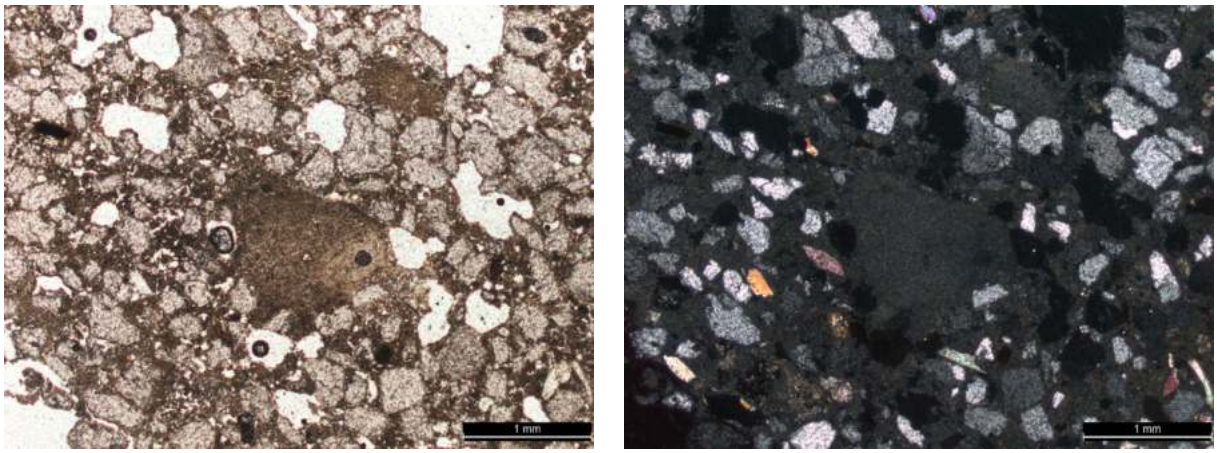

Figure 399 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des micas dispersés dans le sable silico-calcaire qui compose la charge (grossissement × 2.5)

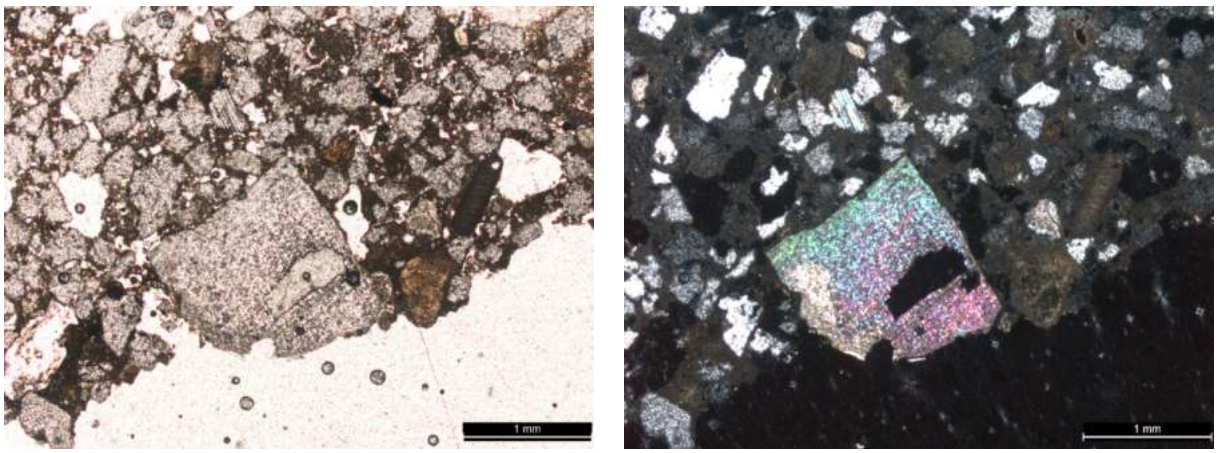

Figure 400 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant un cristal de calcite et des bioclastes d'algues rouges (Rhodophycées) formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)

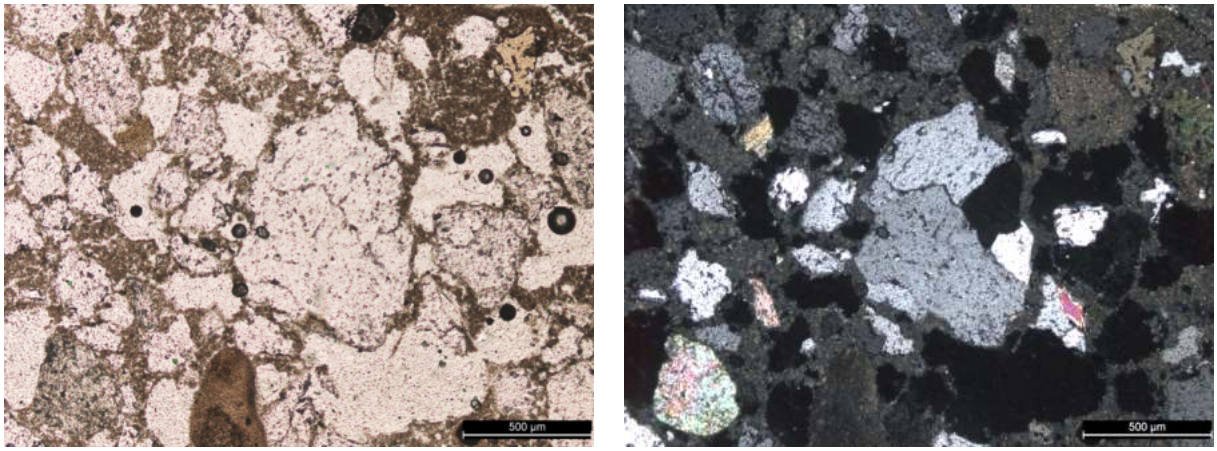

Figure 401 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des micro-fragments de granite mêlés à la charge (grossissement × 5)

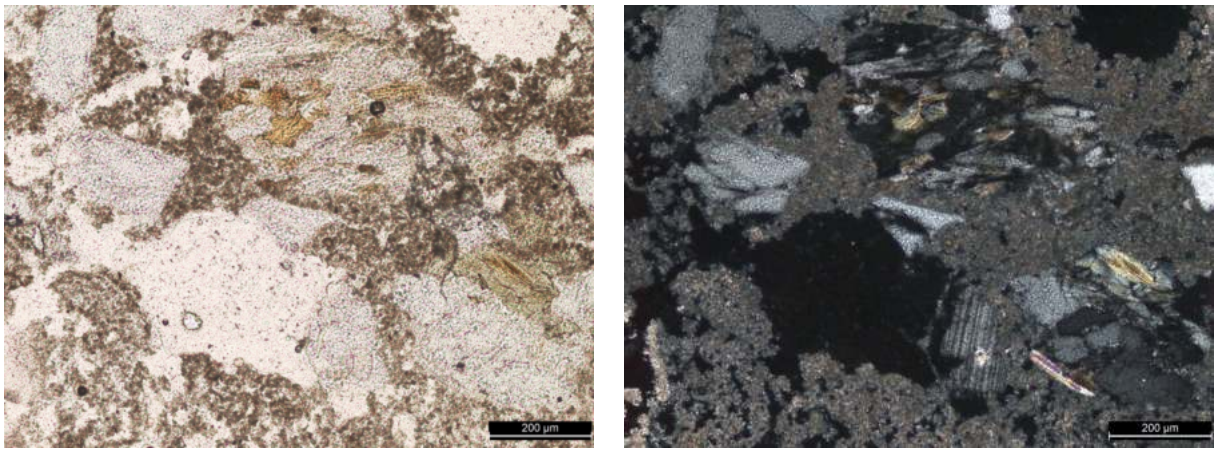

Figure 402 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des micro-fragments de micaschiste ainsi que des feldspaths plagioclases (grossissement × 10)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au moyen du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant de composition homogène, avec la présence de nodules de chaux, tant non mélangés que partiellement calcinés. Les cristaux et les fragments lithiques formant la charge sont de formes angulaires. Parmi ces éléments, on distingue des cristaux de quartz (luminescence mauve), des feldspaths alcalins (luminescence bleu clair), des feldspaths plagioclases (une luminescence verte), ainsi que des cristaux de calcite (une luminescence orange). Les observations plus détaillées au microscope électronique à balayage (MEB) révèlent des nodules de chaux non mélangés qui présentent des textures hétérogènes. Elles mettent également en lumière les réactions entre les grains de sable siliceux et la chaux. Les analyses élémentaires de ces nodules de chaux, réalisées avec la microsonde EDS, montrent des teneurs en CaO variant entre 79,87 et 81,30 % pds, en MgO entre 0,81 et 1,53 % pds et des concentrations en SiO_2 comprises entre 12,60 et 13,23 % pds.

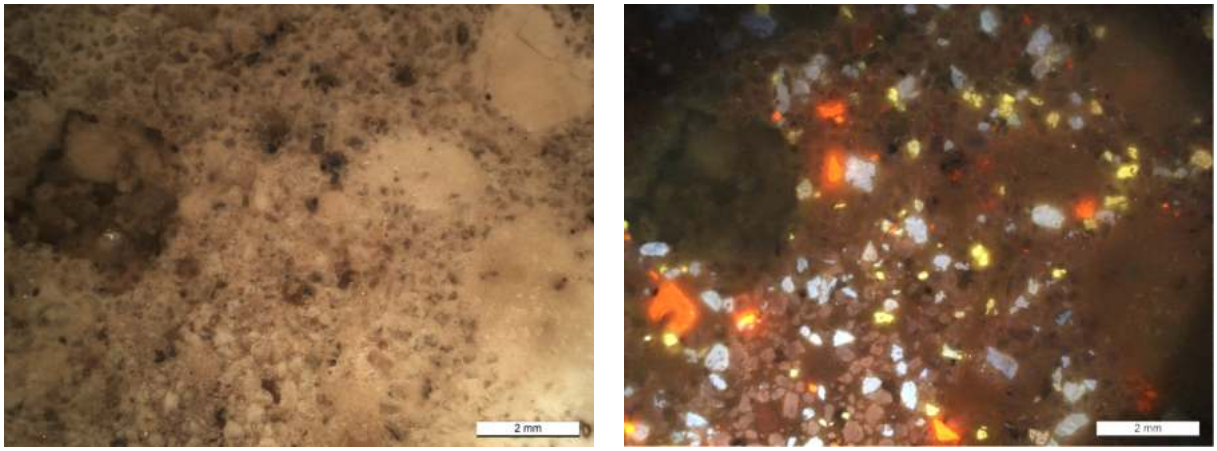

Figure 403 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22410 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

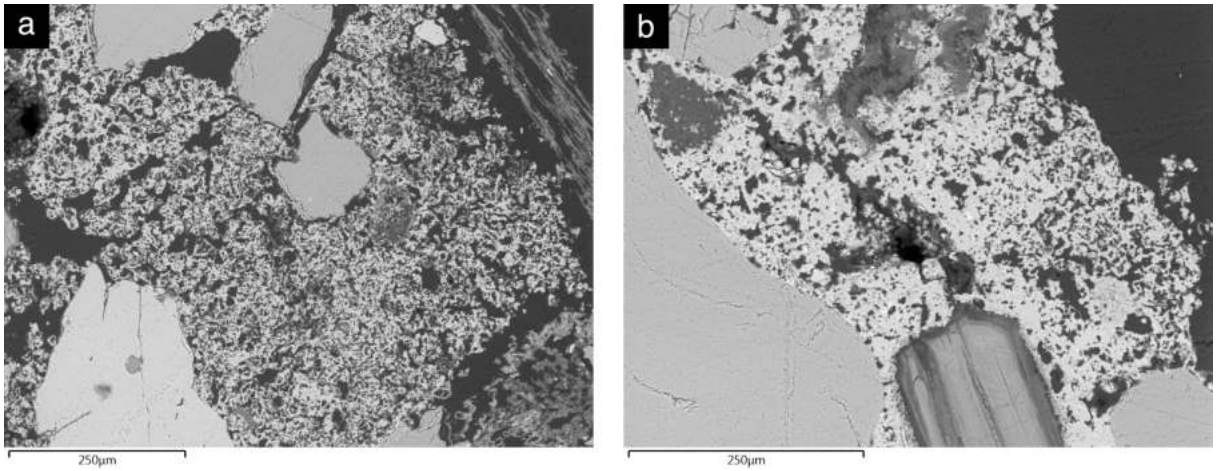

Figure 404 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22410 montrant (a) le liant à base de chaux entièrement carbonatée ; (b) le liant à base de chaux partiellement carbonatée avec des formations de silicates de calcium hydratés

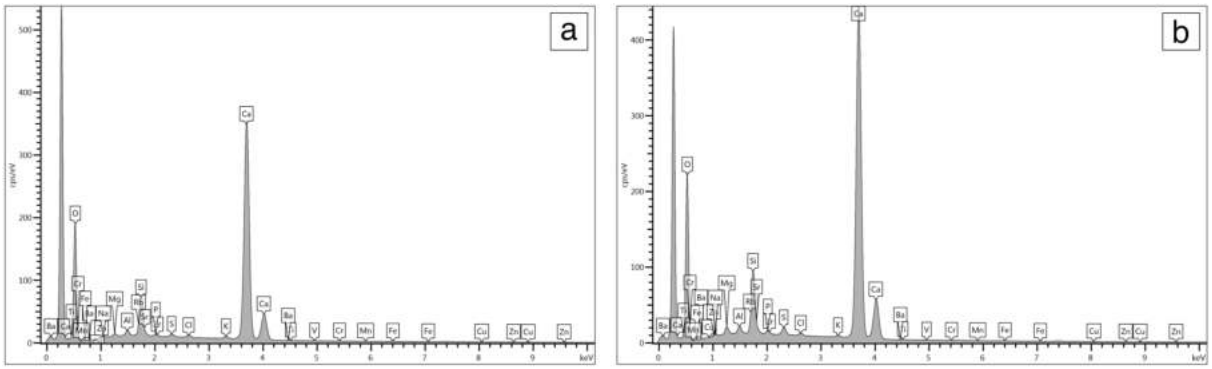

Figure 405 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22410 montrant la composition élémentaire de : (a) liant à base de chaux entièrement carbonatée ; (b) le liant à base de chaux partiellement carbonatée

FICHE 34 BDX22411

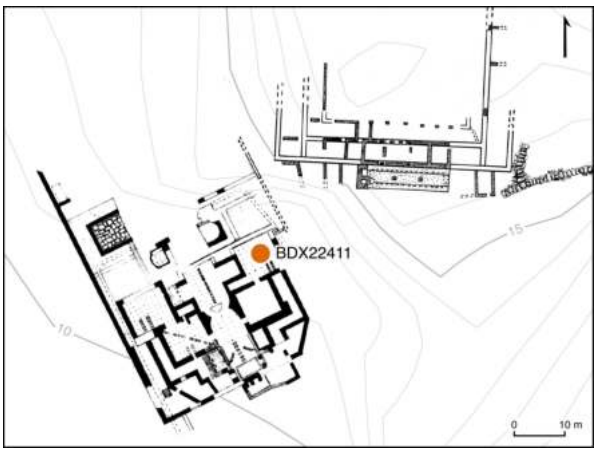

Figure 406 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22411 depuis une pilette d'hypocauste et indication de sa localisation sur le plan des thermes du sud

Contexte archéologique

Site archéologique : *Hippo Regius*
Élément : Pilettes d'hypocauste
Structure : Thermes du sud
Datation : 198 apr. J.-C.
Localisation : Hypocauste
Date de prélèvement : 17/11/2018
Coordonnées : 36.8807640770702, 7.75102883571617

L'échantillon BDX22411 a été prélevé depuis l'une des pilettes de l'hypocauste, situé sous la salle menant au *caldarium* des thermes du sud. Il a été choisi entre deux carreaux d'une pilette qui supportait la dalle de *suspensura*, partiellement préservée, et qui n'a pas été l'objet de travaux de consolidation pendant les campagnes réalisées en 1951 et 1954.

Caractéristiques morphologiques

Type : Mortier
Nature du liant : Chaux
Fonction : Joint de carreaux de pilettes
Couleur : Marron
Résistance apparente : Faible
Texture : Limono-sableuse

Le fragment de mortier est monocouche et mesure environ 30 mm d'épaisseur. Il présente un liant de couleur marron et une texture limono-sableuse, avec une répartition homogène de ses constituants.

Caractéristiques pétrographiques

Les observations pétrographiques révèlent un liant de composition hétérogène, avec de rares nodules de chaux partiellement calcinés (1 %) et une faible porosité présentant des vides de formes sphériques (1 %) et oblongues (1 %). La charge est constituée d'un sable silico-calcaire de granularité hétérogène, avec des grains de formes sub-angulaires. Ce sable se compose principalement de cristaux de quartz, de micas, de calcite et de feldspaths alcalins et plagioclases. En ce qui concerne les inclusions, on observe la présence de fragments de tuileau (10 %) avec granularité variable (de 0,3 à 1,7 mm), ainsi que la présence de fragments d'oxydes métalliques (3 %). Ces derniers sont répartis de manière homogène au sein du mélange.

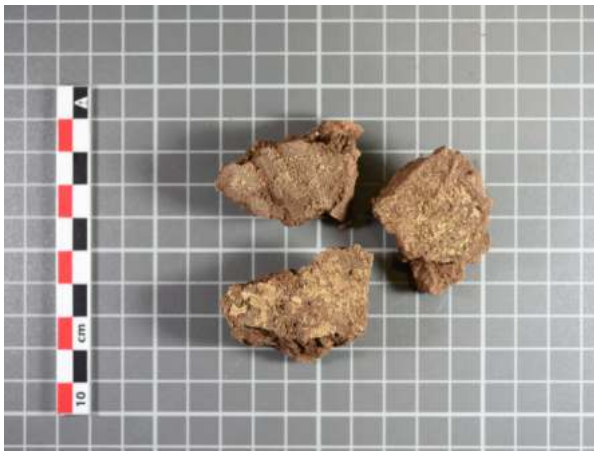

Figure 407 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22411 montrant une matrice de couleur marron et une charge non tamisée

Liant

Nodules de chaux			Porosité		
Type	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**	**Forme**	**Taille (mm)**	**Teneur (%)**
Partiellement calcinés	0.5 - 1.2	1	Sphérique	0.3 - 0.4	1
			Oblongue	0.9 - 1.7	1

Tableau 214 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22411

Charge

Composante lithique	Nature	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Granite	Plutonique	Sub-angulaire	0.5 - 1.9	5	Homogène
Micaschiste	Métamorphique	Sub-angulaire	1.4 - 2.4	3	Homogène
Arénite	Sédimentaire	Sub-angulaire	0.3 - 1.1	1	Homogène

Tableau 215 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22411

Composante minéralogique	Forme	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Muscovite	Angulaire	0.3 - 0.5	10	Homogène
Quartz	Sub-angulaire	0.1 - 0.4	5	Homogène
Feldspaths alcalins	Sub-angulaire	0.2 - 0.4	5	Homogène
Feldspaths plagioclases	Sub-angulaire	0.1 - 0.3	3	Homogène
Biotite	Angulaire	0.3 - 0.4	3	Homogène
Bioclaste	Émoussée	0.4 - 0.6	< 1	Hétérogène

Tableau 216 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22411

Inclusions

Nature	Type	Taille (mm)	Teneur (%)	Répartition
Pouzzolane artificielle	Tuileau	0.3 - 1.7	10	Homogène
Oxydes métalliques (fer)	Scories	0.6 - 4.5	3	Homogène

Tableau 217 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22411

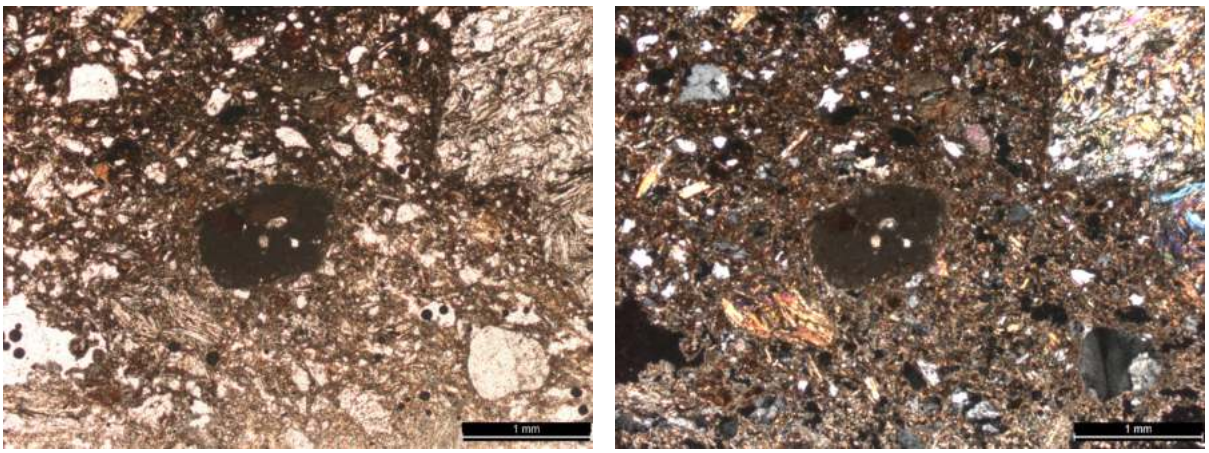

Figure 408 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un nodule de chaux partiellement calcinés et une charge riche en micas (grossissement × 2.5)

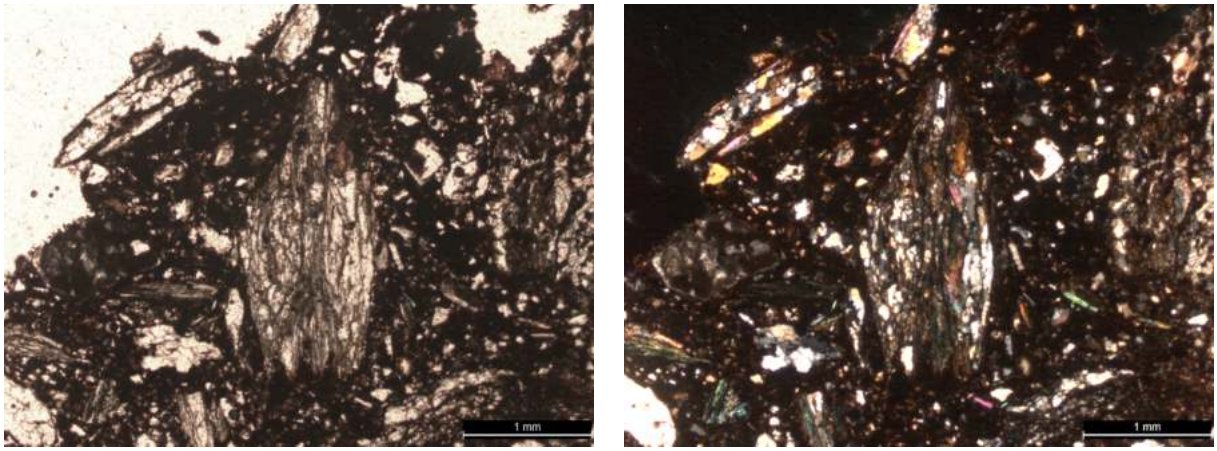

Figure 409 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant des micro-fragments de micaschiste et des micas dans la charge (grossissement × 2.5)

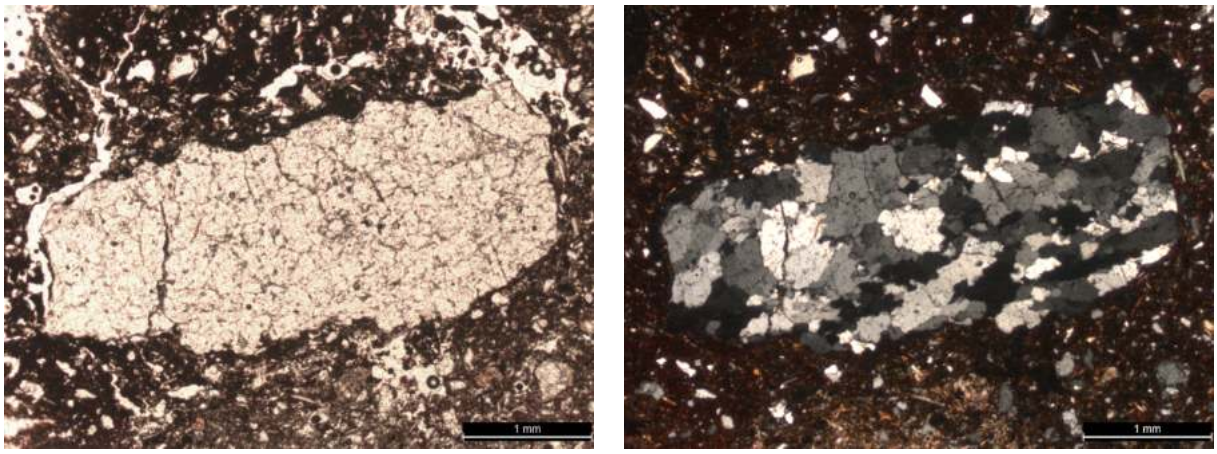

Figure 410 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un fragment de granite inclus dans la charge (grossissement × 2.5)

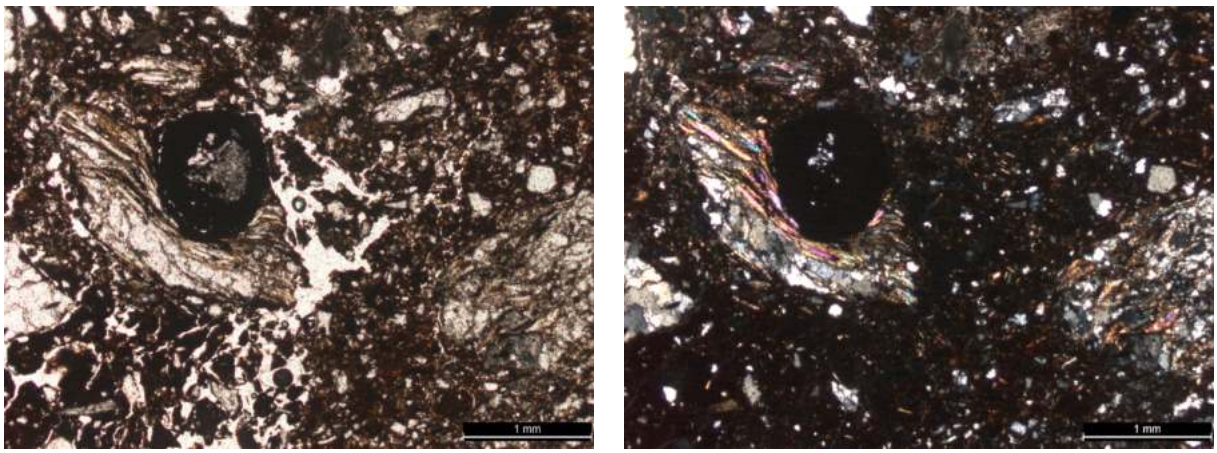

Figure 411 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant des fragments de micaschiste à grenat dispersés dans la charge (grossissement × 2.5)

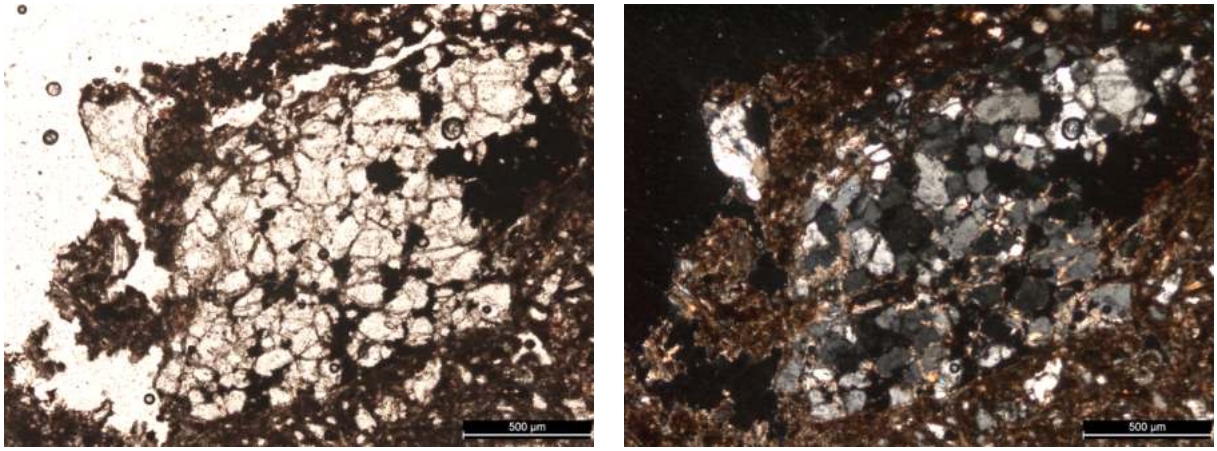

Figure 412 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un fragment d'arénite quartzeuse mêlée à la charge (grossissement × 5)

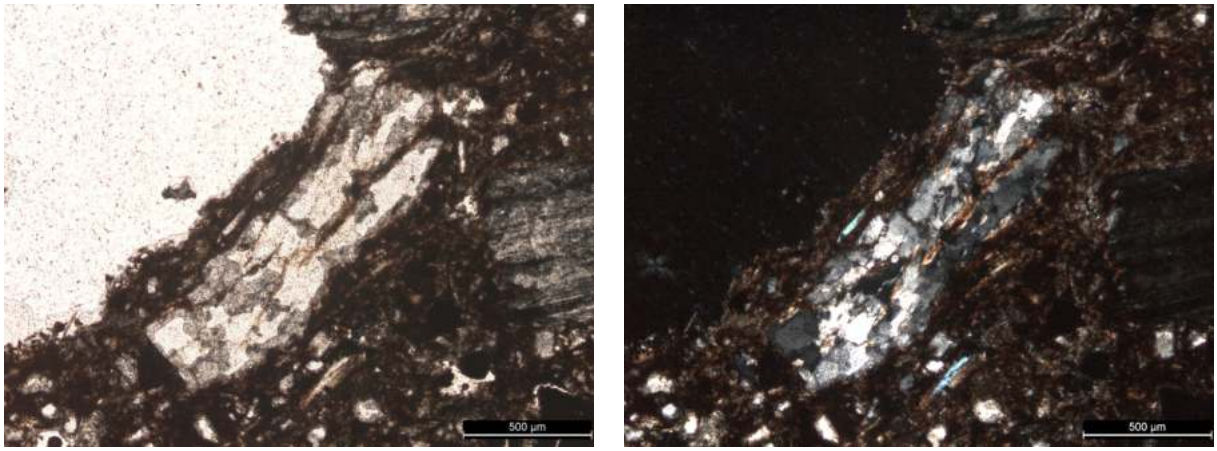

Figure 413 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un le liant à base de chaux de couleur brune (grossissement × 5)

Caractéristiques physico-chimiques

Les observations réalisées au moyen du microscope optique à cathodoluminescence (CL) révèlent un liant constitué de chaux carbonatée caractérisé par une forte hétérogénéité, avec quelques nodules de chaux partiellement calcinés. Les cristaux et les fragments lithiques qui composent la charge présentent des formes sub-angulaires. Parmi ces éléments, on distingue des cristaux de quartz (luminescence mauve), de feldspaths alcalins (luminescence bleu clair) et de feldspaths plagioclases (luminescence verte). En outre, les observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) mettent en évidence l'hétérogénéité de la distribution de la charge au sein du liant, ainsi que la présence de fragments d'oxydes métalliques dans le mortier. Les analyses élémentaires du liant, réalisées au moyen de la microsonde EDS, indiquent des concentrations en CaO oscillant entre 78,39 et 89,37 % pds, tandis que l'analyse élémentaire d'un fragment d'oxyde métallique révèle une teneur élevée en oxydes de fer (FeO/Fe_2O_3) atteignant 65,06 % pds.

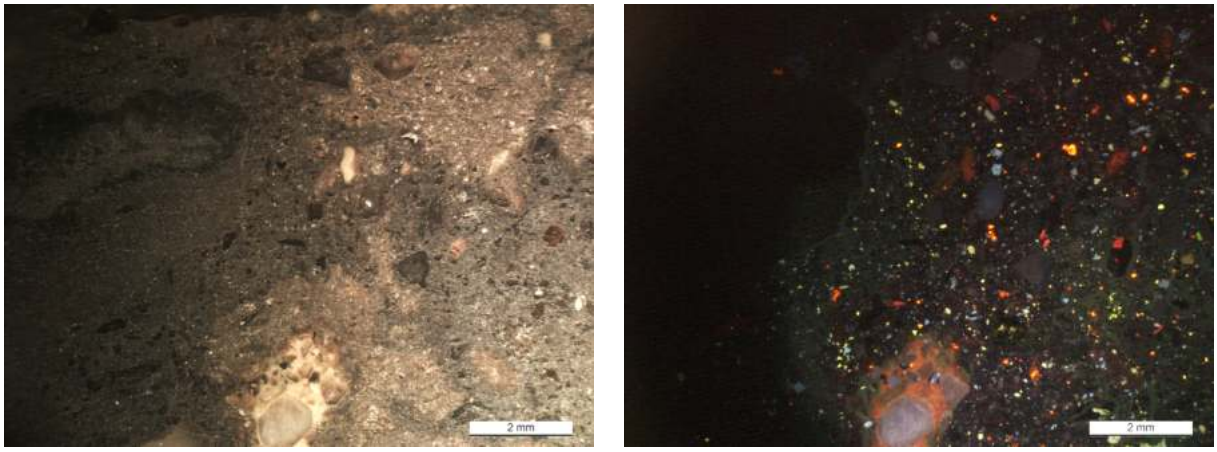

Figure 414 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22411 montrant la présence de fragments de roche calcaire formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 1.25)

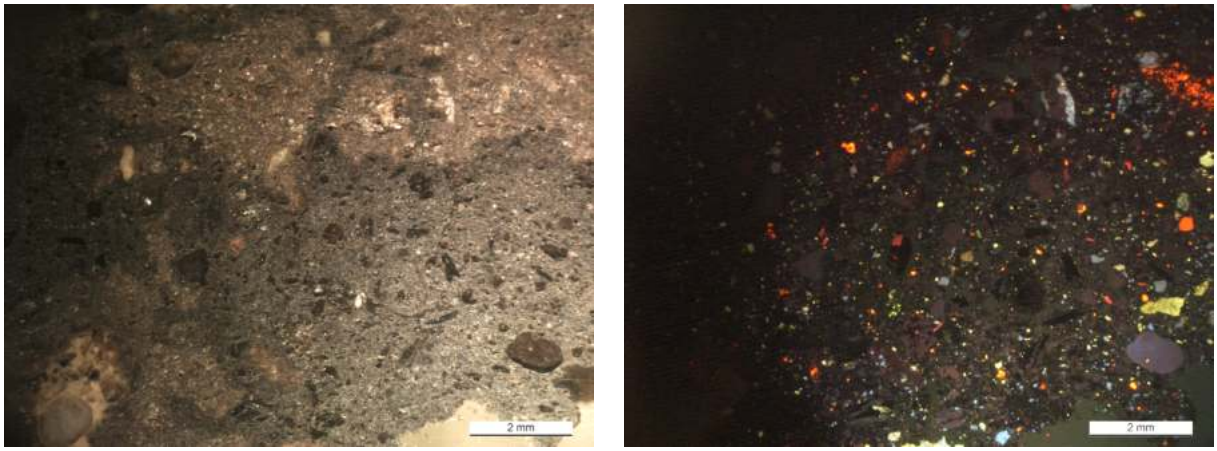

Figure 415 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22411 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)

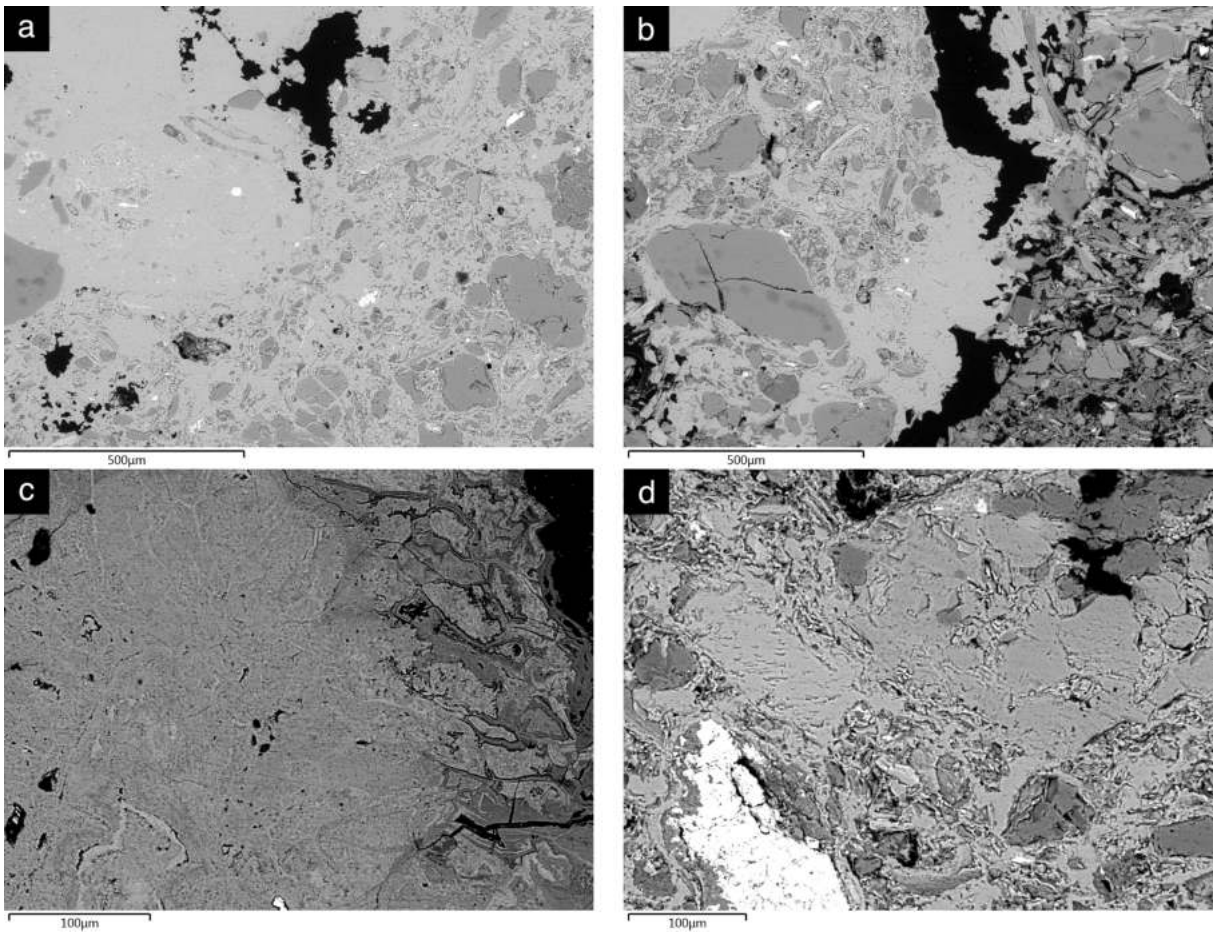

Figure 416 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22411 montrant (a) le liant à base de chaux ; (b) la dispersion hétérogène de la charge dans le liant ; (c-d) la présence de fragments riches en oxydes de fer dans le mortier

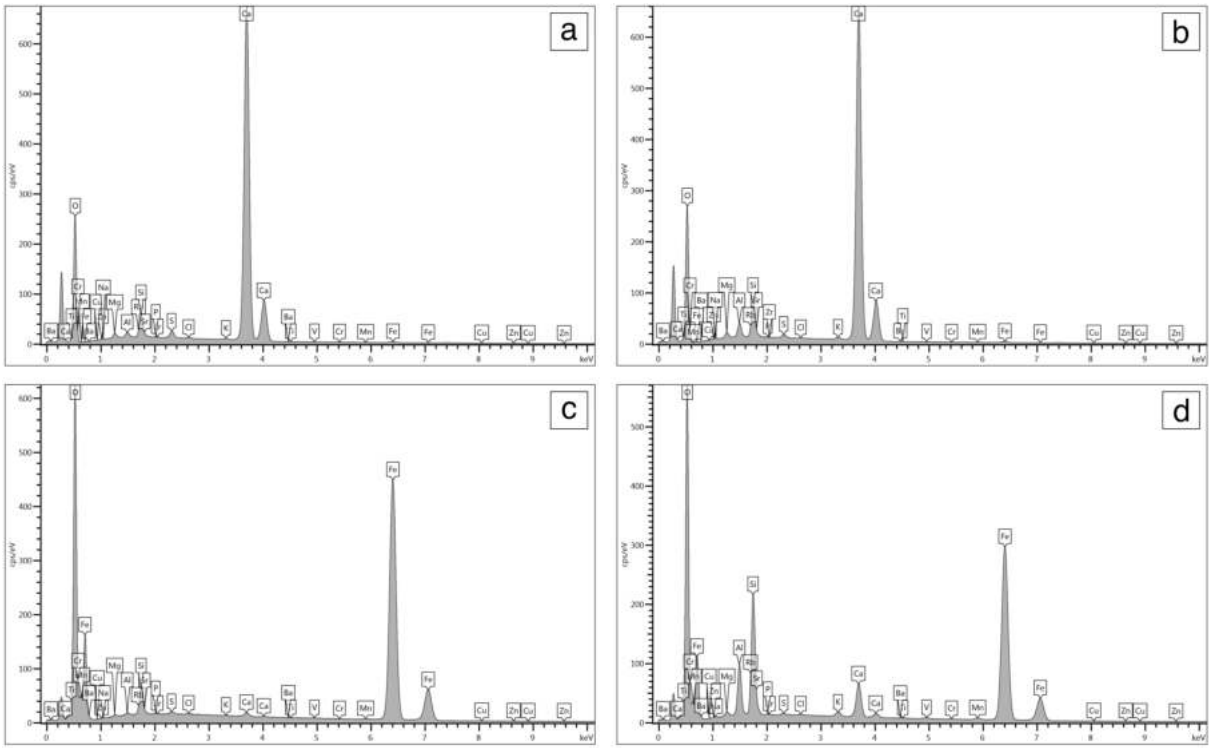

Figure 417 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22411 montrant la composition élémentaire de : (a-b) liant à base de chaux ; (c-d) oxydes métalliques

Plans de prélèvement des échantillons

Figure 418 : Plan général de prélèvement des échantillons de mortier romain depuis les structures du site archéologique d'Hippone (d'après Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Delestre 2005)

Figure 419 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis le complexe des villae du front de mer (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957)

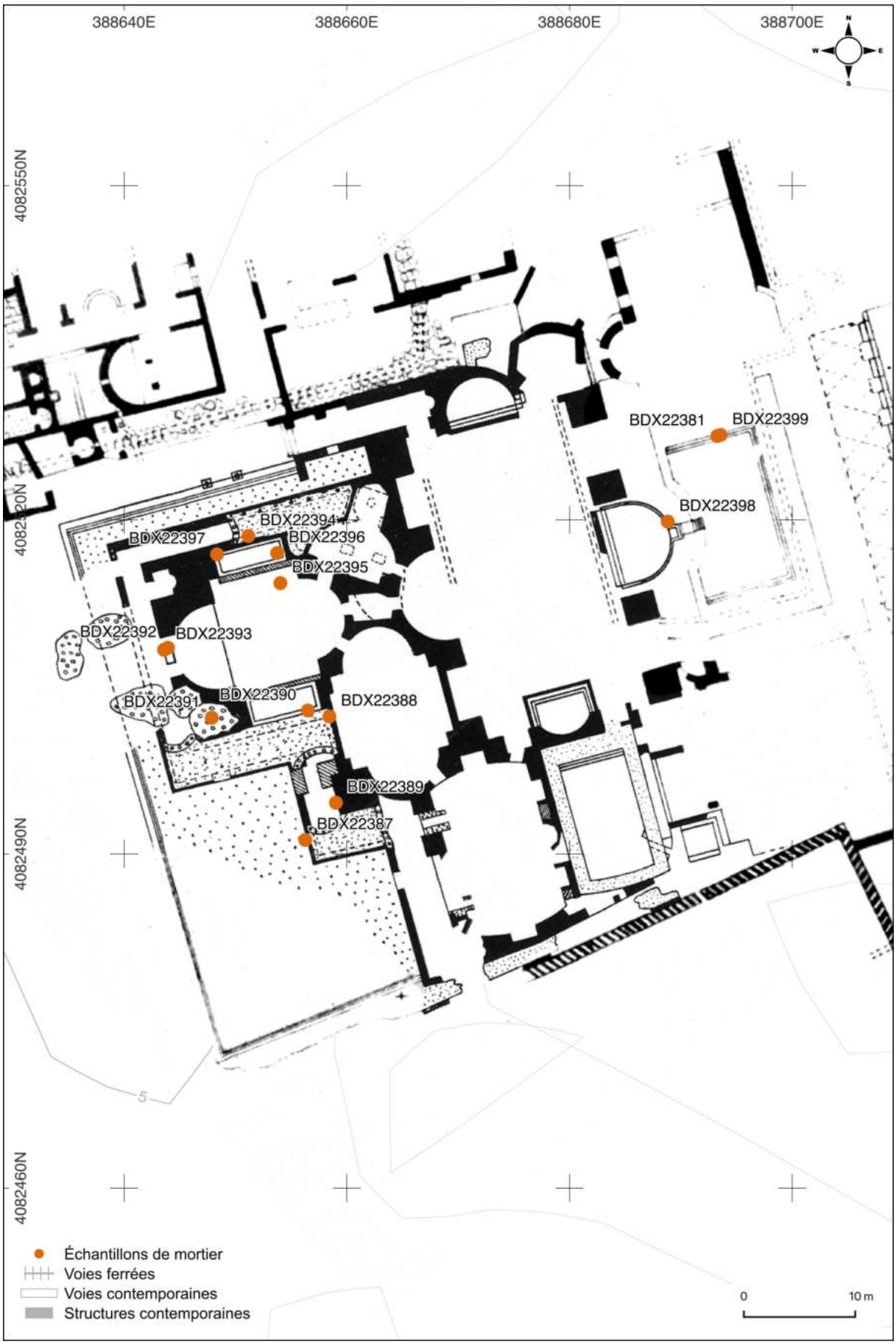

Figure 420 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis le complexe des grands thermes du nord (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957)

Figure 421 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis les structures romaines du quartier chrétien (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957)

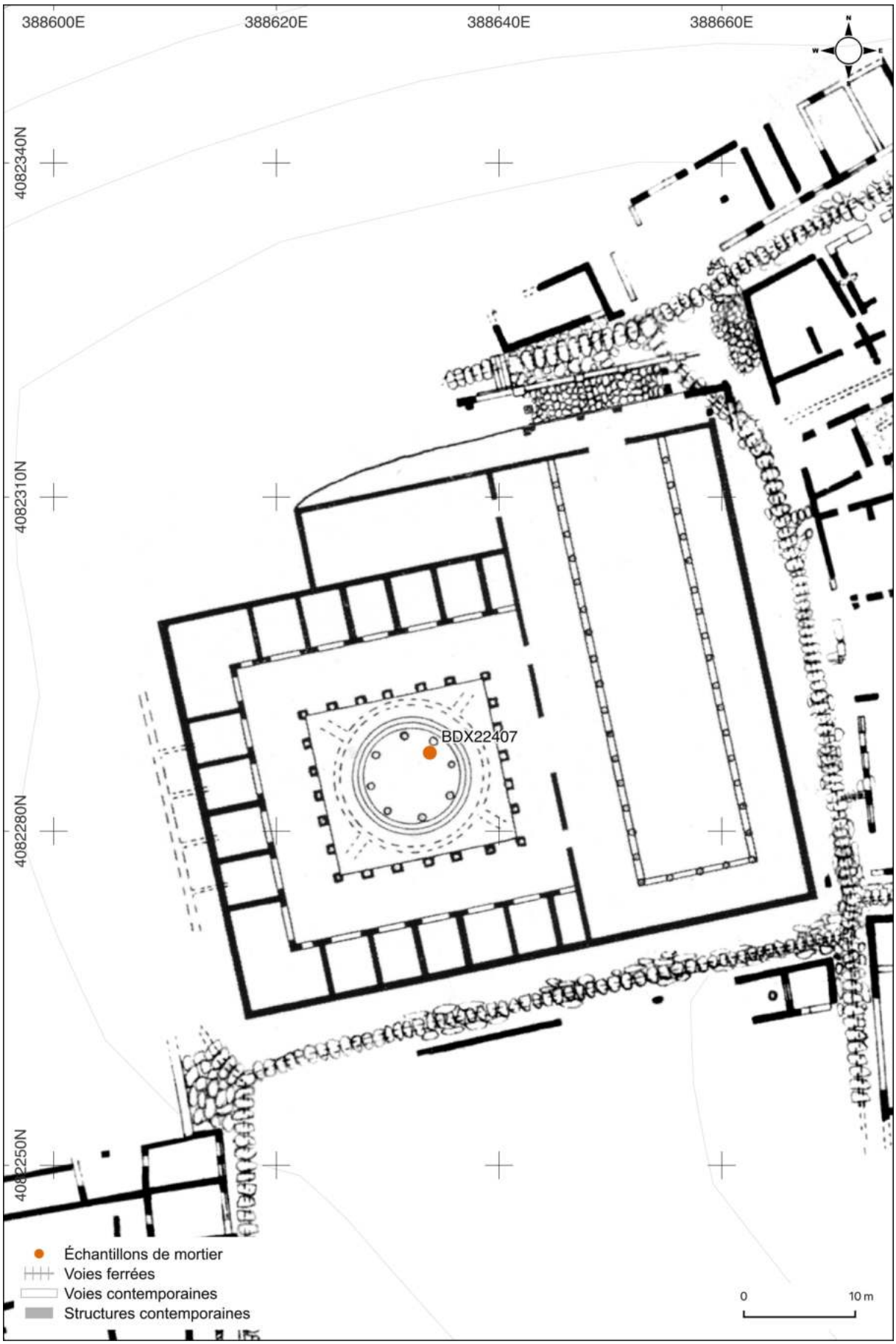

Figure 422 : Plan de prélèvement de l'échantillon de mortier depuis le macellum (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Delestre 2005)

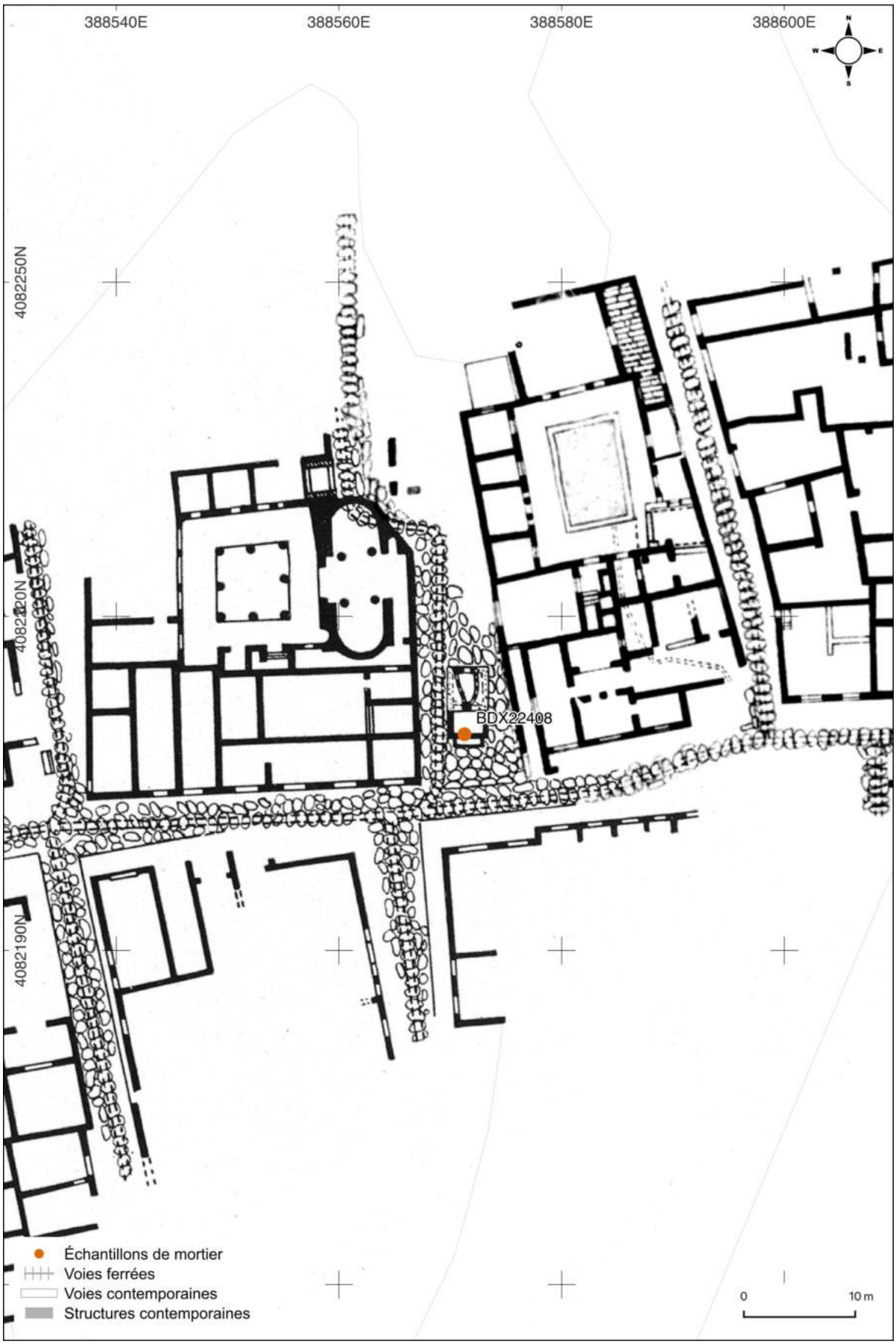

Figure 423 : Plan de prélèvement de l'échantillon de mortier depuis la structure de la Fontaine à la Gorgone (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957)

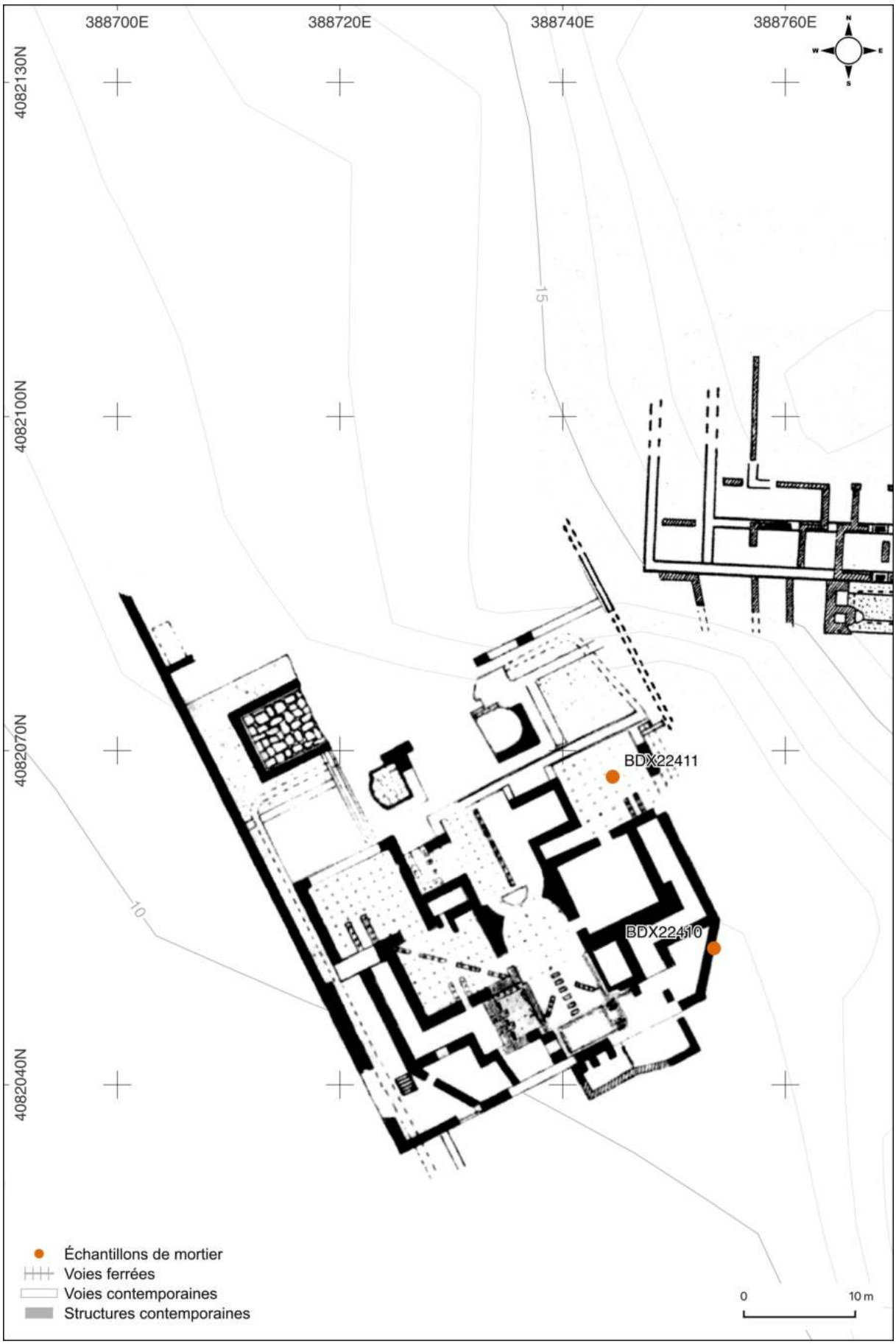

Figure 424 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis les structures romaines des thermes du sud (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Delestre 2005)

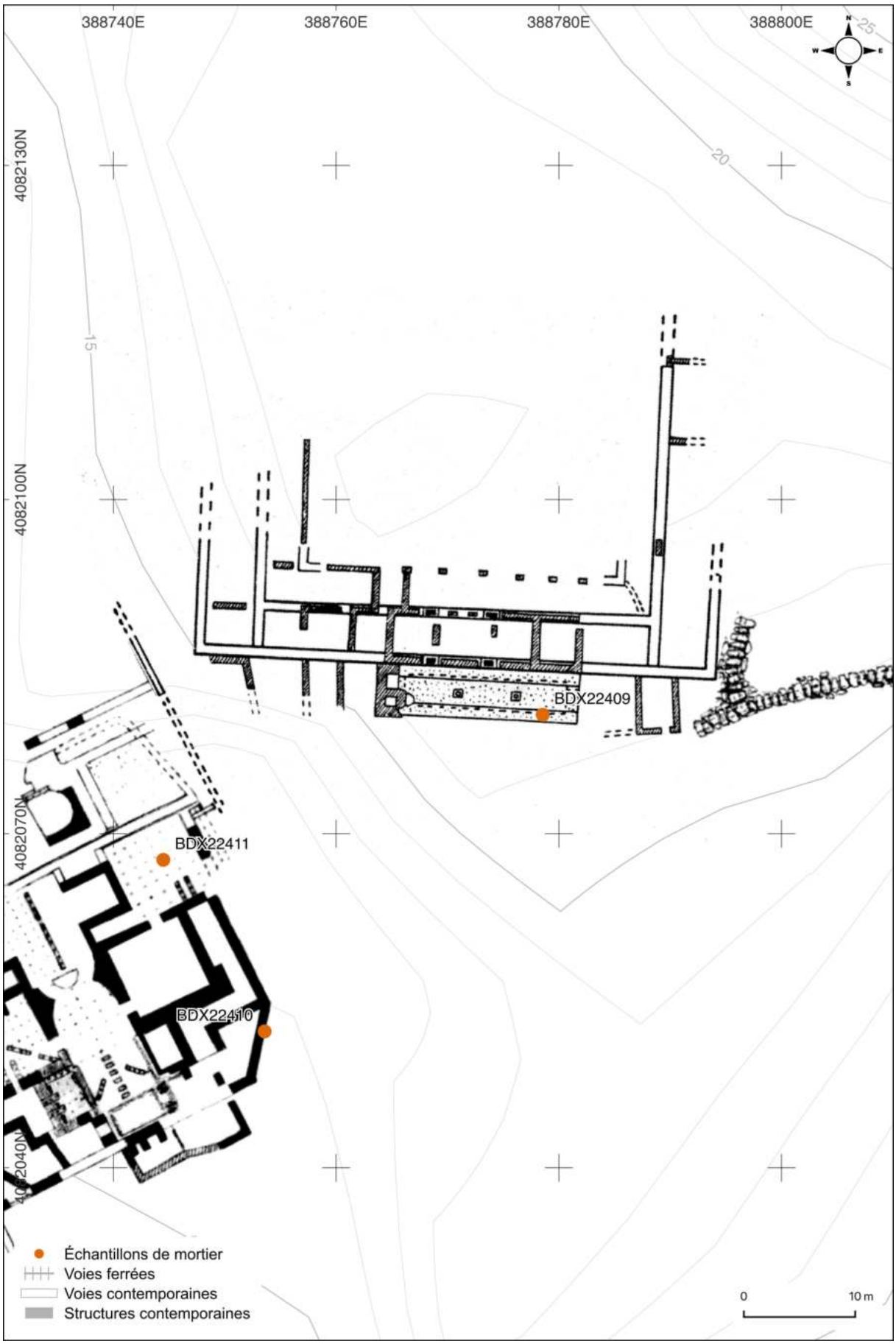

Figure 425 : Plan de prélèvement de l'échantillon de mortier depuis la citerne du Sanctuaire dédié aux Dii Consentes (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Lassus 1959 ; Delestre 2005)

Liste des tableaux

Tableau 13 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22378 228

Tableau 14 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22378 228

Tableau 15 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22378 228

Tableau 16 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22378 228

Tableau 17 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22379a 234

Tableau 18 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22379a 234

Tableau 19 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22379a 234

Tableau 20 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22379a 234

Tableau 21 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22379b 236

Tableau 22 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22379b 236

Tableau 23 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22379b 236

Tableau 24 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22379b 236

Tableau 25 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22380 240

Tableau 26 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22380 240

Tableau 27 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22380 240

Tableau 28 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22380 240

Tableau 29 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22381a 246

Tableau 30 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22381a 246

Tableau 31 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22381a 246

Tableau 32 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22381a 247

Tableau 33 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22381b 248

Tableau 34 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22381b 248

Tableau 35 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22381b 249

Tableau 36 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22381b 249

Tableau 37 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22381c 250

Tableau 38 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22381c 251

Tableau 39 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22381c 251

Tableau 40 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22382 256

Tableau 41 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22382 256
Tableau 42 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22382 256
Tableau 43 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22382..... 256
Tableau 44 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22383 262
Tableau 45 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22383 262
Tableau 46 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22383 262
Tableau 47 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22384a 268
Tableau 48 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22384a 268
Tableau 49 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22384a..... 268
Tableau 50 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22384a..... 268
Tableau 51 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22384b..... 270
Tableau 52 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22384b 270
Tableau 53 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22384b..... 270
Tableau 54 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22384b..... 270
Tableau 55 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du lit de pose BDX22385a 274
Tableau 56 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22385a 274
Tableau 57 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22385a..... 274
Tableau 58 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22385b 276
Tableau 59 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22385b 276
Tableau 60 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22385b..... 276
Tableau 61 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22385b..... 276
Tableau 62 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22385c..... 278
Tableau 63 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22385c 278
Tableau 64 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22385c..... 278
Tableau 65 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22385c..... 278
Tableau 66 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du joint de finition BDX22386a..... 282
Tableau 67 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22386a..... 282
Tableau 68 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de du lit de pose BDX22386b 283
Tableau 69 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22386b 283
Tableau 70 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22386b..... 283

Tableau 71 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22386c 284

Tableau 72 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22386c 284

Tableau 73 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22386c 284

Tableau 74 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22386c 284

Tableau 75 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22386d 286

Tableau 76 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22386d 286

Tableau 77 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22386d 286

Tableau 78 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22386d 286

Tableau 79 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22387a 290

Tableau 80 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22387a 290

Tableau 81 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22387a 290

Tableau 82 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22387a 290

Tableau 83 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22387b 292

Tableau 84 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22387b 292

Tableau 85 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22387b 292

Tableau 86 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22387b 292

Tableau 87 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22388 298

Tableau 88 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22388 298

Tableau 89 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22388 298

Tableau 90 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22389 304

Tableau 91 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22389 304

Tableau 92 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22389 304

Tableau 93 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22389 304

Tableau 94 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22390a 310

Tableau 95 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22390a 310

Tableau 96 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22390a 310

Tableau 97 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22390a 310

Tableau 98 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22390b 312

Tableau 99 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22390b 312

Tableau 100 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22390b 312

Tableau 101 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22390b 312

Tableau 102 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22391 316

Tableau 103 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22391 316

Tableau 104 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22391 ... 316

Tableau 105 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22391 316

Tableau 106 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22392a 322

Tableau 107 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22392a 322

Tableau 108 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22392a..... 322

Tableau 109 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22392a 322

Tableau 110 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22392b 324

Tableau 111 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22392b 324

Tableau 112 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22392b 324

Tableau 113 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22392b 324

Tableau 114 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22393 328

Tableau 115 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22393 328

Tableau 116 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22393 ... 328

Tableau 117 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22393 328

Tableau 118 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22394 332

Tableau 119 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22394 332

Tableau 120 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22394 ... 332

Tableau 121 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22394 332

Tableau 122 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22395 336

Tableau 123 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22395 336

Tableau 124 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22395 ... 336

Tableau 125 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22395 336

Tableau 126 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22396 340

Tableau 127 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22396 340

Tableau 128 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22396 ... 340

Tableau 129 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22396 340

Tableau 130 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22397a 344

Tableau 131 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22397a 344
Tableau 132 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22397a..... 344
Tableau 133 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22397a..... 344
Tableau 134 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22397b..... 346
Tableau 135 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22397b 346
Tableau 136 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22397b..... 346
Tableau 137 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22397b..... 346
Tableau 138 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22398 352
Tableau 139 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22398 352
Tableau 140 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22398 ... 352
Tableau 141 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22398..... 352
Tableau 142 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22399 358
Tableau 143 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22399 358
Tableau 144 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22399 ... 358
Tableau 145 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22399..... 358
Tableau 146 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche d'épiderme BDX22400a..... 364
Tableau 147 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22400a..... 364
Tableau 148 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22400b 365
Tableau 149 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22400b 365
Tableau 150 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22400b 366
Tableau 151 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22400b..... 366
Tableau 152 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22400c 367
Tableau 153 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22400c 367
Tableau 154 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22400c..... 368
Tableau 155 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22400d..... 369
Tableau 156 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22400d 369
Tableau 157 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22400d..... 370
Tableau 158 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22400d..... 370
Tableau 159 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du lit de pose BDX22401a 374
Tableau 160 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22401a..... 374

Tableau 161 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22401b 375

Tableau 162 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22401b 375

Tableau 163 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22401b 375

Tableau 164 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22401c 377

Tableau 165 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22401c 377

Tableau 166 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22401c 377

Tableau 167 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22401c 377

Tableau 168 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de finition BDX22402a 382

Tableau 169 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22402a 382

Tableau 170 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de la couche BDX22402a..... 382

Tableau 171 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22402a 382

Tableau 172 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22402b..... 383

Tableau 173 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22402b 383

Tableau 174 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22402b..... 384

Tableau 175 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22402b..... 384

Tableau 176 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant du lit de pose BDX22403a 388

Tableau 177 : Caractéristiques des fragments minéraux dans la couche BDX22403a 388

Tableau 178 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche intermédiaire BDX22403b 389

Tableau 179 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22403b 389

Tableau 180 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22403b..... 389

Tableau 181 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22403b..... 389

Tableau 182 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de la couche de préparation BDX22403c 390

Tableau 183 : Caractéristiques des fragments lithiques dans la couche BDX22403c 390

Tableau 184 : Caractéristiques des minéraux dans la couche BDX22403c 390

Tableau 185 : Caractéristiques des inclusions dans la couche BDX22403c 390

Tableau 186 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22404 394

Tableau 187 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22404 394

Tableau 188 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22404 ... 394

Tableau 189 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22404..... 394

Tableau 190 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22405 398

Tableau 191 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22405 398
Tableau 192 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22405 ... 398
Tableau 193 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22405..... 398
Tableau 194 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22406 402
Tableau 195 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22406 402
Tableau 196 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22406 ... 402
Tableau 197 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22406..... 402
Tableau 198 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22407 406
Tableau 199 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22407 406
Tableau 200 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22407 ... 406
Tableau 201 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22407..... 406
Tableau 202 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22408 412
Tableau 203 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22408 412
Tableau 204 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22408 ... 412
Tableau 205 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22408..... 412
Tableau 206 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de béton BDX22409 418
Tableau 207 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22409 418
Tableau 208 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22409 ... 418
Tableau 209 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22409..... 418
Tableau 210 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22410 422
Tableau 211 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22410 422
Tableau 212 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22410 ... 422
Tableau 213 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22410..... 422
Tableau 214 : Caractéristiques morphologiques des nodules de chaux et de la porosité dans le liant de l'échantillon de mortier BDX22411 428
Tableau 215 : Caractéristiques des fragments lithiques dans l'échantillon BDX22411 428
Tableau 216 : Caractéristiques des minéraux dans la charge de l'échantillon BDX22411 ... 428
Tableau 217 : Caractéristiques des inclusions dans l'échantillon BDX22411..... 428

Liste des figures

Figure 32 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22378 depuis le mur en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 227

Figure 33 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22378 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge non tamisée 228

Figure 34 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant des grains de quartz, de micas et de feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 2.5) 229

Figure 35 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant la présence de cristaux de calcite et de fragments de roches siliceuses (grossissement × 2.5) 229

Figure 36 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant un fragment de granite de forme sub-émoussée et de faible sphéricité (grossissement × 2.5) 229

Figure 37 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant un fragment de gneiss avec des plages de quartz, feldspaths et micas (grossissement × 5) 230

Figure 38 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant des formations de silicates de calcium et d'aluminium hydratés (grossissement × 10) ... 230

Figure 39 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22378 montrant un pyroclaste trachytique à texture microlithique (grossissement × 10) 230

Figure 40 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22378 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 231

Figure 41 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22378 montrant (a) un fragment de roche volcanique de nature trachytique avec une interface de réaction (en gris sombre) autour du pyroclaste ; (b) le détail de la matrice vitreuse et des inclusions de microlithes 231

Figure 42 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22378 montrant (a) une réaction entre le liant à base de chaux et la charge ; (b) des formations d'aluminosilicates de calcium hydratés 232

Figure 43 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22378 montrant la composition élémentaire de : (a) liant à base de chaux ; (b-c) aluminosilicates et silicates de calcium hydratés résultants des réactions pouzzolaniques entre le liant et les granulats ; (d) matrice vitreuse du pyroclaste trachytique employé comme pouzzolane naturelle 232

Figure 44 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22379 depuis un bassin du péristyle B16 et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 233

Figure 45 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22379 montrant une matrice de couleur beige clair et une charge non tamisée 234

Figure 46 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379a montrant des fragments de terres cuites et des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 235

Figure 47 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379a montrant un fragment de granite entouré de fragments de tuileau (grossissement × 2.5) 235

Figure 48 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379a montrant des fragments de roche calcaire à foraminifères et un fragment d'arénite (grossissement × 2.5) 235

Figure 49 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux et un fragment de tuileau (grossissement × 2.5) 236

Figure 50 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux non mélangés et des fragments de bioclastes (grossissement × 2.5) 237

Figure 51 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des dépôts secondaires de cristaux de calcite à l'intérieur des pores (grossissement × 5) 237

Figure 52 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux non mélangés présents dans la matrice du liant (grossissement × 2.5) 237

Figure 53 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22379 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1) 238

Figure 54 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22379a montrant des cristaux de calcite dans un nodule de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2) 238

Figure 55 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22379b montrant des nodules de chaux non mélangés avec une luminescence de couleur ornage (grossissement × 1.6) 238

Figure 56 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22380 depuis le mur en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 239

Figure 57 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22380 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée 240

Figure 58 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant des fragments de granite, de tuileau et un bioclaste au centre (grossissement × 2.5)..... 241

Figure 59 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5) 241

Figure 60 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant un fragment de micaschiste entouré de fragments de céramique (grossissement × 2.5). 241

Figure 61 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant des bioclastes dont principalement des algues vertes ou Codiacées (grossissement × 5) 242

Figure 62 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant des cristaux de muscovite, biotite et des fragments de céramique (grossissement × 2.5) 242

Figure 63 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant un fragment d'un autre mortier inclus dans la charge (grossissement × 2.5)..... 242

Figure 64 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22380 montrant un cristal de feldspath plagioclase au centre du cliché entouré de micro-fragments de tuileau ainsi que des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 10) 243

Figure 65 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22380 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 243

Figure 66 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22380 montrant la présence de cristaux de calcite et de nodules de chaux provenant de fragments de roches calcaires partiellement calcinées (grossissement × 1.25) 244

Figure 67 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22381 depuis la piscine froide et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 245

Figure 68 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22381 montrant trois différentes couches et des charges non tamisée 246

Figure 69 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381a montrant des fragments de calcite et de marbre dispersés dans la matrice (grossissement × 2.5) ... 247

Figure 70 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381a montrant un lithoclaste de roche calcaire composée de débris de foraminifères et de mollusques (Orbitolinidés et Gastéropode à loge colmatée par une sparite diagenétique) et d'algues rhodophycées (grossissement × 2.5) 247

Figure 71 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381a montrant des fragments pyroclastiques trachytiques à matrice vitreuse (grossissement × 2.5) 248

Figure 72 : Microphotographies en LPNA de la couche BDX22381a montrant des résidus de charbon de bois présents dans le liant (grossissement × 5) 248

Figure 73 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des pyroclastes trachytiques à texture aphanitique (grossissement × 2.5) 249

Figure 74 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5) 249

Figure 75 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des composants de la charge, dont des micas et un fragment de siltite (grossissement × 2.5) 250

Figure 76 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381b montrant des pyroclastes trachytiques à texture porphyrique avec des phénocristaux de sanidine (grossissement × 2.5) 250

Figure 77 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381c montrant un fragment de roche calcaire composée de bioclastes dont des Échinides, des algues rhodophycées et des lamellibranches (grossissement × 2.5) 251

Figure 78 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381c montrant des bioclastes et des pyroclastes trachytiques mêlés à la charge (grossissement × 2.5) ... 251

Figure 79 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22381c montrant un cristal altéré d'augite présent dans le mélange (grossissement × 10) 252

Figure 80 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22381a montrant la composition minéralogique de la charge et des fragments de roche

pyroclastique composée essentiellement de feldspaths alcalins qui émettent une luminescence bleue (grossissement × 1) 252

Figure 81 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22381b montrant un fragment pyroclastique riche en feldspaths alcalins (grossissement × 1) 253

Figure 82 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22381c montrant des fragments de roche calcaire partiellement calcinés qui émettent une forte luminescence de couleur rouge orangé (grossissement × 1) 253

Figure 83 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22381 montrant des fragments de roches volcaniques de formes sub-émoussées à très émoussées et présentant une porosité élevée, dans les couches (a) BDX22381a ; (b) BDX22381b et (c-d) BDX22381c 254

Figure 84 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22381 montrant la composition élémentaire des pyroclastes trachytiques utilisés comme pouzzolane naturelle dans les couches (a) BDX22381a ; (b) BDX22381b et (c-d) BDX22381c . 254

Figure 85 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22382 depuis le sol en opus signinum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 255

Figure 86 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22382 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée 256

Figure 87 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des grains de calcite, de quartz et de feldspaths présents dans la charge (grossissement × 2.5) 257

Figure 88 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des fragments de granite et des fragments de céramique dans la charge (grossissement × 5) 257

Figure 89 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des grains isolés de quartz et de feldspaths ainsi que des silicates de calcium hydratés qui résultent des réactions entre le liant à base de chaux et le tuileau (grossissement × 5) 257

Figure 90 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant les zones de réactions pouzzolaniques entre la chaux et le tuileau (grossissement × 10) 258

Figure 91 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant des réactions pouzzolaniques autour de fragments de céramique (grossissement × 10) .. 258

Figure 92 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22382 montrant un fragment de granite présent dans le sable utilisé comme charge (grossissement × 10) 258

Figure 93 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22382 montrant la composition minéralogique de la charge et des fragments de céramiques (grossissement × 1.25) 259

Figure 94 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22382 montrant en détail les minéraux constituant la charge (grossissement × 1.25) 259

Figure 95 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22382 montrant en détail les formations de silicates de calcium hydratés (grossissement × 10) 260

Figure 96 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22383 depuis le mur en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 261

Figure 97 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22383 montrant une matrice de couleur grise et une charge tamisée 262

Figure 98 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant une charge composée de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases, associés à des grains de calcite, des micas et des bioclastes (grossissement × 2.5) 263

Figure 99 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence dans le liant de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5) 263

Figure 100 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant et de bioclastes dans la charge, dont un test d'Échinide (grossissement × 2.5) 263

Figure 101 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence de fragments de lamellibranches dans la matrice (grossissement × 5) 264

Figure 102 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant un fragment de gneiss faisant partie de la charge (grossissement × 5) 264

Figure 103 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22383 montrant la présence de fragments de granite dans la charge (grossissement × 5) 264

Figure 104 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22383 montrant les constituants de la charge et la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 1.25) 265

Figure 105 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22383 montrant des nodules de chaux non mélangés présentant une texture micritique 265

Figure 106 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22383 montrant la composition élémentaire des nodules de chaux non mélangés avec des teneurs en CaO et MgO respectivement entre (a) 86,40 et 0,52 % pds ; (b) 93,96 et 0,53 % pds 266

Figure 107 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22384 depuis la citerne C6 et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 267

Figure 108 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22384 montrant une matrice de couleur rose clair dans la couche de finition et une matrice de couleur beige clair avec une charge tamisée dans la couche de préparation 268

Figure 109 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384a montrant des fragments de céramique utilisés comme pouzzolane artificielle ainsi qu'un nodule de chaux partiellement calcinés présent dans la matrice (grossissement × 2.5) 269

Figure 110 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384a montrant des nodules de chaux non mélangés et des micro-fragments de céramique qui composent la poudre de tuileau utilisée comme pouzzolane artificielle (grossissement × 2.5) 269

Figure 111 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384a montrant des macro-fragments de céramique (grossissement × 2.5) 269

Figure 112 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant la présence de pores de formes sphériques et oblongues dans la matrice avec des dépôts secondaires de calcite sur les surfaces internes des vides (grossissement × 2.5) 270

Figure 113 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant des nodules de chaux non mélangés présentant des fissures (grossissement × 2.5) 271

Figure 114 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant des cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases ainsi que des fragments de granite (grossissement × 5) 271

Figure 115 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22384b montrant un micro-fragment de granite présent dans la charge (grossissement × 5) 271

Figure 116 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22384 montrant la composition minéralogique de la charge utilisée dans chacune des deux couches (grossissement × 1) 272

Figure 117 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22384a montrant des fragments de céramique inclus dans la matrice (grossissement × 2) 272

Figure 118 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22384b montrant la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2) 272

Figure 119 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22385 depuis la mosaïque de l'Aiôn et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 273

Figure 120 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22385 montrant une matrice de couleur beige clair et une charge non tamisée 274

Figure 121 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385a montrant une charge composée de quartz, de feldspaths et de micas (grossissement × 2.5) 275

Figure 122 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385a montrant la présence de porosité de formes oblongues et sphériques dans le liant (grossissement × 2.5) 275

Figure 123 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385a montrant deux tesselles calcaires (grainstone) riches en foraminifères (grossissement × 2.5) 275

Figure 124 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant la composition minéralogique de la charge et la présence de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 2.5) 276

Figure 125 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant des cristaux de calcite et un fragment de marbre mêlés à la charge (grossissement × 2.5) 277

Figure 126 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant plusieurs fragments de granite et de cristaux de quartz et feldspaths (grossissement × 2.5) 277

Figure 127 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385b montrant en détail des cristaux de quartz, de feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 5) 277

Figure 128 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant fragment de granite avec des inclusions de biotite et muscovite (grossissement × 2.5) 278

Figure 129 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant un fragment de gneiss faisant partie de la charge (grossissement × 2.5) 279

Figure 130 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant un fragment de coquille de lamellibranche isolé dans le liant à base de chaux (grossissement × 2.5) 279

Figure 131 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22385c montrant des micas (biotite et muscovite) dispersés dans la matrice (grossissement × 2.5) 279

Figure 132 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22385a montrant les matrices carbonatées des tesselles et du lit de pose (grossissement × 1) 280

Figure 133 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22385b montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1) 280

Figure 134 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22385c montrant la présence de nodules de chaux et de tuileau dans le mélange (grossissement × 1) . 280

Figure 135 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22386 depuis la mosaïque d'Amphitrite de la pièce B7 et indication de sa localisation sur le plan des villae du front de mer 281

Figure 136 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22386 montrant une matrice de couleur beige clair avec des inclusions de tuileau 282

Figure 137 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386a montrant l'utilisation d'une charge tamisée composée d'un sable silico-calcaire (grossissement × 2.5) 282

Figure 138 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386a montrant des tesselles taillées dans un grainstone fossilifère (grossissement × 2.5) 283

Figure 139 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386b montrant une matrice entièrement carbonatée à faible porosité (grossissement × 2.5) 283

Figure 140 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant une charge non tamisée composée d'un sable silico-calcaire et la présence de bioclastes formant un fragment de calcarénite non calciné (grossissement × 2.5) 284

Figure 141 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant une charge composée de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 2.5) 285

Figure 142 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant des cristaux de calcite et de micas mêlés à la charge (grossissement × 2.5) 285

Figure 143 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386c montrant des fragments de céramique de compositions différentes (grossissement × 2.5) 285

Figure 144 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386d montrant une charge composée d'un sable silico-calcaire (grossissement × 2.5) 286

Figure 145 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386d montrant un fragment de granite inclus dans la charge (grossissement × 2.5) 287

Figure 146 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22386d montrant des fragments de granite qui composent la charge (grossissement × 2.5) 287

Figure 147 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22386 montrant la composition minéralogique des tesselles et du lit de pose (grossissement × 1) 288

Figure 148 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22386c montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1) 288

Figure 149 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22386d montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1) 288

Figure 150 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22387 depuis le mur du gymnasium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord . 289

Figure 151 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22387 montrant deux matrices de couleurs rose foncé et beige clair et une charge non tamisée utilisée dans les deux couches de l'enduit 290

Figure 152 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387a montrant la présence de fragments de granite et de pyroclastes trachytiques (grossissement × 2.5) 291

Figure 153 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387a montrant une matrice entièrement carbonatée et une charge composée de quartz, feldspaths alcalins, calcite et de rares cristaux de pyroxènes (grossissement × 2.5) 291

Figure 154 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387a montrant un pyroclaste trachytique à matrice vitreuse et texture microlithique (grossissement × 10) 291

Figure 155 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant la présence de tuileau et de fragments granitiques et pyroclastiques (grossissement × 2.5) 293

Figure 156 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant des pyroclastes avec des phénocristaux de sanidine (grossissement × 2.5) 293

Figure 157 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant des pyroclastes avec des textures aphanitiques à vitrophyriques (grossissement × 2.5) .. 293

Figure 158 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22387b montrant la présence de fragments de micaschiste dans la charge (grossissement × 2.5) 294

Figure 159 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22387a montrant les compositions lithique et minéralogique du mélange (grossissement × 3.2) 294

Figure 160 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22387a montrant un pyroclaste trachytique à microlithes (grossissement × 5) 295

Figure 161 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22387b montrant des phénocristaux de sanidine dispersés dans la charge (grossissement × 1) 295

Figure 162 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22387 montrant des fragments de pyroclastes trachytiques avec des pores : (a) ouvertes et allongées ; (b) sphériques 295

Figure 163 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22387 montrant la composition élémentaire de : (a) fragment pyroclastique trachytique à pores ouvertes

et allongées avec des dépôts secondaires de calcite ; (b) fragment pyroclastique trachytique à pores sphériques 296

Figure 164 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22388 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 297

Figure 165 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22388 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge tamisée 298

Figure 166 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant des éléments de la charge de formes sub-angulaires à très émoussées (grossissement × 2.5) 299

Figure 167 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant des grains de quartz, de feldspaths alcalins et des arénites quartzeuses (grossissement × 2.5) 299

Figure 168 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant la présence de bioclastes à matrices micritiques et sparitiques (grossissement × 2.5)... 299

Figure 169 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant un fragment de granite et un bioclaste à matrice sparitique (grossissement × 5) 300

Figure 170 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant un fragment de marbre et des cristaux de calcite mêlés à la charge (grossissement × 5) 300

Figure 171 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22388 montrant un fragment de silex constitué de calcédoine mêlé à la charge (grossissement × 10)..... 300

Figure 172 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22388 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 301

Figure 173 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22388 montrant la présence de bioclastes dans la charge (grossissement × 1.25) 301

Figure 174 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22388 montrant (a) la matrice du liant à base de chaux carbonatée ; (b) un élément bioclastique inclus dans la charge 302

Figure 175 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX2238 montrant la composition élémentaire de : (a-b) matrice carbonatée du liant à base de chaux ; (c) matrice d'un fragment bioclastique ; (d) matrice carbonatée du liant en périphérie d'un bioclaste 302

Figure 176 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22398 depuis le mur en opus incertum et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 303

Figure 177 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22389 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge non tamisée 304

Figure 178 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant des nodules de chaux non mélangés présentant des microfissures (grossissement × 2.5) 305

Figure 179 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant des grains de quartz et feldspaths alcalins qui composent la charge ainsi que des fragments de tuileau et de roches pyroclastiques (grossissement × 2.5) 305

Figure 180 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant la présence de fragments de tuileau et de pyroclastes trachytiques (grossissement × 2.5) 305

Figure 181 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant un micro-fragment de granite mêlé à la charge (grossissement × 5)..... 306

Figure 182 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant un phénocristal de sanidine et des fragments de roches pyroclastiques (grossissement × 2.5) 306

Figure 183 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22389 montrant un pyroclaste (trachyte) à texture porphyrique composé de phénocristaux de sanidine et des microlithes de feldspaths alcalins inclus dans une matrice vitreuse (grossissement × 10) 306

Figure 184 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22389 montrant les compositions lithique et minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 307

Figure 185 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22389 montrant (a) un fragment de pyroclaste trachytique à microporosité sphérique occluse ; (b) un second fragment de ponce trachytique affichant une forte microporosité ouverte..... 307

Figure 186 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22389 montrant la composition élémentaire des fragments de roches pyroclastiques où la teneur de SiO_2 varie de 58,9 à 61,4 % pds et la teneur de Na_2O + K_2O varie de 13,3 à 14,2 % pds . 308

Figure 187 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22390 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 309

Figure 188 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22390 montrant deux matrices de couleurs rose foncé et beige foncé et une charge non tamisée dans les deux couches de l'enduit..... 310

Figure 189 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390a montrant les éléments composants la charge (quartz, feldspaths, calcite et arénite quartzeuse) ainsi que des fragments de tuileau dispersés dans la matrice (grossissement × 2.5) 311

Figure 190 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390a montrant la présence de fragments de bioclastes partiellement calcinés (grossissement × 2.5) ... 311

Figure 191 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390a montrant un fragment d'arénite quartzeuse de forme sub-émoussée et des minéraux de la charge, dont des quartz, des feldspaths et des micas (grossissement × 5) 311

Figure 192 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390b montrant la présence de bioclastes partiellement calcinés et des dépôts secondaires de cristaux de calcite au niveau des fissures et des pores (grossissement × 2.5) 312

Figure 193 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390b montrant un micro-fragment de granite et un cristal de calcite (grossissement × 2.5)..... 313

Figure 194 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22390b montrant une forte porosité de forme sphérique et la présence de microfissures (grossissement × 2.5) 313

Figure 195 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22390a montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)..... 314

Figure 196 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22390a montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant (grossissement × 3.2) .. 314

Figure 197 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22390b montrant la présence de fragments de tuileau de compositions différentes (grossissement × 1.25) 314

Figure 198 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22391 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 315

Figure 199 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22391 montrant une matrice de couleur beige clair et une charge tamisée 316

Figure 200 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des cristaux de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases de dimensions régulières (grossissement × 2.5) 317

Figure 201 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des fragments lithiques plutoniques et volcaniques (grossissement × 2.5) 317

Figure 202 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 317

Figure 203 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des micro-fragments de granite et des micas mêlés à la charge (grossissement × 2.5) 318

Figure 204 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant un fragment pyroclastique (trachyte) à matrice vitreuse composé d'un phénocristal de sanidine et de microlithes de feldspaths alcalins (grossissement × 5) 318

Figure 205 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22391 montrant des micro-fragments de granite et des feldspaths alcalins et plagioclases (grossissement × 5) 318

Figure 206 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22391 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 319

Figure 207 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22391 montrant (a) la matrice du liant à base de chaux ; (b) la matrice d'un pyroclaste trachytique à forte microporosité 319

Figure 208 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22391 montrant (a) la formation de dépôts de sel (chlorure de sodium) au sein du liant à base de chaux (en gris clair) ; (b) des dépôts de cristaux de sel au tour des grains qui composent la charge 320

Figure 209 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22391 montrant la composition élémentaire de : (a) liant à base de chaux ; (b) la matrice du pyroclaste trachytique ; (c-d) les dépôts de sel au sein du liant avec des teneurs en Na_2O qui oscillent entre 39,7 et 40,8 % pds et des teneurs en ClO qui varient de 36,4 et 36,8 % pds 320

Figure 210 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22392 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 321

Figure 211 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22392 montrant deux matrices de couleurs beige clair et rose foncé et une charge non tamisée dans les deux couches de l'enduit 322

Figure 212 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392a montrant des cristaux de calcite dispersés la couche d'enduit (grossissement × 2.5)..... 323

Figure 213 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392a montrant fragment de marbre inclus dans la charge (grossissement × 2.5)..... 323

Figure 214 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392a montrant un cristal de calcédoine avec de cristallites de quartz agencés en fibres (grossissement × 10)..... 323

Figure 215 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant la présence de fragments de tuileau et de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5)..... 324

Figure 216 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant des cristaux de calcite, quartz, feldspaths et des micas (grossissement × 2.5) 325

Figure 217 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant des cristaux de feldspaths alcalins et plagioclases mêlés à la charge (grossissement × 10) 325

Figure 218 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22392b montrant des réactions pouzzolaniques entre le liant à base de chaux et les fragments de tuileau (grossissement × 10)..... 325

Figure 219 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22392a montrant une hétérogénéité dans la composition du liant à base de chaux et la présence de calcite et de fragments de marbre dans la charge (grossissement × 1) 326

Figure 220 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22392b montrant la composition minéralogique (grossissement × 1) 326

Figure 221 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22393 depuis le mur de praefurnium et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 327

Figure 222 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22393 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée..... 328

Figure 223 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22393 montrant des fragments de tuileau et des pores de formes sphériques et oblongues (grossissement × 2.5)..... 329

Figure 224 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22393 montrant un fragment de marbre inclus dans la charge (grossissement × 2.5)..... 329

Figure 225 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22393 montrant des éléments bioclastiques constituant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 5)..... 329

Figure 226 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22393 montrant une hétérogénéité dans la composition du liant (grossissement × 1.25)..... 330

Figure 227 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22393 montrant la présence de fragments de marbre et de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 3.2)..... 330

Figure 228 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22394 depuis la dalle de suspensura et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 331

Figure 229 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22394 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée 332

Figure 230 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant des cristaux de quartz et feldspaths de formes sub-émoussées à sub-angulaires (grossissement × 2.5) 333

Figure 231 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 333

Figure 232 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant des bioclastes (Gastéropode et Bivalve) formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 5) 333

Figure 233 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22394 montrant un fragment de granite de forme sub-angulaire mêlé à la charge (grossissement × 5) ... 334

Figure 234 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22394 montrant des fragments de tuileau de compositions différentes (grossissement × 1) 334

Figure 235 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22394 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.6) 334

Figure 236 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22395 depuis l'hypocauste et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 335

Figure 237 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22395 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée 336

Figure 238 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant des fragments de marbre et de siltite présents dans la charge (grossissement × 2.5) 337

Figure 239 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant un fragment de marbre entouré de fragments de tuileau (grossissement × 2.5) 337

Figure 240 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant des cristaux de quartz, feldspaths, calcite et de micas dans la charge (grossissement × 2.5) 337

Figure 241 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22395 montrant en détail un fragment de bioclaste partiellement calciné (grossissement × 5) 338

Figure 242 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22395 montrant une teneur élevée (10 %) de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 1.25) 338

Figure 243 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22395 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 338

Figure 244 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22396 depuis une piscine chaude et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 339

Figure 245 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22396 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée 340

Figure 246 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22396 montrant la présence d'une porosité élevée (10 %) dans le liant (grossissement × 2.5) 341

Figure 247 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22396 montrant un phénocristal de calcite présent dans la charge (grossissement × 2.5)..... 341

Figure 248 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22396 montrant des cristaux de quartz, de calcite et de feldspaths alcalins ainsi que des micro-fragments de granite présents dans la charge (grossissement × 2.5)..... 341

Figure 249 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22396 montrant des fragments de tuileau de compositions différentes (grossissement × 1.25) 342

Figure 250 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22396 montrant des nodules de chaux partiellement calcinés et des cristaux de calcite (grossissement × 1.25)..... 342

Figure 251 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22397 depuis une piscine chaude et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 343

Figure 252 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22397 montrant deux matrices de couleurs rose clair et beige clair et une charge non tamisée dans les deux couches de l'enduit..... 344

Figure 253 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant un pyroclaste trachytique composé de microlithes alcalins inclus dans une matrice vitreuse (grossissement × 2.5)..... 345

Figure 254 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant des cristaux de calcite, feldspaths et quartz présents dans la charge (grossissement × 2.5) 345

Figure 255 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant (grossissement × 2.5)..... 345

Figure 256 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397a montrant des dépôts secondaires de cristaux de calcite dans les pores (grossissement × 10)..... 346

Figure 257 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant un phénocristal de calcite et des interstices de forme sphérique (grossissement × 2.5).. 347

Figure 258 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant la présence d'une porosité moyenne (5 %) de forme sphérique (grossissement × 2.5) . 347

Figure 259 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant des dépôts secondaires de calcite dans les pores (grossissement × 5)..... 347

Figure 260 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22397b montrant en détail les dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 10) 348

Figure 261 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22397 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1) 348

Figure 262 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22397a montrant un pyroclaste trachytique et une répartition hétérogène des carbonates (grossissement × 2)..... 349

Figure 263 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22397b des fragments de tuileau de compositions minéralogiques différentes (grossissement × 1.25) 349

Figure 264 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22397 montrant (a) un fragment de roche volcanique (trachyte) avec une microporosité sphérique ; (b) un fragment pyroclastique trachytique avec une microporosité oblongue 349

Figure 265 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22397 montrant la composition élémentaire de : (a) fragment de roche volcanique avec une teneur en SiO_2 de 61,56 % pds et une teneur en NaO_2 + K_2O de 12,48 % pds ; (b) un fragment de ponce trachytique avec une teneur en SiO_2 de 61,12 % pds et une teneur en NaO_2 + K_2O de 12,08 % pds 350

Figure 266 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22398 depuis la piscine froide et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 351

Figure 267 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22398 montrant une matrice de couleur rose clair et une charge non tamisée 352

Figure 268 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant des fragments de tuileau et de pyroclastes trachytiques (grossissement × 2.5) 353

Figure 269 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant une charge constituée d'un sable silico-calcaire avec la présence de cristaux de quartz, feldspaths, micas (biotite) et des cristaux de calcite (grossissement × 2.5) 353

Figure 270 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant un pyroclaste trachytique de forme émoussée présentant une matrice vitreuse avec des inclusions de phénocristaux de sanidine (grossissement × 2.5) 353

Figure 271 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant plusieurs fragments de roches pyroclastiques avec des phénocristaux de sanidine et des microlithes inclus dans une matrice vitreuse (grossissement × 2.5) 354

Figure 272 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant un phénocristal de sanidine dispersé dans la charge (grossissement × 5) 354

Figure 273 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22398 montrant la présence d'une porosité élevée (10 %) dans le liant avec des pores de formes sphériques et oblongues (grossissement × 2.5) 354

Figure 274 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22398 montrant des phénocristaux de sanidine dispersés dans le liant entièrement carbonaté (grossissement × 1.25) 355

Figure 275 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22398 montrant des fragments pyroclastiques à microporosité élevée avec des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores (grossissement × 2.5) 355

Figure 276 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22398 montrant (a) un fragment de roche pyroclastique présentant une microporosité élevée et orientée avec des inclusions de phénocristaux (texture porphyrique) ; (b-d) des fragments pyroclastiques de formes sub-angulaires à très émoussées 356

Figure 277 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22398 montrant la composition élémentaire des fragments de roche pyroclastique (trachyte) 356

Figure 278 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22399 depuis le grand bassin et indication de sa localisation sur le plan des grands thermes du nord 357

Figure 279 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22399 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée 358

Figure 280 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant la présence de nodules de chaux non mélangés et une porosité élevée (grossissement × 2.5) 359

Figure 281 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant la présence de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 2.5) 359

Figure 282 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant in fragment de granite de forme sub-angulaire mêlé à la charge (grossissement × 2.5) 359

Figure 283 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant des pores de formes sphériques avec des dépôts secondaires de calcite (grossissement × 2.5) 360

Figure 284 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant des fragments de roche pyroclastique avec des inclusions microlithes et des phénocristaux de sanidine dans une matrice vitreuse (grossissement × 5) 360

Figure 285 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22399 montrant des nodules de chaux non mélangés et des cristaux de calcite dans le liant (grossissement × 5) 360

Figure 286 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22399 montrant des nodules de chaux non mélangés et des cristaux de calcite dans le mélange ainsi que des fragments de pyroclastes à texture porphyrique (grossissement × 1) ... 361

Figure 287 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22399 montrant des fragments pyroclastiques à texture microlithique ainsi que les dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 3.2) 361

Figure 288 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22399 montrant (a) des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores ; (b-d) des fragments de pyroclastes trachytiques 362

Figure 289 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22399 montrant la composition élémentaire des : (a) dépôts secondaires de calcite ; (b-c) fragments de pyroclastes (les teneurs en SiO_2 et $Na_2O + K_2O$) indiquent la nature trachytique de la roche ; (d) dépôts secondaires de calcite à l'intérieur de la microporosité des fragments pyroclastiques 362

Figure 290 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22400 depuis le presbyterium et indication de sa localisation sur le plan de la grande basilique 363

Figure 291 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22400 montrant des matrices de couleurs différentes (beige foncé à beige clair) marquant une nette différenciation entre les couches qui composent l'enduit 364

Figure 292 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400a montrant des cristaux de calcite dispersés en abondance (5 %) dans le liant (grossissement × 2.5)364

Figure 293 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400a montrant des cristaux de calcite de forme angulaire en surface de la couche (grossissement × 5) . 365

Figure 294 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400a montrant les principaux composants de la charge, dont de la calcite et des micas (grossissement × 5) 365

Figure 295 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant un nodule de chaux non mélangé (grossissement × 2.5) 366

Figure 296 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant des minéraux constituant la charge, dont des quartz, feldspaths et calcite (grossissement × 2.5) 366

Figure 297 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant des nodules de chaux partiellement calcinés formés par des bioclastes (grossissement × 5) 367

Figure 298 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400b montrant des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des interstices (grossissement × 10) 367

Figure 299 : Microphotographies en LPNA et LPA montrant la séparation entre les couches BDX22400b et BDX22400c (grossissement × 2.5) 368

Figure 300 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400c montrant une forte présence (30 %) de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 2.5).... 368

Figure 301 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400c montrant une porosité élevée (10 %) de formes sphériques et oblongues (grossissement × 5) 369

Figure 302 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400c montrant la présence (<1 %) de nodules de chaux non mélangés (grossissement × 5) 369

Figure 303 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant une charge composée d'une charge silico-calcaire (grossissement × 2.5) 370

Figure 304 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant des fragments de granite mêlés à la charge (grossissement × 2.5) 370

Figure 305 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant la présence d'un fragment de marbre dans la couche d'enduit (grossissement × 2.5) ... 371

Figure 306 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22400d montrant la présence d'un fragment de micaschiste dans la couche d'enduit (grossissement × 2.5) 371

Figure 307 : Microphotographies en lumière naturelle et CL montrant la carbonatation en surface de la couche pigmentaire la couche BDX22400a (grossissement × 1)..... 372

Figure 308 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22400c montrant la concentration de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 1)..... 372

Figure 309 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22400d montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1)..... 372

Figure 310 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22401 depuis une mosaïque de la salle D1 et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien 373

Figure 311 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22401 montrant deux matrices de couleurs gris clair et rose clair avec des inclusions de tuileau 374

Figure 312 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401a montrant des fragments roches calcaires (à gauche un grainstone et à droite un packstone à globigérines) qui composent les tesselles noires de la mosaïque (grossissement × 2.5) 374

Figure 313 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401a montrant une porosité élevée (5 %) de forme oblongue dans le liant (grossissement × 2.5) 375

Figure 314 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant une charge composée de quartz, de feldspaths, de micas et de calcite (grossissement × 2.5) 376

Figure 315 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 376

Figure 316 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant la présence de nodules de chaux entièrement carbonatée (grossissement × 2.5) 376

Figure 317 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401b montrant des fragments de granite mêlés à la charge (grossissement × 2.5) 377

Figure 318 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401c montrant un fragment de granite entouré de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases et de muscovite (grossissement × 2.5) 378

Figure 319 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401c montrant une charge composée de grains principalement de formes angulaires (grossissement × 2.5) 378

Figure 320 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22401c montrant des micro-fragments de granite et un cristal de feldspath plagioclase (grossissement × 5) 378

Figure 321 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22401a montrant une tesselle en roche calcaire (biomicrite) à microfossiles (grossissement × 1) 379

Figure 322 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22401b montrant la composition lithique et minéralogique de la charge (grossissement × 1)379

Figure 323 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22401c montrant la composition lithique et minéralogique de la charge (grossissement × 1)380

Figure 324 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22402 depuis la cuve baptismale et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien 381

Figure 325 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22402 montrant deux matrices de couleurs rose foncé et beige foncé 382

Figure 326 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402a montrant des cristaux de calcite de forme angulaire inclus dans la charge (grossissement × 2.5) .. 383

Figure 327 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402a montrant une porosité élevée (20 %) de formes sphériques et oblongues (grossissement × 2.5) 383

Figure 328 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant une charge constituée d'un sable silico-calcaire de granularité homogène (grossissement × 2.5) 384

Figure 329 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant des cristaux de quartz, feldspaths, calcite et de micas dans la charge (grossissement × 2.5) 384

Figure 330 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant la présence de nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 385

Figure 331 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22402b montrant des fragments de marbre dispersés dans le liant (grossissement × 2.5) 385

Figure 332 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22402 montrant les nodules de chaux présents dans le liant des deux couches (grossissement × 1) 386

Figure 333 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22402b montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 3.2) 386

Figure 334 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22403 depuis la mosaïque de la salle C et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien 387

Figure 335 : Photographies du fragment de mosaïque et de la lame mince de l'échantillon BDX22403 montrant deux matrices de couleurs gris clair et rose foncé 388

Figure 336 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403a montrant des fragments de tesselles calcaires (microsparite et grainstone) ainsi que la présence élevée (10 %) de nodules de chaux dans le liant du lit de pose (grossissement × 2.5) 388

Figure 337 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403b montrant une charge composée d'un sable silico-calcaire avec la présence de nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés dans le liant (grossissement × 2.5) 389

Figure 338 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403b montrant un micro-fragment de granite et un cristal de feldspath plagioclase (grossissement × 2.5) 390

Figure 339 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403c montrant des bioclastes formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 391

Figure 340 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403c montrant des inclusions de fragments de céramique dans le mélange (grossissement × 2.5) 391

Figure 341 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22403c montrant les composants de la charge, dont un fragment de biotite au centre (grossissement × 2.5) 391

Figure 342 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22403a montrant la matrice de roche carbonatée d'une tesselle rouge (grossissement × 4) 392

Figure 343 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de la couche BDX22403a montrant la présence de nodules de chaux non mélangés dans le liant (grossissement × 1) 392

Figure 344 : Microphotographies en lumière naturelle et CL des couches BDX22403b et BDX22403c montrant la composante minéralogique de la charge (grossissement × 2) 392

Figure 345 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22404 depuis la cuve de la salle e3 et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien 393

Figure 346 : Photographies du fragment d'enduit et de la lame mince de l'échantillon BDX22404 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée 394

Figure 347 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22404 montrant des nodules de chaux non mélangés présentant des microfissures (grossissement × 2.5) 395

Figure 348 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22404 montrant des inclusions de fragments de céramique dans le mélange (grossissement × 2.5)..... 395

Figure 349 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22404 montrant des cristaux de quartz et feldspaths qui composent la charge ainsi que des fragments de roche calcaire et de fragments de Bivalves présents dans le liant (grossissement × 2.5) 395

Figure 350 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22404 montrant des inclusions de fragments de céramique (tuileau) de compositions différentes (grossissement × 1.25)..... 396

Figure 351 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22404 montrant la composante minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)..... 396

Figure 352 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22405 depuis le sol de la salle e4 et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien..... 397

Figure 353 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22405 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée 398

Figure 354 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22405 montrant la présence de cristaux de calcite dans la charge (grossissement × 2.5) 399

Figure 355 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22405 montrant des fragments de roche calcaire (calcarénite) fossilifère (grossissement × 2.5)..... 399

Figure 356 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22405 montrant des dépôts secondaires de calcite à l'intérieur des pores (grossissement × 2.5)..... 399

Figure 357 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22405 montrant les cristaux de calcite dispersés dans la charge (grossissement × 1.25) 400

Figure 358 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22405 montrant les réactions pouzzolaniques (formations de C-A-S-H) entre les fragments de tuileau et le liant à base de chaux (grossissement × 1.25)..... 400

Figure 359 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22406 depuis une pilette d'hypocauste et indication de sa localisation sur le plan du quartier chrétien 401

Figure 360 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22406 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée 402

Figure 361 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22406 montrant un nodule de chaux non mélangé présentant des microfissures (grossissement × 2.5)... 403

Figure 362 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22406 montrant des éléments bioclastiques qui forment des nodules de chaux partiellement calcinés ainsi que des inclusions de fragments de céramique (grossissement × 2.5) 403

Figure 363 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22406 montrant des fragments lithiques (arénite quartzeuse et granite) qui composent la charge ainsi que des bioclastes (algues rouges) dispersés dans le mélange (grossissement × 2.5) 403

Figure 364 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22406 la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)..... 404

Figure 365 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22406 montrant des nodules de chaux non mélangés et des nodules partiellement calcinés (grossissement × 1.25)..... 404

Figure 366 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22407 depuis le sol en marbre de la tholos et indication de sa localisation sur le plan du macellum 405

Figure 367 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22407 montrant une matrice de couleur rose foncé et une charge non tamisée..... 406

Figure 368 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant une charge constituée d'un sable silico-calcaire à granularité hétérogène (grossissement × 2.5)..... 407

Figure 369 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant une porosité élevée (10 %) de forme sphérique dans le liant (grossissement × 2.5) 407

Figure 370 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des fragments de roche calcaire (calcarénite) contenant des bioclastes d'algues rouges (Rhodophycées) et de lamellibranches (grossissement × 2.5)..... 407

Figure 371 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des inclusions de fragments de céramique dans le mélange (grossissement × 2.5)..... 408

Figure 372 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des fragments de calcite de formes sub-angulaires (grossissement × 2.5) 408

Figure 373 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des cristaux de quartz et de feldspaths alcalins et plagioclases qui composent la charge (grossissement × 5)..... 408

Figure 374 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22407 montrant des éléments bioclastiques (oolithes) qui constituent des nodules de chaux partiellement calcinés dispersés dans la matrice (grossissement × 5) 409

Figure 375 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22407 montrant la composante minéralogique de la charge (grossissement × 1.25)..... 409

Figure 376 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22407 montrant la présence de nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 1.25) 410

Figure 377 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22408 depuis la structure en opus testaceum et indication de sa localisation sur le plan de la Fontaine à la Gorgone 411

Figure 378 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22408 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge non tamisée..... 412

Figure 379 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant un fragment d'algue Mélobésiée formant un nodule de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 413

Figure 380 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des fragments pyroclastiques dispersés dans la charge silico-calcaire (grossissement × 2.5) 413

Figure 381 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des fragments de roches volcaniques (trachyte) à texture microlithique (grossissement × 2.5) 413

Figure 382 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des pyroclastes à texture aphanitique dispersés dans la charge (grossissement × 2.5) 414

Figure 383 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant en détail un pyroclaste trachytique avec des inclusions de phénocristaux de sanidine dans une matrice vitreuse à microlithes de feldspaths alcalins (grossissement × 2.5) 414

Figure 384 : Microphotographies en LPNA et LPA de la couche BDX22408 montrant des constituants de la charge, dont des cristaux de quartz et de feldspaths plagioclases (grossissement × 5) 414

Figure 385 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22408 montrant les fragments trachytiques et les cristaux de sanidine dispersés dans la charge (grossissement × 1.25) 415

Figure 386 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22408 montrant (a) des pyroclastes trachytiques ; (b) les réactions pouzzolaniques entre le liant et les pyroclastes 415

Figure 387 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22408 montrant la composition élémentaire de : (a) matrice vitreuse d'un fragment trachytique ; (b) formations des aluminosilicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique) 416

Figure 388 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22409 depuis la chape de la citerne et indication de sa localisation sur le plan du Sanctuaire des Dii Consentes 417

Figure 389 : Photographies du fragment de béton et de la lame mince de l'échantillon BDX22409 montrant une matrice de couleur rouge brique et une charge non tamisée 418

Figure 390 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22409 la présence de nodules de chaux non mélangés et partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 419

Figure 391 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22409 un fragment de granite mêlé à la charge (grossissement × 2.5) 419

Figure 392 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22409 un fragment de micaschiste mêlé à la charge (grossissement × 2.5) 419

Figure 393 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22409 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1) 420

Figure 394 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22409 montrant des fragments de céramique de compositions différentes (grossissement × 1.25) 420

Figure 395 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22410 depuis le mur en opus incertum et indication de sa localisation sur le plan des thermes du sud..... 421

Figure 396 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22410 montrant une matrice de couleur beige foncé et une charge tamisée 422

Figure 397 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des cristaux de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases dans la charge (grossissement × 2.5) 423

Figure 398 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant un nodule de chaux non mélangé dans le liant (grossissement × 2.5)..... 423

Figure 399 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des micas dispersés dans le sable silico-calcaire qui compose la charge (grossissement × 2.5) 423

Figure 400 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant un cristal de calcite et des bioclastes d'algues rouges (Rhodophycées) formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 2.5) 424

Figure 401 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des micro-fragments de granite mêlés à la charge (grossissement × 5)..... 424

Figure 402 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22410 montrant des micro-fragments de micaschiste ainsi que des feldspaths plagioclases (grossissement × 10) 424

Figure 403 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22410 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 425

Figure 404 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22410 montrant (a) le liant à base de chaux entièrement carbonatée ; (b) le liant à base de chaux partiellement carbonatée avec des formations de silicates de calcium hydratés 425

Figure 405 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22410 montrant la composition élémentaire de : (a) liant à base de chaux entièrement carbonatée ; (b) le liant à base de chaux partiellement carbonatée 426

Figure 406 : Photographie du lieu de prélèvement de l'échantillon BDX22411 depuis une pilette d'hypocauste et indication de sa localisation sur le plan des thermes du sud 427

Figure 407 : Photographies du fragment de mortier et de la lame mince de l'échantillon BDX22411 montrant une matrice de couleur marron et une charge non tamisée 428

Figure 408 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un nodule de chaux partiellement calcinés et une charge riche en micas (grossissement × 2.5) 429

Figure 409 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant des micro-fragments de micaschiste et des micas dans la charge (grossissement × 2.5) . 429

Figure 410 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un fragment de granite inclus dans la charge (grossissement × 2.5) 429

Figure 411 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant des fragments de micaschiste à grenat dispersés dans la charge (grossissement × 2.5) ... 430

Figure 412 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un fragment d'arénite quartzeuse mêlée à la charge (grossissement × 5) 430

Figure 413 : Microphotographies en LPNA et LPA de l'échantillon BDX22411 montrant un le liant à base de chaux de couleur brune (grossissement × 5)..... 430

Figure 414 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22411 montrant la présence de fragments de roche calcaire formant des nodules de chaux partiellement calcinés (grossissement × 1.25)..... 431

Figure 415 : Microphotographies en lumière naturelle et CL de l'échantillon BDX22411 montrant la composition minéralogique de la charge (grossissement × 1.25) 431

Figure 416 : Images en électrons rétrodiffusés de l'échantillon BDX22411 montrant (a) le liant à base de chaux ; (b) la dispersion hétérogène de la charge dans le liant ; (c-d) la présence de fragments riches en oxydes de fer dans le mortier 432

Figure 417 : Spectres des microanalyses EDS pratiquées sur l'échantillon BDX22411 montrant la composition élémentaire de : (a-b) liant à base de chaux ; (c-d) oxydes métalliques 432

Figure 418 : Plan général de prélèvement des échantillons de mortier romain depuis les structures du site archéologique d'Hippone (d'après Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Delestre 2005) 433

Figure 419 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis le complexe des villae du front de mer (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957) 434

Figure 420 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis le complexe des grands thermes du nord (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957) 435

Figure 421 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis les structures romaines du quartier chrétien (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957)..... 436

Figure 422 : Plan de prélèvement de l'échantillon de mortier depuis le macellum (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Delestre 2005) 437

Figure 423 : Plan de prélèvement de l'échantillon de mortier depuis la structure de la Fontaine à la Gorgone (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957) 438

Figure 424 : Plan de prélèvement des échantillons de mortier depuis les structures romaines des thermes du sud (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Delestre 2005) 439

Figure 425 : Plan de prélèvement de l'échantillon de mortier depuis la citerne du Sanctuaire dédié aux Dii Consentes (d'après les dessins de Marec 1954 ; Stawski 1957 ; Lassus 1959 ; Delestre 2005)..... 440