



**HAL**  
open science

# Les ressources en pierre de construction dans le bâti antique de Reims et leur utilisation, application à l'étude de la Porte de Mars

Sébastien Laratte

## ► To cite this version:

Sébastien Laratte. Les ressources en pierre de construction dans le bâti antique de Reims et leur utilisation, application à l'étude de la Porte de Mars. Géologie appliquée. Université de Reims Champagne Ardenne, 2022. Français. NNT : . tel-03772369

**HAL Id: tel-03772369**

**<https://hal.science/tel-03772369v1>**

Submitted on 8 Sep 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE ARDENNE  
École Doctorale Sciences Fondamentales - Santé N°619

# THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

*Discipline : Sciences de l'univers*

*Spécialité : Géosciences*

Présentée et soutenue publiquement le 30 Juin 2022 par

**SÉBASTIEN LARATTE**

## LES RESSOURCES EN PIERRE DE CONSTRUCTION DANS LE BÂTI ANTIQUE DE REIMS ET LEUR UTILISATION, APPLICATION À L'ÉTUDE DE LA PORTE DE MARS

Thèse co-dirigée par GILLES FRONTEAU et CÉLINE SCHNEIDER

### JURY

Mme. Anne CHABAS	Professeure	Université de Paris-Est Créteil	Rapportrice
Mme. Anne BAUD	Maîtresse de conférences HDR,	Université de Lyon 2	Rapportrice
Mme. Hélène DESSALES	Maîtresse de conférences	ENS Paris	Examinatrice
M. Fabrice MONNA	Professeur,	Université de Bourgogne	Examineur
M. Régis BONTROND	Archéologue,	Service Archéologique du Grand Reims	Invité
Mme. Céline SCHNEIDER	Maîtresse de conférences HDR,	Université de Reims	Co-Directrice
M. Gilles FRONTEAU	Professeur,	Université de Reims	Co-directeur
M. Jean-Paul DEROIN	Professeur,	Université de Reims	Président





En couverture : Tête de Mars Ultor (le vengeur) en référence à l'acronyme initial du projet encadrant ce travail : **MARS** : Matériaux Antiques de Reims. Partie d'une sculpture en relief basée sur des représentations similaires du Temple de Mars Ultor dans le Forum d'Auguste, IIe siècle de notre ère, Palazzo Altemps, Rome (Photo Carole Raddato, sous licence Creative Common).





Mosaïque antique de Reims, Musée Saint Rémi

La vie est belle  
je me tue à vous le dire  
dit la fleur  
et elle meurt  
Sans répondre à la fleur  
l'homme traverse le jardin  
l'homme traverse la forêt  
sans jamais adresser la parole à son chien

*Jacques Prévert  
Soleil de mars*



---

## Remerciements

Ce travail de thèse s'est déroulé au GEGENAA (Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques) de l'université de Reims Champagne-Ardenne, dont je remercie les directeurs successifs, Vincent Barbin et Gilles Fronteau, qui m'ont accueilli (avant et) pendant la durée de cette tâche. Je tiens en premier lieu à remercier mes directeur et directrice de thèse Gilles Fronteau et Céline Schneider qui m'ont accompagné tout au long de la réalisation de cette étude, que ce soit au laboratoire, sur le terrain, sous terre ou sur les façades des monuments, mais aussi dans tous les autres aspects de ce travail des plus laborieux au plus plaisant.

Je tiens également à remercier les membres du Jury qui ont accepté d'endosser la lourde tâche d'évaluer ce travail : Anne BAUD, Régis BONTROND, Anne CHABAS Jean-Paul DEROIN, Hélène DESSALES, Fabrice MONNA aux côtés de Céline SCHNEIDER et de Gilles Fronteau.

Dans l'ordre alphabétique, Alain, Béatrice, Benjamin, Christophe, Françoise, Guillaume, Jean-Paul, Jessy, Stéphanie, Olivier, Marie, Xavier M. (mon premier chef au GEGENAA), Nicolas, Patricia qui en plus de Céline et de Gilles ont été présents. Un remerciement également à tous les collègues du Département des Sciences de la Terre pour m'avoir donné l'occasion d'enseigner dans les mêmes salles où il y a bien des années j'ai essayé d'apprendre.

Pour ne froisser personne à cause d'un oubli, je remercie également les personnes qui n'auront pas trouvé leur nom dans ces lignes. Qu'ils se rassurent, l'oubli est involontaire. Il me tient à cœur de souligner le caractère collégial de la réalisation de ce travail. C'est donc avec l'esprit plein de reconnaissance que j'écris les lignes qui suivent.

Alexandra, Julien, Pauline, Xavier pour leur présence pendant ces travaux, mais depuis mon entrée dans le laboratoire en mars 2012, les manips, journées de terrain par tous les temps ou presque, les repas entre collègues, dont la fréquence s'est trouvée bien diminuée au fur et à mesure des évolutions de la situation sanitaires. Leur présence pour les missions de terrain sur tous les sites où ces travaux m'a porté. Robin pour ses conseils dans les choix techniques qui ont accompagné mes débuts dans l'apprentissage de la photogrammétrie. J'exprime mes plus sincères et amicaux remerciements à l'ensemble des membres du laboratoire avec qui je collabore depuis ces dix dernières années au fil de nombreux projets (EPRC, Impact 14-18, Trapèze, Perchlorigine...). Thomas et Émilie qui ont été de précieux conseils, aides dans la réalisation des relevés sur le terrain et de précieux collègues dans le cadre des cours et des manips de laboratoire.

Laure Koupaliantz cheffe, du Service Archéologique du Grand Reims, puis Anne-Laure Brives qui lui a succédé à ce même poste, pour avoir soutenu et poussé ce projet pour le Grand Reims. Les équipes du musée Saint Rémi, sa conservatrice en tête, qui m'ont gentiment ouvert les portes de l'établissement.



---

Hélène Dessales pour ses conseils qui m'ont donné à réfléchir sur la construction romaine de l'Antiquité et qui m'ont poussé à sortir d'une approche basée uniquement sur les modalités d'assemblage des maçonneries. J'espère les avoir suivis au mieux. Je la remercie également pour sa généreuse proposition de relecture de mes travaux sur ce même sujet, merci pour ce temps qui m'a été consacré. Fabrice Monna, pour les nombreuses discussions étalées sur une durée bien longue depuis mes années d'étude dijonnaise et ses conseils toujours précieux malgré les trop rares occasions de se croiser.

À Jean-Claude Golvin et à Actes Sud, sa maison d'édition, pour m'avoir très aimablement autorisé à utiliser une de ses illustrations de la ville de *Durocortorum* dans ce travail. Le dessin apporte la touche de vie qui manque parfois lorsqu'on aborde l'organisation d'une ville à travers des plans et à plus forte raison ses matériaux de construction.

Bernard Riera pour ses conseils et l'intérêt qu'il a porté à mes travaux depuis avant même le début des opérations, à ses conseils pour l'impression 3D, pour la réalisation de la thèse ou encore pour tous les gadgets et équipements pour lesquels il connaît ma curiosité. Son épouse, Anne, pour les chouettes soirées que nous avons partagé ces dernières années.

Et la longue, très longue liste des archéologues, avec Régis Bontrand en premier lieu pour l'ensemble des discussions et échanges qui ont porté sur la Porte de Mars et sur les lapidaires mis au jour par ses soins et ceux de ses équipes, pour avoir bien voulu figurer parmi les relecteurs et relectrices sur le fond de la partie de ce travail consacrée à l'archéologie. Mais aussi tous les collègues archéologues avec qui j'ai pris plaisir à travailler : Baptiste Panouillot, Mathilde Arnaud, Émilie Jouhet, Sébastien Péchart, Magalie Cavé, Aurélie Troublart, Sidonie Bundgen, Sidonie Richez (pour sa maîtrise d'In Design qu'elle a su partager), Pascal Neaud, Nicolas Garmond, Yoann Rabasté, Bruno Duchêne (tiens bon camarade), Agnès Balmelle, Stéphane Sindonino et tous ceux que j'oublie malheureusement pour m'avoir accueilli sur leurs opérations de fouille et dans les réserves. Sandrine Thiol pour les discussions impromptues au chevet de la cathédrale où les corps des ouvriers défunts dans les tranchées de récupération donnent des informations convergentes avec les usages des pierres de construction. Patrick Huard pour ses instructives discussions et informations glissées au détour d'une rencontre de bord de fouille. À ses conseils réitérés sur les bonnes pratiques en photogrammétrie et sur l'utilisation détournée de QGis dans le contexte des études de bâti. Véronique Brunet-Gaston pour les moments passés sur la Porte de Mars (littéralement), pour les discussions et les relectures toujours constructives au pied du monument qui se sont poursuivies bien après jusque pendant la rédaction de ce travail. Une mention tout à fait particulière de ma reconnaissance à Tom Menant pour m'avoir longuement conseillé et dépanné lorsque mes compétences faisaient défaut depuis ma prise en main des méthodes de photogrammétrie en particulier en souterrains jusqu'à l'extraction des déroulés de voûtes récalcitrantes.

Je me dois également de remercier les membres de différents services de la ville de Reims et du Grand Reims et en particulier du Service de la Culture qui m'a permis d'accéder aux monuments antiques sous leur responsabilité, en particulier le Cryptoportique.

---

Je veux remercier mes nombreux collègues et amis côtoyés au cours de mon parcours universitaire qui m'ont tous apporté quelque chose à divers degrés. Ils sont nombreux, bien trop pour être tous cités ici, et nos années passées sur les bancs d'amphis, sur les falaises et dans les karsts de Bourgogne et du Jura, sur les glaciers et dans les vallées alpines, sur les dunes africaines, l'épais brouillard et les moraines islandaises. Une pensée à Pierre-Claude R., ou plus sobrement P.C., dont la disparition aussi subite qu'inattendue a été un choc pour tous, ses amis, son épouse et sa fille. À tous ceux avec qui nous avons partagé les meilleurs moments de fac auxquels on puisse rêver, et qui sont restés proches, ils sont nombreux et essayer de les citer tous voudraient nécessairement dire en oublier beaucoup trop.

Merci également à tous les camarades de l'association des amis du Fort de Nogent-l'Abbesse qui m'ont permis d'utiliser ce beau terrain qu'est un Fort Séré de Rivière comme d'un chantier-école. Les souterrains se souviendront longtemps de ces séances de photos aux résultats un peu incertains dans des conditions d'éclairage acrobatiques et pas toujours maîtrisées dans l'unique but de maîtriser la photogrammétrie de bâtiments et de cavités. Merci à Daniel, Patrick, Chantal, Jean-Michel et Isabelle, Ludovic... Vous êtes à ce jour plus de 250 à remercier, je me contenterai donc d'un grand clin d'œil en attendant que l'on puisse faire mieux !

Ma petite Simone pour ses injonctions journalières à produire « du bon travail mon papa », lors de nos discussions sur le trajet de l'école maternelle. Ma petite Simone qui a fait de moi un papa en ce petit matin de juillet 2016 où il faisait si beau et surtout si chaud. Et surtout, merci ma puce parce que tu as été là, depuis le premier jour de ce travail jusqu'au dernier, indéfectible pour me rappeler qu'il y a beaucoup de choses à ne pas négliger et surtout pas toi.

À ma maman qui a fait son de son mieux pour que ce travail puisse s'accomplir, je la remercie pour ce soutien sans faille. Je remercie également Gérard et Pascale, les grands-parents de la petite Simone, de m'avoir fait une petite place dans la famille et pour les nombreux encouragements qu'ils ont prodigués ces dernières années et été compréhensifs lorsque je devais finir d'écrire ces travaux.

Aux copains qui ont tous tenté de me convaincre que ce n'était qu'une question d'opiniâtreté pour arriver à finaliser ce travail Patrick, Nadège, Bertrand, Géraldine, Alban, Dalila, Sébastien et Estelle, Sébastien (dit DD) Claire, et tous les autres... et tous les enfants qui sont venus se greffer au fil des ans sur cette belle équipe. Bref, merci à tous pour vos encouragements et votre compréhension.

Un dernier clin d'œil à Jagger, « petite » chatte qui n'a eu de cesse de me rappeler à la réalité tout au long de ces mois de bureau et qui a indéfectiblement fait la sieste et réclamé ta gamelle.

Les disparus auxquels les pensées ramènent tous les jours ou presque, d'abord à mon père, trop tôt disparu, mais toujours très vivant dans mon cœur. De là où tu es, j'espère que tu es toujours fier de ton fils et de ce qu'il aura essayé d'accomplir le mieux possible. À mes grands-parents qui auraient, sans en douter, beaucoup apprécié que l'on discute de tous les aspects de ce travail et ses implications entre leur maison que j'aimais tant et ce grand jardin dans lequel ils passaient tant de temps. À ma tante Ginette et son époux, André, partis à quelques semaines d'intervalle pendant la rédaction de ce mémoire de thèse, embrassez bien

---

ceux que vous avez rejoints (Guy, Louis), je pense, bien à vous. C'est avec beaucoup d'émotions que je souhaite dédier ce travail à ceux de mes proches qui n'auront, heureusement, jamais à subir l'épreuve de le lire. Enfin, un clin d'œil en forme d'hommage au légendaire tonton Michel, ancien directeur de l'IUT de chimie de Bordeaux, que je n'ai malheureusement pas eu le plaisir de connaître, mais que tous s'accordent pour dire qu'on se serait entendu, dont la curiosité scientifique n'avait d'égale que la qualité de son humour. Comment faire autrement que de consacrer une pensée à ceux qui ne sont plus là.

Merci aux personnes, probablement trop nombreuses que j'oublie inmanquablement et qui ont toutes contribué directement ou indirectement à ce travail, parfois inconsciemment. Je leur adresse mes plus chaleureux remerciements et qu'ils m'excusent par avance si j'ai oublié leurs noms, leur contribution n'est, en tout cas, jamais passé inaperçue. Ils se reconnaîtront, je l'espère... et qu'ils ne prennent pas ombrage de ne pas voir leur nom apparaître dans ces premières pages.

Enfin, je remercie tout particulièrement Anne-Laure Brives (encore elle) de m'avoir poussé à accomplir ce travail, à m'avoir sans cesse renouvelé sa confiance, m'avoir accompagné tout au long de ses trois années de thèse. Pour son amour constant, son soutien et ses encouragements, sa confiance en moi et en ma capacité à mener à bien cette tâche, qui a rendu ces épreuves « plus faciles », plus sereines et heureuses, un grand merci.

\* \*  
\*

## SIGLES ET ABRÉVIATIONS UTILISÉES

Le développement des abréviations utilisées dans le texte et la bibliographie est reporté par ordre alphabétique ci-dessous.

### Sigles

**AFAN** : Association pour les Fouilles Archéologiques Nationales

**AGBP** : Association des Géologues du Bassin de Paris

**ANR** : Agence nationale de la Recherche

**BIM** : Building Information Modelling ou Modélisation des Informations du Bâtiment

**BMR** : Bibliothèque municipale de Reims

**BRGM** : Bureau de Recherche Géologique et Minières. Service géologique national français

**BSS** : Banque de données du sous-sol, base de données construite et maintenue par le BRGM

**CAG** : Carte Archéologique de la Gaule

**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique

**DRAC** : Direction des affaires culturelles

**DFS** : Document Final de Synthèse

**DOE** : Dossier d'Ouvrage Executé

**ENS** : Ecole Nationale Supérieure

**GEACA** : Groupe d'études archéologiques Champagne-Ardenne

**GEGENAA** : Groupe d'étude sur les géomatériaux naturels anthropiques et archéologiques, EA 3795 de l'Université de Reims Champagne Ardenne

**INRAP** : Institut National de la Recherche en Archéologie Préventive

**INHA** : Institut National d'Histoire de l'Art

**LRMH** : Laboratoire recherche des monuments historiques

**MH** : Monuments historique

**MNHN** : Museum National d'Histoire Naturelle

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**NGF** : Nivellement général de la France (à détailler)

**PCR** : Programme Collectif de Recherches

**SAC** : Société d'archéologie Champenoise

**SAGR** : Service Archéologique du Grand Reims

**SIG** : Système d'Information Géographique

**SRA** : Service Régional de l'Archéologie

**RO** : Responsable d'opération

**RFO** : Rapport Final d'Opération

**RHA** : Reims Histoire Archéologie

### Datations :

**Av.J.-C.** : avant Jésus-Christ

**Ap. J.-C.** : après Jésus-Christ

**Ma** : Millions d'Années

**s.** : siècle(s)



Unités de mesure :

**kg** : Kilogramme

**T** : Tonne

**Pa** : Pascal

**cm** : centimètre

**m** : mètre

**km** : kilomètre

**Mi** : Mile romaine (Miliaria) soit environ 1609 m

**P** : Pes Pied romain soit environ 29,5 cm

Sauf mention contraire, les illustrations sont de l'auteur.

Afin d'aider le lecteur à se localiser parmi les toponymes utilisés dans le corps du texte, des supports cartographiques centrées sur l'agglomération de Reims/*Durocortorum* à différentes échelles sont joints en annexes (Annexe 1, page 429 et Annexe 2, page 430 )

Les références bibliographiques sont intégrées en respectant les normes ISO-690 afin de suivre les recommandations de rédaction et de publication des écoles doctorales de l'Université de Reims champagne Ardenne.

# TABLE DES MATIÈRES

Sigles et abréviations utilisées.....	11
Introduction.....	17
<b>Chapitre I : Le contexte naturel et archéologique de Reims .....</b>	<b>I-25</b>
1. Le cadre naturel : Contexte géographique et géomorphologique de l'étude.....	I-27
1.1. Le cadre géographique régional .....	I-27
1.2. Le site de Reims .....	I-28
2. Le contexte géologique .....	I-33
2.1. Le socle du Bassin de Paris .....	I-34
2.2. La couverture sédimentaire : Les formations du Mésozoïque.....	I-36
2.3. La couverture sédimentaire : Les formations du Cénozoïque .....	I-37
2.4. La couverture sédimentaire : Les formations du Quaternaire.....	I-43
2.5. Les calcaires du Lutétien.....	I-45
3. Contexte historique et archéologique.....	I-58
3.1. Fondation et évolution de la cité des Rèmes.....	I-58
3.2. Les manifestations de la romanisation .....	I-61
3.3. Les méthodes de construction romaine .....	I-66
3.4. Les techniques de construction romaine.....	I-71
3.5. Les grandes phases historiques de la construction de Durocortorum.....	I-76
3.6. Composition et évolution depuis la Protohistoire jusqu'à la chute de l'empire .....	I-77
3.7. La parure monumentale de la ville à travers l'Antiquité .....	I-87
4. Synthèse .....	I-100
<b>Chapitre II : Les pierres de construction de la Reims antique.....</b>	<b>II-101</b>
1. Les types d'usages et approvisionnements en géomatériaux à Reims .....	II-103
1.1. L'étude des provenances des matériaux.....	II-103
1.2. La description et l'identification des géomatériaux antiques à Reims .....	II-106
2. L'inventaire général des géomatériaux observés à Reims .....	II-110
2.1. Les matériaux disponibles in situ.....	II-110
2.2. L'emploi des géomatériaux de l'aire locale .....	II-118
2.3. Les géomatériaux importés de l'aire régionale : les pierres de grand appareil ....	II-131
2.4. L'emploi de géomatériaux extrarégionaux importés .....	II-132
2.5. Synthèse des approvisionnements pour la construction.....	II-136
3. Résultats de l'étude de corpus issus de sites archéologiques de la ville .....	II-138
3.1. Les matériaux de l'architecture privée .....	II-144
3.2. Les matériaux de l'architecture publique .....	II-156
3.3. Synthèse .....	II-185
4. Conclusions partielles .....	II-186
<b>Chapitre III : Étude de cas : La Porte de Mars .....</b>	<b>III-189</b>
1. L'historique de la Porte de Mars .....	III-191
1.1. Présentation du monument dans son contexte actuel.....	III-191
1.2. Sa construction au III <sup>e</sup> siècle ap. J.-C. ....	III-191
1.3. Son intégration au système défensif tardo-antique.....	III-193
1.4. L'intégration au château des Archevêques.....	III-194
1.5. L'intégration au rempart médiéval et son dégagement.....	III-195

1.6. Les restaurations du XIX <sup>e</sup> siècle .....	III-196
1.7. Les avaries du XX <sup>e</sup> siècle.....	III-198
2. Les méthodes de documentation du bâtiment utilisées .....	III-199
2.1. La représentation des données .....	III-199
2.2. L'obtention de supports réalistes et fiables : modélisation 3D .....	III-208
2.3. L'élaboration d'une maquette numérique en 3D.....	III-212
2.4. La construction du SIG .....	III-222
3. Identification et caractérisation des matériaux de la Porte de Mars. ....	III-231
3.1. L'étude antérieure .....	III-231
3.2. Les matériaux du monument.....	III-232
3.3. Le constat des altérations et répartition spatiale .....	III-277
3.4. La caractérisation pétrophysique des matériaux.....	III-293
3.5. Synthèse des caractérisations pétrophysiques .....	III-318
4. Conclusions partielles .....	III-319
<b>Chapitre IV : Discussion générale .....</b>	<b>IV-321</b>
1. Choix et utilisations des matériaux de construction pendant l'Antiquité.....	IV-323
1.1. Une rationalisation dans l'emploi des matériaux en œuvre .....	IV-323
1.2. Les critères de choix des matériaux de construction.....	IV-326
1.3. Le remploi des pierres de construction antiques .....	IV-329
1.4. Approvisionnements en matériaux de construction depuis l'antiquité.....	IV-332
2. Les biais et les limites de l'étude .....	IV-341
2.1. Les biais inhérents aux études de matériaux.....	IV-341
2.2. Les limites de la méthodologie de représentation des données .....	IV-344
3. Vers une utilisation prospective de l'outil .....	IV-346
3.1. Une méthode adaptée à la Porte de Mars comme à d'autres bâtiments .....	IV-346
3.2. Outils pour la réalisation des cartes de susceptibilité .....	IV-348
3.3. Susceptibilité vis-à-vis des sels (SSI) .....	IV-351
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>V-355</b>
Bibliographie .....	363
Tables.....	408
Annexes .....	425





## INTRODUCTION



Mosaïque aux Dauphins, IIe-IIIe siècle ap. J.-C., Musée Saint-Rémi

« La petite échelle a autant d'importance que la grande.  
Le projet est un aller-retour permanent entre ces  
échelles »

Anne Lacaton & Jean-Philippe Vassal  
Le Moniteur, 2008



## Introduction

L'activité économique soutenue dans et à la périphérie de Reims depuis le début du XXe siècle jusqu'à nos jours a repoussé les limites de la ville vers l'extérieur de 13 km<sup>2</sup> en 1918 à 47 km<sup>2</sup> en 2016 (Taborelli 2018). Cette extension de l'aire urbaine a naturellement amené la programmation et la réalisation de nombreux travaux d'aménagements. La construction de nouveaux équipements et le déplacement de sites industriels ont, dans le même temps, impulsé des travaux de réhabilitation et d'embellissement de son centre-ville. C'est ainsi que depuis 2007 les travaux de construction, comme ceux de la première ligne de tramway, et très régulièrement depuis avec les travaux de réhabilitation de friches industrielles, se sont accompagnés d'importantes opérations de fouilles d'archéologie préventive dans l'espace urbain rémois. On peut citer en guise d'exemples les sites de l'ancienne SOCATREM (2013) ou de l'ancienne SERNAM (2018-2021), les aménagements des Hautes Promenades (2018-2019), et à la périphérie les aménagements de la Croix-Blandin à l'est de l'agglomération ou du secteur de Bezannes au sud.

L'initiation du projet « Reims Grand Centre », dont les travaux ont débuté en 2015<sup>1</sup>, a visé la transformation de friches industrielles localisées en limite du centre urbain en espaces de services et de loisirs, ainsi que le retour des Promenades à leur vocation initiale de grand espace public végétalisé. Cette réhabilitation de l'espace du centre urbain a suscité une réflexion sur la préservation des monuments inclus dans l'emprise des futurs travaux. La volonté de mise en valeur du patrimoine de la ville a simultanément attiré l'attention sur l'urgence qu'il y avait à entreprendre des travaux de restauration, parfois urgents, sur certains monuments emblématiques de la ville. La Porte de Mars fut parmi les premiers monuments à avoir fait l'objet d'un projet incluant la restauration de l'édifice à la réhabilitation de son environnement immédiat. La constatation de la présence d'altérations pouvant mettre le bâtiment en péril a déclenché la réalisation d'études préalables en particulier dans le champ de l'archéologie (Bontrond *et al.* 2015 ; 2018 ; 2019).

Avec 180 diagnostics archéologiques conduit entre 2001 et 2020 et les opérations de fouilles qui leur ont succédé dans et aux abords immédiats de Reims (Balmelle *et al.* 2021), la ville est à l'heure actuelle une des plus fouillées en France (Chossenot *et al.* 2010 ; Berthelot *et al.* 2013). L'importance de ce chiffre représente 3,5 % de la surface occupée par la ville gallo-romaine. Sur l'ensemble de ces opérations archéologiques, 84 % de ces chantiers ont mis au jour des occupations antiques (Pichard 2014). Toutes n'ont pas nécessairement donné lieu à des études systématiques des géomatériaux, néanmoins elles furent assez nombreuses pour apporter une vision globale de l'utilisation des ressources minérales dans la ville (Berthelot *et al.* 2013) et permettre ainsi d'ébaucher un panorama très contrasté de l'utilisation de cette ressource (Fronteau et Paicheler 1999 ; Fronteau *et al.* 2008 ; Fronteau 2010 ; Devos *et al.* 2010 ; Fronteau *et al.* 2014). Pour la période gallo-romaine en particulier, la réalisation d'études plus systématiques sur les sites investigués et dans les réserves archéologiques, ont donné une vision plus complète qu'auparavant où elles se focalisaient sur les pièces d'exception dans le cadre muséal (Fronteau *et al.* 2008 ; 2014). En complément, certaines pièces de mobilier

<sup>1</sup> <https://www.reims.fr/la-ville-de-reims/reims-grand-centre-11208.html>

lapidaire comme les meules ont abouti à des études systématiques aussi bien sur un registre archéologique (stylistique, morphologie...) que géologiques (pétrographie, provenance...). Ces dernières ont ensuite dépassé le cadre régional pour être élargies à d'autres régions françaises par le biais de Programmes Communs de Recherches (PCR « Évolution typologique et technique des meules du Néolithique à l'an mille sur le territoire français », Buchsenschutz *et al.* 2017).

L'usage de la pierre en Gaule pendant l'Antiquité s'est généralisé sous l'influence romaine jusqu'à devenir omniprésente dans la société gallo-romaine. L'adoption des pratiques de construction d'influence italique, la densification de l'urbanisme et les évolutions de la société aspirant à améliorer ses conditions d'existence a abouti à l'installation et à l'épanouissement d'une « culture de la pierre ». En même temps qu'elles permettaient la mise à disposition du matériau, ces pratiques nouvelles dans le bâtiment introduisaient leurs usages dans une grande diversité de formes constructives (Bessac et Sablayrolles 2002 ; Bessac *et al.* 2020).

Cependant, les premières études qui se sont intéressées aux matériaux de construction l'ont fait selon un angle privilégiant les roches décoratives (Coulon et Goudineau 1996). Cette même approche découlait des problématiques archéologiques qui visaient à la restitution des grands flux commerciaux depuis l'échelle locale jusqu'à celle de l'Empire romain. Problématiques par ailleurs fortement induites par l'intérêt particulier que portaient les auteurs anciens aux matériaux décoratifs comme le souligne Bedon (2000). Puis, suivant l'évolution de la recherche archéologique, les problématiques et les questionnements ont progressivement interrogé les provenances des matériaux à vocation de moins en moins ostentatoire. Paradoxalement, cela a permis d'interroger des corpus de plus en plus volumineux (Coulon et Goudineau 1996 ; Coulon 2000). Cette approche a ainsi permis d'esquisser les interactions socio-économiques dépendantes de ces applications à des échelles variées, depuis le bâtiment ou l'agglomération jusqu'à des emprises régionales. Il est possible de citer comme exemples des études limitées à un site en prenant pour sujet l'évolution de ce bâtiment au cours du temps à l'image du site de Brans dans le Jura (Viscusi *et al.* 2013). À l'échelle d'une agglomération antique, ces travaux sont tout aussi présents, par exemple pour *Argentomagus* (Coulon et Goudineau 1996 ; Coulon *et al.* 2000 ; Coulon 2000 ; Tardy 2000) ou pour *Vesunna*-Périgueux (Blanc *et al.* 2004). Ces études interrogent les matériaux à l'échelle microrégionale (Turmel 2014), échelle d'une communauté de commune), à l'échelle régionale (Revenu 2010) et enfin inscrite dans de plus vastes étendues, à l'échelle extrarégionale (Clément 2013 ; Delencre 2017 ; Picavet 2019). Mais ces dernières s'intéressent cependant à des corpus spécialisés et limités temporellement.

Pour la région de Reims, les approvisionnements en pierre pour l'Antiquité ont été peu documentés jusqu'au début des années 2000 (Fronteau *et al.* 2021). C'est à partir de cette période que l'étude des géomatériaux de construction en contexte archéologique et leur mise en relation avec les bassins carriers originels ont posé les bases d'une réflexion sur les approvisionnements en pierre dans la ville de Reims. Or, l'une des particularités les plus frappantes de Reims est le fait que sa fondation s'est réalisée **à la période** protohistorique sur un site dépourvu en pierres de construction de qualité. Ce site fut ensuite **élevé** au statut de capitale de province, induisant la nécessité d'acheminer de la pierre sur place pour pallier aux besoins en pierres aptes au bâti monumental. **Cela pose donc directement la question de la nature des géomatériaux utilisés dans la construction de la Reims gallo-romaine.** Car poussés par les évolutions socio-économiques de l'époque qui valorisaient l'utilisation des pierres **à bâtir et notamment des pierres de taille** de grands modules, les approvisionnements en matériaux ont dû s'adapter afin de répondre à cette nouvelle demande (Pasquini 2020).

De plus, comme le soulignent Fronteau *et al.* (2014), « si une pierre est présente dans la ville c'est parce que, pour la période considérée, elle était disponible et faisait l'objet d'une diffusion depuis son site d'extraction ». **Ce constat amène donc logiquement à interroger l'origine géographique des sources de production de ces matériaux.** L'intérêt pour les matériaux de construction antiques de Reims, objets de ce travail, a défini clairement le cadre géographique au secteur de la ville de l'époque et à sa périphérie. Cette délimitation s'inscrit aujourd'hui à l'intérieur des limites de la ville actuelle et des quelques communes limitrophes. Les travaux sur les sites archéologiques ont donc été réalisés dans la région de Reims tandis que la recherche d'analogues aux matériaux de construction a été menée jusque dans le Soissonnais en carrières souterraines.

Ce travail s'est également focalisé sur les vestiges et les monuments gallo-romains qu'ils soient encore en élévation, comme la Porte de Mars et le Cryptoportique, ou exhumés à l'occasion de fouilles archéologiques. La vision de l'usage des matériaux mis en œuvre dans ces constructions porte nécessairement l'information sur l'éventuelle rationalisation des emplois des pierres. **Existe-t-il donc une utilisation et une mise en œuvre raisonnée des pierres dans la construction antique à Reims ?**

Ce sont les travaux de réfection de la couverture de la Porte de Mars en 2016 et l'annonce de travaux de restauration d'ampleur sur ce monument, qui ont motivé la réalisation d'une étude approfondie de ses matériaux de construction. Ce travail de documentation du bâti succédant à un premier et unique relevé ayant été effectué il y a près de 35 ans (Blanc 1984), une profonde révision apparaissait nécessaire. Le soutien de ce projet par la Communauté Urbaine du Grand Reims en collaboration avec son service archéologique<sup>2</sup>, les services de de l'État<sup>3</sup> et l'INRAP, nous a facilité les accès à l'édifice. L'accessibilité à ses parties hautes a été garantie par un échafaudage (démonté en décembre 2018) et des moyens de levage (nacelle), qui ont permis la réalisation du relevé des matériaux du monument. L'étude d'un bâtiment monumental complet comme la Porte de Mars porte cependant d'importantes interrogations en particulier sur **l'enregistrement de l'information que celui-ci peut porter, à plus forte raison lorsque cette étude est pluridisciplinaire.**

C'est donc poussé par le besoin de documenter un édifice à la forte portée patrimoniale par le biais de ses matériaux de construction, mais également de ses dégradations et de sa composition architecturale, que **l'élaboration d'un moyen de documentation exploitable s'est imposée comme un impératif dans ce travail.** Les solutions apportées en réponse à ces problématiques sont très variées en fonction de la sensibilité de leurs auteurs. Mais, accompagnés par le développement d'outils de modélisation 3D et de représentation qui leurs sont associés, les approches considérant l'ensemble du bâti ou une partie de celui-ci se sont multipliées, à l'image des études du château de Chambord (Janvier-Badosa 2012 ; Brunetaud *et al.* 2012 ; Janvier-Badosa *et al.* 2015). Le passage de l'information vers des supports numériques facilite également la hiérarchisation des informations, mais permet aussi une évolutivité importante, susceptible de conserver le passé de la construction tout en intégrant les travaux et restaurations au fil de leur réalisation. Par extension, les synthèses et simplifications possibles constituent également une ouverture vers la diffusion et la valorisation vers le grand public ou d'autres acteurs du patrimoine. C'est donc porté par ces besoins et ces impératifs de documentation du monument que la problématique méthodologique spécifique à cette

---

2 Service Archéologique du Grand Reims

3 DRAC

tâche a été soulevée. Il s'agit là d'un travail relevant de la conservation du patrimoine qui ne se limite pas aux restaurations à venir (Mohen 1999). **Pour remplir l'objectif de documentation et de conservation des données de l'édifice en élévation adapté à un cadre pluridisciplinaire, quelle méthodologie peut être (ou doit être) adoptée ou développée ?**

Pour les monuments en élévation, et en particulier pour la Porte de Mars qui fait l'objet de ce travail, l'utilisation d'un support informatique à la documentation d'un monument en œuvre **peut-elle porter une vision prospective sur l'évolution future des matériaux constitutifs du bâtiment ?** Loin de n'intéresser que les spécialistes des géosciences ou de l'archéologie, la documentation d'un monument tel que la Porte de Mars peut également être utilisée pour évaluer la susceptibilité des pierres vis-à-vis des facteurs d'altération naturels.

C'est ainsi que se dessinent les problématiques principales de cette étude, dont l'objectif se concentre sur l'étude des matériaux de construction mis en œuvre au cours de l'Antiquité à Reims (). Elle peut donc se formuler de la façon suivante : **quels ont été les matériaux mis en œuvre dans la construction antique de la ville de *Durocortorum* et selon quel(s) critère(s) leurs usages se sont-ils rationalisés ? À travers l'étude de la Porte de Mars, monument antique en élévation, comment ces critères se manifestent-ils, comment les documenter et les caractériser ?**

Afin de répondre au mieux à ce questionnement, ce document s'articule autour de quatre chapitres au cours desquels seront présentés successivement les éléments constitutifs de ce travail de recherche, à forte connotation interdisciplinaire ou tout du moins transdisciplinaire. L'origine des matériaux de construction d'une ville est enracinée dans l'histoire géologique de sa région et dans ses contraintes environnementales. Ainsi, **le premier chapitre de ce travail présente le contexte naturel de Reims et de ses environs.** Puis, la construction romaine et ses spécificités sont introduites afin de donner une vision des modalités d'emploi des matériaux. L'Antiquité étant une période singulière pour ce territoire, théâtre de la fondation de la ville et de son évolution, l'histoire de l'agglomération, de ses transformations et de sa composition, est ensuite retracée.

Puis, **dans un second chapitre, les matériaux de construction d'origine géologique utilisés dans l'agglomération seront détaillés** en s'appuyant sur leur présence dans des aires d'approvisionnement de plus en plus distantes. Ces dernières reflètent la stratégie et l'importance des efforts nécessaires aux populations pour se fournir en matière première à la construction. L'examen de quelques cas d'étude, intégrés dans une base de données synthétique, apportera des arguments quant à la rationalisation des matériaux dans leur mise en œuvre et les caractéristiques typiques du secteur étudié.

**Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la Porte de Mars,** avec en premier lieu la présentation des outils déployés pour recueillir et conserver les données issues de l'étude de ce monument. Les matériaux mis en œuvre dans sa construction et au cours des différentes restaurations sont identifiés et catégorisés selon leur nature et leur date de mise en œuvre. Cette première partie de l'étude du bâtiment met en évidence les choix qui ont prévalu lors de sa construction. Puis, ces matériaux seront envisagés sous l'angle de la caractérisation pétrographique. Des équivalents aux pierres en œuvre ne pouvant faire l'objet de prélèvements seront proposés avant d'être caractérisés. Cette seconde partie permet

d'extraire les paramètres déterminant pour évaluer l'évolution des matériaux vis-à-vis de l'environnement.

Enfin, **le quatrième chapitre permettra de lier les résultats issus des deux chapitres précédents pour en dresser une synthèse.** Les modalités d'usage des matériaux en fonction de leur nature et de leur provenance seront examinées en abordant leurs aptitudes dans les différents emplois et contextes dans lesquels ils ont été observés. Ces résultats seront ensuite interprétés et discutés tout en les articulant avec les connaissances sur l'évolution des pierres du patrimoine bâti. Alors, en conclusion générale à cette thèse, un bilan sera présenté afin de dégager les principaux résultats, ainsi que les principales perspectives ouvertes au cours de la progression de ces travaux.





## CHAPITRE I : LE CONTEXTE NATUREL ET ARCHÉOLOGIQUE DE REIMS



Mosaïque des gladiateurs, Musée Saint Remi, Reims  
(Orthophotographie S. Laratte et A. Conreux)

« Concevez toujours une chose en la considérant  
dans un contexte plus large - une chaise dans une  
pièce, une pièce dans une maison, une maison  
dans un quartier, un quartier dans une ville. »

*Eliel Saarinen*  
(1873 - 1950)



Ce premier chapitre est consacré au contexte naturel de Reims et ses environs, cadre de ce travail, à l'histoire de la ville et à son évolution depuis sa fondation jusqu'à la fin de l'Antiquité. Cette introduction est d'abord utile pour comprendre en quoi le contexte naturel de l'agglomération a influencé les modalités de construction et les stratégies d'approvisionnement en matériaux. Les débuts de l'histoire de la ville et son essor rapide pendant l'Antiquité permettent également d'apprécier à quel point l'urbanisme de cette période a connu un développement important. C'est sous l'influence de cette croissance urbaine que se sont exprimés des besoins en matériaux de provenance parfois lointaine. C'est aussi grâce aux caractéristiques qu'a conférées l'histoire géologique aux matériaux locaux qu'ils ont acquis des propriétés propres à susciter l'intérêt des bâtisseurs gallo-romains.

## 1. Le cadre naturel : Contexte géographique et géomorphologique de l'étude

### 1.1. Le cadre géographique régional

La ville de Reims est située à l'est du Bassin de Paris, à la limite occidentale de la Champagne crayeuse. Cette aire dite « plaine de champagne », constituée de bas plateaux, s'étend sur près de 45 km à l'est de la ville. Le terme Champagne désigne une vaste zone ouverte, sans relief marquant à la façon de la Campanie, qui correspond ici au vaste replat s'étendant à l'ouest de Reims, jusqu'à Troyes (*Campania Remensis*; Dion 1961).

Ses reliefs sont limités à de petites vallées faiblement incisées et quelques « monts » ou croupes de terrain peu accusées et faiblement pentues. Les cours d'eau s'écoulent selon une orientation est-ouest, presque orthogonale avec les crêtes des plateaux cénozoïques dominant la ville à l'ouest. Il s'agit, du nord vers le sud, des plateaux du Laonnois, du Soissonnais, du Tardenois, de la Montagne de Reims et de la Brie Champenoise (Figure I-1) dont la limite ouest constitue la *Cuesta* (ou côte) d'Île-de-France (Pichard 2014 ; Devos *et al.* à paraître). L'orientation des vallées subit également la contrainte imposée par la tectonique alpine au travers de corridors fracturés de direction NNE – SSO (Allouc 2013).

Les cours d'eau qui drainent la craie ont également incisé des vallées aussi larges que profondes qui, au niveau de la transition entre les paysages de plaine et les plateaux, forment des entonnoirs de percées cataclinales. Cette organisation morphologique s'observe pour les vallées de l'Aisne (entre Berry-au-Bac et Cuiry-les-Chaudardes), pour la vallée de la Vesle (entre Reims et Jonchery-sur-Vesle) et pour la Marne (entre Épernay et Châtillon-sur-Marne). L'effet d'entonnoir de la vallée de la Vesle est fortement accentué par la Montagne de Reims qui forme un saillant important sur son flanc sud. Ce relief constitue le point culminant de la région avec une altitude de 286 m (au Mont Sinai). Au Nord, c'est le massif de Saint-Thierry qui forme la limite nord de l'entonnoir.

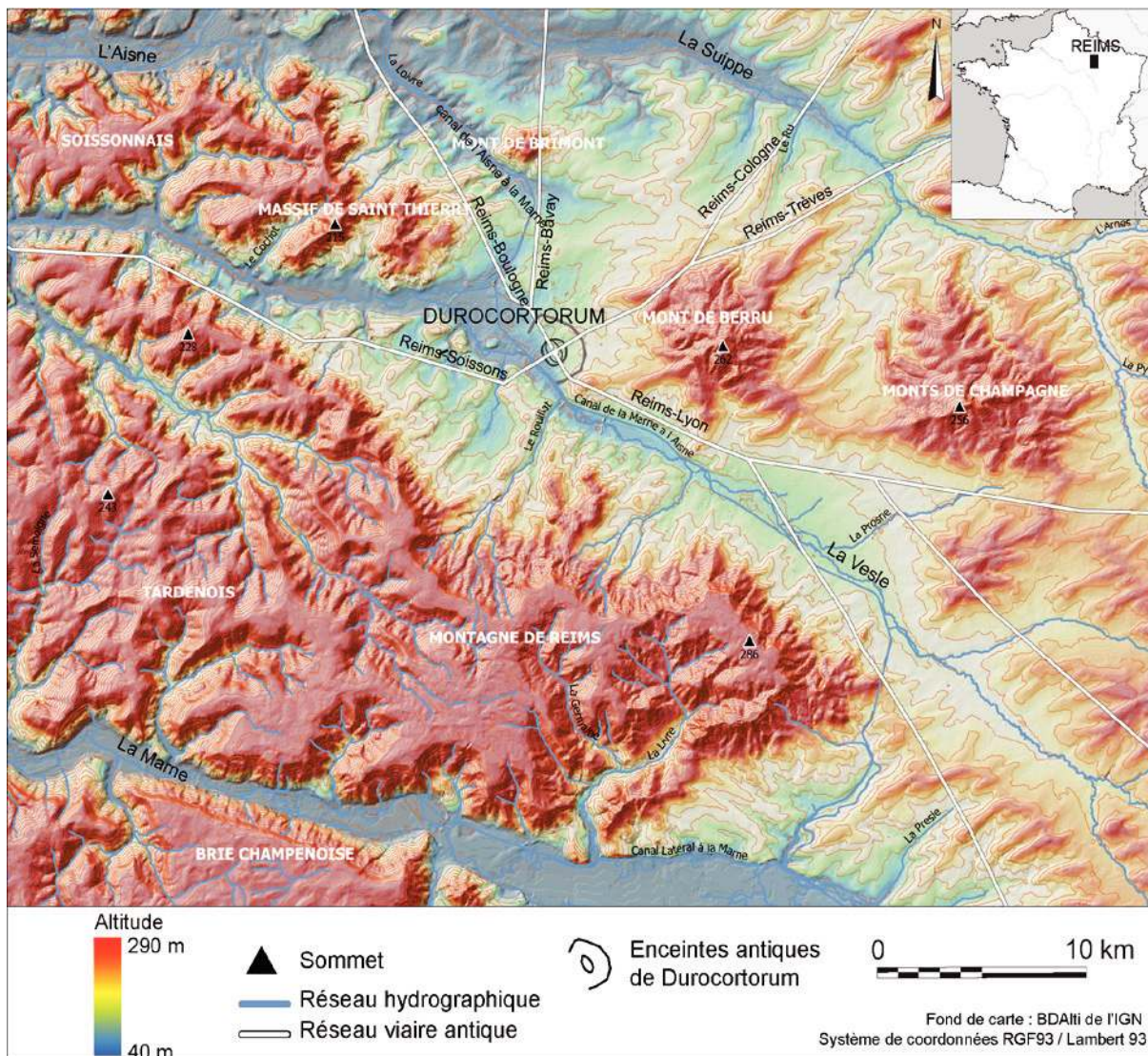


Figure I-1. Contexte et principales unités géographiques des environs de Reims (modifié d'après Pichard 2014).

À l'est et au nord, la ville est encerclée par des buttes-témoins et avant buttes (Monts de Berru, de Brimont, de Champagne) qui parsèment l'interfluve entre la vallée de la Suipe et celle de la Vesle. Le Mont de Berru, immédiatement à l'est de Reims est le plus haut de ces reliefs, culminant à 270 m, et correspond en une véritable butte-témoin. Les reliefs formés par le Mont de Brimont et les Monts de Champagne (Mont Cornillet : 206 m, Mont Haut : 256 m, Casque : 245 m, Téton : 237 m, etc.... ) forment des avant-buttes<sup>4</sup>.

## 1.2. Le site de Reims

Reims a été fondée sur un site de plaine alluviale tout à fait atypique pour la période protohistorique (Fichtl 2005), puisque situé dans cette plaine à une distance assez importante (environ 500 m) d'un petit cours d'eau. Dans les faits, la cité s'est implantée sur de hautes terrasses alluviales (+ 15 m d'altitude relative) sur la rive droite de la Vesle. Cette rivière, autochtone de la craie (Lejeune 2005 ; Devos *et al.* 2007 ; Lejeune *et al.* 2007) prend sa source à Somme-

4. La distinction entre butte-témoin et avant-butte se fait sur le fait que l'érosion a enlevé sa couverture de roche dure (Foucault, Raoult 1995)

Vesle, près de Châlons-en-Champagne et se jette dans la rivière Aisne un peu avant Soissons (Aisne). Son nom, dérivé du latin *vitula* (« arbre » ; Morlet 1953), contraste fortement avec l'absence d'arguments en faveur d'une ripisylve<sup>5</sup> développée sur ses abords (Boulen, à paraître).

Géomorphologiquement, Reims s'inscrit en contexte de marge (ou de transition) entre deux plateaux étagés. À l'est, le plateau de la craie de Champagne et à l'ouest, dominant la ville, les reliefs de la côte d'Île de France. Cette situation spécifique a contribué au façonnement de microreliefs issus de versants en cours d'érosion dominant une « cuvette ». La couverture superficielle de ces croupes crayeuses, généralement assez discontinue, est composée de formations de pentes, colluvions, graviers de craie, limons et dépôts alluvo-colluviaux accompagnés de quelques blocs reliques des formations érodées.

Le site de la ville possède donc un relief très peu marqué au sein d'une vallée alluviale très ouverte dominée par quelques buttes de craie aux reliefs mous. La rive droite de la Vesle est dominée par des éminences séparées et incisées d'un réseau de talwegs généralement secs tandis qu'en rive gauche, la naissance progressive des reliefs de la Montagne de Reims est incisée des lits des affluents de la Vesle (Le Rouillat, La Muire...). Ce n'est que plus à l'ouest que la vallée de la Vesle quitte son domaine de plaine pour s'encaisser progressivement en traversant les reliefs au sein des terrains du Cénozoïque.

Le site de la fondation de l'*oppidum*<sup>6</sup> et de la ville antique est celui d'une terrasse à la surface plus ou moins plane, développée en rive droite de la Vesle qu'elle domine de quelques mètres. Il est traversé d'un réseau de trois talwegs subparallèles et très peu profonds (Figure I-2 et Figure I-3). Ces reliefs sont aujourd'hui très peu perceptibles dans la topographie de la ville à l'exception notable de l'actuelle rue Jean Jaurès, qui en porte encore la signature et les conséquences lors d'évènements pluvieux de forte intensité. Au sud, ce replat est délimité par le cours mineur de la Vesle, entourée de zones humides (Figure I-2 et Figure I-3).

La situation de la ville au centre de l'entonnoir de percée cataclinale<sup>7</sup> lui permet de bénéficier d'un corridor naturel qui s'ouvre vers le centre du Bassin de Paris, ce qui lui confère une situation de convergence des voies naturelles de communication et des ressources qui peuvent y transiter (Pichard 2014).

Aussi peu accusés soient-ils, les reliefs ont défini les tracés des grands axes de circulation de la ville (Neiss 1984 ; Pichard 2014). Au cœur de l'enceinte, le tracé du *Cardo Maximus* est subparallèle à l'axe de la vallée de la Vesle tandis que le *Decumanus Maximus*<sup>8</sup> qui lui est orthogonal, est installé dans l'axe du principal des trois talwegs (axe de la Rue Jean Jaurès actuelle). La vallée de la Vesle constitue un axe de circulation naturel amplement attesté (Pichard 2014). La rivière semble par ailleurs constituer une limite naturelle pour l'extension de la ville qui a longtemps perduré.

5. La ripisylve représente l'ensemble des végétaux se développant au bord des cours d'eau. Du latin *ripa* pour rive et *sylve* forêt

6. Terme latin signifiant « ville » ou « agglomération généralement fortifiée ». C'est le nom donné par les auteurs latins à un type d'agglomération protohistorique d'Europe occidentale et centrale.

7. Une percée cataclinale est une percée topographique large qui se rétrécit en front de cuesta et qui permet à un cours d'eau cataclinal de franchir cette vallée.

8. Dans le monde romain, de nombreuses villes se caractérisent par la présence de deux axes routiers majeurs qui rappellent ceux du camp militaire, le *Cardo maximus* et le *Decumanus maximus*

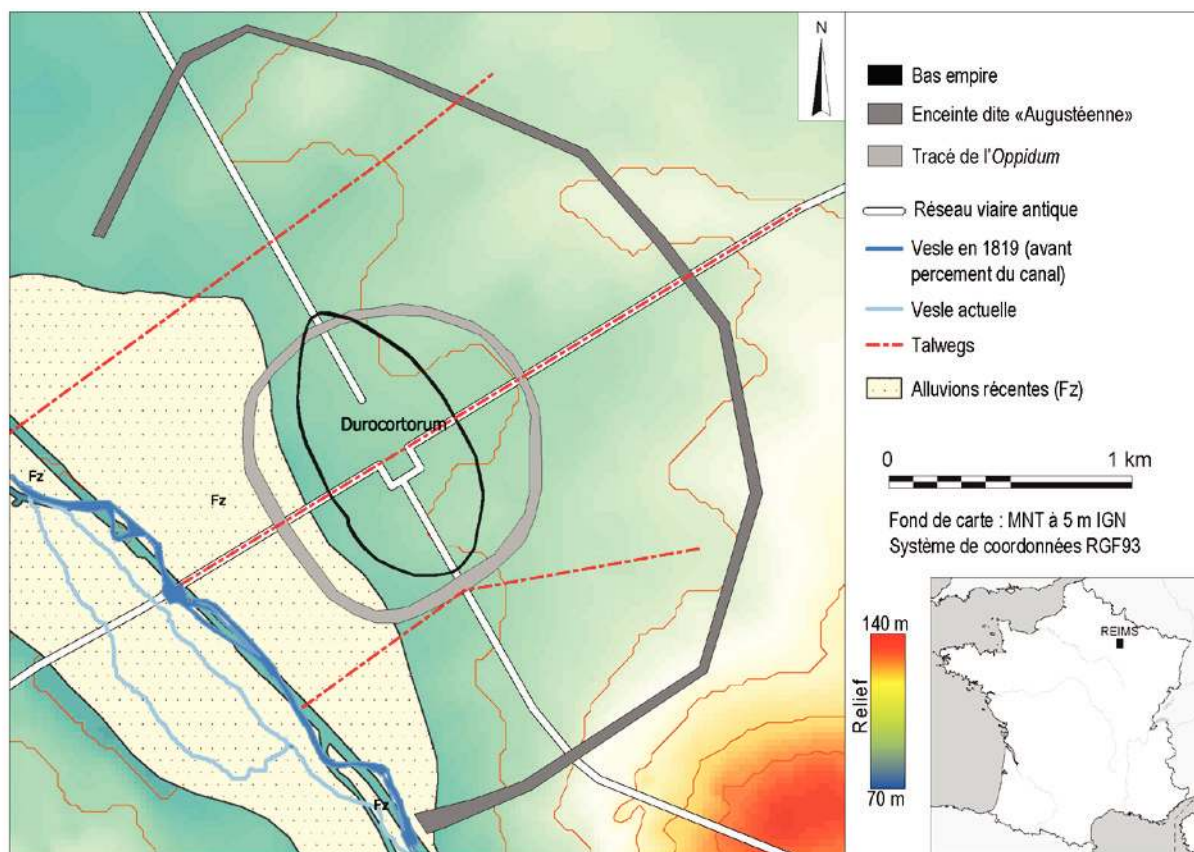


Figure I-2. Topographie du site de *Durocortorum* (modifié d'après Pichard 2014).

L'implantation des voiries est elle aussi largement influencée par la topographie et la géomorphologie locale (Neiss 1984). Les grands axes de circulation qui sortent de la ville vers l'est sont assez linéaires et longent les bas de versants avec des pentes extrêmement faibles entre les reliefs de la plaine crayeuse (cf Figure I-1). Les reliefs peu accusés de la Montagne de Reims sont néanmoins suffisants pour rendre leur contournement partiel vers le sud-est nécessaire en cherchant à emprunter des « cols » (Cran de Ludes, « col » de Jouy). Inversement, vers le nord, les voies en direction de Bavay et Théroouanne sont tracées de part et d'autre du Mont de Brimont en restant en contrebas de la côte d'Île de France. Vers le nord-est, les voies Reims-Trèves et Reims-Cologne longent le pied du Mont de Berru avant de se diviser vers le nord (Jemin 2012).

### 1.2.1. Le cadre hydrologique et hydrogéologique

Contrairement à de nombreuses grandes villes de fondation contemporaine, Reims a été fondée en bordure d'un petit affluent de l'Aisne presque en tête de son réseau hydrographique. À son entrée dans Reims, cette rivière draine un bassin versant de 800 km<sup>2</sup> sur un développé linéaire de près de 60 km. En amont de Reims, la rivière s'écoule sur un *substratum* crayeux dont la faible couverture le rend très peu apte aux ruissellements, expliquant de fait la très faible densité du réseau hydrographique (De Martonne 1947). C'est également la faiblesse des ruissellements qui est invoquée pour expliquer les très faibles dynamiques d'incision des vallées indigènes à la craie (Lejeune 2005). Sur la rive gauche de la Vesle, le contact entre les formations cénozoïques et la craie se caractérise par l'existence d'un front de karstification (Lejeune *et al.* 2007 ; Damien *et al.* 2016). Cependant, celui-ci ne semble fonctionner qu'en

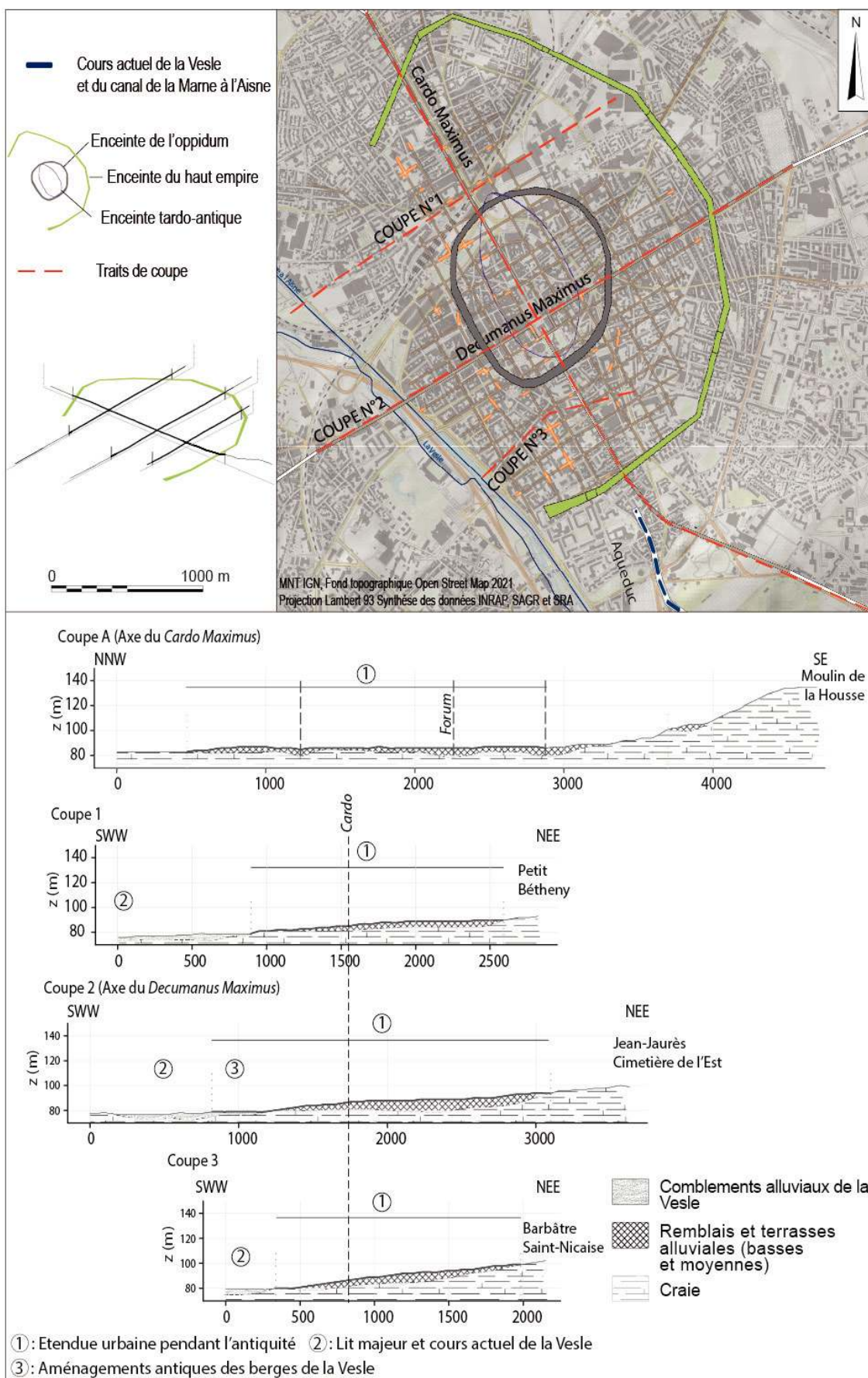


Figure I-3. Coupes topographiques interprétatives de l'emprise de la Reims antique avec l'emplacement schématique des terrasses alluviales, des remblais anthropiques et des talwegs du secteur.



infiltration vers la nappe de la craie et ne contribue pas à la dynamique de la Vesle (Damien *et al.* 2016 ; Devos *et al.*, à paraître). Celle-ci est alimentée essentiellement par la vidange de la nappe de la craie dont la vallée fortement fracturée (Coulon 2011) permet d'assurer une bonne accessibilité à la ressource. Les faibles battements piézométriques (quelques centimètres) en fond de vallée et dans les talwegs conditionnent également la présence d'un grand nombre de puits intra-muros (Pichard 2014 ; Devos *et al.*, à paraître), tandis que cette valeur augmentant considérablement vers les interfluves et sur les croupes de craie (10 à 15 m) permet l'ouverture de cavités artificielles capables de rester hors d'eau (crayères).

Au sortir de la ville, le changement de nature des formations superficielles évoluant vers des matériaux semi-perméables induit un changement de régime de la nappe de la craie. Cette évolution conditionne une mise en charge de la rivière qui se traduit par de bons rendements aquifères, une bonne productivité en eau et l'apparition en aval de la ville de zones humides (marais de la Vesle). Cette étendue palustre a longtemps constitué le second plus vaste ensemble de zones humides de la Champagne crayeuse après les marais de Saint-Gond (Damien 2019).

À ce jour, et en l'absence de données sédimentologiques et géomorphologiques, la reconstitution de l'évolution morphologique et de son cours apparaît comme impossible. Ces études seraient par ailleurs rendues d'autant plus ardues par la construction d'un canal latéral (canal de la Marne à l'Aisne) au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, son approvisionnement en eau impacte fortement son régime et les travaux ont conduit au comblement des petits chenaux latéraux (Pichard 2014) témoignant de l'artificialisation de son cours intra-muros. Cependant, la faible quantité de données disponibles rend la reconstitution d'un paysage fluvial ancien très ardue. Pour Devos *et al.* (à paraître), « rien ne semble indiquer de grandes mutations durant l'Holocène, et plus spécifiquement depuis 2000 ans, qui puissent justifier une évolution radicale du style et du profil de la Vesle ».

La vulnérabilité aux pollutions de la nappe de la craie et la présence de zones marécageuses aux portes de la ville ont conduit à la construction d'un aqueduc pour la desserte en eau potable de la ville (Rabasté *et al.* 2009). Ce dernier était alimenté par une prise d'eau, non pas au niveau d'une source ou dans le cours amont de la Vesle, mais sur la Suipe à Jonchery-sur-Suipe (Rabasté *et al.* 2009). Cette rivière parallèle à la Vesle est elle aussi indigène à la craie et présente de meilleurs rendements hydrologiques (Devos *et al.* 2007).

La compréhension du fonctionnement du cours d'eau inciterait fortement à penser que sa dynamique hydrologique actuelle, fortement déterminée par le climat, est très similaire, si ce n'est identique, à celle de l'époque gallo-romaine au moins pendant l'optimum climatique romain (Clauzel *et al.* 2020). Cependant, la Vesle est parfois considérée comme un cours d'eau à faible énergie peu propice à la navigation, ou au transport du bois par flottage (Bernot 1995), ou encore à la dilution des effluents urbains. Elle a par ailleurs montré d'importantes limitations dans une utilisation de fourniture d'eau potable du fait de sa grande sensibilité à la pollution de surface et de son inclusion dans un ensemble de zones humides.

### 1.2.2. Les éléments de paléoenvironnement

Les paysages actuels de la Champagne sont marqués par une importante évolution depuis le XVIIIe siècle (Renard 1966 ; 1970 ; Buridant 2007). Cependant, les données paléoenvironnementales pour la période protohistorique et antique sont peu nombreuses. Elles sont principalement issues de sources archéologiques (carpologie, palynologie) et en particulier des données issues des études préalables aux grands travaux et de génie civil (Ligne Grande Vitesse, aménagement de l'aéroport de Watry ; Matteredne 2009) ou des travaux d'aménagement de la périphérie de Reims (secteurs de Bezannes et de Bétheny ; Bündgen *et al.* 2014). Les interprétations de ces analyses ont souligné un net recul des forêts de type chênaies/hêtraies dès la protohistoire (Boulen à paraître ; Zech-Matteredne à paraître). Ces ensembles forestiers sont alors ponctués de clairières autour desquelles s'organisent les premières implantations humaines pérennes du secteur (Bündgen *et al.* 2014). À partir de la fin de l'âge du Fer, le couvert forestier apparaît fortement diminué en corrélation avec la pérennisation et la densification des implantations humaines jusqu'à la fondation de l'*oppidum*. Cependant, en l'état actuel des connaissances, les données témoignent majoritairement d'une grande stabilité des conditions édaphiques depuis l'Antiquité jusqu'à la période industrielle (Boulen à paraître ; Zech-Matteredne à paraître).

Pour la région de Reims, et malgré la rareté relative des arguments paléoenvironnementaux, il semble qu'un milieu très ouvert développé sur des sols pauvres a persisté depuis La Tène moyenne<sup>9</sup> (soit entre 400 et 320 avant J.-C.), jusqu'au XVIIIe siècle. Les bois relictuels des forêts antérieures au défrichage anthropique sont extrêmement rares et peu étendus, démontrant à la fois l'intensité et la précocité du défrichement de la Champagne crayeuse (Bournérias 1979 ; Bournérias et Timbal 1979). Ce n'est que depuis les trois derniers siècles que les paysages de la Champagne crayeuse ont subi les plus importants bouleversements (Renard 1966 ; Buridant 2008) avec la Première Guerre Mondiale comme point d'orgue (Buridant 2003 ; Devos *et al.* 2018 ; Taborelli 2018), ou avec le remembrement massif d'après la Seconde Guerre Mondiale (Ballif *et al.* 1995).

## 2. Le contexte géologique

Le Bassin de Paris, situé dans la partie nord-est du pays, est le plus étendu des ensembles géologiques de la France (Figure I-4 ; Pomerol 1974 ; Mégrien 1980). Il est séparé du Bassin Belge par l'anticlinal de l'Artois au nord, du Fossé Bressan par le seuil de Bourgogne au sud-est et du Bassin d'Aquitaine par le Seuil du Poitou. À l'est, il est bordé par le Fossé Rhénan et le massif plissé du Jura. Il s'appuie sur les massifs paléozoïques : des Ardennes au nord-est, des Vosges à l'est, du Morvan au sud-est, le Massif Central au sud, et enfin le Massif Armoricain à l'ouest. Enfin, son extrémité nord-ouest s'ouvre largement sur la Manche (Pomerol 1974). C'est selon Lorenz et Pomerol (1989) l'un des Bassins sédimentaires intracratoniques les mieux étudiés au monde.

---

9. La Tène ou second âge du Fer correspond à une culture archéologique qui s'étend en Europe de 450 à 25 avant J.-C.

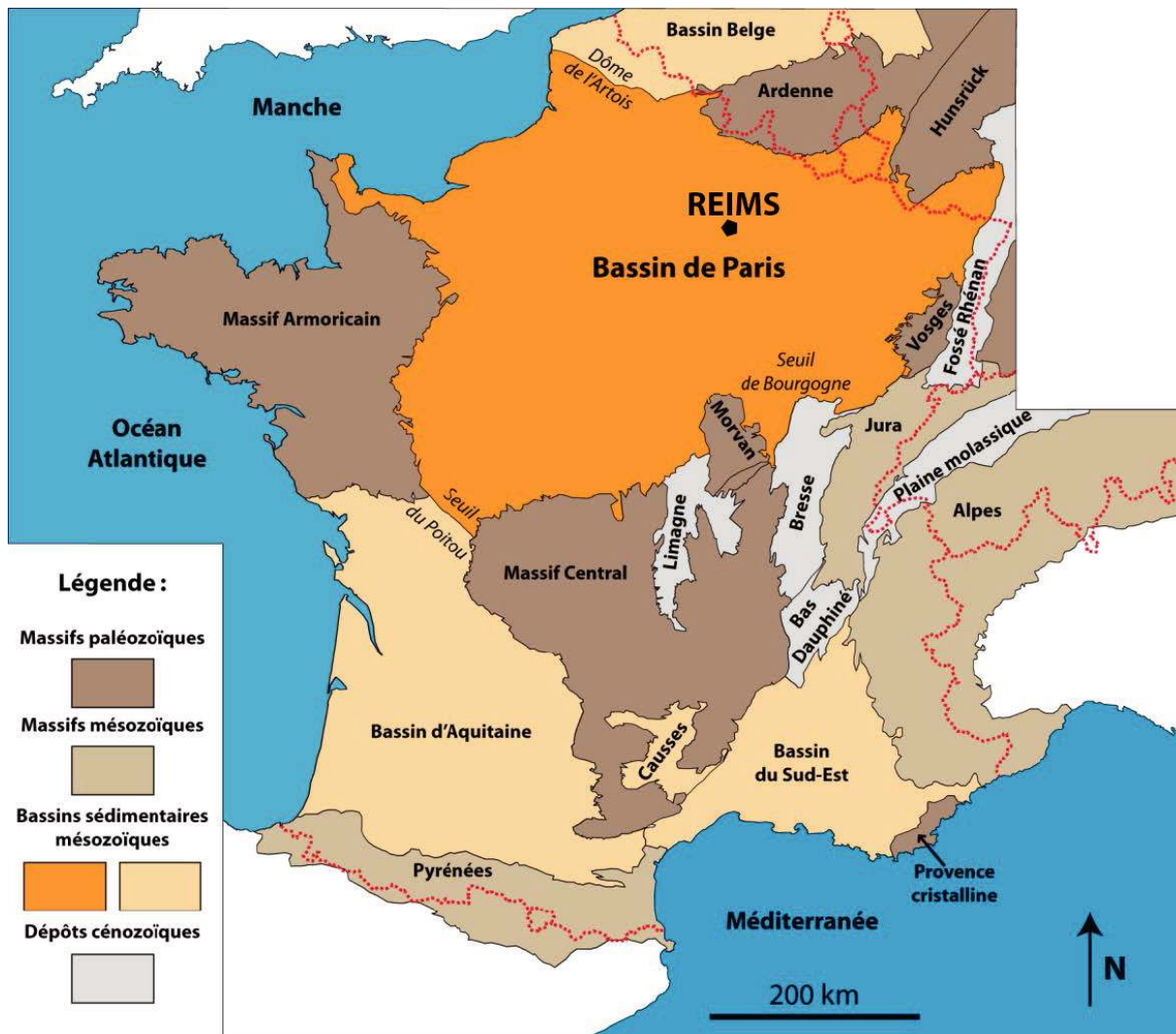


Figure I-4. Situation du Bassin de Paris par rapport aux autres grands ensembles géologiques de France (Linoir 2014).

## 2.1. Le socle du Bassin de Paris

Le Bassin de Paris est un bassin sédimentaire intracratonique de forme oblongue d'environ 650 km d'est en ouest et de 500 km du nord au sud (Figure I-5 ; Pomerol 1974 ; Cavalier *et al.* 1980 ; De Wever *et al.* 2002 ; Huyghe *et al.* 2012). Le socle cristallin est formé par des unités cratoniques agrégées pendant l'orogène hercynienne qui ont donné naissance à la Pangée. Le démantèlement de la chaîne hercynienne est accompagné par la lente détumescence thermique de la lithosphère qui contrôlera la subsidence à long terme du bassin (Brunet et Le Pichon 1982 ; Prijac *et al.* 2000 ; Littke *et al.* 2000 ; Le Solleuz *et al.* 2004). Cette extension précoce a permis la structuration à son extrémité orientale d'un grand système de bassin silicoclastique carbonifère très subsident (Gély et Hanot 2014) abondamment approvisionné par le démantèlement de la chaîne varisque (Cavalier *et al.* 1980). Cette structuration constituera un héritage important pour les accidents tectoniques qui rejoueront postérieurement au cours des différents épisodes de subsidence du Bassin Parisien.

Le Bassin de Paris est resté pendant une grande partie de son fonctionnement paléogéographiquement relié aux bassins de Londres et de la Manche au nord-ouest (Dadlez et Piwocki 2001), et au bassin de Belgique au nord.

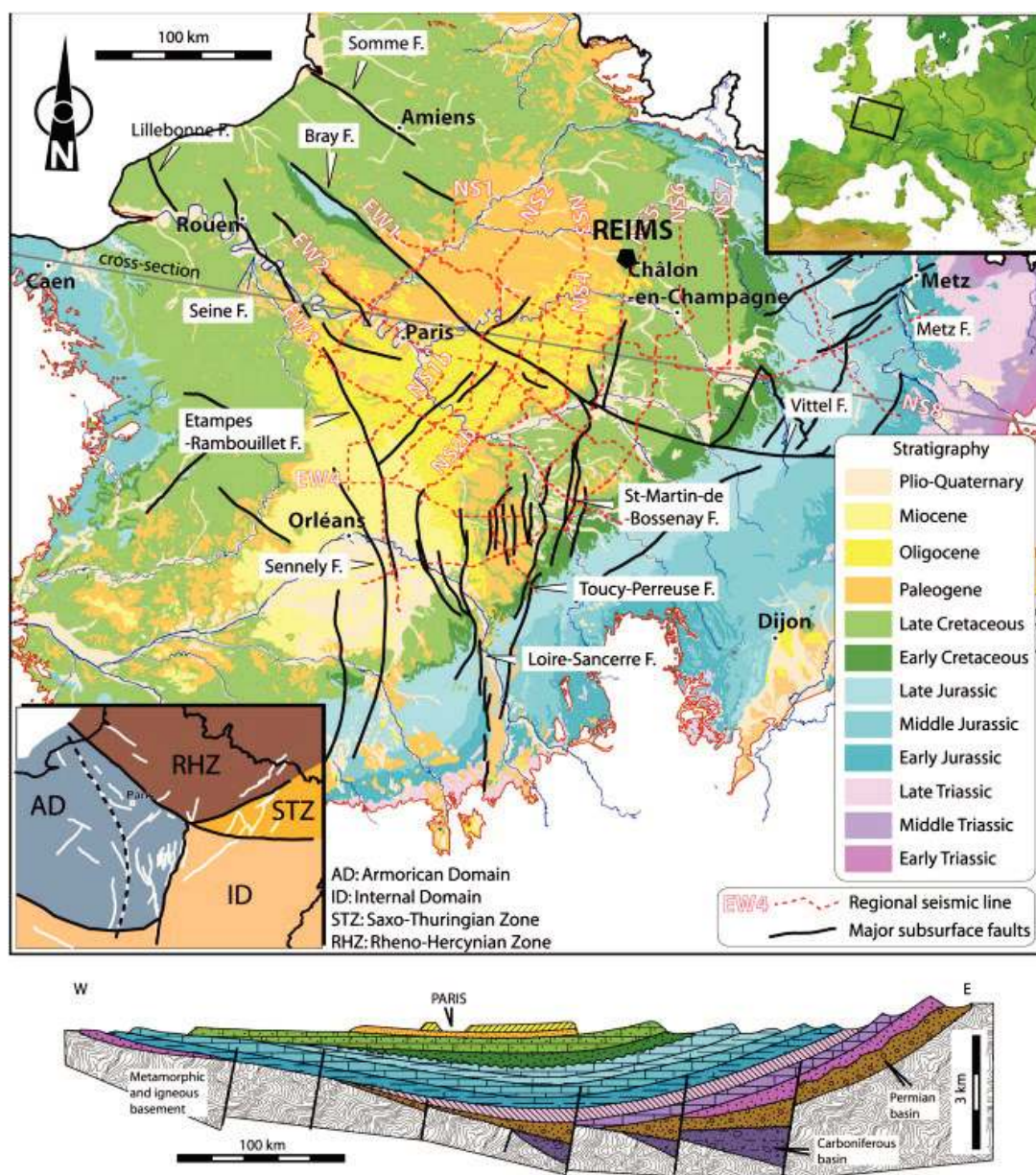


Figure I-5. Carte géologique du Bassin de Paris, localisation des accidents majeurs (Beccaletto et al. 2011) et coupe ouest-est montrant également la structuration des Bassins paléozoïques (Gély et Hanot 2014).

Pendant l’essentiel du Trias, le Bassin est connecté avec le Bassin Germanique (Henk 1993), son centre de subsidence ne se déplaçant vers son dépointe actuel qu’au Trias supérieur (Mégnyen 1980 ; Perrodon et Zabek 1990).

Dans sa morphologie actuelle (Figure I-5), le bassin apparaît sous la forme d’une succession d’auréoles sédimentaires concentriques qui résultent de la déformation et de l’érosion du Crétacé supérieur et du Cénozoïque (Cavelier *et al.* 1980 ; Perrodon et Zabek 1990).

## 2.2. La couverture sédimentaire : Les formations du Mésozoïque

La région de Reims, cadre géographique de ce travail, est constituée de deux unités géologiques distinctes (Figure I-6). Chacun de ses ensembles constitue *in fine* un ensemble géomorphologique aux caractéristiques propres :

- La plaine de Champagne, caractérisée par les dépôts de la fin du Mésozoïque, composée de craie, à l'allure de plaine (*sic*) et dont les rares reliefs sont peu prononcés ;
- Les terrains d'Île-de-France, caractérisés par les dépôts du Cénozoïque, composés de roches sédimentaires variées : sables, argiles, calcaires...), dont les strates constituent les reliefs de plateaux incisés de vallées de la Côte d'Île de France.

Ces unités stratigraphiques, caractérisées par de fortes disparités de paléoenvironnement déterminent une importante variation spatiale des faciès de pierres et leurs propriétés géotechniques (Fronteau, 2000). Ceci multiplie ainsi davantage leurs spécificités et capacités d'emploi dans le patrimoine bâti (Devos *et al.*, 2008).

### **Le Crétacé — (-145 Ma à -66.5 Ma) :**

Le Mésozoïque a connu une succession de cycles sédimentaires. Dans le Bassin de Paris, ces cycles sont perceptibles principalement au Jurassique et au Crétacé inférieur (Mégny 1980 ; Lasseur 2007 ; Guillocheau *et al.* 2000). La période d'émersion qui clôt le premier cycle est marquée par l'existence de dépôts continentaux (molasses des faciès wealdiens) au centre du bassin et le modelage de surfaces d'érosion et de karstifications sur ses marges. En Champagne, la transgression du Crétacé inférieur est visible à l'est, en Argonne, grâce à des dépôts de sables verts de l'Aptien, glauconieux recouvert par les argiles du Gault et de la Gaize caractéristiques de la Champagne humide (Pomerol 1974 ; Cavelier *et al.* 1980). Puis, pendant le Crétacé supérieur, une période de plus grande stabilité s'installe durablement et induit une sédimentation d'une grande homogénéité. En effet, l'enregistrement sédimentaire de cette époque se caractérise par les grandes épaisseurs de craie de qualités variables. Ainsi, la région de Reims et ses secteurs orientaux s'inscrivent dans de vastes affleurements de craie blanche, dite de Champagne, dont une des particularités est de ne pas receler d'accidents siliceux (silex), inversement aux dépôts contemporains de la région de Sens ou encore des Marais de Saint-Gond. Cette sédimentation carbonatée biogénique a perduré pendant une période allant du Santonien et au Campanien (Mégny 1980 ; Laurain *et al.* 1981). Les dépôts ultérieurs, s'ils ont existé, ont été érodés à la faveur de l'émersion induite par la régression de la fin du Crétacé. Les craies de la région de Reims sont très homogènes et très peu fossilifères, rendant complexe la lecture stratigraphique. En effet, celle-ci ne peut être pleinement comprise que par une approche micropaléontologique (Laurain *et al.* 1981).

Les dépôts les plus tardifs du Crétacé dans la région, attribués au Maastrichtien, ont été préservés en discordance sur les dépôts campaniens (Guernet 2013). Ces dépôts arment dans les reliefs de la butte-témoin du Mont Aimé situé dans le sud de la Marne. Ils sont constitués d'une succession de calcaires marneux et de bancs de calcaires contenant des fragments de craie auxquels succèdent des dépôts de calcaires gréseux puis de calcaires massifs dont les parties supérieures sont karstifiées. Ces formations, dont la datation a été longtemps controversée, ont été récemment confirmées du Maastrichtien (Montenat et Merle 2018).

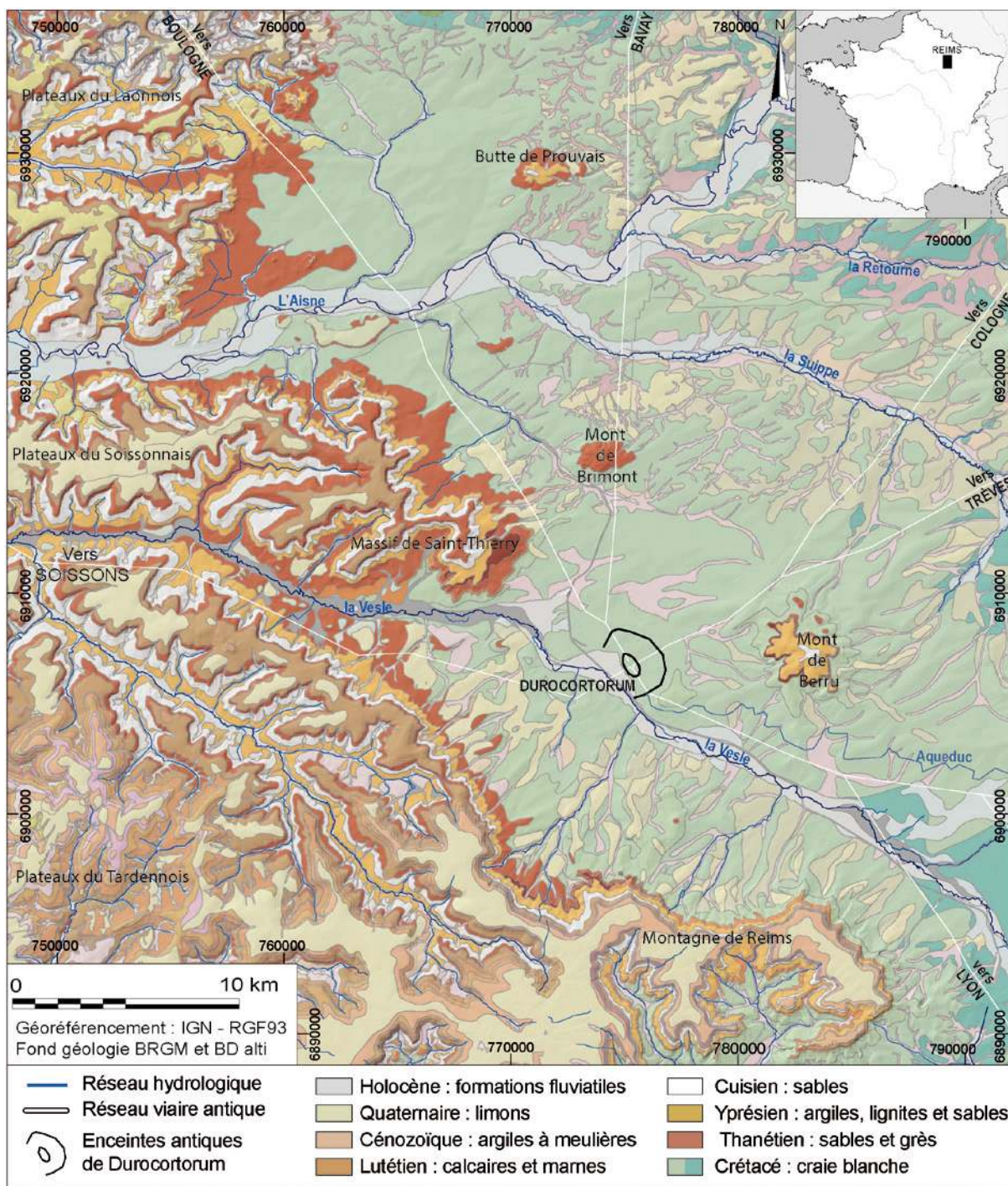


Figure I-6. Carte géologique de la régions de Reims (source BRGM BD Charm).

### 2.3. La couverture sédimentaire : Les formations du Cénozoïque

Après les grands cycles stratigraphiques du Mésozoïque viennent les rapides variations eustatiques du Cénozoïque. Ces successions de transgressions et de régressions n’ont que très rarement dépassé le futur site de Reims, mais ont laissé les enregistrements sédimentaires importants du centre du Bassin de Paris. Ils correspondent aux roches à l’affleurement sur les fronts et les revers de la Côte d’Île de France (Figure I-7 et Figure I-8).

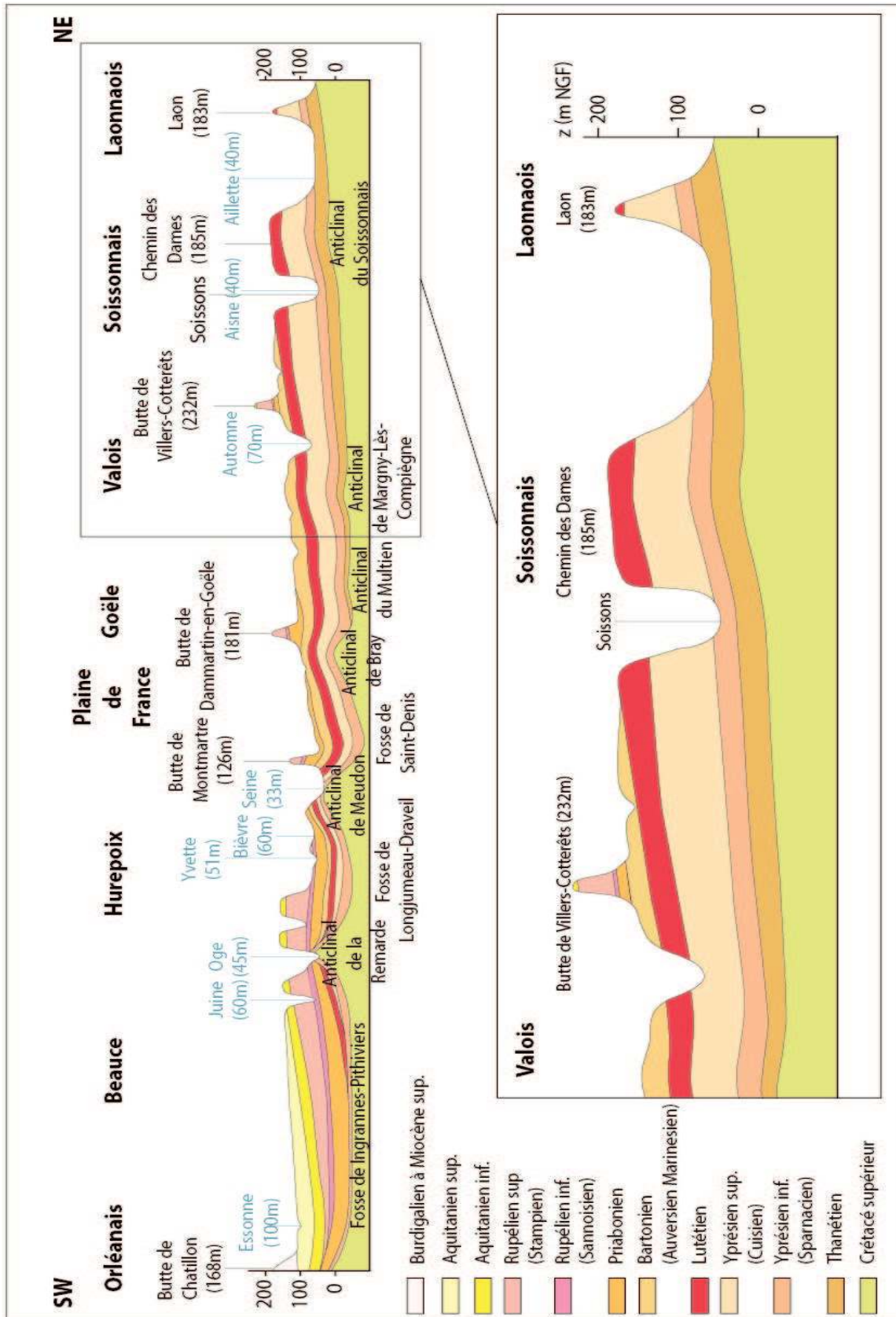


Figure I-7. Coupe géologique simplifiée de la couverture sédimentaire cénozoïque du Bassin de Paris, depuis le Laonnois à l'Orléanais (Gély 2016). La tectonique compressive synsédimentaire à courte et à grande longueur d'onde est représentée par les plis et par la migration des dépo-centres vers l'ouest du Bassin.

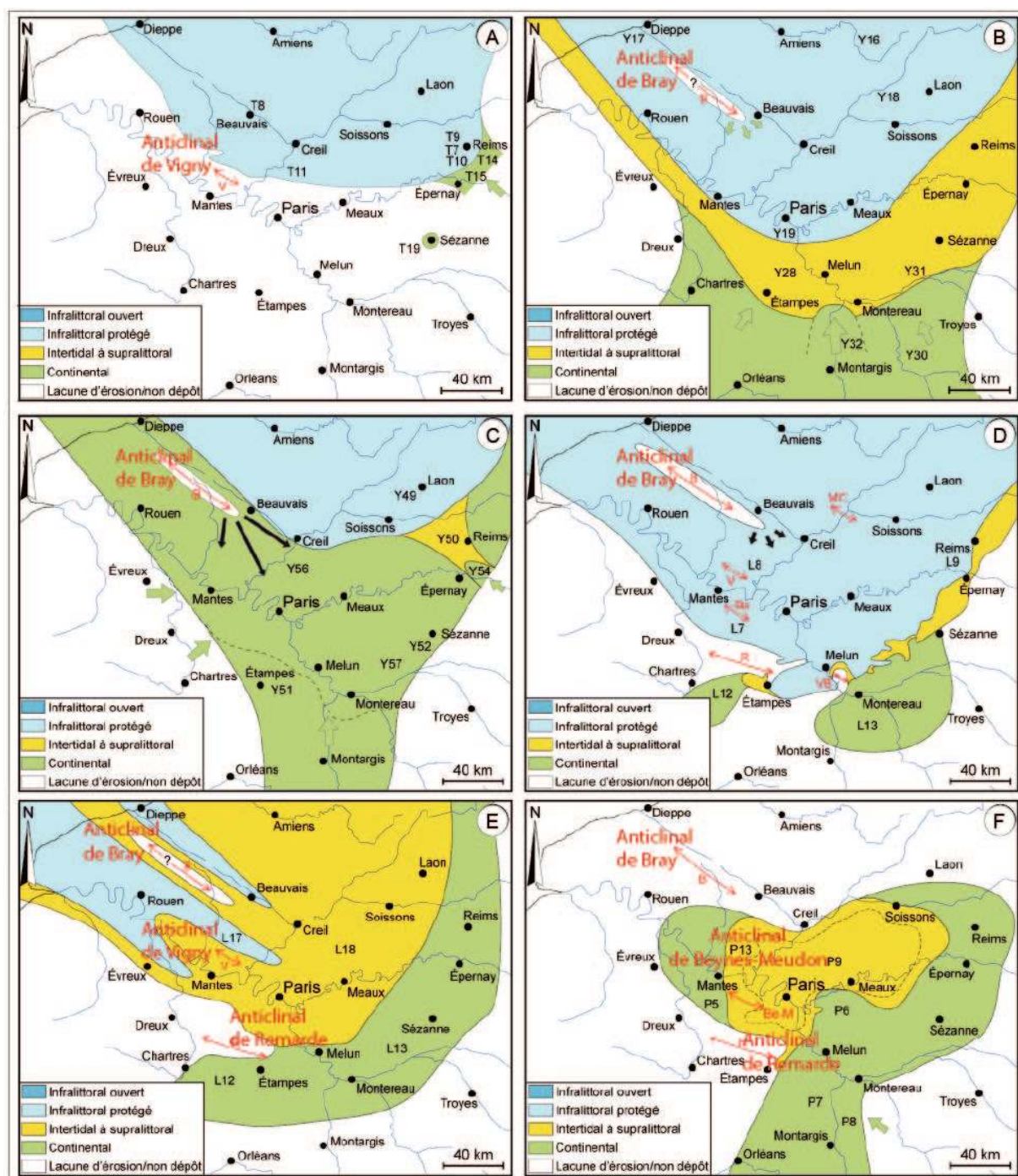


Figure I-8. Cartes paléogéographiques des formations paléogènes du Bassin de Paris (Gély 2016). A. Thanétien supérieur ; B. Yprésien (Spartnacien) ; C. Yprésien (Cuisien) ; D. Lutétien moyen ; E. Lutétien supérieur à Bartonien ; F. Priabonien (Ludien moyen).

### Le Thanétien (-59.2 Ma à -56 Ma) :

Après une longue lacune de sédimentation caractérisée par l'absence d'enregistrement du Maastrichtien au Thanétien (anciennement lacune dano-montienne ; Gély *et al.* 2014), la première transgression à atteindre le secteur de Reims est celle du Thanétien (Figure I-8 A). Après cette longue émergence qui s'est accompagnée d'une importante érosion, la mer revient dans la région depuis le nord. Les apports détritiques en provenance du continent alimentent de vastes dépôts continentaux d'origines fluviales (Grès du Mont Chenois) tandis



que les premiers dépôts de remaniement d'altérites crayeuses, discordants sur la craie vont constituer le Tuffeau du Moulin Compensé (Laurain et Meyer 1986 ; Aubry *et al.* 2005). Ces formations élaborées à partir des produits de l'érosion post crétacé se sont déposées sous la forme d'un vaste cône d'épandage fluviatile caractérisé par la présence de *Microcodium* (Lejeune *et al.* 2007). La sédimentation au cours de cette période de climat tropical est majoritairement silicoclastique (Gély 2016), depuis des sables fins (ponctuellement indurés, jusqu'aux conglomérats fins. Ces derniers sont représentés par les épandages deltaïques du « Conglomérat de Cernay » à l'affleurement à l'ouest du Mont de Berru (Laurain *et al.* 1981 ; Laurain 1985).

Les milieux de dépôts évoluent alors lentement, toujours en restant dans un contexte littoral soumis aux courants tidaux. Cela permet l'installation de paléoenvironnements estuariens et marins littoraux, parcourus de chenaux tidaux. Les sédiments de cette période sont bien représentés par les « Sables de Châlons-sur-Vesle » (Massif de Saint Thierry), qui peuvent arborer des faciès localement grésifiés. La seconde partie du Thanétien est marquée par une régression dont les dépôts préservés consistent en des sables éoliens et des grès-quartzitiques. Un grès calcaire à *Microcodium*, marqueur d'un environnement fluviatile, termine cette séquence régressive. Indiqué comme Thanétien sur les cartes géologiques (Laurain *et al.* 1981, p. 81), ce faciès est aussi parfois placé à la base de l'Yprésien (Gély 2016).

### **L'Yprésien (Sparnacien et Cuisien — -56 Ma à -47.8 Ma) :**

Il est encore coutumier de diviser l'Yprésien en deux entités stratigraphiques : le Sparnacien et le Cuisien (Figure I-8 B et C). Ces deux faciès de l'Yprésien correspondent à deux anciens étages de référence de la charte stratigraphique internationale. Ils sont d'autant plus prisés localement dans le secteur de Reims que le stratotype du Sparnacien était situé au sommet du Mont Bernon à Épernay (Hatrival 1977). Ces deux anciens étages correspondent à des faciès et donc à des environnements de dépôt, ce qui ne leur permet donc pas de prétendre à une valeur de référence stratigraphique (Aubry *et al.* 2005). Pendant l'ensemble de la transgression yprésienne, la mer envahit le bassin depuis l'actuelle Mer du Nord, avec toutefois des périodes de connexions avec l'Atlantique Nord au cours du Cuisien (Mégny 1980 ; Gély 1996 ; 2016). Pendant cette première partie du Paléogène, le Bassin de Paris ne constitue qu'un des golfes de la Mer du Nord.

Le Sparnacien est un faciès où alternent des marnes brunes à jaunes, des argiles plastiques et des sables à lignite (Hatrival 1977). Localement le pôle argileux peut nettement dominer (Laurain *et al.* 1976 ; Laurain *et al.* 1981). Cette formation des sables et lignites du Soissonnais renvoie à un paléoenvironnement de type laguno-littoral (Huyghe *et al.* 2012) peu profond.

Les dépôts de l'Yprésien supérieur renvoient l'image d'un paléoenvironnement nettement marin, réputé être une des transgressions les plus importantes (Huyghe *et al.* 2012). Ces dépôts sont constitués de sables moyens à fins, micacés (dits « Sables de Glennes », « Sables de Cuise » ou localement « Sables à lapins »). Ces derniers peuvent également présenter une nette influence tidale. Cette période de sédimentation marine prend fin avec une influence fluviatile de plus en plus affirmée. Les derniers dépôts sont préservés sous la forme de lentilles où s'intercalent des dépôts argilo sableux et argilo-ligniteux à empreintes de végétaux (formations des Argiles de Laon ou des Grès de Belleu ; Laurain *et al.* 1976 ; Hatrival 1977 ; Laurain *et al.* 1981 ; Laurain 1985).

Sous l'influence de plus en plus sensible de la surrection pyrénéenne, le Bassin connaîtra alors une nouvelle émergence complète qui durera jusqu'au début du Lutétien, avec une érosion des derniers dépôts de l'Yprésien (Pomerol 1974 ; Gély 2009).

### Le Lutétien (- 47.8 Ma à -41.2 Ma) :

Le Lutétien se caractérise par une succession de trois cycles sédimentaires mineurs largement influencés par des contrôles tectoniques (Gély 1996). Ce contrôle dans la subsidence du Bassin Parisien est marqué par un changement majeur de nature et de provenance des apports sédimentaires. En effet, la sédimentation auparavant majoritairement silicoclastique va évoluer vers un pôle carbonaté dès le Lutétien moyen (Pomerol 1974 ; Cavelier *et al.* 1980 ; Figure I-8 D et E). Cette évolution est liée à la compartimentation du Bassin suite au bombement Weald-Artois-Ardenne, qui place la mer lutétienne sous l'influence directe de l'Océan Atlantique via la Manche (Gély 1996 ; 2009 ; Gély *et al.* 2014). Ce changement de polarité est identifié par de nombreux auteurs comme l'un des événements majeurs de l'histoire du Paléogène du Bassin de Paris (Guillocheau *et al.* 2000 ; Huyghe *et al.* 2012 ; Gély 2016).

D'un point de vue paléoenvironnemental, les dépôts de cette période, majoritairement carbonatés, renvoient l'image d'une vaste plateforme carbonatée dont le développement profite d'un climat encore tropical. La mer lutétienne s'est alors étendue à travers l'ensemble du golfe parisien (Figure I-9).

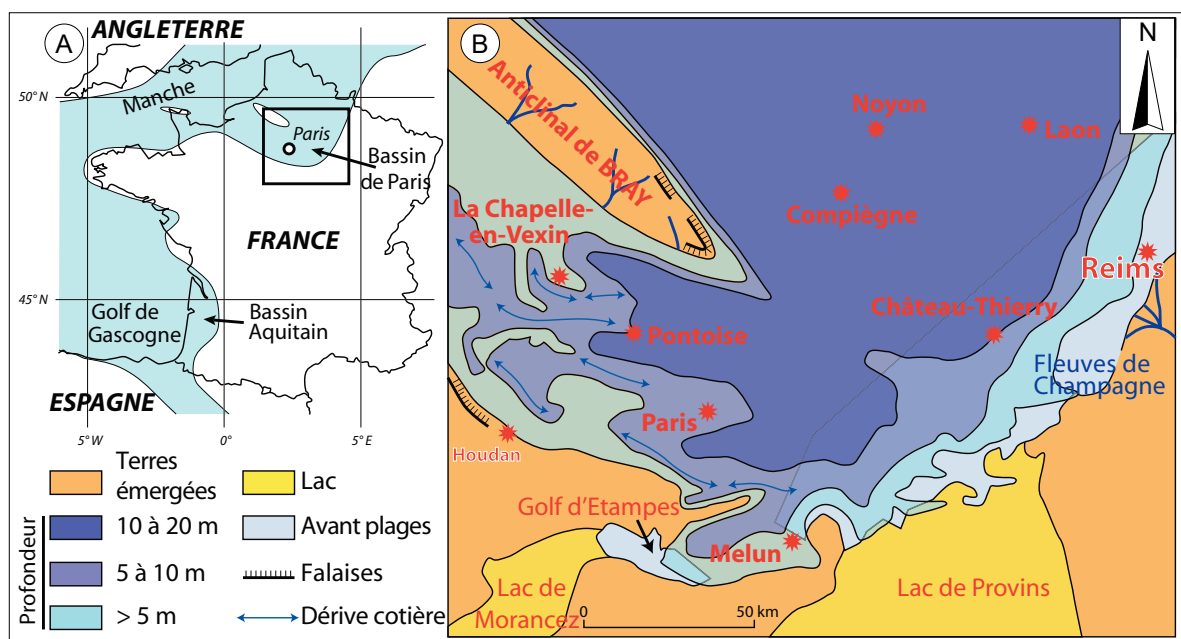


Figure I-9. Reconstitution paléogéographique du sud du Bassin de Paris au Lutétien moyen d'après Huyghe *et al.* (2012).

Durant le Lutétien supérieur et le début du Bartonien, l'évolution tectono sédimentaire du Bassin va conduire à son isolement relatif du domaine marin franc et à l'installation de conditions lagunaire (permettant la précipitation d'évaporites dans le centre du Bassin ; Gély *et al.* 2014). Dans le secteur de Reims, cette période est caractérisée par les dépôts des « Marnes et Caillasses » et par des dépôts calcaires fortement influencés par des conditions lacustres (calcaires sublithographiques à cristallisations gypseuses, calcaires à Limnées et à gyrogonites de Charophytes).

Les calcaires du Lutétien seront plus longuement détaillés par la suite, ces derniers étant particulièrement utilisés dans la construction de la ville de Reims, depuis sa fondation jusqu'à nos jours. Les importantes variations de faciès et de stratonomie qui caractérisent les dépôts lutétiens rendent nécessaire une approche descriptive plus fine, indispensable également pour la compréhension de son utilisation dans la construction (Blondeau *et al.* 1965 ; Guindollet 1991 ; Benoît *et al.* 2000 ; Gély 2009 ; 2016 ; Fronteau *et al.* 2014 ; Turmel *et al.* 2014).

#### **Le Bartonien (-41.2 à -37.71 Ma) :**

Durant le Bartonien, les conditions redeviennent favorables à l'installation d'une nouvelle mer dont la transgression vient une nouvelle fois de l'Atlantique, confirmant le précédent changement de polarité des apports. Le Bartonien, traditionnellement subdivisé en deux épisodes distincts (Auversien et Marinésien (Cavelier *et al.* 1980 ; Mégnien 1980), reflète une nouvelle évolution des paléoenvironnements (Figure I-8 D). Alors que l'ancien Auversien est caractérisé par une sédimentation marine, les formations marinésiennes s'inscrivent dans un environnement laguno-lacustre (Laurain *et al.* 1976 ; Laurain *et al.* 1981). On constate également que les dépôts carbonatés sont intercalés de corps sableux issus du remaniement des sables paléocènes à l'affleurement en périphérie du bassin (Gély 2016).

Les dépôts bartoniens sont essentiellement représentés par des marnes blanches et de sables très purs (Sables de Beauchamp), qui localement peuvent être grésifiées. Mais ils peuvent aussi être carbonatés, comme avec les calcaires à *Limnea longiscata* de la Montagne de Reims ou encore marno-calcaires. Ils sont considérés comme équivalents latéraux aux Calcaires de Saint-Ouen.

#### **Le Priabonien (-37.2 Ma à -33.9 Ma) :**

Au Priabonien (ex Ludien), le Bassin de Paris est de nouveau brièvement envahi par une mer chaude et peu profonde (Figure I-8 F), dont les dépôts sont caractérisés par une prédominance des évaporites (marnes gypseuses et gypses ; Huyghe *et al.* 2012). Les faciès gypseux sont essentiellement développés dans le centre du Bassin, à partir de Fère en Tardenois, et absents des environs de Reims. Le dépôt centre du système sédimentaire reste localisé au niveau de l'emplacement actuel de Paris. Cette période est marquée par la résorption complète de l'antiforme lithosphérique présente qui a structuré le Bassin de Paris depuis le début du Cénozoïque (Gély 2016).

Les dépôts de cette période dans les régions à l'ouest de Reims sont principalement caractérisés par la présence de Marnes à *Pholadomya Ludensis* (faciès marins) et par les Calcaires de Champigny, de faciès saumâtres à lacustres (Laurain *et al.* 1976 ; 1981 ; Cavelier *et al.* 1980 ; Gély 2016).

#### **Le Rupélien (-33.9 Ma à -28.4 Ma) :**

Le Rupélien (ex Stampien) se matérialise dans le Bassin de Paris par une importante remobilisation des sables paléocènes et éocènes avec, en conséquence, la mise en place de la formation des Sables de Fontainebleau et de leurs équivalents latéraux (Gély *et al.* 2014). Les épaisseurs et le développement de ces dépôts s'accroissent vers Paris où est toujours localisé le dépôt-centre (Huyghe *et al.* 2012 ; Gély 2016).

Ce sont les formations attribuées à cet étage qui scelleront les dépôts sédimentaires cénozoïques pour l'est de la Côte d'Île de France. Outre les dépôts sableux précédemment évoqués qui apparaissent principalement dans le Tardenois et vers l'ouest, les dépôts les plus représentatifs de cette période consistent en des argiles à meulière (Laurain *et al.* 1976 ; 1981), dont l'âge de genèse reste controversé (Lozouet 2012). Ces formations se présentent sous la forme d'argiles de couleur brunes à rouges emballants des niveaux plus ou moins continus de pierres meulières dispersées (Ménillet 1987 ; Guérin 1991 ; Thiry 2009). Ces meulières sont des accidents siliceux qui, en Montagne de Reims et dans le Tardenois, se présentent sous la forme de blocs de toutes dimensions, massifs et vacuolaires, à cassures conchoïdales. L'aspect vacuolaire des pierres meulières s'accroît vers l'ouest jusqu'à être qualifié de caverneux alors qu'il est très massif à l'est (Laurain *et al.* 1981).

Comme le signalent Laurain *et al.* (1976 ; 1981), les meulières, du fait de leur très grande résistance, sont présentes sous la forme de formations résiduelles sur tous les dépôts antérieurs depuis les pentes de la cuesta jusque sur pratiquement toute la plaine crayeuse à l'est de Reims (Laurain *et al.* 1981 ; Guérin 1991).

## 2.4. La couverture sédimentaire : Les formations du Quaternaire

Pendant le Quaternaire et jusqu'aujourd'hui les processus de dépôts et d'érosions ont façonné les paysages, déposant des sédiments et en érodant d'autres. Ces formations, classiquement qualifiées de formations superficielles (Campy et Macaire 2005), peuvent néanmoins représenter localement des épaisseurs importantes. Elles sont issues de processus de dépôts différents et donc possèdent des caractéristiques qui leur sont spécifiques. Elles seront abordées depuis les formations colluvionnaires périglaciaires jusqu'aux formations alluviales constituant les remplissages des vallées.

### **Les formations colluviales périglaciaires : les poches de cryoturbation et les grèzes :**

Le Quaternaire a vu se succéder des alternances de périodes glaciaires froides et de périodes interglaciaires tempérées qui ont largement façonné les sols de Champagne (Laurain *et al.* 1995 ; Figure I-10). Les variations de température et les alternances de cycles gel/dégel aussi bien journaliers que saisonniers s'inscrivent dans le substrat par la formation de poches de cryoturbations (Laurain, Marre et Guérin 1997), dont l'expression en plan sont des sols polygonaux (Laurain 2001). Le comblement de la poche se réalise par cryofracturation et décarbonatation des matériaux qui composent les cheminées des poches, la matière ainsi produite migre vers l'intérieur des poches par gravité (Dutil et Balif 1968).

Sur les versants peu accusés des reliefs de la craie, ces sols polygonaux se déforment, fluent et s'étirent selon la ligne de plus grande pente à la faveur des périodes de dégel (Matsuoka 2001 ; Harris *et al.* 2009). Le long du profil de pente (Figure I-11), les formes évoluent depuis des sols polygonaux vers des sols striés qui à l'extrême sont tellement étirés qu'il est impossible de les différencier (Laurain *et al.* 1995). Les matériaux se déversent alors progressivement dans la pente. Il en résulte alors des formations colluvionnaires de grèzes litées (régionalement appelées graveluches ; Laurain *et al.* 1995). Ces colluvions sont répandues sous forme d'un mélange de sables et de graviers de craie indurés et jaunâtres d'un diamètre compris entre 1 et 5 mm, accumulés principalement en pied de pente (Laurain *et al.* 1995 ; Laurain 2001).

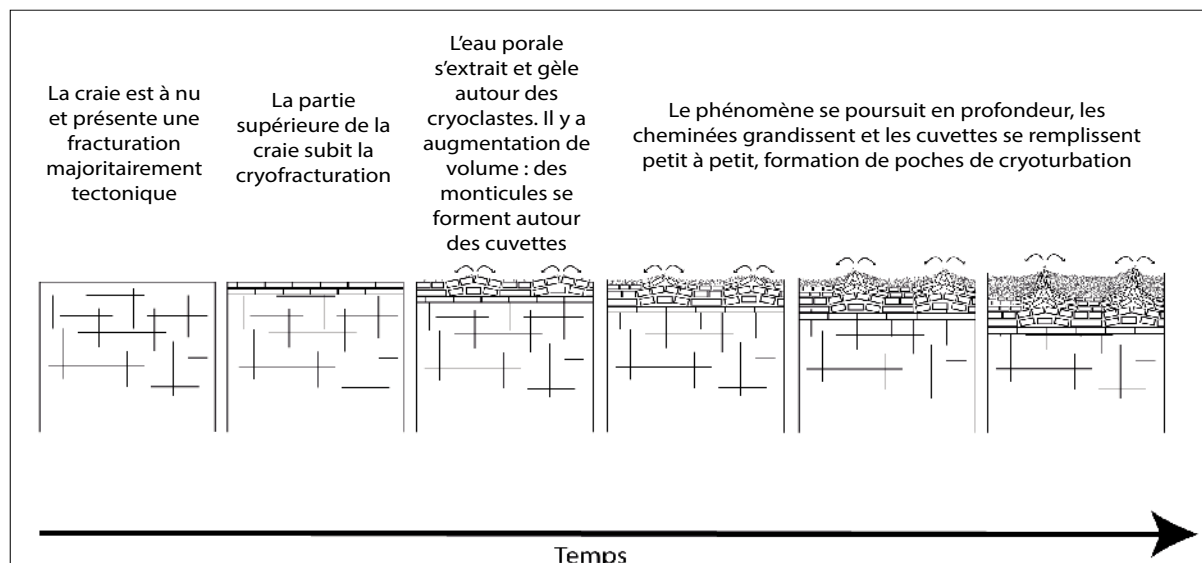


Figure I-10. Formation des poches de cryoturbation d'après (Laurain, Marre et Guérin 1997).

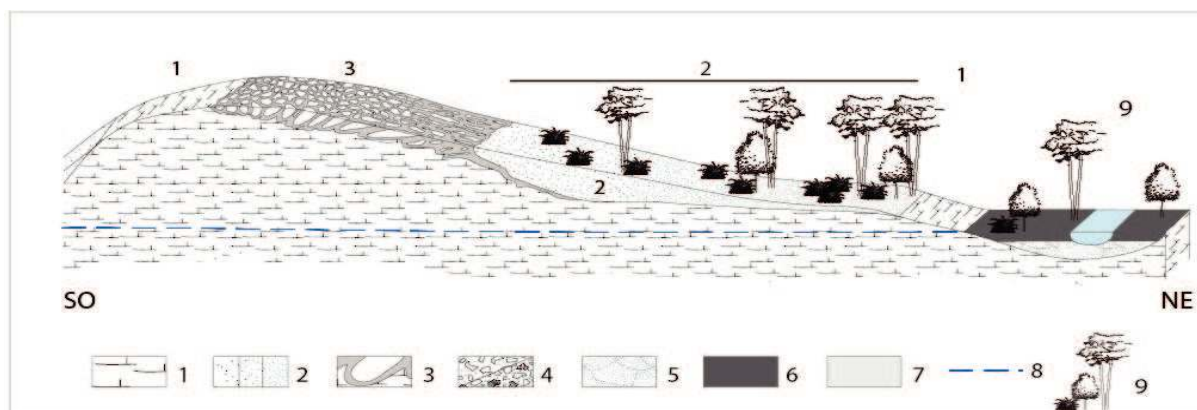


Figure I-11. Évolution des gélifracts de la craie en fonction de leur position sur le versant d'après Laurain *et al.* (1995) modifié in Devos *et al* (sous presse). 1. Craie ; 2. Graveluches grossières à fines ; 3. Sols polygonaux ; 4. Remblais et déblais hétérométriques ; 5. Remplissage alluvial tardiglaciaire ; 6. Alluvions holocènes ; 7. Rendosol ; 8. Surface piézométrique ; 9. Végétation.

### **Les formations colluviales périglaciaires : les dépôts de pentes des plateaux cénozoïques**

Les pentes du revers de cuesta et des vallées ont été au cours des périodes du Quaternaire soumises à l'action du froid (cryoturbation et cryofracturation) combiné aux processus de pentes. Au cours de cette période, les matériaux qui composent ces pentes ont donc évolué sous la forme de colluvions sur l'ensemble du talus de la Côte d'Île-de-France (Laurain *et al.* 1976 ; Laurain *et al.* 1981 ; Laurain 1985). La nature de ces dépôts est variable et dépend essentiellement de la composition du versant et des formations susceptibles de les approvisionner. De manière générale, les colluvions sont enrichies de fragments de roches dures (meulières, calcaires, grès...) et peuvent être emballées dans une matrice constituée de sables et de marnes. Ces formations peuvent également remobiliser des dépôts alluviaux antérieurs, contribuant au façonnement d'éléments polygéniques à tendance alluvio-colluviale (Campy et Macaire 2005).

### **Les dépôts Loessiques :**

Les loess, bien que d'extension réduite en Champagne, sont assez répandus dans le secteur de Reims jusqu'à Rethel (Ballif *et al.* 1995). Les formations loessiques sont composées de limons décalcifiés et enrichis en argiles, de couleur brun-rouge à jaune (Laurain *et al.* 1976 ; 1981 ; Laurain 1985). Ce sont des dépôts continentaux fins à très fins (de granulométrie inférieure à 62.5 µm), issus de la remobilisation par déflation éolienne de roches préexistantes en contextes périglaciaires (Bordes, 1954).

### **Les alluvions :**

Au cours de leurs évolutions, les cours d'eau ont induit la mise en place d'alluvions. Ces dépôts sont aujourd'hui préservés sous la forme de terrasses alluviales dont l'altitude et la composition reflètent en partie l'ancienneté. Les alluvions récentes de la Vesle et des cours d'eau affluents sont majoritairement constituées de rares graviers et de sables crayeux qui peuvent localement être enrichis en limons calcaires grâce aux apports colluvionnaires (Laurain *et al.* 1981). Dans les zones humides développées en aval de la ville se forment des dépôts tourbeux (Laurain *et al.* 1976). La rencontre avec des dépôts tourbeux est par ailleurs régulièrement signalée lors de travaux recouvrant des alluvions anciennes dans les talwegs entourant la ville (Ballif *et al.* 1995 ; Linoir 2014).

Les dépôts alluvionnaires sont de nature majoritairement calcaire, représentés par des graviers et des sables. Les éléments de nature crayeuse sont bien représentés malgré la très mauvaise aptitude de ce matériau au transport par l'eau liquide. Ils sont issus de la reprise par le cours d'eau de cryoclastes de craie remobilisée depuis les formations colluvionnaires (Ballif *et al.* 1995 ; Coulon 2011). La présence d'éléments issus des calcaires lutétiens ou encore des fragments roulés de silex noirs sont également nombreux au sein de ces dépôts alluvionnaires. Ils peuvent être issus de la remobilisation d'alluvions anciennes ou de dépôts de colluvions (grèzes ou dépôts de pentes issus du démantèlement de la cuesta).

## 2.5. Les calcaires du Lutétien

Comme déjà dit précédemment (page I-41), les calcaires du Lutétien occupent une place prépondérante dans les matériaux de construction de l'Antiquité utilisés à *Durocortorum*. Cependant, leur sédimentologie est, dans le détail, très complexe qui amène donc à leur accorder un développement particulier.

Le Lutétien est l'un des étages de l'Éocène les plus étudiés et des plus documentés en France. Cette profusion d'information est liée d'une part à l'utilisation de sa pierre pour la construction de Paris et d'autre part à la précocité des explorations géologiques pour localiser cette ressource (Gély 2009). En effet, la raréfaction des pierres pour la construction dans la région de Paris pendant le XVII<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle, en plus d'un abondant et remarquable contenu paléontologique ont rapidement attiré l'attention des savants de l'époque. L'étage Lutétien est créé en 1883 par A. De Lapparent avec Paris comme stratotype (« *Lutetia* » ; Gély 2009), et depuis plusieurs auteurs ont établi des subdivisions au sein de ses formations (historique des subdivisions du Lutétien en Annexe 3, page 431 ; Abrard 1925 ; Blondeau *et al.* 1965 ; Blondeau 1966 ; Gély 1996 ; De Wever *et al.* 2002 ; Gély 2016). Désormais, Le stratotype est officiellement défini dans l'Oise via les affleurements de Saint-Leu-d'Esserent et de Saint-Waast-lès-Mello (Merle 2008).

Tout comme l'avait fait Turmel (2014) dans sa thèse, nous avons choisi de nous référer principalement à Gély (1996 ; 2009 ; 2016), à la fois pour le lien maintenu entre les faciès et leur utilisation comme matériaux de construction, mais également par souci de continuité avec les études antérieures thématiquement proches.

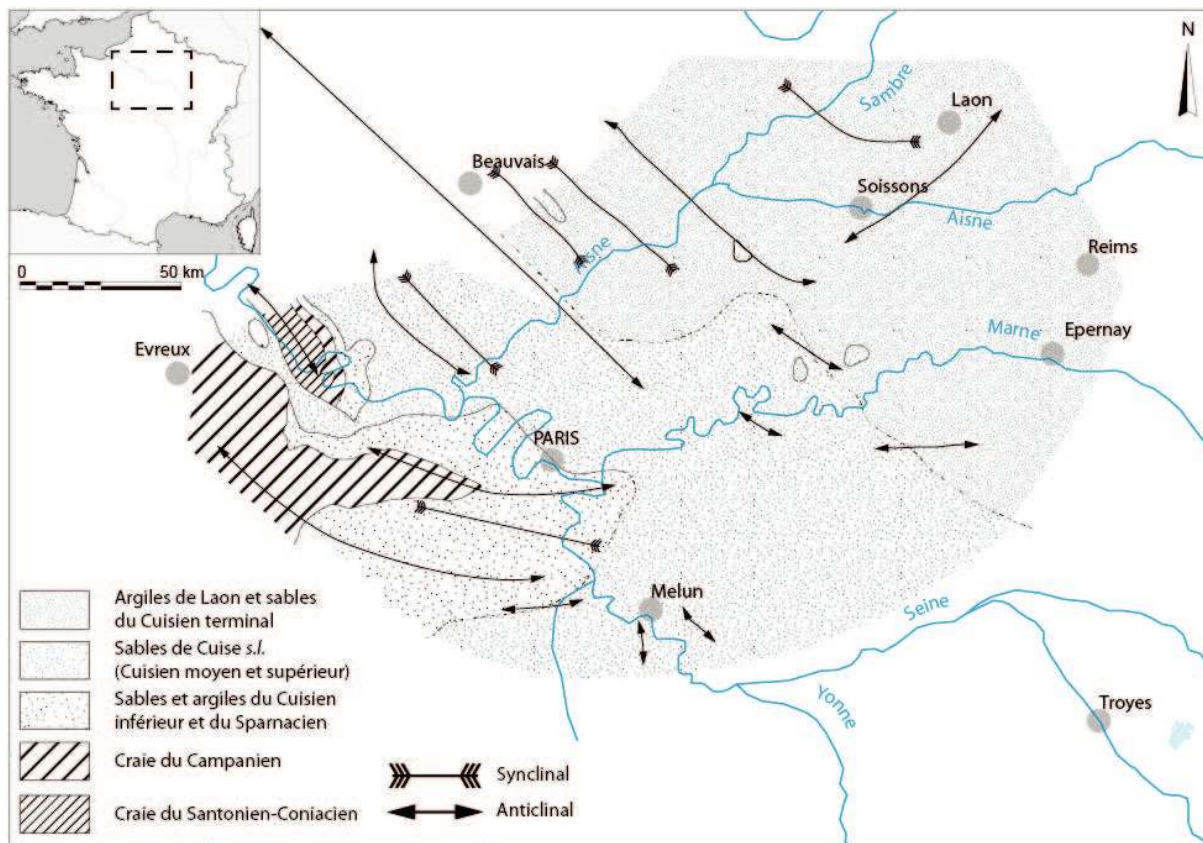


Figure I-12. Carte paléogéographique de la surface d'érosion ante Lutétien (Gély 2009).

Si les dépôts lutétiens revêtent une grande importance pour ce travail, c'est principalement en raison de son exploitation intensive en tant que géomatériaux (pour les époques médiévale et moderne (Devos *et al.* 2008). Ces calcaires arment les plateaux de la Côte d'île de France depuis Reims jusque dans le Laonnois en passant par le Soissonnais, mais ils sont recouverts par des terrains de faible intérêt géotechnique, ce qui a conditionné leurs modes d'exploitation essentiellement en carrière souterraine ouverte à partir de front de taille aérien (Bessac *et al.* 2020). Cependant, à ce jour, il n'est pas possible faute d'argument, de préciser si ce mode d'exploitation était également pratiqué au cours de l'antiquité, mais juste de souligner que les carrières romaines semblent essentiellement à ciel ouvert (Adam 1984).

L'Yprésien prend fin avec une nette tendance régressive, enregistrée par les Argiles de Laon ou les Grès de Belleu/Bazoches-sur-Vesle. Puis, suite à une émergence se forme une surface d'érosion qui façonne la topographie à l'échelle du Bassin. C'est sur cette discontinuité que la mer va progressivement envahir le Bassin pour la première transgression de l'étage Lutétien. Mais les reliefs générés par le soulèvement et les déformations du Bassin sous l'influence de la compression pyrénéenne (Gély 1996 ; 2016) vont induire une forte diachronie de l'enregistrement sédimentaire liée à ce nouvel envahissement marin (Figure I-12).

Pendant toute la durée du Lutétien, la région de Reims présentera des paléogéographies contrastées, avec à l'est, au niveau de Reims ou de Damery, des rivages et des faciès peu profonds ou continentaux, différents de ceux de mers plus franches à l'ouest, vers Soissons et Laon (Devos *et al.* 2008 ; Fronteau *et al.* 2008). Cette spécificité, probablement liée à la présence de seuils bathymétriques dans les environs de Reims, détermine également une grande variabilité spatiale des faciès de pierres et de fortes disparités de leurs propriétés géotechniques (Fronteau 2000 ; Fronteau *et al.* 2008), multipliant leurs capacités d'emploi dans le patrimoine bâti (Figure I-13 et Figure I-14).

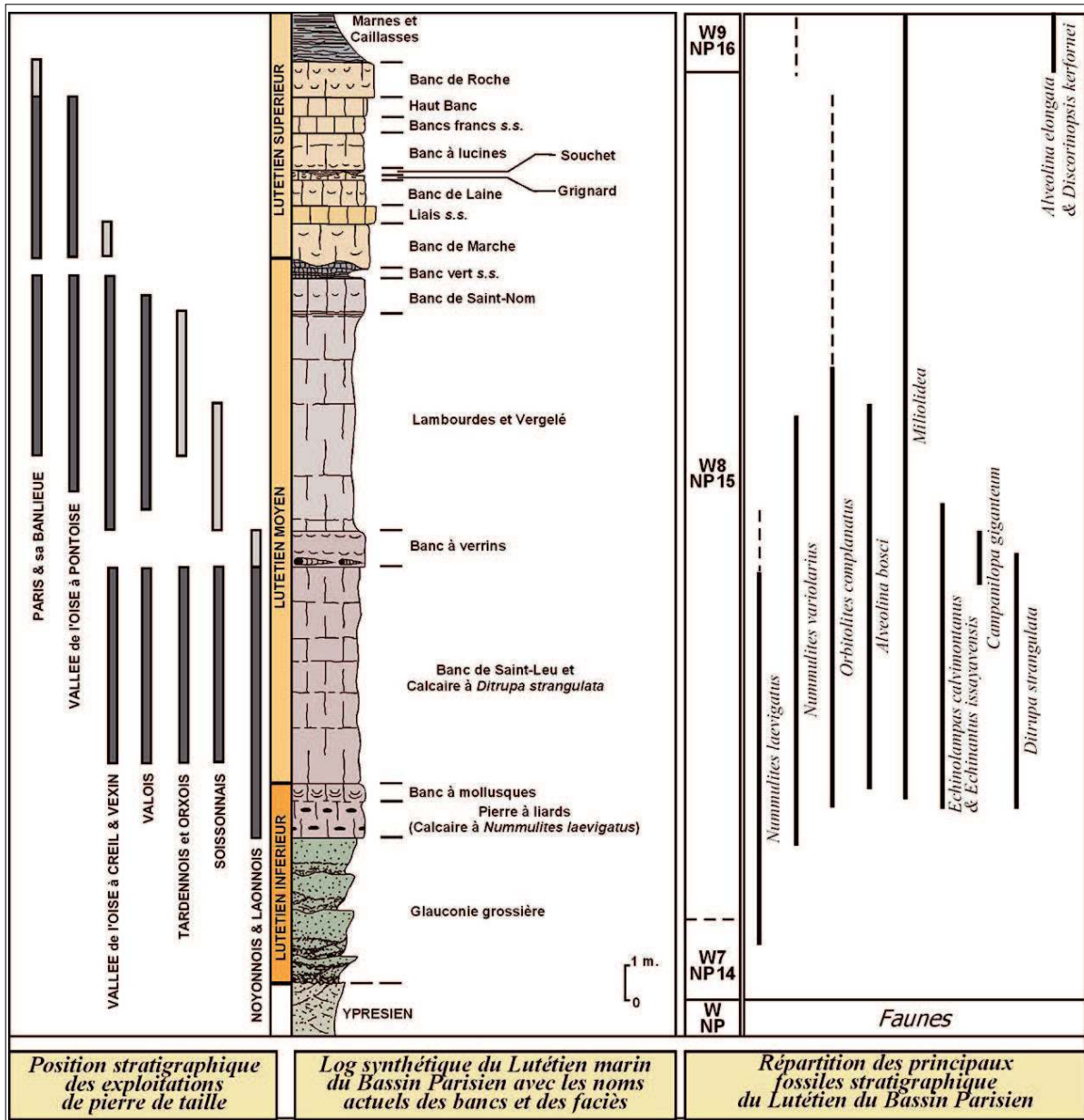


Figure I-13. Synthèse du log stratigraphique du Lutétien (d'après Gély 1996, 2009)



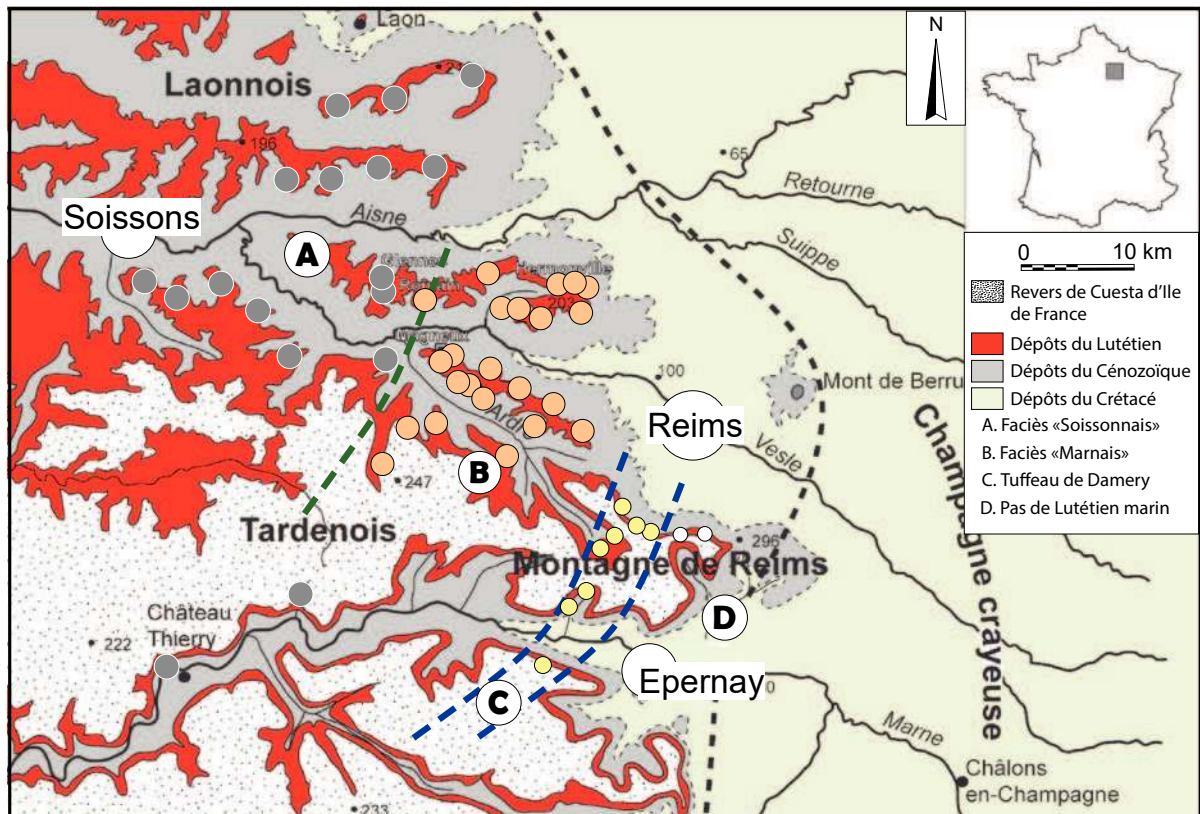


Figure I-14. Variations latérales de faciès dans la région de Reims, depuis les faciès littoraux du tuffeau de Damery jusqu'aux faciès plus distaux du Soissonnais (Fronteau *et al.* 2021).

### 2.5.1. Le cycle eustatique Lutétien inférieur et moyen

La transgression est sensible dès le début de l'étage (Gély 1996 ; 2009 ; 2016) et la mer envahit rapidement le Bassin du nord au sud.

Les premiers sédiments préservés sont ceux de la **Glauconie grossière** (Figure I-13 ; Gély 1996). Ils reposent sur la surface érosive de transgression (Figure I-15). Cette formation, à dominante détritique, se caractérise par des dépôts de sables et à la base de graviers très grossiers, voire parfois des cordons de galets de grès et de silex roulés issus des remaniements des formations sous-jacentes. Ces éléments peuvent se présenter avec une couleur vert sombre en lien avec la présence de glauconite (Merle 2008). Ces sables, outre les nombreux grains de glauconite qu'ils renferment, contiennent de nombreux fossiles avec en particulier de nombreux bryozoaires et polypiers (*Eupsammia* [Balanophyllia] *Trochiformis*), échinodermes (oursins), bivalves (huîtres, *Venericor planicosta*), Gastéropodes (*Haustator*) et une multitude d'animaux fouisseurs. Ces dépôts livrent également des *Nummulites Laevigatus*, grands foraminifères benthiques à valeur stratigraphique (Cohen *et al.* 2013). Localement cette formation peut être lithifiée sous la forme d'un grès grossier à ciment calcaire ou d'un calcaire gréseux (Gély 1996).

Les dépôts de cette formation telle qu'elle est définie dans le stratotype (Merle 2008) n'existent pas dans les environs de Reims où elle ne constitue qu'un dépôt condensé, épais de vingt à cinquante centimètres, comprenant à la base un niveau conglomératique coquillier, puis un sable glauconieux friable à *Nummulites Planulatus* yprésiennes remaniés. Cette formation atteint des épaisseurs notables vers le nord-ouest, à l'approche de la vallée de l'Aisne (Gély 2009) et des plateaux du Soissonnais (Laurain *et al.* 1976).

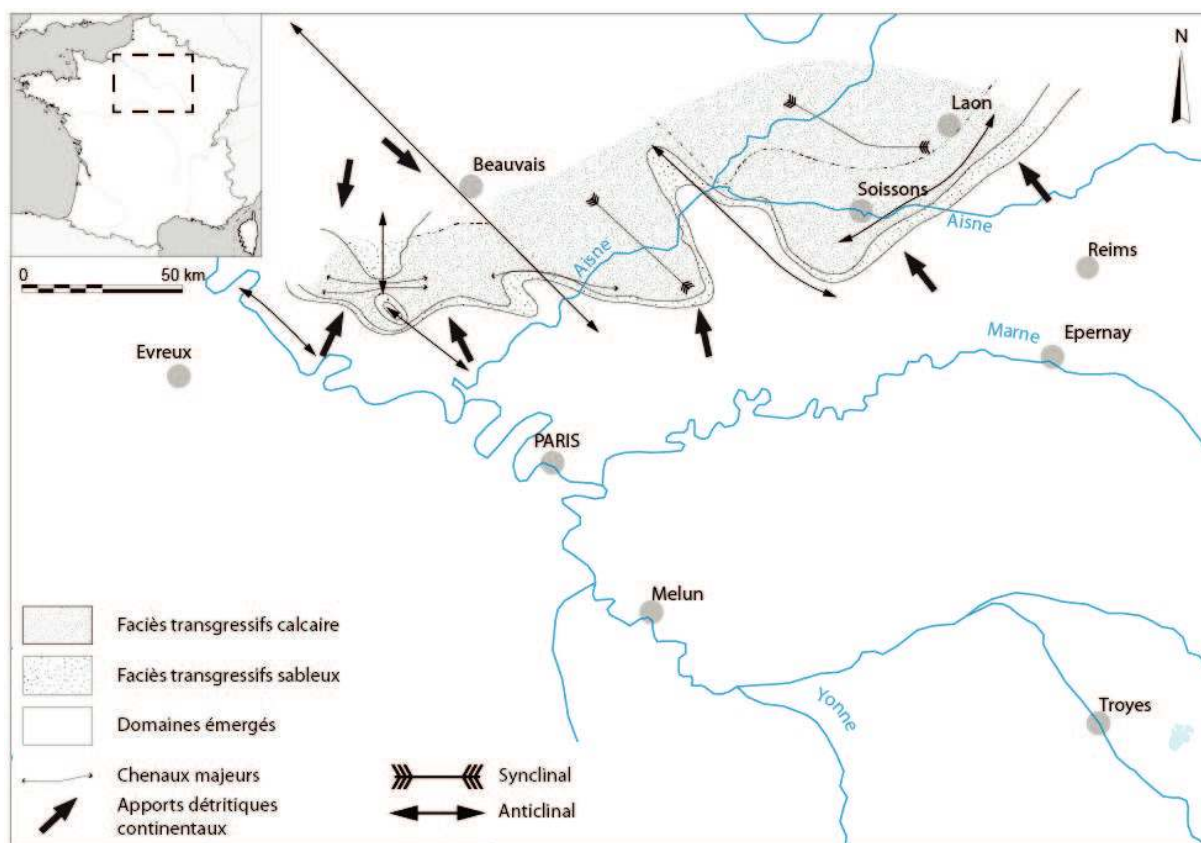


Figure I-15. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant la Glauconie grossière (d'après Gély 2009).

Alors que la transgression progresse vers le sud du Bassin, les bathymétries augmentent et les conditions deviennent très favorables au développement massif des *Nummulites Laevigatus*. La série lutétienne se poursuit par la **Pierre à Liards** (Figure I-13 et Figure I-16). Il s'agit d'un calcaire sableux, très glauconieux et extrêmement riche en *N. Laevigatus* qui sont parfois jointives.

Absente des alentours de Reims, elle ne s'observe vers l'ouest qu'à partir de Fismes. Cette formation est en revanche très bien représentée dans le Soissonnais et le Laonnois et surtout dans le Noyonnais où elle peut atteindre des épaisseurs de 2 à 3 m (carrières de Grandrû, Oise). Les *Nummulites laevigatus* sont cependant trouvées de manière éparse dans le premier banc véritablement calcaire de la série lutétienne du Massif de Saint-Thierry (Devos *et al.* 2008). La stratonomie des bancs de calcaires à rares *N. Laevigatus* observés dans le Massif Saint-Thierry limite très fortement la taille des moellons extractibles (Laurain, Guérin et Barta 1976 ; Turmel 2014).

L'association de ces deux premières formations représente les dépôts du lutétien inférieur (Gély 1996 ; 2009).

Les premiers dépôts attribués au Lutétien moyen consistent en des bancs de calcaire tendre, légèrement glauconieux et très riches en bivalves et débris d'algues calcaires, le **Banc à mollusques**. Ces dépôts se mettent en place quand la mer gagne progressivement le sud du Bassin (Figure I-17) alors que paradoxalement sa bathymétrie moyenne se réduit (Gély 2016). Ce banc est directement surmonté par les bancs de **Calcaires à *Ditrupe Strangulata*** parfois également désigné sous le nom de **Banc de Saint-Leu** (du nom de la localité de référence du

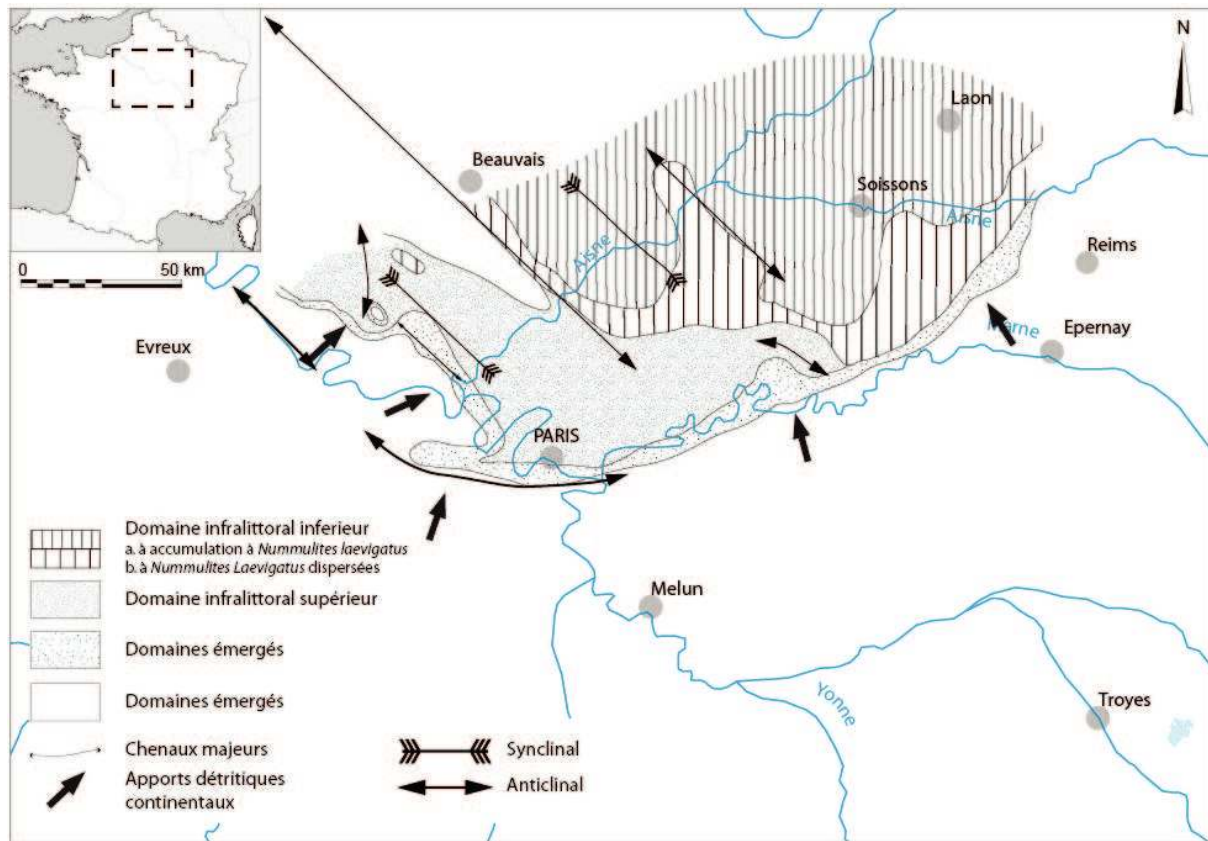


Figure I-16. Carte des paléoenvironnements de la mer lutétienne pendant le dépôt de la « Pierre à Liards » (d'après Gély 2009)

néostratotype situé dans l'Oise). Cette formation, très riche en fossiles et en particuliers de *Ditrupa Strangulata*, (tubes de vers annélides endobenthiques dont l'accumulation peut aller jusqu'à la formation de « véritables petits récifs » ; Gély 2009). Les *N. Laevigatus* sont toujours présentes, associées à d'autres espèces de Nummulites comme *N. Variolarius*. Les foraminifères sont très nombreux avec d'abondants *Millioidae* et les premières occurrences d'*Orbitolites Complanatus* (excellent fossile marqueur du Lutétien). De nombreux échinodermes sont également utilisés comme fossiles biostratigraphiques pour cette période : *Echinolampas Calvimontana* et *Echinantus Issyavensis*.

Dans la région de Reims là encore, ces calcaires présentent un faciès différent. En effet, ils se présentent sous la forme de petits bancs irréguliers d'un calcaire gréseux à empreintes ou coquilles de bivalves dans lesquels les *D. Strangulata* sont peu abondants comparativement à l'expression de ce calcaire dans le Soissonnais et le Laonnois. À partir de Fismes/Glennes, les *Ditrupas* vont devenir de plus en plus abondants et seront associés à des fragments de tests d'échinodermes. Parfois légèrement gréseux en raison de la proximité des apports terrigènes en provenance des littoraux, près de Reims, les bancs sont très irréguliers et parfois discontinus à la différence du Soissonnais et du Laonnois (Laurain 1985 ; Laurain *et al.* 1976 ; Fronteau *et al.* 2014). Ces bancs calcaires alternent avec des interbancs plus tendres imparfaitement lithifiés. Les calcaires à *Ditrupa* atteignent jusqu'à 5 m de puissance et ont fourni de grandes quantités de moellons grâce à de nombreuses exploitations à ciel ouvert réparties sur le Massif Saint-Thierry et dans la vallée de la Vesle (Trigny, Hermonville, Prouilly...).

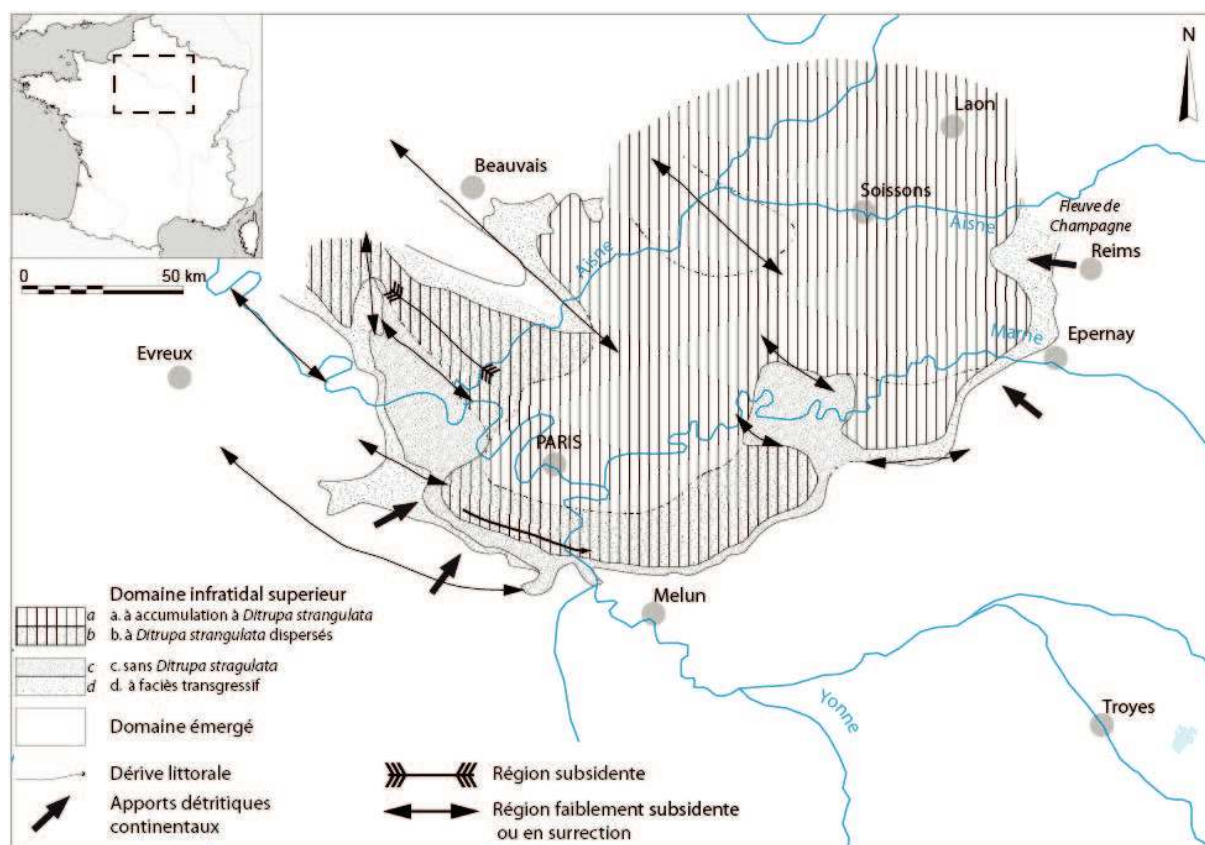


Figure I-17. Carte des paléoenvironnements de la mer lutétienne pendant la sédimentation des « Calcaires à *Ditrupa strangulata* » (d'après Gély 2009).

La sédimentation du Lutétien moyen se poursuit dans un environnement où la mer est bien installée au sein du Bassin de Paris et le maximum de la transgression est alors atteint (Figure I-17 ; Gély 2016). En effet cette dernière atteint des profondeurs estimées entre 20 et 30 mètres ne dépassant pas les profondeurs infratidales supérieures. Les fonds se tapissent alors de grands herbiers qui abritent de nombreux organismes dont de grands foraminifères comme les *Orbitolites complanatus* ou les *Alveolina*. Se forment alors des bancs de calcaires fins dont la dénomination des carriers a été conservée : **Banc à vérins, Lambourdes et Vergelés**. La terminologie de Banc à vérins renvoie à la présence des restes fossilisés du *Campanile (Cerithium) Giganteum*, dont les empreintes et les moules internes souvent préservés forment de grandes vis pluridécimétriques. L'important développement ponctuel des populations de ce mollusque a permis de définir ce niveau comme niveau repère à l'échelle de tout le bassin. Les marges du bassin voient se déposer d'impressionnants faluns (Fleury-la-Rivière, Damery ou encore Grignon en sont des exemples célèbres) dont les contenus paléontologiques sont de renommée mondiale (Merle 2008 ; Lozouet 2014).

Le banc à vérins s'étend là encore jusque dans la région rémoise, immédiatement au-dessus des calcaires à *D. strangulata*. Les empreintes de *Campanile (Cerithium) giganteum* y sont cependant plus discrètes au sein des exploitations à ciel ouvert. Cependant les dépôts sableux littoraux dits du Tuffeau de Damery, faiblement indurés, en livrent en grande quantité, comme ceux visibles désormais au sein de la Cave aux coquillages à Fleury-la-Rivière.

Au-dessus de ce niveau repère, la quantité de *Ditrupa* décroît progressivement pour disparaître totalement à mesure que le niveau marin diminue et que les premiers signes d'une régression marine s'affirment. Le sommet du Banc à vérins enregistre les premiers signes de

dessalures du milieu à proximité des rivages et se déposent alors les calcaires biodétritiques tendres à milioles et *O. complanatus* des bancs dits de « **Lambourdes** » ou de « **Vergelés** ». Dans le centre du bassin, dans l’Oise et jusque dans le Soissonnais, ces niveaux prennent l’appellation de « **Bancs francs** » et de « **Banc Royal** » (Figure I-18 ; Merle 2008 ; Devos *et al.* 2008).

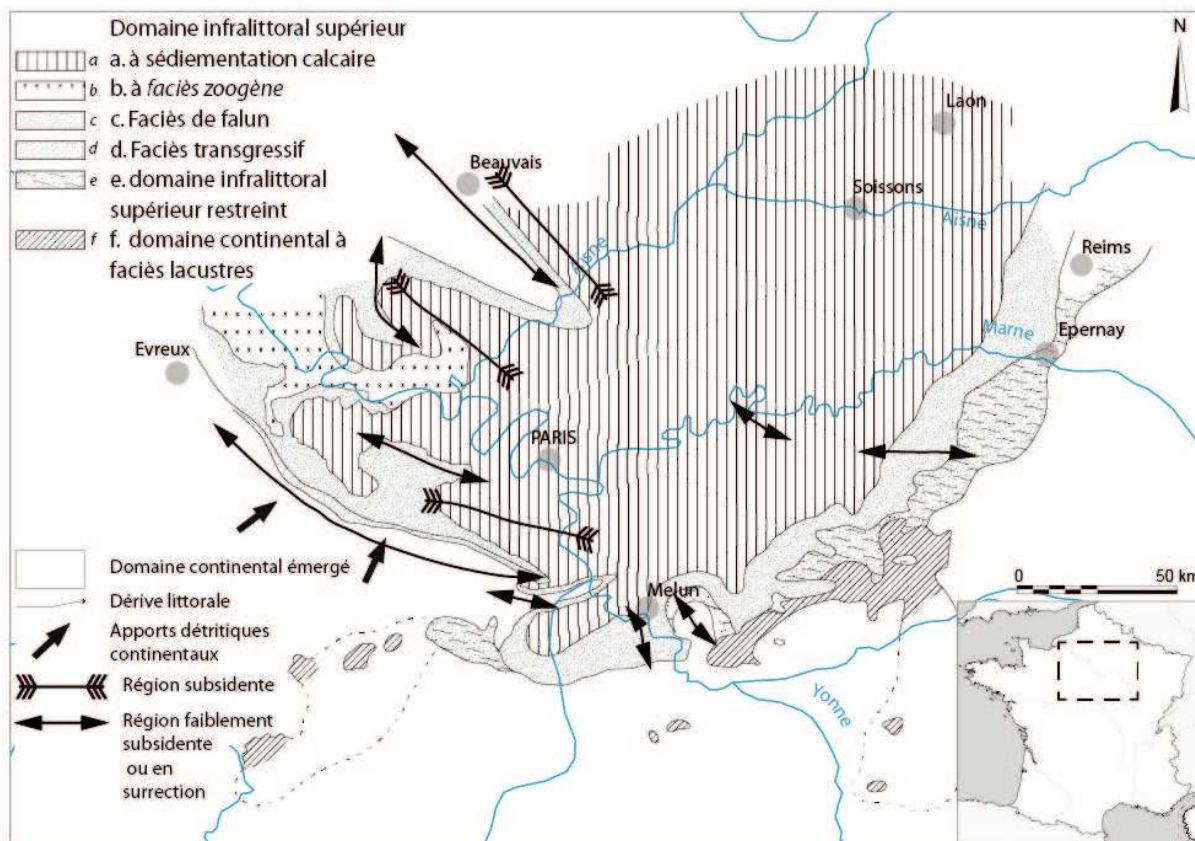


Figure I-18. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant la sédimentation du « Banc à vérens » (d’après Gély 2009).

L’équivalent latéral des **Lambourdes** et **Vergelés** dans le pays rémois sont représentés par les calcaires à Milioles et à *O. complanatus*. Ces niveaux furent abondamment exploités dans la région de Fismes et en particulier à Courville sous le nom de « **Liais et la Roche de Courville** ». Ces calcaires présentent un faciès fin légèrement roux (Laurain, Guérin et Barta 1976 ; Fronteau 2000 ; Fronteau *et al.* 2008). L’ensemble de cette formation peut atteindre 4 m de puissance composée de bancs de 30 à 60 cm.

Les caractères lagunaires des rivages s’affirment de plus en plus, ce qui se traduit notamment par la présence de débris de végétaux flottés et d’un fossile caractéristique *Avicularium aviculare*, un mollusque bivalves à coquille quasiment triangulaire. Le Lutétien moyen prend fin avec l’installation d’environnements lagunaires et lacustres.

Ces dépôts marquent la limite entre les formations du Lutétien moyen et ceux du Lutétien supérieur. Dans la région de Reims, cette limite est matérialisée par la présence de « **calcaires à plantes** », marqués par l’existence de grands herbiers à Posidonies dont la présence est attestée par les nombreuses empreintes qu’ils ont laissées. Ils sont également connus dans le reste du Bassin Parisien et notamment le Valois où ils sont particulièrement spectaculaires. Ces dépôts sont également marqués par l’existence d’accidents siliceux de type chailles (silicification diffuse de couleur brune ou noire ; Figure I-19 ; Laurain *et al.* 1976).

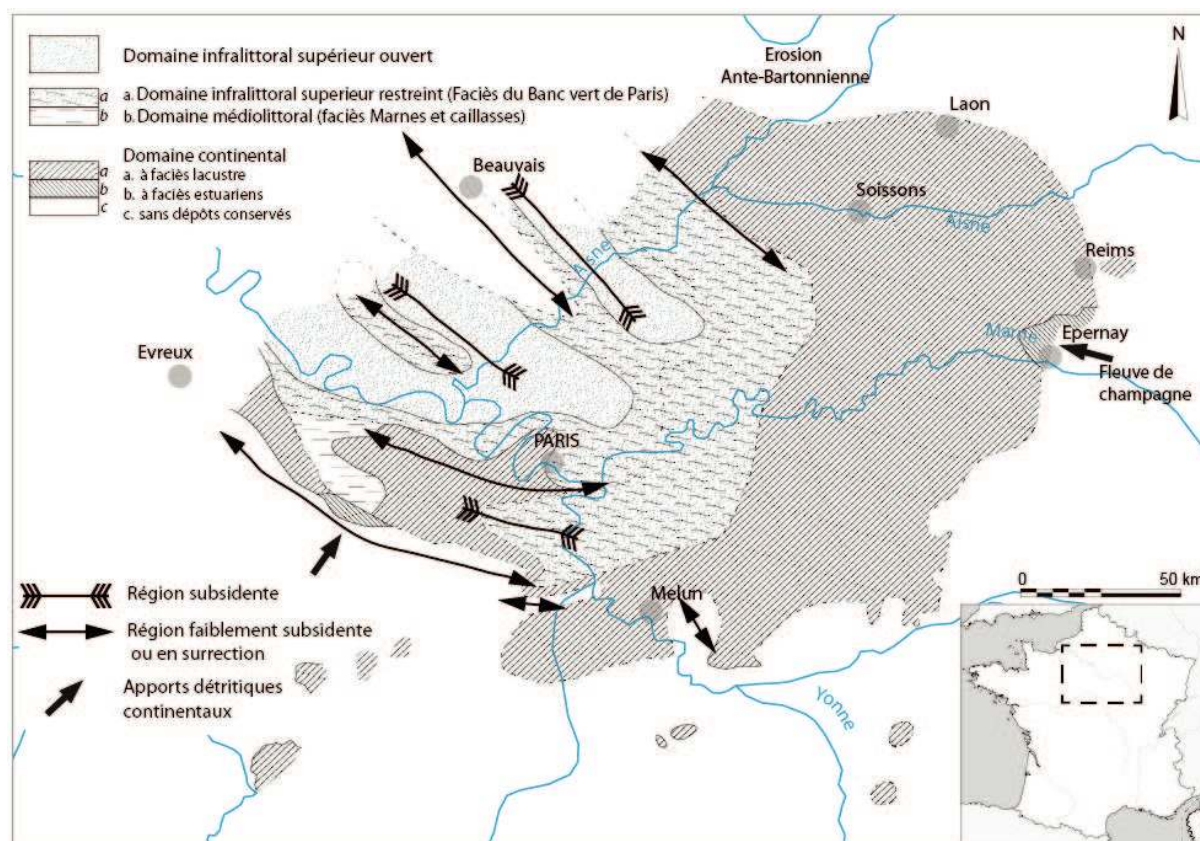


Figure I-19. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant le « banc vert » (d'après Gély 2009).

### 2.5.2. Les cycles du Lutétien supérieur

Au Lutétien supérieur, une mer peu profonde (quelques mètres seulement de bathymétrie moyenne) envahit timidement le Bassin depuis le nord-ouest et reforme le golfe parisien (Figure I-20). Ses dépôts sont caractérisés par des calcaires à *O. complanatus* ou des miliolites, auxquels succèdent rapidement des « **Calcaires à cérithes** ». La mer très peu profonde est alors sillonnée de chenaux de marée séparant des herbiers où s'épanouissent miliolites et cérithes ainsi que des Leucines (petits lamellibranches endobenthiques). Les dépôts de cet environnement présentent également des caractéristiques de variations de salinité avec l'apparition de faunes inféodées à des eaux saumâtres ou tolérant des variations importantes de salinité (Hydrobies et Potamides). En rivage du golfe parisien se dépose alors un **calcaire à *Potamides lapidum*** aux influences laguno-lacustres très affirmées. L'installation locale de conditions lacustres permet le dépôt de **calcaires micritiques à Limnées**.

Les dépôts associés à cet environnement sont constitués de calcaires à miliolites, *O. complanatus* et cérithes, parfois très granulaires (jusqu'à être presque exclusivement constitués de miliolites cimentées : faciès de miliolites). Ces calcaires sont organisés en assises répétées à plusieurs reprises et éventuellement séparées de sables glauconieux. Vers Reims, ces calcaires se présentent sous la forme de plusieurs séquences de bancs de 30 à 80 cm, emballés dans des marnes noires, vertes puis blanches, comme encore observables à Courville. On attribue leur formation à des incursions marines temporaires dans des environnements laguno-lacustres littoraux. Ces dépôts comprennent aussi un ou plusieurs bancs métriques d'argiles vertes très caractéristiques, à Palygorskite, qui se retrouveront jusqu'en Montagne de Reims (sondage de Ludes, coupe de Mailly Champagne). Ces formations correspondent aux « **bancs de Liais** »

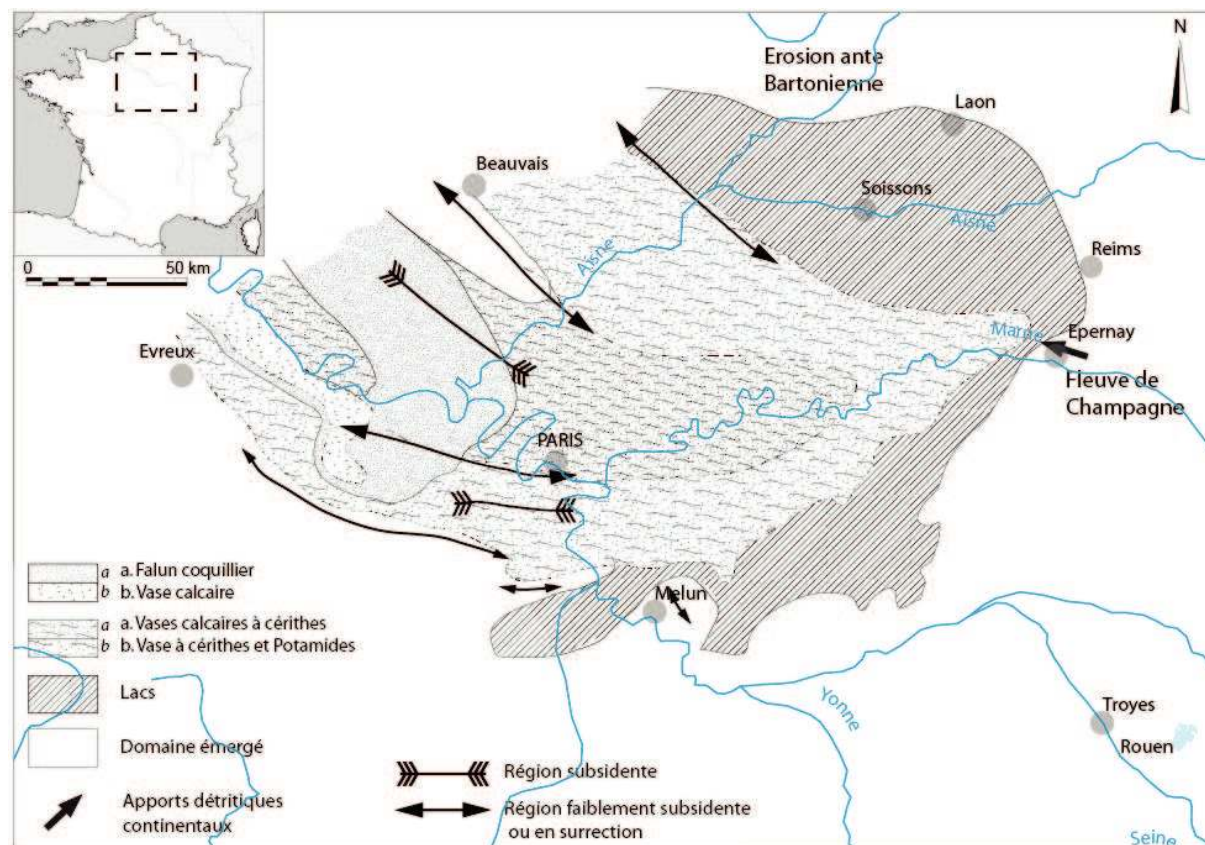


Figure I-20. Carte paléogéographique de la mer lutétienne au cours du début du Lutétien supérieur (d'après Gély 2009).

et aux « **bancs de roches** » *sensu stricto*. Mais ils sont plus généralement regroupés sous l'appellation de « **Calcaires à cérithes** » pour leur concentration, parfois très importante, d'empreintes de ce petit gastéropode.

Le dernier cycle de transgression-régression n'envahit que le nord-est du bassin depuis l'Atlantique par la Manche, avec une extension maximale qui peine à atteindre Paris (Figure I-21) il appartient, comme le cycle précédent au Lutétien supérieur. Ce cycle sédimentaire est enregistré par le dépôt d'un unique banc calcaire à miliolites, sableux, dolomitique et localement siliceux ou encore par un sable calcaire riche en miliolites et *Alveolina* qui caractérisent les « **Faluns de Foulangues** ». Ces deux dépôts montrent le retour de l'influence marine dans le Bassin, mais ils n'ont été observés que très ponctuellement.

Le paléoenvironnement évolue ensuite rapidement vers des conditions lagunaires enregistrées dans les cortèges de dépôts évaporitiques de la formation des **Marnes et Caillasses**. Ces derniers, comme leur nom l'indique, sont constitués de marnes, de calcaires argileux et de calcaires sublithographiques, parfois à cristallisations de gypse. Ces dépôts continentaux peuvent contenir en proportion variable des éléments reproducteurs de plantes comme les charophytes (gyrogonites de Characées, ex oogones de Chara) et être alors considérés comme de véritables calcaires lacustres. Le centre du bassin connaît quant à lui des conditions nettement évaporitiques avec une accumulation maximale de près de 15 m d'épaisseur de gypse sur les flancs de l'anticlinal de Meudon (Gély 2009).

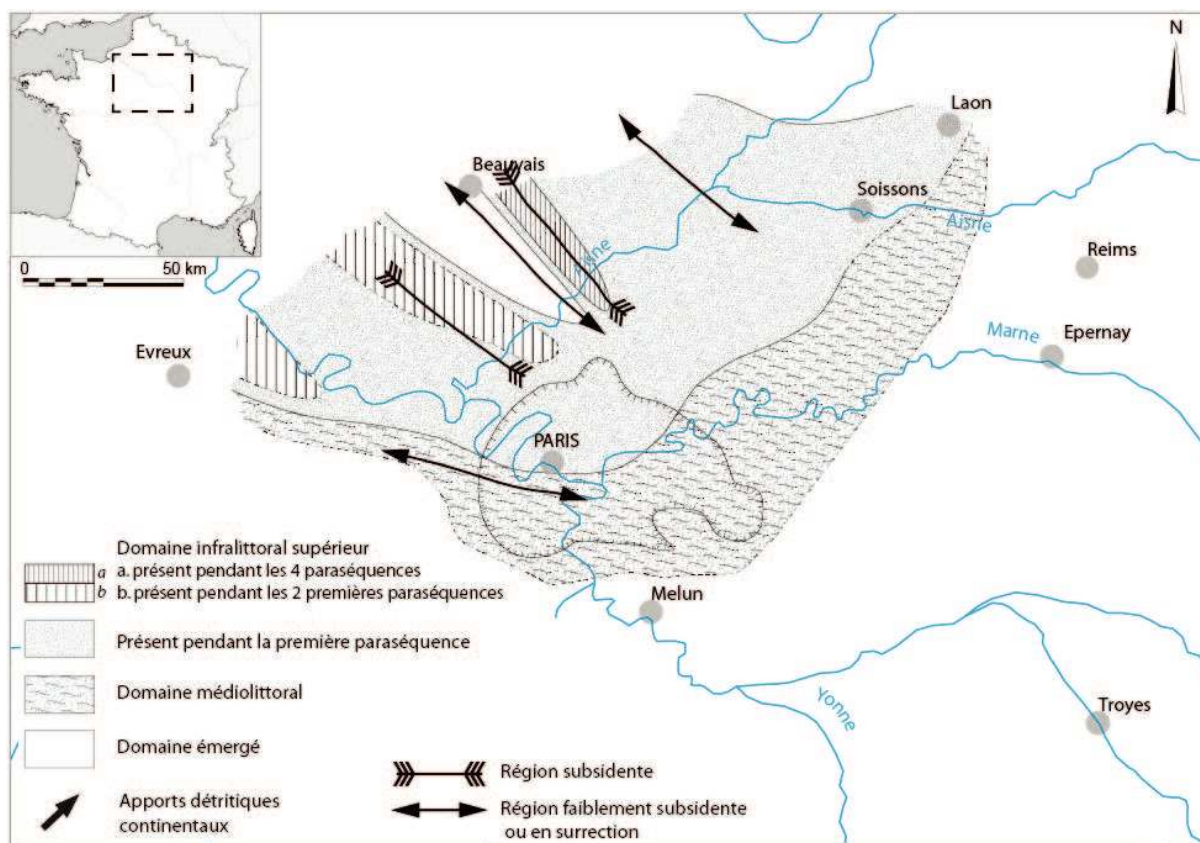


Figure I-21. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant le dépôt des Marnes et Caillasses (Gély 2009).

La formation des Marnes et Caillasses dans le Tardenois scelle les dépôts du Lutétien et fait une transition avec le Bartonien. Son épaisseur peut aller jusqu'à 40 m d'une alternance de calcaires sublithographiques organisés en bancs d'épaisseur décimétrique et de marnes grisâtres à verdâtre (Laurain, Guérin et Barta 1976). Ils ne contiennent que très peu de faunes à l'exception notable de rares tests de planorbes et de limnées associés à des gyrogonites de Characées. Le caractère évaporitique des dépôts de cette période se retrouve également au travers de la présence de pseudomorphoses de gypses. En Montagne de Reims, cette formation est représentée par des dépôts plus hétérogènes avec de nombreuses variations latérales de faciès, ainsi que par un paléosol à pseudogleys (Courtehoux 1968).

### 2.5.3. La disparité régionale des dépôts du Lutétien

Les cartes paléogéographiques du Lutétien (Figure I-13 à Figure I-21) montrent la position toujours marginale de la région rémoise au cours de ces cycles sédimentaires. Cette position du futur emplacement de la ville se confirme lorsque l'on s'intéresse uniquement à l'évolution du trait de côte au cours du Lutétien (Figure I-22). Le dépôt-centre du bassin progresse vers le sud-ouest à mesure que le bassin est envahi par les eaux marines, mais le trait de côte restera toujours cantonné légèrement à l'ouest de Reims, comme bloqué par un seuil bathymétrique. Les dépôts seront donc soit très franchement à caractères littoraux, soit fortement condensés du fait des plus faibles bathymétries et d'une accommodation réduite. Inversement le Soissonnais et dans une moindre mesure le Tardenois, plus précocement inondés et bénéficiant de bathymétries plus importantes, pourront développer de plus grandes épaisseurs de dépôts avec des caractères différents en lien avec des paléoenvironnements marins mieux exprimés.



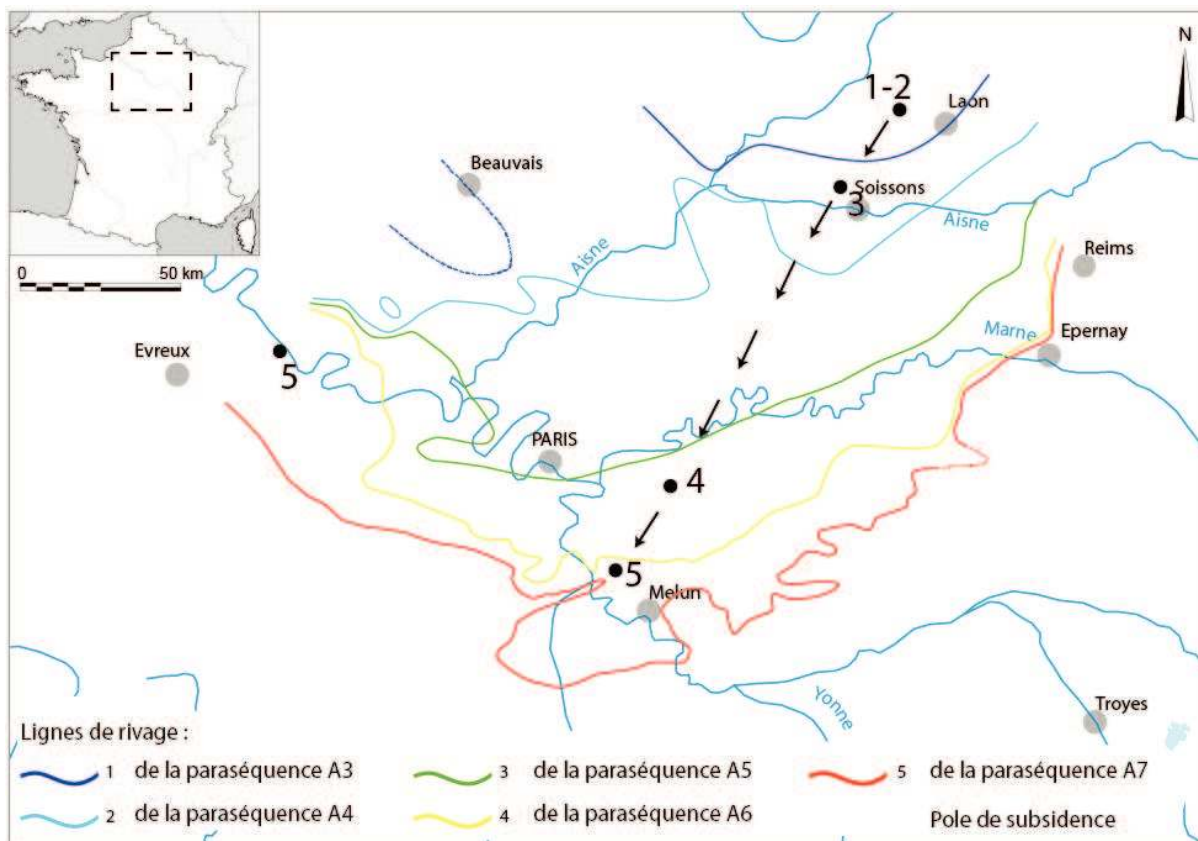
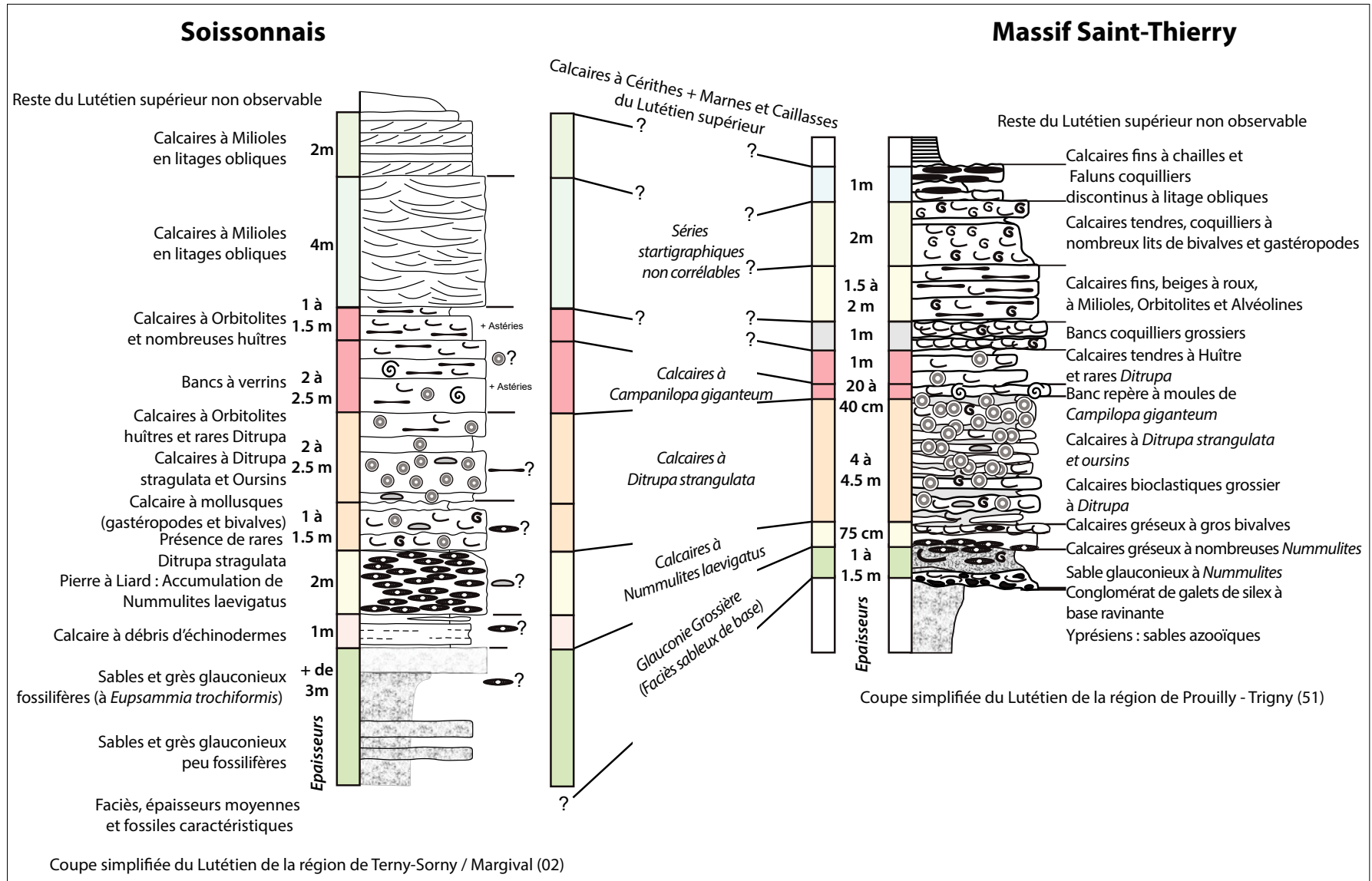


Figure I-22. Carte paléogéographique de l'évolution du trait de côte de la mer lutétienne au cours de la période (modifié d'après Gély 2009).

Ces variations de faciès et surtout de microfaciès ont été étudiées et décrites par Fronteau (2000). Celui-ci met en lien des groupes de faciès différenciés par les natures des ciments microsparitiques et des matrices micritiques des calcaires. Il en résulte que les roches à matrice micritique sont plus fréquentes aux alentours de Reims, tandis que les roches les plus poreuses à ciments microsparitiques sont plus nombreuses vers l'intérieur du Bassin (Oise) et vers le nord (Soissonnais et Laonnois ; Fronteau *et al.* 2008 ; Fronteau *et al.* à paraître).

De nombreux auteurs s'accordent également pour conclure que les calcaires lutétiens des alentours de Reims expriment d'importantes variations latérales de l'épaisseur des bancs et de faciès (Gély 1996 ; 2009 ; Fronteau, *et al.* 2000 ; Devos *et al.* 2008 ; Bollot *et al.* 2014 ; Turmel *et al.* 2014 ; Gély 2016). Cette constatation est appuyée par la corrélation des séries lutétiennes du massif de Saint-Thierry et du Soissonnais (Figure I-23), qui montrent à la fois une réduction d'épaisseur depuis le nord-ouest vers le sud-est, mais aussi une grande condensation de l'épaisseur des formations calcaires (Devos *et al.* 2015). Ces variations seraient principalement liées aux conditions paléogéographiques et paléoenvironnementales particulières induisant la juxtaposition de faciès à influence marine à l'ouest, avec des dépôts à influence littorale et continentale vers l'est.

Figure I-23. Comparaison entre les séries lutéliennes du Massif Saint-Thierry et du Soissonnais (Fronteau, et al., 2021).



### 3. Contexte historique et archéologique

#### 3.1. Fondation et évolution de la cité<sup>10</sup> des Rèmes

##### 3.1.1. La cité des Rèmes

Les *Rèmes* étaient un peuple celte du second âge du Fer (La Tène 450 à 25 avant J.-C.), leur territoire était bordé au nord par celui des Nerviens et des Tongres, à l'est par ceux des Trévires, des Médiomatriques et des Leuques, au sud par ceux des Tricasses et à l'ouest par ceux des Suessions, auxquels ils étaient liés, et par celui des Viromanducs (Figure I-24). Ce territoire s'étendait sur l'emprise actuelle des départements de l'Aisne, des Ardennes, de la Marne, de la Haute-Marne, de la Meuse du Nord et sur une petite partie de la Wallonie (sud de la Belgique ; Figure I-25). À la fin de la période laténienne, la superficie contrôlée par les *Rèmes* est estimée à 16 000 km<sup>2</sup> (Desportes 1983 ; Dessaint 2019).

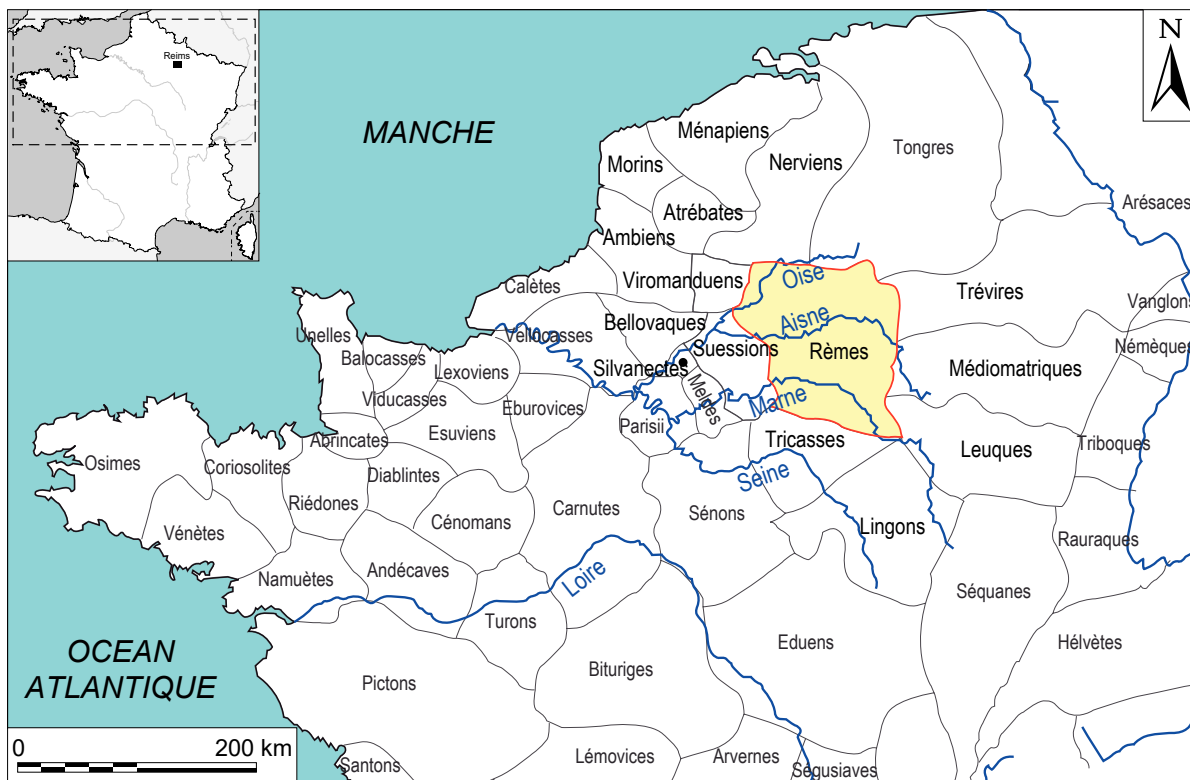


Figure I-24. Localisation de la Cité des *Rèmes*, à l'échelle du nord de la Gaule (Goudineau 1990 ; in Corsiez 2016).

À cette période laténienne (second âge du Fer), plusieurs *oppida* existent déjà sur ce territoire tels que ceux de Condé-sur-Suippe (Le Vieux Reims), de la Cheppe (Camp d'Attila), de Château-Porcien (Plateau de Nandin), de Vouziers (Chestres) et de Saint-Thomas (Le Vieux Laon Lobjois 1964 ; Fichtl 2000). L'*oppidum* de Condé-sur-Suippe est par ailleurs supposé avoir été la capitale des *Rèmes* avant la fondation de *Durocortor* (Neiss 2010). Ce réseau d'*oppida* était complété par un maillage d'agglomérations secondaires localisées le plus souvent aux nœuds de communications (Petit, Mangin et Brunella 1994 ; Fichtl 2000).

10. Cité au sens antique de *civitas* pour définir le territoire occupé par un peuple gaulois (Neiss *et al.* 2015)

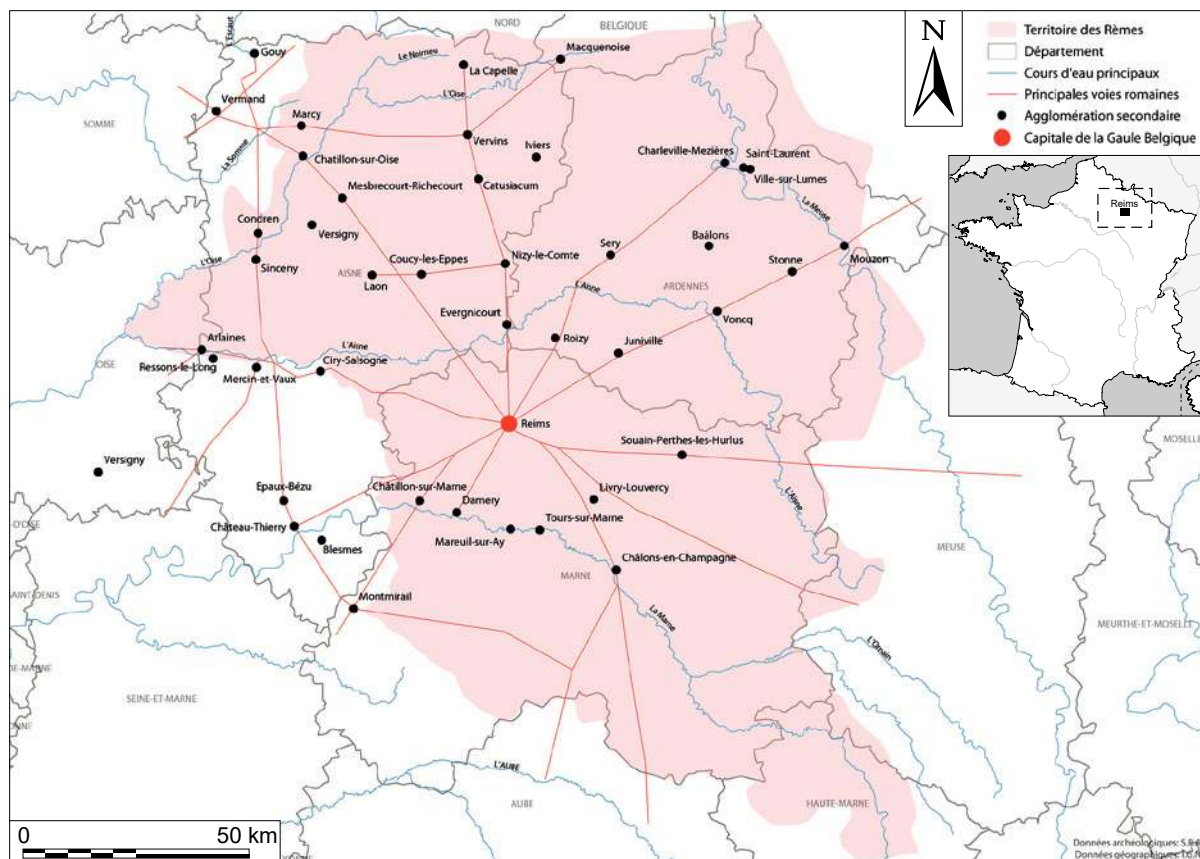


Figure I-25. Emprise restituée du territoire des Rèmes et réseau de transport durant le Haut Empire. Une partie des agglomérations secondaires du territoire des Rèmes et limitrophe sont représentées (d'après Petit, Mangin, Brunella 1994 ; Achard-Corompt et al. 2016 ; Dessaint 2019).

La cité des *Rèmes* et *Durocorter* en particulier prennent rapidement une grande importance stratégique en raison de la concentration sur le site d'un important carrefour de voies de transport, dont un des axes principaux terrestres de la Gaule (Leman 1975 ; Lambot et Casagrande 1996).

### 3.1.2. L'évolution du statut de la cité entre la conquête et la chute de l'Empire

Lors de la Guerre des Gaules entre -58 et -50 avant J.-C., les *Rèmes* ne participent pas à l'alliance des Belges, prennent fait et cause pour César et se placent sous son autorité. Ce choix les émancipe de la relation qui les liait aux Suessions et en fait les principaux alliés de Rome en Gaule Belgique. Lambot et Casagrande (1996) placent l'acte fondateur de la transformation de la société des *Rèmes* dans ce conflit. La prédominance des *Rèmes* dans le nord de la Gaule est donc directement la conséquence de l'alliance à Rome (Fichtl 2004).

Le statut de *Durocorter* comme pôle politique de premier ordre semble bien acquis lorsqu'en 53 avant J.-C. César convoque l'assemblée des Gaules<sup>11</sup> (*De Bello Gallico*) dans la ville. Malgré la rareté des sources, on trouve mention dans Pline l'Ancien de *Durocortorum* avec le statut spécifique de cité fédérée (Pline l'Ancien). Ce statut était le plus avantageux puisque la cité avait conclu un traité avec Rome, conférant aux *Rèmes* autonomie politique et juridique sans tribut en contrepartie.

Sous Auguste, le pouvoir central romain va opter pour une reprise dans les grandes lignes de l'organisation administrative des territoires gaulois (Raepsaet-Charlier 2008). Administrativement, ces territoires se présentent sous la forme de quatre grandes provinces : La Gaule Aquitaine (*Gallia Aquitana*), la Gaule Narbonnaise (*Gallia Narbonensis*), la Gaule Lyonnaise (*Gallia Lugdunensis*) et La Gaule Belgique (*Gallia Belgica*). Cette dernière s'étendait depuis la Seine jusqu'au Rhin avec *Durocortorum* comme capitale. Strabon précisera que le gouverneur romain de la province y avait sa résidence.

Les capitales laténiennes sont remplacées par des agglomérations (ou chefs-lieux) desservies par le réseau viaire modernisé (Raepsaet-Charlier 2008). Les agglomérations fondées seront baptisées en référence à Auguste à l'image de Soissons (*Augusta Suessionum*), Trèves (*Augusta Treverorum*) ou Autun (*Augustodunum*). Pour Raepsaet-Charlier (2008), la transformation du tissu administratif et urbain protohistorique marque la volonté du pouvoir central romain d'intégrer les peuples gaulois dans le cadre institutionnel de l'empire.

À partir de la fin du III<sup>e</sup> siècle après J.-C., ces mêmes provinces seront subdivisées en entités plus petites. Ainsi, la Gaule Belgique sera morcelée en :

- Belgique Première dont *Augusta Treverorum* (Trèves) sera la capitale
- Belgique Seconde dont *Durocortorum* conserve le statut de capitale
- La Séquanais avec *Vesontio* (Besançon) comme capitale

Ainsi, la province de Gaule Belgique puis de Belgique seconde a été gouvernée depuis *Durocortorum*<sup>12</sup> (Wightman 1985 ; Deru et Delmaire 2016) pendant toute l'Antiquité. L'installation de nombreux dignitaires et militaires de haut rang affirme ce statut de même que l'installation de manufactures de fournitures pour les légions (Neiss 2010).

La ville conservera son statut jusqu'à la chute de l'Empire sous les coups de boutoir des populations germaniques (Riché et Le Maître 2003). Les peuples germaniques « barbares » franchissent les *limes* de l'empire et mettent à sac les territoires qu'ils rencontrent jusqu'à Rome :

« *Des nations innombrables et féroces se sont rendues maîtresses de la Gaule. Tout le territoire compris entre les Alpes et les Pyrénées, l'Océan et le Rhin a été dévasté par les Quades, les Vandales, les Sarmates, les Alains, les Gépides, les Hérules, les Saxons, les Burgondes, les Alamans, les Pannoniens... Mayence a été prise et détruite, et des milliers d'hommes égorgés*

11. « ... César ramena son armée, moins les deux cohortes perdues, à *Durocortorum* des *Rèmes* ; ayant convoqué dans cette ville l'assemblée de la Gaule, il entreprit de juger l'affaire de la conjuration des *Sénon*s et des *Carnutes* : *Acco*, qui en avait été l'instigateur, fut condamné à mort et supplicié selon la vieille coutume romaine. » « ... *exercitum Caesar duarum cohortium damno Durocortorum Remorum reducit, concilioque in eum locum Galliae indicto de coniuratione Senonum et Carnutum quaestionem habere instituit ; et de Accone, qui princeps eius consilii fuerat, grauiore sententia pronuntiata more maiorum supplicium sumpsit.* » (César).

12. Pour Delamarre (2018) *Durocortorum* serait un acronyme gaulois composé de *duro*, *duron*, soit : « marché » ou « forum » et dont la seconde partie reste inconnue.

dans l'église. Worms est tombé après un long siège. Reims..., Arras..., Tournai, Spire, Strasbourg, ont été transférées en Germanie ; Aquitaine, Novempopulanie, Lyonnaise, Narbonnaise ont été dévastées » Jérôme de Stridon).

Malgré la présence d'une fortification protégeant la ville, celle-ci est franchie et la ville pillée en 406 par les Vandales (Riché et Le Maître 2003) causant l'épisode de la décapitation de l'évêque de la ville, Saint Nicaise, au seuil de la cathédrale (Figure I-26). En 451, ce sont les Huns qui attaquent et pillent la ville. Les destructions liées aux incendies qui ont dévasté la ville pendant ces épisodes catastrophiques semblent avoir provoqué une modification profonde de la cité (Pichard 2014 ; 2018).



Figure I-26. Dalle située dans l'allée centrale de l'actuelle cathédrale de Reims commémorant la décapitation par les Vandales de l'évêque Saint Nicaise sur le seuil de la première cathédrale.

### 3.2. Les manifestations de la romanisation

Loin de l'image d'une domination rigide et inflexible, la romanisation ou acculturation romaine se manifeste par une progressivité et un étalement dans le temps. Pour Buchsenschutz (2004), le système impérial romain vise en effet à une absorption des populations choisissant d'intégrer la culture romaine (ou la « civilisation ») en tournant le dos à la guerre (et à la « barbarie »). L'aspect le plus pragmatique des premiers temps de la colonisation romaine est surtout la soumission du territoire à l'impôt et non l'affectation de troupes militaires. L'adhésion au mode de vie romain et à ses pratiques tient donc plus lieu d'une assimilation progressive que d'une domination au sens militaire du terme. L'adoption de la culture romaine est d'abord réalisée par l'élite qui y voit principalement un moyen de progrès social et de gain de confort avant d'être intégrée par les autres couches de la société. Pendant longtemps il a été considéré que l'un des principaux facteurs de la romanisation a été porté par les légions vectrices de la *Pax Romana*, et ce principalement par les auteurs contemporains de cette période comme

César<sup>13</sup>, Tite-Live<sup>14</sup> Tacite<sup>15</sup>... Cet aspect est résumé par les principes de l'impérialisme romain qui veulent qu'il « *ne [puisse] pas y avoir de tranquillité pour les nations sans armées, pas d'armées sans soldes, ni de soldes sans tributs* » (Tacite). La paix a donc un coût pour les peuples conquis et il consiste en la soumission à l'impôt (tribut ; Deru et Delmaire 2016 ; Delencre 2017 ; Pasquini 2020).

L'installation progressive des légions romaines, de dignitaires romains et des activités artisanales qui les accompagnent contribue également à la diffusion du mode de vie romain et des modalités techniques qui leur sont associées, y compris au niveau architectural (Deru et Delmaire 2016). Le constat général va vers l'adoption et la dissémination de nouvelles techniques qui permettent une meilleure durabilité des édifices tout en allant vers un confort supérieur, avec par exemple l'emploi de la pierre et de la terre cuite architecturale. Ainsi, le modèle romain prend le pas sur l'habitat vernaculaire celtique en bois et torchis, tout en intégrant les savoir-faire de ces modes de construction indigènes. Cette transition est très progressive et diachrone à l'échelle du territoire des Gaules, et il est noté que les occurrences de briques de terre cuite liées de mortier de chaux dans les murs peuvent apparaître également précocement dans l'architecture, sans association avec une couverture en tuiles d'inspiration italique (Szabó, Tímár et Szabó 2007). Ces premières traces de romanisation de l'architecture ont été observées, notamment à Bibracte, pour la période comprise entre 50 et 25 avant J.-C. (Delencre 2017). Pour *Durocortorum*, Delencre (2017) date l'emploi de la chaux comme liant et l'apparition des couvertures en terre cuite vers 25 av J.-C., avec une diffusion plus large au cours du I<sup>er</sup> siècle ap J.-C.

Toujours d'après Buchsenschutz (2004), l'objet emblématique de l'empreinte culturelle et technologique romaine de cette période est la *tegula*<sup>16</sup> (il s'agit en fait de l'association *tegula/imbrex*), qui signe l'adoption des modalités romaines dans la construction (et donc dans les archives archéologiques, Figure I-27 ; Delencre 2017). Cette adhésion technique et culturelle est telle qu'elle va au-delà des « ressources naturelles disponibles [d] es contraintes climatiques ou [d] es traditions culturelles locales » (Buchsenschutz 2004). Son emploi en couverture des bâtiments a d'autres implications qu'un changement de matériaux ou de l'adoption d'un nouveau matériau. Ce changement, comme le souligne Delencre (2017), implique également un profond remaniement structurel de la charpente du bâtiment rendu nécessaire par l'excès de masse des éléments de couverture. C'est donc l'ensemble des méthodes architecturales qui sont soumises à adaptation. Mais cette adhésion à de nouveaux matériaux n'est pas nécessairement généralisée à l'ensemble de la population qui peut conserver des pratiques autochtones voire les adapter en les associant aux techniques romaines (Delencre 2017).

Il serait probablement très réducteur de limiter les marqueurs de la romanisation à un unique objet, fut-il emblématique de la période. En effet, l'apparition de couvertures en terres cuites a déjà été constatée sur des sites bien antérieurs à la conquête. Ces découvertes,

---

13. La guerre des Gaules/*De Bello Gallico*

14. Abrégés des Livres de l'Histoire romaine, « *Periochae* » transmises par les manuscrits, édité et traduit. P. Jal, Paris, Les Belles Lettres (CUF, série latine), 1984.

15. Histoires, tome I, livre I, éd. et trad. P. Wuilleumier et H. Le Bonniec, annoté par J. Hellegouarc'h, Les Belles Lettres (CUF, série latine), 2002

16. la Tegula désigne non seulement la tuile en terre cuite, mais aussi la brique cuite (par opposition à la brique de terre crue) (Ginouvens et al. 1985). Ces tuiles pouvaient être recyclées en les broyant et en les incorporant au mortier « de tuileau » qui permettait d'augmenter sensiblement sa résistance voire de lui donner des propriétés hydrauliques (Coutelas 2003).

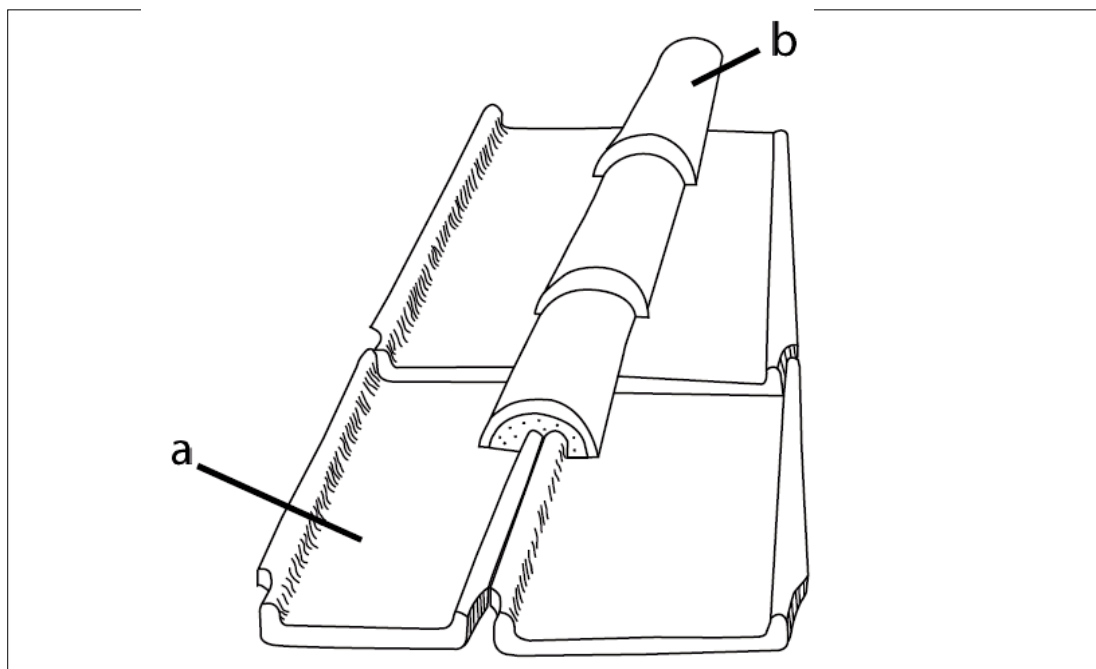


Figure I-27. Modélisation d'une couverture en tuiles antique a. tegula ; b) imbrex (modifié d'après Le Ny 1992 ; in Delencre 2017).

notamment chez les Éduens, ont démontré la présence de couvertures en tuiles romaines à la fin du II<sup>e</sup> siècle avant J.-C., soit 50 ans avant le début de la conquête (Ramponi *et al.* 2006). Cette présence est interprétée comme liée à l'accroissement des liens commerciaux de la région avec Rome. Cependant, même longtemps après la conquête, ont subsisté des usages locaux comme l'utilisation de couvertures en ardoises (Cartron 2019) ou encore sous la forme de dalles de calcaires sciées (Figure I-28 ; Olivier 1982). L'assimilation de l'apparition des *tegulae* (et plus largement de l'usage des terres cuites architecturales) à un marqueur de l'acculturation, bien que fiable à grande échelle de temps et d'espace, doit être nuancé tant les exemples de persistance de pratiques indigènes sont récurrents (Delencre 2017). Il apparaît également important de préciser que certaines productions locales de tuiles et terres cuites sur des modèles romains ont également persisté bien au-delà de la fin de l'Antiquité (Nauleau 2013 ; Delencre 2017).

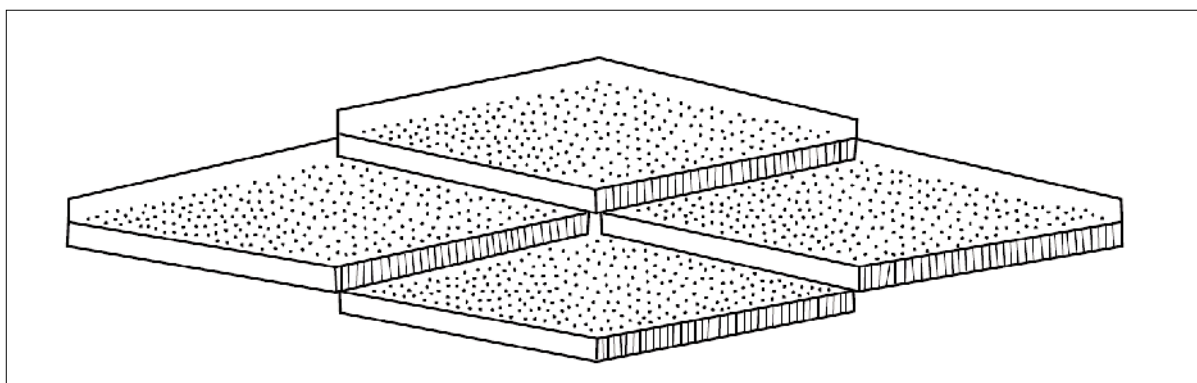


Figure I-28. Schéma de mise en œuvre d'une toiture en dalles sciées (Olivier 1982 in Delencre 2017).



Les matériaux de construction antiques en terre cuite tiennent une place primordiale dans la construction en Gaule romaine (Nauleau 2013 ; Delencre 2017). Employés dans les maçonneries, dans les édifices balnéaires, et sur les toitures, ils deviennent au cours du I<sup>er</sup> siècle après J.-C. des matériaux incontournables (Nauleau 2013). En plus des couvertures en terre cuite, les maçonneries en *opus mixtum* observées dans certaines enceintes antiques encore en élévation comme celle du Mans (Streiff 1952) ou encore leurs utilisations extensives dans les maçonneries sous forme d'assises de réglage ou dans les voûtes (Figure I-29 ; Nauleau 2013) à l'image des thermes de Cluny (Salet 1951), ont employé de grandes quantités de matériaux. Il faut par ailleurs constater que ce mode de construction et les bâtiments construits selon ces modalités sont devenus emblématiques de cette époque (Nauleau 2013).

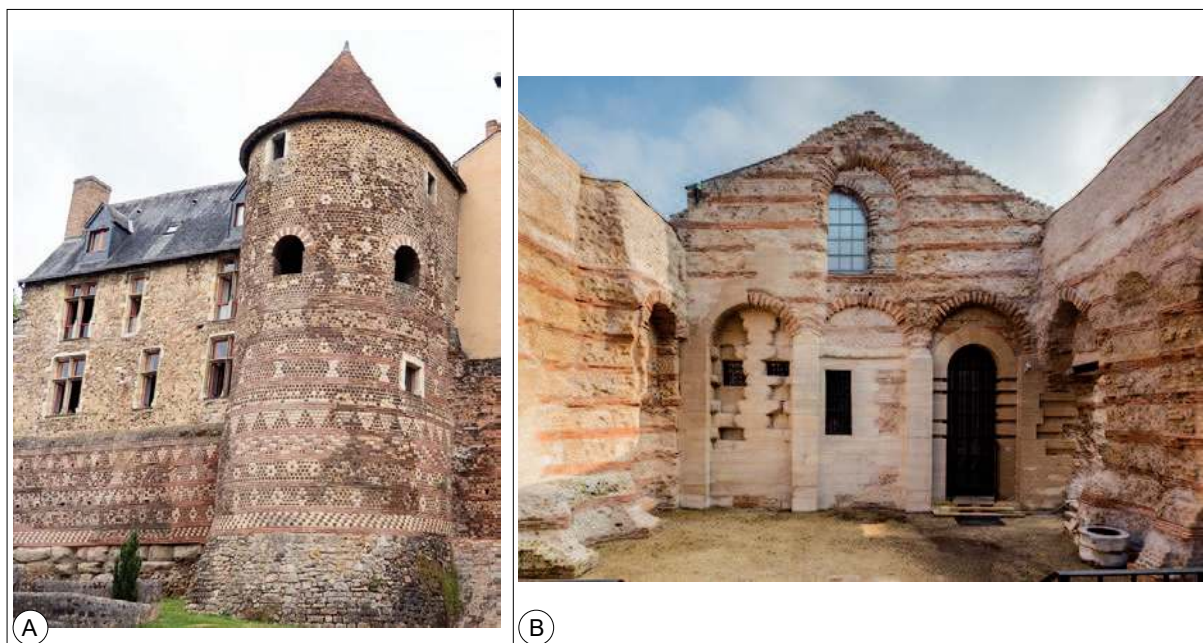


Figure I-29. Exemple d'utilisation des terres cuites architecturales antiques dans deux monuments antiques emblématiques. A. L'enceinte romaine du Mans ; B. Les thermes de Cluny à Paris.

Le passage de l'habitat vernaculaire gaulois à l'adoption des modalités de construction romaine apparaît donc comme un marqueur robuste de la romanisation (Delencre 2017). Nauleau (2013) souligne par ailleurs que de manière générale, les variations de l'utilisation des terres cuites architecturales dans la construction constituent de bons marqueurs des conditions économiques et culturelles des populations. Il faut néanmoins pondérer ce qui serait une adoption massive de la culture romaine, car les modes de constructions anciens continuent de se pratiquer au moins dans les petits établissements ruraux de la périphérie ou dans l'architecture utilitaire. Vitruve illustre sous une forme très raccourcie la relation du matériau de construction à l'incorporation à l'Empire avec l'opposition entre l'association « pierre et civilisation » et l'association « bois et barbarie », marquant l'attachement de l'usage de la pierre dans la civilisation romaine.

L'utilisation de la *tegula* comme matériel de couverture a cependant survécu localement à la chute de l'Empire romain, car des preuves son utilisation jusqu'à l'époque alto-médiévale sont bien avérées (Chapelot *et al.* 2009 ; Bessac *et al.* 2020). Bien sûr, plus tardivement les exemples de réemploi de terres cuites architecturales à diverses périodes ne manquent pas (l'exemple de l'aqueduc est à ce titre très parlant, Rabasté et Ardhuin 2010) notamment pour l'édification des églises locales.

L'édification de bâtiments propres à la culture romaine comme les *fora*<sup>17</sup>, les thermes ou les amphithéâtres et le symbolisme qu'ils véhiculent, semble être également un marqueur important de l'adhésion profonde à la culture romaine au même titre que l'utilisation massive de la pierre et de la *tegula* comme matériaux de construction.

Pour Deru et Delmaire (2016) les thermes sont un des principaux marqueurs physiques de la romanité. Ces constructions à vocation publique sont indubitablement la manifestation de l'opulence d'une agglomération, leur vocation ostentatoire étant affirmée par leur architecture même. La répartition spatiale de ces bâtiments plaide également pour la représentativité de ce marqueur, car ils sont très répandus à travers le territoire, avec des dimensions adaptées aux agglomérations qu'ils équipent. Loin de ne résider que dans l'édification de bâtiments possédant une teinte culturelle, l'apparition de technologie du bâtiment comme les hypocaustes<sup>18</sup> est également un marqueur de la romanisation des populations jusque dans les lieux d'habitation (Ginouès *et al.* 1992 ; Deru et Delmaire 2016 ; Adam 1984).

L'édification de temples, quant à elle, traduit l'implantation et l'adoption du culte impérial même si les divinités antiques sont souvent adossées à leur pendant indigène ou complété par des mythologies indigènes (Figure I-30) fondant un syncrétisme religieux répandu à l'échelle de l'Empire (Deru et Delmaire 2016).



Figure I-30. Stèle gallo-romaine du II<sup>e</sup> siècle après J.-C. dédiée à Cernunnos flanqué d'Apollon à gauche et de Mercure à droite, preuve du syncrétisme religieux de l'Antiquité romaine, exposée au Musée Saint Remi, Reims.

17. Le *forum* constitue, pour les peuples de culture romaine, le lieu de rencontre majeur de la ville romaine où les citoyens se réunissent pour traiter de leurs affaires municipales, commerciales ou pour leurs plaisirs. Il est traditionnellement situé au milieu de la ville et constitue un espace libre ou convergent des voies de circulation (Ginouès *et al.* 1998).

18. Hypocauste : chauffage antique par le sol dont les matériaux font intervenir en grande quantité des éléments en terre cuite (pilettes, *tubuli*), mais également l'usage de mortiers de tuileau.

Il est nécessaire de conserver à l'esprit que pendant l'Antiquité, tout comme pendant le Moyen-Âge, la très grande majorité de la population du nord-est de la Gaule est rurale et autosuffisante (Deru et Delmaire 2016). Celle-ci est estimée pour la France à près de 90 % de la population alors même qu'elle est de 70 % pour l'Italie romaine. L'exposition à la culture romaine est par là même très hétérogène et bien plus importante pour les populations urbaines, d'autant plus si elles sont aisées.

### 3.3. Les méthodes de construction romaine

Pour Adam (1984), « *l'architecture romaine est [...] la plus étonnamment riche, en techniques comme en programmes et pour ces raisons celle qui nous est la plus perceptible et la plus proche* ». Comme déjà évoquée précédemment, l'architecture romaine antique se manifeste par la présence de certains bâtiments propres à la civilisation gréco-romaine (Figure I-31). L'adoption de la pierre et des terres cuites comme matériaux de construction, que ce soient des tuiles (*tegulae*) ou des briques ou encore sous la forme du mortier de tuileau, serait donc un marqueur matériel de l'évolution du paradigme architectural.

Pour la période antique en Gaule, c'est-à-dire entre le I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. et le IV<sup>e</sup> siècle après J.-C., les normes et références architecturales romaines et les matériaux employés sont, malgré des évolutions inévitables, conformes à celles de l'épicentre de l'Empire à partir duquel elles diffusent, à savoir l'*Vrbs* ou Rome (Delencre 2017). Elles sont à tel point transposables que, comme l'indique la découverte d'épaves de navires chargés de terres cuites architecturales (Ximénès et Moerman 1998), ces matériaux font l'objet de transactions commerciales et de transport sur des distances importantes à l'intérieur de la sphère d'influence culturelle et économique de l'empire (Pasquini 2017 ; 2020). Leur diffusion font à la fois l'objet d'un commerce d'opportunité afin d'éviter des trajets de navires « à vide », que d'un commerce réellement orienté puisque la nature de la cargaison va bien au-delà de la simple vocation de lest (Delencre 2017).

Après avoir donné un aperçu des formes de l'architecture romaine publique puis privée, les techniques d'organisation des différents matériaux seront abordées. Les *opus* définis notamment par Vitruve<sup>19</sup> (Adam 1984 ; Ginouvès *et al.* 1985), font référence aux modes de construction, aux matériaux et aux modules qu'ils adoptent. Les matériaux utilisés dans la construction antique dans le secteur de Reims bénéficieront, quant à eux, d'un chapitre entier dans la suite du document.

Il faut également garder en mémoire que la construction romaine antique n'avait pas atteint la perfection de mise en œuvre que certains voudraient y voir (Le Gall 1959). Les erreurs de conception et les malfaçons y existent bien évidemment avec des conséquences diverses (Dessales 2014). Les bâtiments antiques encore en élévation constituent une infime partie de ce qui fut construit. Outre la chance d'échapper à la destruction, les édifices qui ont traversé les âges le doivent tout autant à la chance qu'à la grande attention qui a été portée à la qualité de leur construction (Adam 1984).

---

19. *De architectura*

### 3.3.1. L'architecture publique

Pour Gros (1996), les structures de l'architecture publique peuvent être catégorisées entre les édifices liés aux divertissements (spectacles et loisirs), à la structuration de l'espace urbain (enceintes, portes, arcs, portiques), au commerce (marchés, greniers), à la gestion de l'eau (thermes, fontaines...) et enfin aux diverses composantes des centres urbains monumentaux (temples, *fora*, basiliques...). Cependant, comme le souligne Delencre (2017), il est très complexe d'attribuer à un édifice une finalité unique tant les pratiques de la vie publique romaines coexistent et rendent délicate la séparation des faits administratifs, politiques et religieux qui peuvent s'effectuer dans les mêmes lieux (Gros 1996).

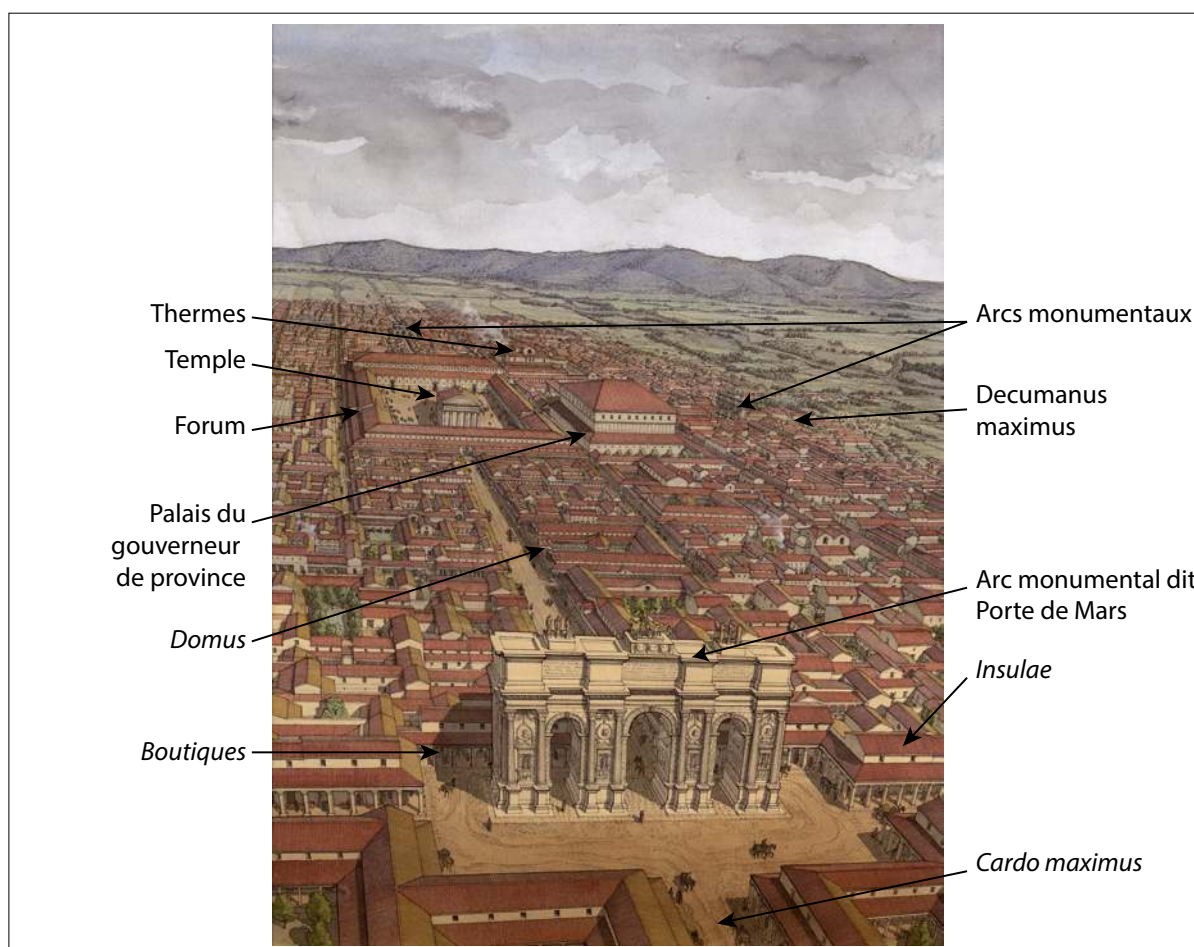


Figure I-31. Reconstitution de Durocortorum au cours de la période alto-impériale. L'organisation à plan orthonormé, et les édifices repérés figurent des formes canoniques de l'architecture et de l'urbanisme romain (Aquarelle de Jean-Claude Golvin. Musée départemental Arles Antique © Jean-Claude Golvin /Éditions Errance, avec son aimable autorisation).

L'espace urbain dispose d'édifices qui le structurent (Figure I-31). L'un de ces principaux éléments en est bien sûr celui qui en matérialise les limites c'est-à-dire l'enceinte ou la muraille. Celle-ci possède une fonction première défensive et militaire, mais aussi une fonction symbolique et ostentatoire (Gros 1996 ; Ginouvès *et al.* 1998 ; Adam 1984). Visible depuis l'extérieur, elle proclame la puissance et l'opulence de la cité, mais, et cela est particulièrement vrai pour Rome

où elle sépare l'*Urbs*<sup>20</sup> de l'*Ager*<sup>21</sup>, matérialisant la limite physique du *Pomerium*<sup>22</sup> (Gros 1996)

Les édifices de divertissements constituent une catégorie qui regroupe tous les monuments dédiés à la tenue de représentation. Ces derniers recouvrent les théâtres et amphithéâtres, ou encore les odéons (espaces de spectacles fermés). Ces édifices sont construits en matériaux pérennes et leurs formes générales n'ont que peu évolué depuis le 1<sup>er</sup> siècle av. J.-C. (Gros 1996 ; Adam 1984). Les arcs monumentaux sont, d'après Gros (1996), parmi les « éléments les plus représentatifs de la monumentalité proprement romaine ». Ils peuvent se ranger aux côtés d'un ensemble de constructions à vocation commémorative. Cependant ils revêtent également une dimension politique importante puisqu'ils symbolisent la puissance du pouvoir centralisé romain. Par ces édifices il y a donc une représentation de Rome dans l'urbanisme à partir du règne d'Auguste (Delencre 2017).

Les édifices des centres urbains monumentaux sont nombreux et variés, dans le cadre de l'architecture romaine, le plus emblématique d'entre eux est certainement le *forum*. Ce dernier, loin de n'être qu'un bâtiment unique, est composé par le regroupement de plusieurs édifices sur un même site limitant un espace « où se concentrent tous les signes de la dignité municipale et autour duquel les générations successives, quel que soit leur statut juridique, acquièrent ou entretiennent la conscience d'appartenir à une communauté » (Gros 1996). Classiquement il s'agit d'une grande place flanquée d'un temple et d'une basilique civile auxquels de nombreux autres édifices civils peuvent s'agréger (curie, tribunal...). L'ensemble est localisé au cœur de la cité, à l'intersection du *Cardo maximus* et du *Decumanus maximus*. Cependant, comme le souligne Bouet (2012), ceci tolère de très nombreuses exceptions aussi bien dans les dispositions que dans les localisations. Le *forum* en tant qu'ensemble, constitue donc le centre de la ville et de la cité sur tous les plans de la vie publique antique (Gros 1996 ; Bouet 2012 ; Delencre 2017). Les infrastructures dédiées au commerce et au stockage de marchandise (greniers, entrepôts...) couvrent toute une variété d'édifices dont la forme générale est adaptée à la destination du lieu ou de la nature de l'activité qui s'y tient (Adam 1984).

Enfin, il faut également signaler les installations techniques de l'agglomération avec en particulier les constructions liées à la gestion de l'eau, son approvisionnement (aqueduc), sa distribution (fontaine, thermes...) et son évacuation (latrines, égouts). Ces ouvrages, participant largement à l'urbanisme monumental des villes antique, sont de véritables traits d'union avec le domaine privé de l'habitat urbain romain (Dessales 2008). Ainsi, les aqueducs constituent de véritables projections de la ville à travers les espaces ruraux environnants (Rabasté et Ardhuin 2010).

---

20. Terme latin qui désigne la ville dans l'antiquité

21. Terme latin pour les territoires situés en dehors de la ville, littéralement il peut s'agir du territoire qui appartient au peuple romain (*Ager romanus*)

22. D'après Magdelain (1990), le *Pomerium* de la Rome Antique. Cette limite consistait chez les peuples étrusques et les Romains en une séparation entre la ville (*urbs*) et les territoires alentours (*ager*). Elle a une valeur religieuse et juridique puis administrative et il est interdit à l'armée de la franchir. Cette limite ne peut formellement exister qu'à Rome, dans le *Latium* et dans les colonies fondées Sa localisation reposerait sur le mythe fondateur de Rome avec le trait de charrue fixant les limites de la ville. Il ne peut donc y avoir d'assimilation entre ce centre urbain de *Durocortorum* et le *pomerium*, mais celui-ci peut mimer l'organisation de l'urbanisme de la ville de Rome.

### 3.3.2. L'architecture privée

Pour Gros (2001), les constructions du domaine privé, bien que pouvant disposer d'espaces dédiés à l'accueil du public, intègrent aussi bien l'habitat dans les villes, les palais<sup>23</sup>, les *uillae*<sup>24</sup> ainsi que les monuments funéraires. Les limites du cadre de cette étude conduisent à restreindre aux seules typologies présentes dans la ville et ses alentours immédiats les cas abordés conduisant à exclure les *uillae* tout comme les Palais dont aucun n'est à ce jour documenté à Reims.

L'habitat urbain est une notion qui recouvre une grande diversité de forme. En effet, il faut y considérer aussi bien les demeures de l'élite (la *domus*) que celles des populations les plus modestes (*insula*). Pour Ginouvès *et al.* (1998), la *domus* peut se traduire par « maison », mais désigne surtout une construction destinée à l'occupation par une ou plusieurs familles. Ce terme peut également bien s'employer pour une résidence de prestige. La présence précédemment évoquée dans les *domus* d'espaces réservés à la réception de publics extérieurs au foyer permet également à Gros (2001) d'affirmer que « la demeure des puissants est donc aussi et peut-être d'abord le symbole d'un statut et l'instrument d'un pouvoir » (Figure I-32). La définition de Gros (2001) pour les *domus* intègre une dimension juridique qui considère la maison comme un espace distinct de ceux dédiés aux activités publiques et politiques. Pour le bâtiment collectif (immeuble), on parlera d'*insula*.

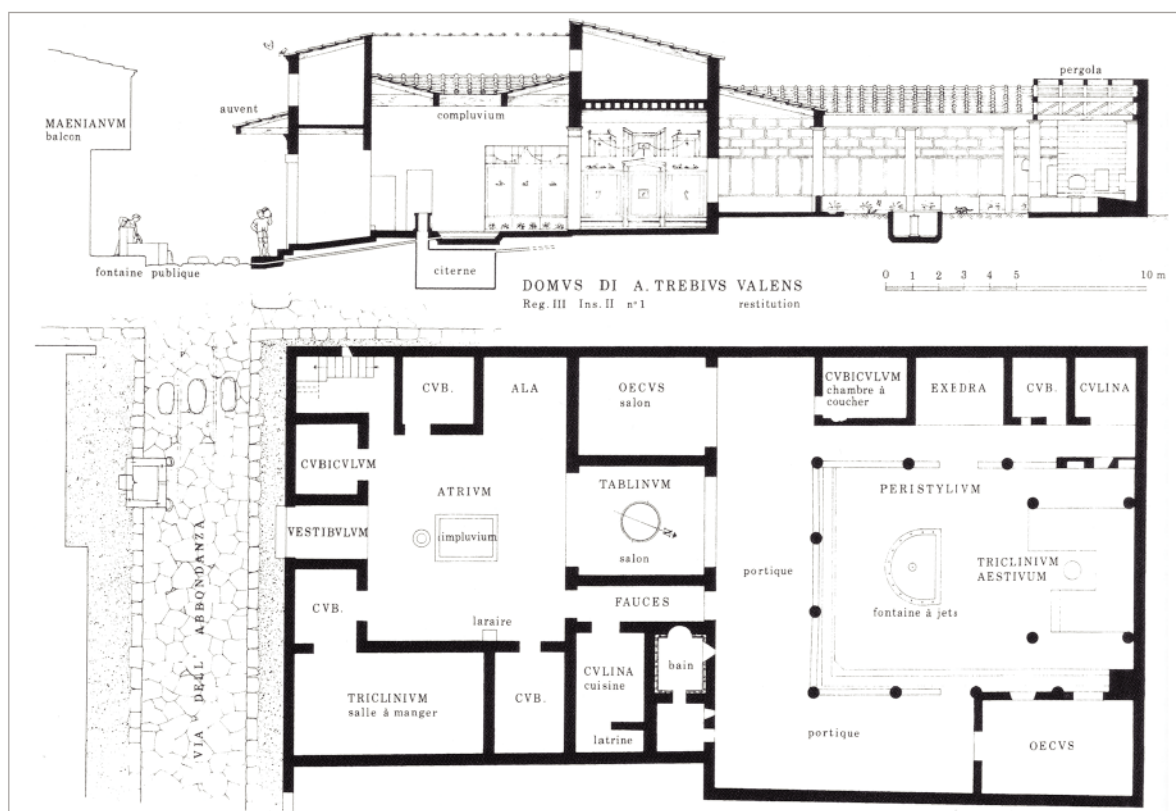


Figure I-32. Exemple d'une *Domus* respectant toutes les caractéristiques de la résidence urbaine. Maison de Trebivs Valens, Rue de l'Abondance à Pompéi (Adam 1984).

23. Dans cette typologie, il s'agit des palais impériaux fort peu répandus en dehors de Rome.

24. P. Leveau (2002) a produit une définition « usuelle », appuyée sur celle de Ferdière (1988) d'une *uilla* en tant qu'« exploitation agricole comportant une partie résidentielle plus ou moins importante et construite « en dur », à la manière romaine

Les habitats modestes sont caractérisés par des constructions dont l'usage est strictement réservé au cadre privé, où les pièces sont dédiées aux besoins de la vie quotidienne (repos, cuisine, stockage...). Pour Gros (Gros 2001), cela indique que cette organisation répond en tous points à la notion d'abri. Il en existe un vaste éventail de formes, dont la typologie repose sur le nombre et la disposition des pièces ou encore sur la présence et le nombre d'étages (Ginouvés *et al.* 1998 ; Gros 2001).

Les monuments funéraires recouvrent une forme très particulière de la construction romaine. Ces constructions poursuivent un objectif commémoratif (Gros 2001) et, à ce titre, ne répondent pas nécessairement aux mêmes contingences que pour les bâtiments pour les vivants. Ils présentent des formes variées, depuis la stèle jusqu'aux tombes monumentales (mausolées, Figure I-33) à l'image de celles visibles aux sorties de la ville de Pompéi ou même de Rome. Pour les sépultures, les expressions architecturales sont variées. Elles évoluent largement au cours du temps et font intervenir une grande variété de matériaux depuis l'utilisation de *Tegulae* ou de poteries, jusqu'au bois ou encore la pierre. Nous renverrons par exemple à des travaux plus spécifiques aux pratiques funéraires antiques (Brives 2008).



Figure I-33. Exemples de monuments funéraires mis au jour à Reims, tous deux exposés au Musée Saint Remi. A. Stèle funéraire de deux époux, découverte en remploi dans la muraille tardo-antique, Rue de Contrai à Reims ; B. Couverture d'un petit mausolée avec l'aigle représentant l'âme du défunt.

### 3.4. Les techniques de construction romaine

Les techniques d'agencement des matériaux selon les techniques et modalités romaines sont nombreuses, adaptées aux matériaux qu'elles mettent en œuvre et aux situations architecturales dans lesquelles elles interviennent (Adam 1984). Devant la diversité de ces techniques et leurs adaptations à des contextes locaux (on le verra notamment pour Reims) le sujet ne sera qu'effleuré dans ce travail, préférant s'en remettre aux nombreux ouvrages qui leurs sont consacrées (Adam 1984 ; Ginouvès *et al.* 1985 ; 1998 ; 1998 ; Gros 1996 ; 2001). L'appareil renvoie aux dispositions d'assemblage, de liaison et de mise en valeur des matériaux de construction (Adam 1984 ; Gros 1996). Mais il est également important de noter que plusieurs modalités de construction peuvent se superposer ou se juxtaposer dans un même bâtiment dans un but structurel ou tout simplement décoratif (Ginouvès *et al.* 1985).

La présentation faite ici des techniques d'appariement des matériaux est très loin d'être exhaustive, cependant une attention particulière a été portée à ce que celles qui sont mises en œuvre au sein des cas étudiés dans ce travail soient tous mentionnées ici.

#### 3.4.1. Le grand appareil

Le grand appareil quadrangulaire (ou Opus quadratum ; Figure I-34) consiste en un assemblage de blocs de grandes dimensions, préalablement taillés en forme de parallélépipède rectangle (Ginouvès *et al.* 1985). Ils sont disposés selon des assises horizontales et assemblés sans recourir à l'utilisation de mortier, grâce à l'utilisation d'un ingénieux système de crampons et d'agrafes métalliques maintenues solidaires de la pierre par du plomb coulé dans les cavités de scellement. Ces dispositifs ont déterminé l'implantation de certaines cavités techniques visibles sur les faces supérieures des blocs (Adam 1984). Ils ont également suscité des dégradations ultérieures par le creusement de cavités de prédation dans le but de récupérer les métaux de ces scellements. Les exemples d'utilisation de cet appareil sont nombreux en particulier pour les grands monuments publics ou encore pour les monuments funéraires privés (Figure I-34).

Pour certains édifices, les murs parés de grand appareil possèdent un noyau interne ou massif de remplissage ou encore un blocage, qui peut être constitué en *opus caementicium*. Il s'agit d'un mélange de pierres et/ou d'éléments de terres cuites liés au mortier, utilisé pour combler l'espace entre les parements d'un mur, indifféremment de son mode constructif. Cette technique, très caractéristique de la construction romaine, s'est développée depuis la Campanie et dans le Latium à partir du III<sup>e</sup> siècle avant J.-C. C'est notamment grâce à ce mode de mise en œuvre que les bâtisseurs romains ont développé une importante maîtrise de la voûte et du dôme, impossible à ériger en pierre. Son caractère très économique et sa facilité de réalisation expliquent également l'usage intensif qui en a été fait dans l'architecture.





Figure I-34. Exemples de grand appareil quadrangulaire : A- Murailles en grand appareil de la ville antique de Pompéi et de la Porta Nocera ; B- Arc de Suse (cliché V. Brunet-Gaston), et C. vue du Mausolée 28 du secteur est de Pompéi..

### 3.4.2. Les structures mixtes

Ces structures existent sous plusieurs formes. Comme leur nom l'indique, elles consistent en un mélange de plusieurs matériaux au sein d'un même appareil. Que cela soit la terre cuite et la pierre ou encore la terre crue et le bois, les structures mixtes sont très variées. Leur caractéristique principale est l'utilisation conjointe de matériaux très différents que ce soit dans leurs natures ou dans leurs dimensions (Adam 1984).

Ce type d'architecture (Figure I-35) consiste en un soubassement en maçonnerie, limité par une arase horizontale sur laquelle était assemblée une structure en matériaux périssables à base de pans de bois et d'argile ou de terre crue. Des adaptations ou des variantes peuvent être observées, dont la spécificité rémoise de l'utilisation des carreaux de terre crue (Delencre 2017). Les exemples de mise en œuvre antique de cette méthode sont à chercher aujourd'hui

en Campanie, à Herculanium et Pompéi visible dans les étages, au-dessus des soubassements et en cloisons.

Ce sont dans les structures mixtes que cette catégorie de structures à pan de bois ou *opus craticium* sont associées. Cet *opus* semble être la plus répandue de toutes les techniques de construction romaine alors que, paradoxalement, c'est aussi celle qui a laissé le moins de traces (Adam 1984). Il est cependant possible d'en observer exceptionnellement des restes à l'occasion de destructions par le feu des bâtiments (les terres crues sont alors cuites par l'incendie et préservées, Brunet-Gaston et Monier, 2008).

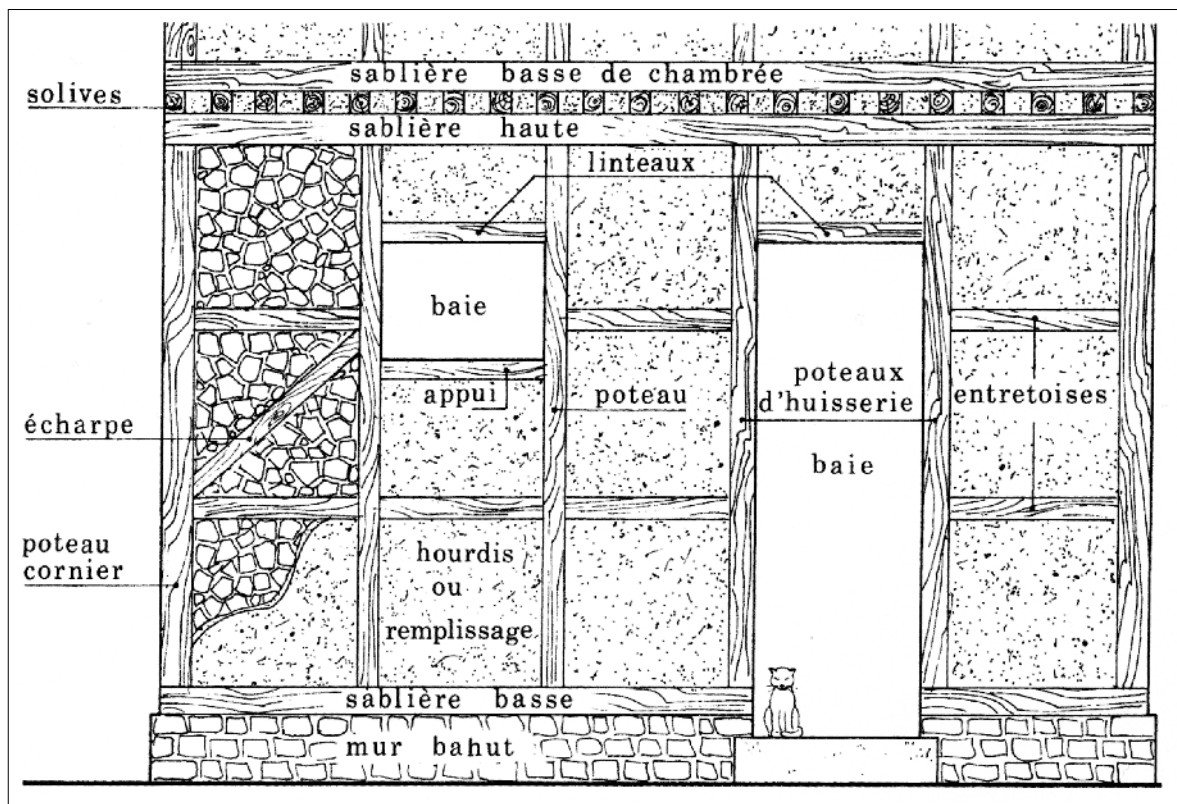


Figure I-35. Éléments constitutifs de l'architecture à pan de bois antique (Adam 1984).

### 3.4.3. Le petit appareil

L'architecture romaine a développé au cours du temps une grande inventivité dans l'usage des matériaux et dans leur mise en œuvre. Les roches et matériaux exploités aussi bien que la manière de les mettre en forme et de les associer dans le parement des constructions sont donc extrêmement diversifiés. Ces associations varient à un point tel qu'il est illusoire de prétendre en faire une synthèse en l'espace de quelques paragraphes. Cependant, nous pouvons brièvement exposer les caractéristiques de certains de ceux rencontrés au cours de ce travail (Figure I-36).

Les maçonneries en petit appareil concernent aussi bien les fondations des édifices que leurs élévations. Adam (1984) précise que les prescriptions à observer pour fonder des édifices en grand appareil ou en petit appareil sont les mêmes, quelle que soit la nature des élévations. Elles seront donc régulièrement montées en suivant par exemple un **agencement**



Figure I-36. Exemples d'appareils observés sur des maçonneries antiques à Reims. A. *opus incertum*, soubassements de la fouille de la rue Marie Stuart, 2018 ; B. Appareil en hérission sur le même site de la rue Marie Stuart ; C. *Opus vittatum* associé à de l'*opus mixtum*, murs extérieurs du cryptoportique de Reims (la partie haute à partir des départs de voûtes est restaurée) ; D. Restes des murs bahuts caractéristiques de l'*opus craticium* de soubassement de l'habitat antique à proximité de la Porte de Mars.

**fruste** ou ***opus incertum*** (Adam 1984). Dans cet *opus*, les éléments de petite taille qui ne sont pas nécessairement calibrés sont mis en œuvre sans qu'il soit possible d'en distinguer les assises.

L'**appareil quadrangulaire** ou ***opus vittatum*** est constitué à partir de moellons aux faces travaillées de manière à le rendre parallélépipédique, disposés selon des assises horizontales en faisant alterner les joints

L'**appareil réticulé** ou ***opus reticulatum*** constitue les parements de maçonneries qui limitent un noyau de blocage. Il est constitué de moellons travaillés en forme de petites pyramides tronquées (dites à queues abattues), disposées à 45° pour dessiner un motif de filet sur le mur (Ginouvens *et al.* 1985).

Enfin, l'**appareil mixte** (***opus mixtum***) rassemble de nombreuses maçonneries différentes. Il s'agit de qualifier dans cette catégorie tous les parements où se trouvent moellons et briques en association. La mise en œuvre de cet appareil a clairement une justification technique pour certains bâtiments, où elles constituent les chaînages d'angles, les briques de terres cuites peuvent n'avoir qu'une vocation esthétique avec des arases plus ou moins régulières (Adam 1984).

L'**appareil en hériss** est constitué d'éléments assez plats et allongés qui seront disposés de champ selon une oblique plus ou moins marquée. Ce type d'appareil est observé dans les fondations des bâtiments.

Enfin, pour mémoire, certains appareils sont exclusivement constitués de briques. Il s'agit de l'**opus testaceum**. Même si cet appareil semble peu représenté dans la construction antique de *Durocortorum*, il était néanmoins nécessaire de le signaler aux vues des réalisations monumentales de la Rome antique. Que ce soit la *Domus Aurea* ou encore les superstructures du *forum* de Trajan, ce sont des pans entiers de l'architecture de Rome qui sont édifiés en briques (Figure I-37).



Figure I-37. A. Vue des ruines de grands édifices publics à Rome intégralement érigée en briques ; B. Exemple de l'opus testaceum dans la construction antique rémoise (photo R. Bontrond, SAGR).

### 3.5. Les grandes phases historiques de la construction de *Durocortorum*

Les phases de croissance et de contraction urbaines de Reims sont nettement ancrées dans son histoire (Pichard 2014). Les différentes évolutions ont influencé l'organisation et l'aménagement de la ville jusqu'à sa reconstruction presque totale résultant des destructions de la Première Guerre Mondiale (Potier 2017). Pour tracer à grands traits l'histoire de la ville (Figure I-38), les références temporelles s'appuieront en partie sur le découpage proposé par C. Pichard (2014) et par Fronteau *et al.* (2014) comme support de description, en le modifiant afin de mieux refléter les périodes précoces de la ville et en particulier les périodes protohistorique et antique. Ces périodes feront l'objet d'un descriptif plus détaillé dans la suite de ce travail afin de mieux appréhender le contexte historique et archéologique dans lequel se campe cette recherche.

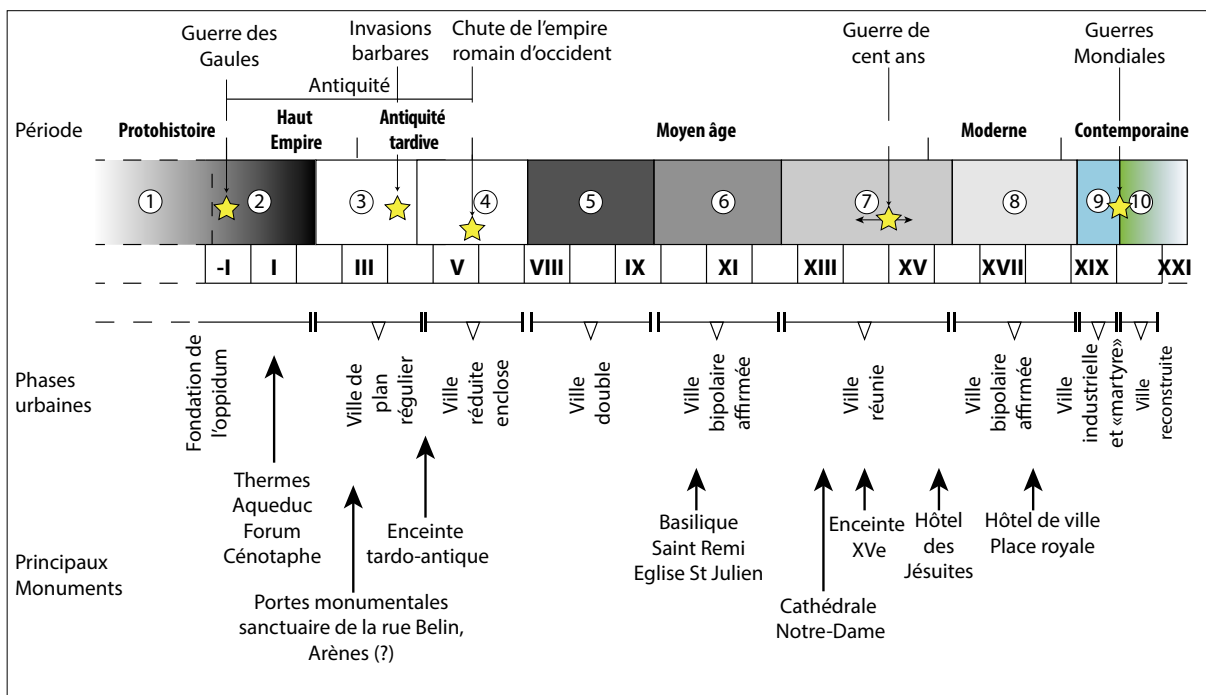


Figure I-38. Chronologie des différentes phases urbaines de Reims (modifiée d'après Pichard 2014 ; Fronteau 2014).

**Phase 1 : L'occupation diffuse (ante 1<sup>er</sup> siècle av J.C).** Cette phase est une phase de densification progressive et d'agglomération des habitats. Ses traces sont très incomplètes, car intensément obliérées (Neiss et Rollet 2010).

**Phase 2 : L'Oppidum (1<sup>er</sup> siècle avant J.-C. au 1<sup>er</sup> siècle après J.C).** Fondé sur le site du centre urbain actuel, l'*Oppidum* est la première occupation développée au sein d'une enceinte (Fichtl 2004 ; Neiss, Rollet 2010).

**Phase 3 : La ville dans la grande enceinte (1<sup>er</sup> au 4<sup>e</sup> siècle).** Capitale de la Gaule Belgique, la ville se développe autour d'un plan orthonormé régulier centré sur un *Forum* et matérialisé par une grande enceinte limitant un territoire de 600 ha.

**Phase 4 : La ville enclose (du 4<sup>e</sup> au 6<sup>e</sup> siècle).** En conséquence des troubles et instabilités du III<sup>e</sup> siècle, la ville se contracte à l'abri d'une « enceinte réduite » définissant un espace *intra-muros* de 55 ha. Les constructions des faubourgs sont progressivement abandonnées, exploitées en carrières ou sont remployées.

**Phase 5 : La ville double (VI<sup>e</sup> au IX<sup>e</sup> siècle après J.-C.).** En marge de la ville tardo-antique se développe un nouveau pôle urbain sur la Butte Saint-Nicaise, essentiellement autour de l'abbaye Saint-Remi, devenue lieu de pèlerinage, et principalement représentée par des édifices cultuels et des lieux d'inhumations connexes.

**Phase 6 : La ville bipolaire affirmée (IX<sup>e</sup> — XII<sup>e</sup> siècle après J.-C.).** Le pôle autour de l'abbaye Saint-Remi, sur la Butte Saint-Nicaise, devient un ensemble urbain (*pagus* dit du Bourg de Saint-Remi) et se dote d'une enceinte. Les deux ensembles se développent alors parallèlement, sans jonction. La cité amorce une nouvelle phase de monumentalisation avec l'édification de nombreux édifices religieux.

**Phase 7 : La ville réunie (XII<sup>e</sup> – XVI<sup>e</sup> siècle après J.-C.).** Au cours des XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles, la ville se dote d'un grand système de fortification périphérique qui englobe les deux pôles urbains. Ces remparts sont initiés sous Philippe Auguste, mais sont uniquement terminés pour s'opposer à la menace anglaise en 1359-1360 (siège de Reims ; Bernot 1995 ; Pichard 2018). Des arguments montrent une nette augmentation de la population urbaine (Pichard 2018).

**Phase 8 : La ville embellie (XVI<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> siècle après J.-C.).** Le centre-ville est modernisé avec le réaménagement du quartier du Credo et le percement de la Place royale (1758-1760). Suite à la Révolution de 1789 et au délabrement des bâtiments, l'abbaye Saint-Nicaise est vendue et utilisée comme carrière (Fronteau *et al.* 2014). Puis, dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'enceinte médiévale est démantelée et les infrastructures préexistantes de la cité sont renouvelées.

**Phase 9 : La ville industrielle et la « ville martyre » de l'après-guerre (XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle après J.-C.).** La ville connaît une importante phase de croissance qui s'accompagne de l'urbanisation de nouveaux quartiers. Les mises en service successives du canal de la Marne à l'Aisne en 1853 et du réseau ferré en 1854 (Desportes 1983), ainsi que le percement des grands axes urbains, permettent un important développement industriel et commercial (Pichard 2018). En première ligne pendant la Première Guerre Mondiale, la ville est rasée à plus de 80 %, ses monuments sont totalement ravagés par l'artillerie des belligérants (Potier 2017).

**Phase 10 : La ville reconstruite (XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles après J.-C.).** L'après-guerre est l'occasion de reconstruire (Potier 2017) et de faire évoluer l'urbanisme de Reims : reconstruction et restauration des monuments (cathédrale, Basilique Saint Remi...), percement et alignement de rues et plus tard de routes (et de l'autoroute), création d'infrastructures (hôpital...) et implantation de nouveaux quartiers, dont des citées « idéales » (Chemin vert...). Les agglomérations périphériques connaissent une forte croissance (Pichard 2018).

### 3.6. Composition et évolution depuis la Protohistoire jusqu'à la chute de l'empire

Ce travail est centré sur l'Antiquité de la ville de *Durocortorum* entre le I<sup>er</sup> et le VI<sup>e</sup> siècle après J.-C. Pour mieux comprendre sa structuration et son évolution et parce que *Durocortorum* n'est pas une création *ex nihilo*, sa fondation et la période protohistorique (laténienne) de la ville seront abordées.

### 3.6.1. La Protohistoire : Fondation d'un *oppidum* tardif

Les premières traces d'occupation de ce qui deviendra *Durocortorum*, puis Reims, apparaissent au cours du second âge du Fer (La Tène C2-D1) sous la forme d'occupations sporadiques (Figure I-39 ; Neiss et Rollet 2010). Le site correspond alors à une vaste cuvette au relief peu contrasté et drainé par la Vesle (cf. contexte géographique). Les traces d'installations montrent une lente densification dans un contexte d'agriculture développée et riche de plus en plus apte à développer des liens commerciaux autour des excédents agricoles (Buchsenschutz 2000 ; 2004). L'existence de ces échanges supposent *de facto* l'existence de voies de circulation développées. Guichard (2017) estime par ailleurs que le maillage urbain gallo-romain est, pour l'essentiel, un héritage de la période qui précède les *oppida*, dont la position fut déterminée aux III<sup>e</sup> et II<sup>e</sup> s. avant J.-C., l'infrastructure de la Gaule romaine semblant surtout redevable des acquis de la période antérieure.

La densification croissante de l'occupation humaine sur le site du futur *oppidum* au détriment d'une occupation antérieure plus lâche serait le fruit de l'intervention d'une autorité centrale (Neiss et Rollet 2010). C'est également devant un antagonisme croissant entre les *Rèmes* et les *Suessions*, auxquels ces derniers sont subordonnés, que l'*oppidum* est fondé<sup>25</sup>, probablement dans le but d'affirmer pouvoir et autonomie des *Rèmes* dont la puissance est montante (Fichtl 2004 ; Deru et Delmaire 2016).

### 3.6.2. Première fondation : la période laténienne et l'*oppidum*

Auparavant datée du début du I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. (*circa* -80 av. J.-C., Berthelot, Balmelle et Rollet 1993 ; Neiss 2010), la fondation de l'*oppidum* est aujourd'hui estimée entre le premier quart du II<sup>e</sup> siècle et le début du I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. (Rollet 1994 ; Neiss *et al.* 2015). L'occupation ouverte connaît alors une mutation d'importance vers une agglomération fortifiée de plaine exprimant ainsi sa pérennité (Fichtl 2004), mais contrastant avec les *oppida* de reliefs. L'*oppidum* est délimité par une première enceinte, dite « primitive » (au sens de première, Fichtl 2006), qui circonscrit une surface variant, selon les auteurs, de 80 ha (Berthelot, Balmelle, Rollet 1993) jusque 110 ha (Neiss 1984 ; 2005 ; Reims 2002). C'est en général la seconde valeur qui est la plus fréquemment retenue. La situation géographique (Figure I-39) à la fois suffisamment éloignée du cours de la Vesle et en terrain relativement plat a permis aux constructeurs de lui donner un tracé subcirculaire régulier d'un périmètre estimé comme légèrement supérieur à 3 100 m (Fichtl 2004).

La fortification en elle-même se compose d'une levée de terre et de craie formant un rempart massif (dont les dimensions de la levée de terre restent inconnues) flanquée d'un fossé (Neiss 1976 ; Berthelot *et al.* 1993). Cette fortification de « type Fécamp<sup>26</sup> » (Ralston et Büchsenschütz 1975 ; Fichtl 2004) ne semble pas avoir été élevée dans un but uniquement défensif, malgré ses dimensions imposantes (45 m de large et jusqu'à 10 m de profondeur pour l'ensemble de la fortification), mais aussi ostentatoires et symboliques. La levée de terre a quant à elle largement été arasée par la suite, au cours du développement de la ville antique (Balmelle 1995). Cependant, son tracé est régulièrement précisé par les opérations

25. Les *Rèmes* déclarèrent à César qu'ils étaient « frères de race,... vivent sous les mêmes lois,... ont même chef de guerre, [et] même magistrat » « *Suessiones..., fratres consanguineosque suos, qui eodem iure et isdem legibus utantur, unum imperium unusque magistratum cum ipsis habeant,...* »)

26. Les auteurs parlent de rempart massif ou de type Fécamp pour une fortification composée d'un grand rempart de 6 à 10 m de hauteur et un large fossé à fond plat.

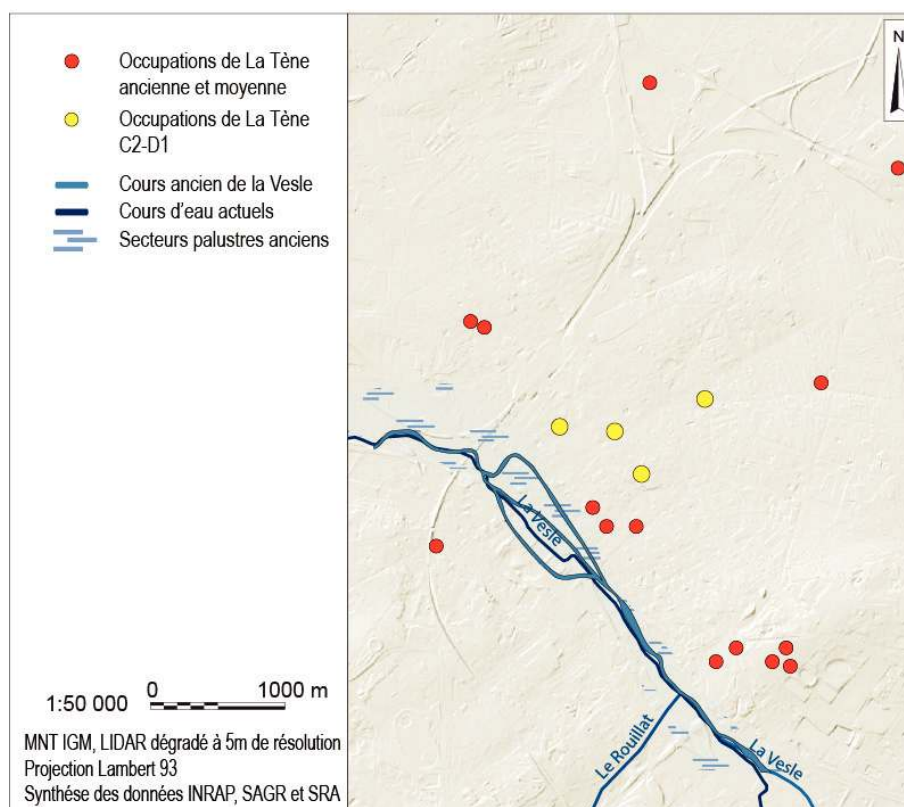


Figure I-39. La Tène C2 D1 premières phases d'occupation du site de Durocortorum. (Données SRA, Neiss et Rollet 2010).

de fouilles qui l'intersectent (Berthelot *et al.* 1993 ; Balmelle 1995 ; 1999 ; Rollet *et al.* 2001 ; Balmelle, Neiss 2003). Ces dernières fonctions semblent confirmées par le choix du site de son implantation. En effet, celui-ci se situe en plaine, sur un carrefour de voies dont l'importance était déjà probable et à une distance de presque 500 m du cours de la Vesle en terrain très peu accidenté (Figure I-41). Elle serait à ce titre caractéristique des *Oppida* de La Tène moyenne et finale où le rempart s'affranchit de la contrainte topographique pour tendre vers une régularité géométrique (Fichtl 2004). À ce titre, elle s'inscrit dans une forme subcirculaire qui se retrouve sur d'autres sites de plaines comme celui de La Cheppe (Figure I-40), bien que ce dernier n'ait en rien une empreinte au sol comparable à celui de *Durocorter* avec seulement 20 ha de superficie enclose. D'après le même auteur, ce sont les rôles symbolique et ostentatoire qui revêtent la plus grande importance dans la démarche de fortification du monde celtique en pleine mutation alors qu'un antagonisme politique avec les Suessions voisins se développait.

À l'intérieur de cette fortification, les traces de nombreuses structures dont des habitats de la Tène finale ont été mises au jour (Neiss *et al.* 2015 ; Neiss 2010 ; Chossenot *et al.* 2010), mais, le plus fréquemment de manière très incomplète, car toujours oblitérée par la densité des aménagements ultérieurs. Ces occupations étaient toujours matérialisées par des structures construites à partir de matériaux périssables ou fragiles (bois et terre crue ; Neiss et Rollet 2010 ; Berthelot *et al.* 2013). Ces traces d'occupation sont généralement attestées par des structures en creux (trous de poteaux, sablières, dépotoirs (Neiss 2010 ; Chossenot *et al.* 2010).



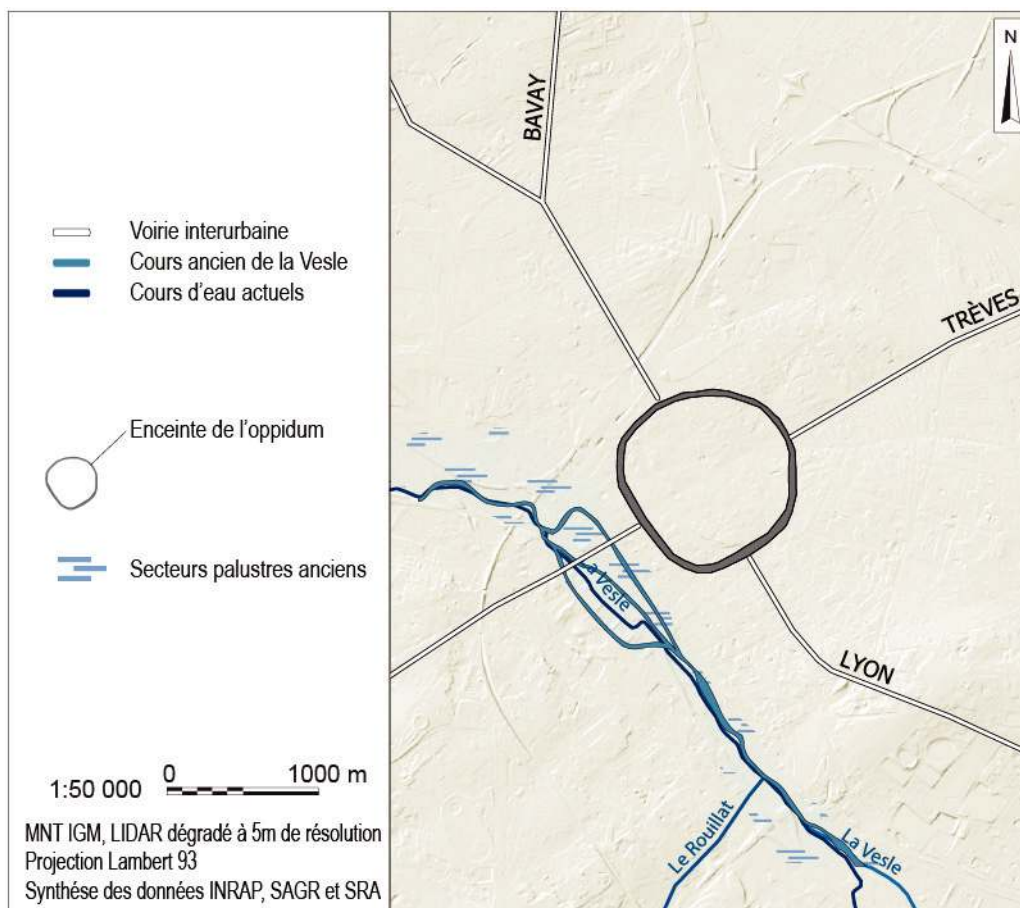


Figure I-41. L'enceinte de l'Oppidum de Durocortorum pendant La Tène D2 (entre le IIe et le Ier siècle av J.-C. ; Données SRA, Neiss et Rollet 2010).

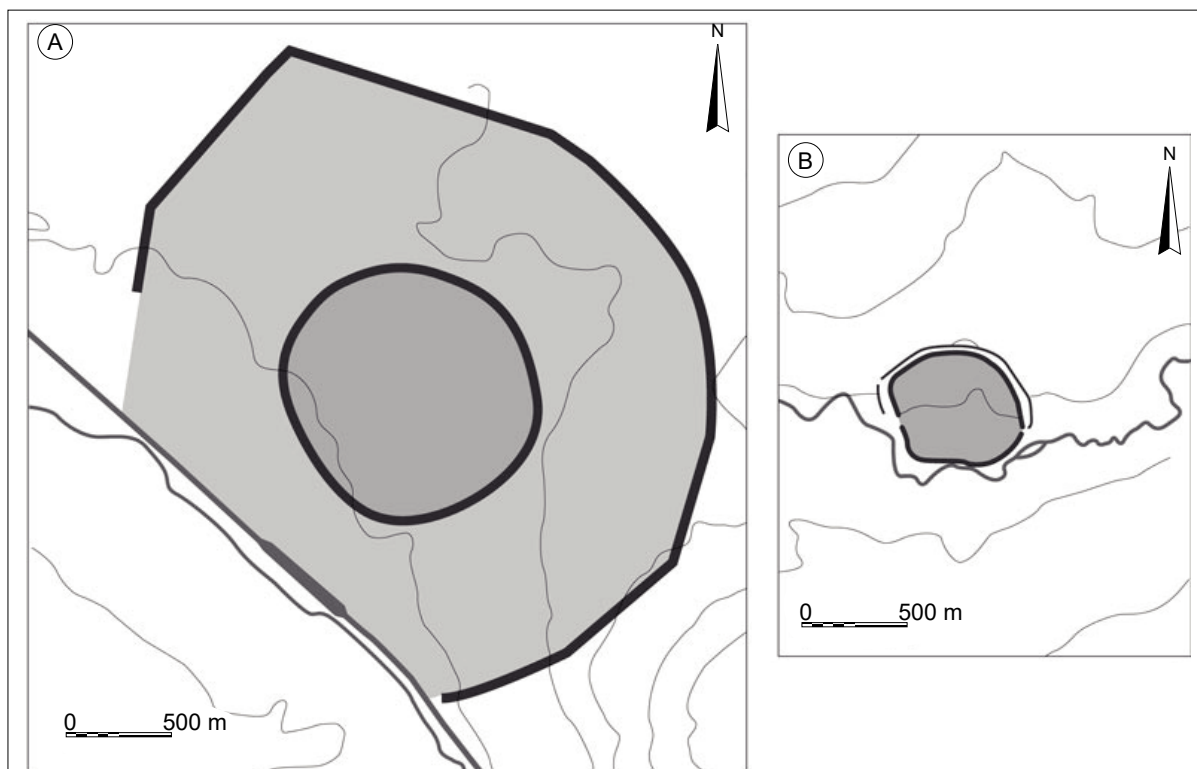


Figure I-40. Comparaison des sites de (A) Durocortum (Rèmes) et de (B) La Cheppe (Suessons), tous deux oppida de plaine, munis d'enceintes à tracé circulaire.

Neiss et Rollet (2010) estiment par ailleurs que les traces d'occupation sont suffisamment denses pour qu'il soit possible de parler de première urbanisation pour cette agglomération. À l'intérieur de l'enceinte, un premier carroyage de rue semblait déjà exister (Neiss 2010) à l'image de ce qui a été observé pour l'*oppidum* de Variscourt/Condé-sur-Suippe (Pichon 2002). Par ailleurs, Neiss (1984) signale que les directions des accès aux grands axes de circulations avaient été canalisées par la topographie et notamment par les talwegs et la vallée de la Vesle. Le réseau de transport (cf. Figure I-25, page I-59) s'est donc précocement structuré sous la forme d'un plan en étoile, ce qui a probablement constitué une condition favorable aux échanges commerciaux et en conséquence à la densification de l'agglomération (Neiss et Rollet 2010 ; Berthelot *et al.* 2013 ; Pichard 2014). Berthelot *et al.* (2013) estiment qu'à La Tène finale, l'*oppidum* abrite déjà une population relativement dense.

### 3.6.3. La première organisation urbaine antique : la grande enceinte

Le passage de l'*oppidum* à la ville gallo-romaine semble se manifester essentiellement par la création d'une seconde enceinte urbaine (parfois, dite « grande enceinte » ou « enceinte augustéenne » ; Figure I-42 ; Menu 1907a ; 1907 b ; Demitra 1910 ; 1912 ; Neiss 1976 ; 1984). Cette nouvelle enceinte au tracé polygonal est inscrite dans un cercle d'un mille romain (1 748 m), centré sur le *forum*, circonscrit un espace de 600 ha avec une longueur de 7 000 m. Son périmètre est complété au sud-ouest par le cours de la Vesle et par la présence de secteurs marécageux à l'ouest.

Elle est principalement matérialisée par un fossé au profil trapézoïdal (à fond plat et parois inclinées) de 20 à 30 m de largeur pour 4 à 10 m de profondeur (cf Figure I-20, page I-54 ; Neiss 1984 ; Neiss et Rollet 2010 ; Berthelot *et al.* 2013 ; Thomann et Péchart 2013). Si la datation de son creusement reste incertaine, il semble que son comblement, au moins pour certaines parties, se soit produit dès le milieu du I<sup>er</sup> siècle après J.-C. Dans la zone correspondant à l'actuelle rue Sébastopol, ce fossé ne serait resté ouvert que très brièvement (moins d'un siècle ? Figure I-43 ; Thomann et Péchart 2013), ce qui semble exclure qu'il puisse remonter à l'époque de la fondation de l'*oppidum*. La ville romaine précoce est donc ceinte d'une grande fortification éphémère, alors qu'en son centre le fossé de « l'enceinte primitive » était encore ouvert.

Si cette ceinture fortifiée est beaucoup trop vaste pour avoir eu une vocation militaire, Fichtl (2004) estime que sa taille hypertrophiée est imputable à l'importance que voulaient donner les *Rèmes* à leur capitale sans toutefois intégrer les schémas monumentaux urbains romains. La volonté des *Rèmes* d'exprimer leur nouvelle puissance s'exprime donc dans la fonction ostentatoire de cette enceinte qui fait de *Durocortorum* la ville la plus étendue de Gaule (Neiss 1984 ; Fichtl 2004 ; Tableau I-1). Cette longueur est à comparer avec les près de 6 000 m d'enceinte encore conservées à Autun<sup>27</sup>, pour 200 ha de superficie enclose.

La ville, entre la fin du I<sup>er</sup> siècle av. J.-C. et le début du I<sup>er</sup> siècle après J.-C., va progressivement se transformer afin de s'adapter aux canons de l'urbanisme romain en particulier en adoptant un plan de circulation basé sur un maillage orthonormé établi à partir de deux axes principaux (*Cardo* et *Decumanus* ; Figure I-42). Les modes de construction évoluent également avec d'une part l'adoption de la pierre qui fait son apparition (majoritairement

27. La ligne des remparts s'inscrit dans un espace délimité par plusieurs cours d'eau : la rivière Arroux et l'Accoron et le ruisseau de Riveau (Duval 1989a).

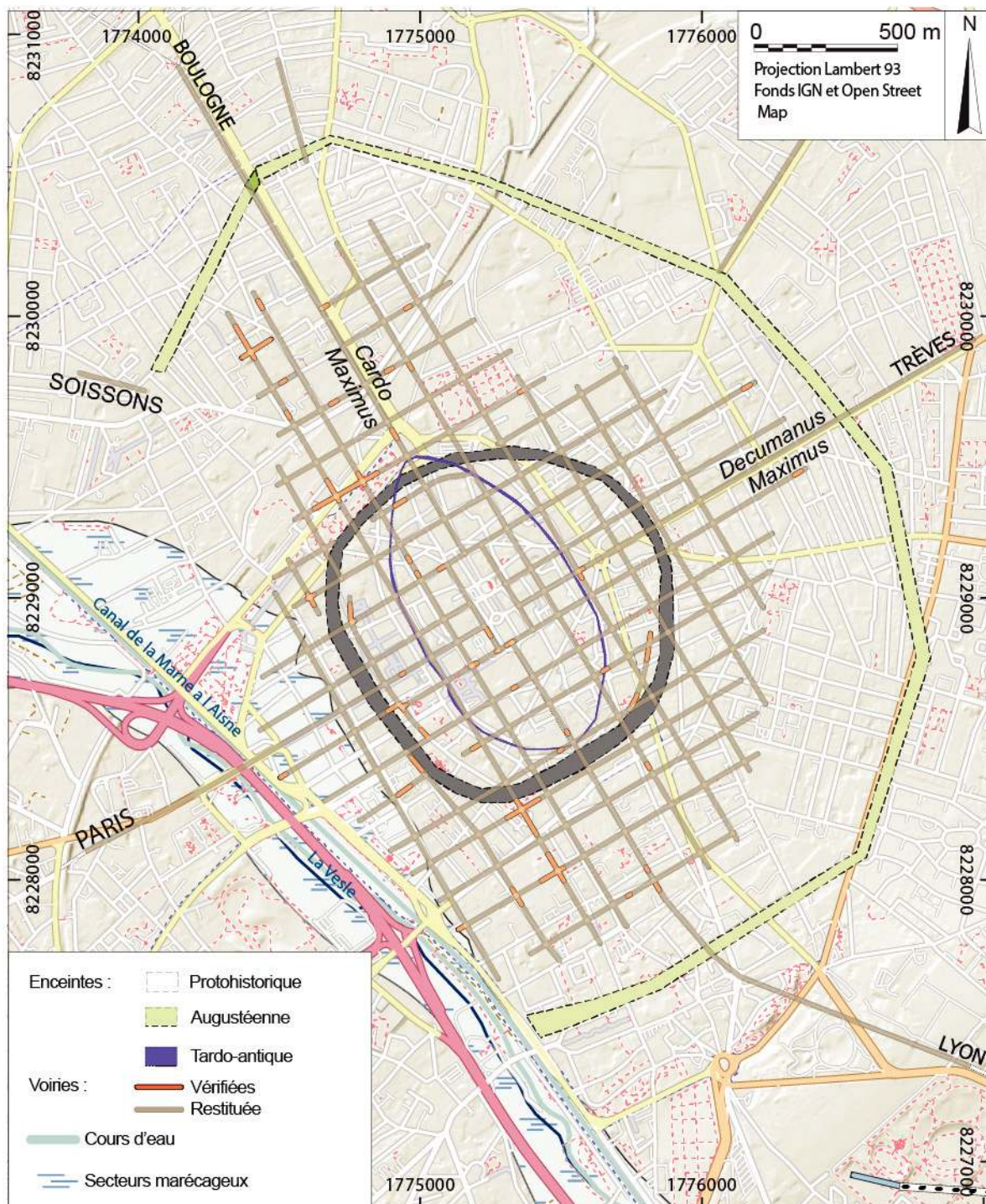


Figure I-42. Emprise des deux grandes enceintes antiques projetées sur la ville moderne. Le secteur palustre est repris à partir du plan Kalas (d'après les données du SRA Champagne Ardenne et Chossenot et al 2010 ; Berthelot et al. 2013 ; Neiss et al. 2015).

dans les soubassements) et d'autre part avec l'utilisation des briques de terre crue (carreaux de terre) pour les élévations (Balmelle et Neiss 2003). Cependant, les bâtiments construits selon des modalités et des matériaux traditionnels ne sont pas totalement remplacés. Dans le même temps, en réponse à la saturation de l'espace *intra-muros* de l'*oppidum*, des bâtiments sont érigés à l'extérieur de l'enceinte primitive (Rollet et al. 2001) associés à des traces de l'installation d'activités artisanales (Rollet et al. 2001 ; Deru et al. 2013).



Figure I-43. Coupe dans le fossé de l'enceinte augustéenne, les clinoformes progradantes des comblements sont soulignées par les traits tiretés, la limite du creusement par le trait plein (Thomann et Péchart 2013).

Villes	Superficies	Sources
Rome — <i>Roma</i>	1 385 ha	Homo 1971
Reims — <i>Durocortorum</i>	<b>600ha</b>	Neiss 19 84 ; Rollet et al. 2001 ; Berthelot et al. 2013
Lyon — <i>Lugdunum</i>	200 ha	Lenoble, François-dit-Miret 2014 ; Faure 2019
Autun — <i>Augustodunum</i>	200 ha	Duval 1989b
Trêves — <i>Augusta Treverorum</i>	200 ha	Bayard et al. 2004 ; Coulon 2006
Soissons — <i>Augusta Suessionum</i>	100 ha	Pichon 2002
Paris — <i>Lutèce</i>	60 à 70 ha	De Carbonnières 1997
Bavay	40 ha	Desmulliez et al. 1988

Tableau I-1. Comparaison des superficies de quelques agglomérations de Gaule et de Rome.

### 3.6.4. La première grande transformation urbaine : de la refondation de la période augustéenne vers la ville de plan régulier

Entre le début du I<sup>er</sup> siècle et la fin du III<sup>e</sup> siècle après J.-C., marqué par l'affirmation du statut de capitale de la ville, l'urbanisme connaît une refondation accompagnée d'une monumentalisation majeure (Neiss 1984 ; 2005). Le maillage urbain régulier et orthonormé s'étend sur la superficie définie par la grande enceinte tout en intégrant les contraintes liées à

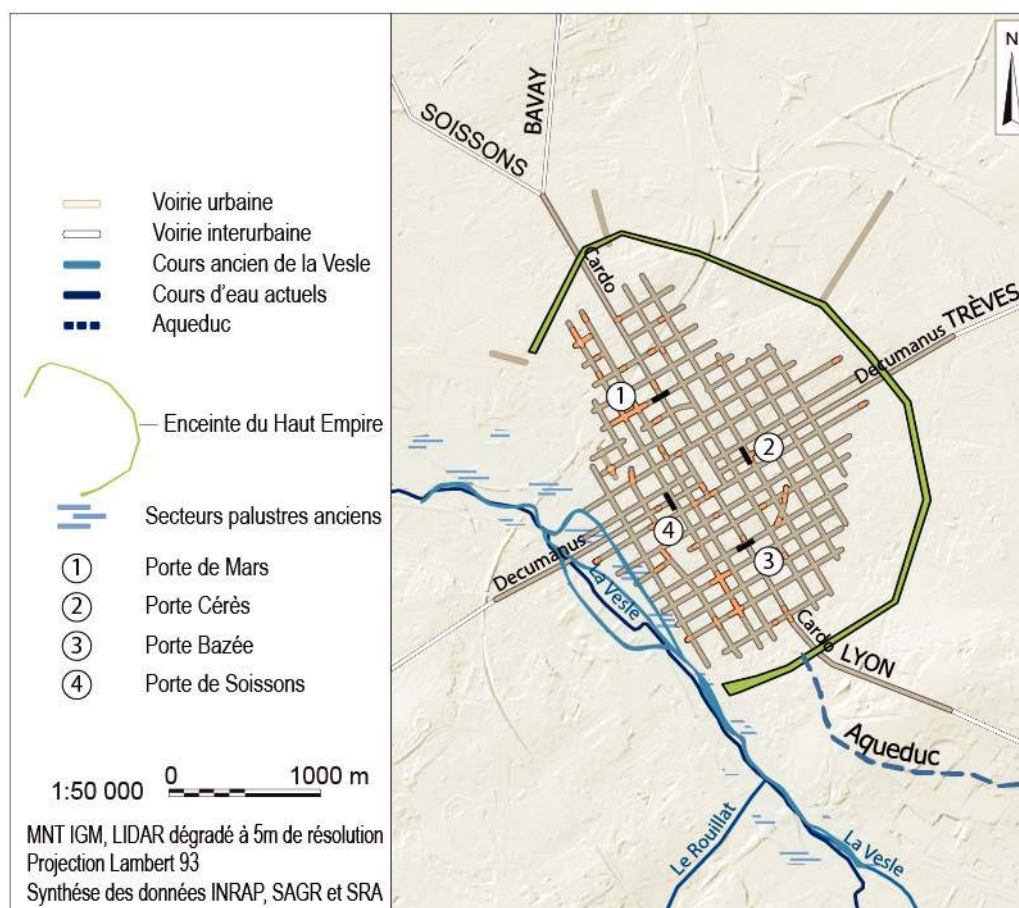


Figure I-44. Refondation urbaine de Durocortorum et édification de l’enceinte augustéenne (développement à l’intérieur de la « Grande enceinte ») (Données SRA, Neiss et Rollet 2010).

l’existence du fossé de l’*oppidum* encore présent, marqué par le tracé courbe de tronçons de voies (Berthelot *et al.* 2013 ; Figure I-42 et Figure I-44).

Dans ces premiers temps du règne d’Auguste, la ville, nouvellement élevée au rang de capitale de province fédérée, se pare d’un premier *forum* (Berthelot *et al.* 2013) mais aussi de temples, comme celui dont est issu le cénotaphe des Princes de la Jeunesse (Neiss 1982 ; Neiss et Deniaux 1992).

Au cours de cette période, la ville s’affranchit des limites de son enceinte antérieure devenues obsolètes et évolue progressivement vers une nouvelle forme urbaine (Figure I-44). Elle se développe jusqu’aux berges marécageuses de la Vesle, ce qui donne lieu à leur stabilisation et notamment par la mise en œuvre d’aménagements de berges conséquents (Rollet 2016 ; Gucker 2020).

C’est au cours de cette période d’opulence que la ville se dote de la plupart des bâtiments de sa parure monumentale. La ville s’équipe rapidement, au début du I<sup>er</sup> siècle, d’un aqueduc long de près de 40 km (Rabasté 2010). Après le I<sup>er</sup> siècle, la ville se pare d’un amphithéâtre (Sindonino 2013), de thermes qui seront sans cesse rénovés et reconstruits jusqu’au IV<sup>e</sup> siècle après J.-C. (Deneux 1944), d’un *forum* de style et de dimensions comparables à ceux de Trèves (Cüppers 1979), de Bavay (Frezouls 1973) ou de Lutèce (Duval 1955 ; 1989 b).

Un grand ensemble cultuel comportant plusieurs sanctuaires et daté de la fin du II<sup>e</sup> siècle-début du III<sup>e</sup> siècle a été mis au jour au nord de la ville (Rollet 2006), complété dans un secteur proche par la découverte récente d'un temple de plan octogonal (Péchart et Arnaud 2014).

Dans le premier quart du III<sup>e</sup> siècle, quatre arcs monumentaux sont érigés, enjambant les axes principaux, renforcent l'image ostentatoire de la ville. Le seul encore en élévation au nord et les données connues sur son homologue au sud, en font les deux plus larges arcs du monde romain (Lefèvre 1980 ; Lefèvre *et al.* 1985). Leurs pendants oriental et occidental ont totalement disparu, à l'exception de quelques éléments de soubassements retrouvés à la faveur des aménagements du tramway, rue de Vesle (Sindonino 2013).

L'habitat, lui aussi, continue d'évoluer vers les standards de la construction romaine avec un souci constant apporté au confort (Brunet-Gaston 2008). Les façades des maisons donnant sur la rue sont graduellement équipées de portiques ce qui fait écrire à Berthelot *et al.* (2013) que « *ce sont au moins 17 000 piliers de portiques qui sont construits. [Et que] Ils matérialisent une normalisation du paysage urbain qui devient le cadre (décor) de la mise en scène des monuments* ». Les rues, fixées dans leurs tracés, sont dotées de caniveaux latéraux et de grands collecteurs d'égouts monumentaux (Sindonino 2013 ; Bontrond *et al.* 2015). La présence d'un système élaboré d'adduction d'eau sous pression est également documenté dans de nombreuses opérations de fouille recoupant des portions de voirie (Balmelle et Neiss 2003 ; Balmelle et Sindonino 2004).

Très récemment, Neiss (à paraître) a proposé une nouvelle hypothèse associant le fossé de la Grande Enceinte à l'oppidum lui attribuant une fonction rituelle. S'appuyant sur une synthèse des sondages archéologiques le concernant, il propose également une nouvelle géométrie pour cette enceinte, mais également son doublement par un nouveau fossé à l'époque augustéenne dont la fonction, discutée, pourrait être d'ordre juridique.

### 3.6.5. Les grandes transformations de l'Antiquité Tardive

Dans la première moitié du IV<sup>e</sup> siècle après J.-C., en réponse à la période de récession de la fin de la seconde moitié du III<sup>e</sup> siècle, la structure urbaine de *Durocortorum* se modifie profondément. Dans son étendue tout d'abord, puisque c'est pendant cette période qu'est édifiée l'enceinte tardo-antique (Figure I-45), donc la construction est datée entre les décennies 330-350 après J.-C. (Neiss et Sindonino 2004 ; Neiss et Rollet 2010). La fonction de cette fortification est évidemment défensive en réponse aux grandes déstabilisations que connaît la période, mais, de la même manière que pour l'*oppidum*, l'enceinte possède également une fonction ostentatoire d'affirmation du pouvoir et de l'opulence de la ville (Berthelot *et al.* 2013). Il s'agit en effet d'afficher la pérennité du statut de capitale de la ville et de proclamer son statut.

Cette enceinte est composée d'un système de rempart ponctué de tours et bordé d'un fossé lui-même prolongé d'un glacis, portant l'emprise totale du dispositif à 100 m de profondeur pour une hauteur de 10 m est une longueur de 2 880 m (Balmelle et Sindonino 2004 ; Neiss et Sindonino 2004). Les entrées de la ville sont alors assurées par les arcs monumentaux reliés entre eux par la muraille et parfois flanqués par des tours (Lévêque 1991) cf. *infra* Figure I-57.

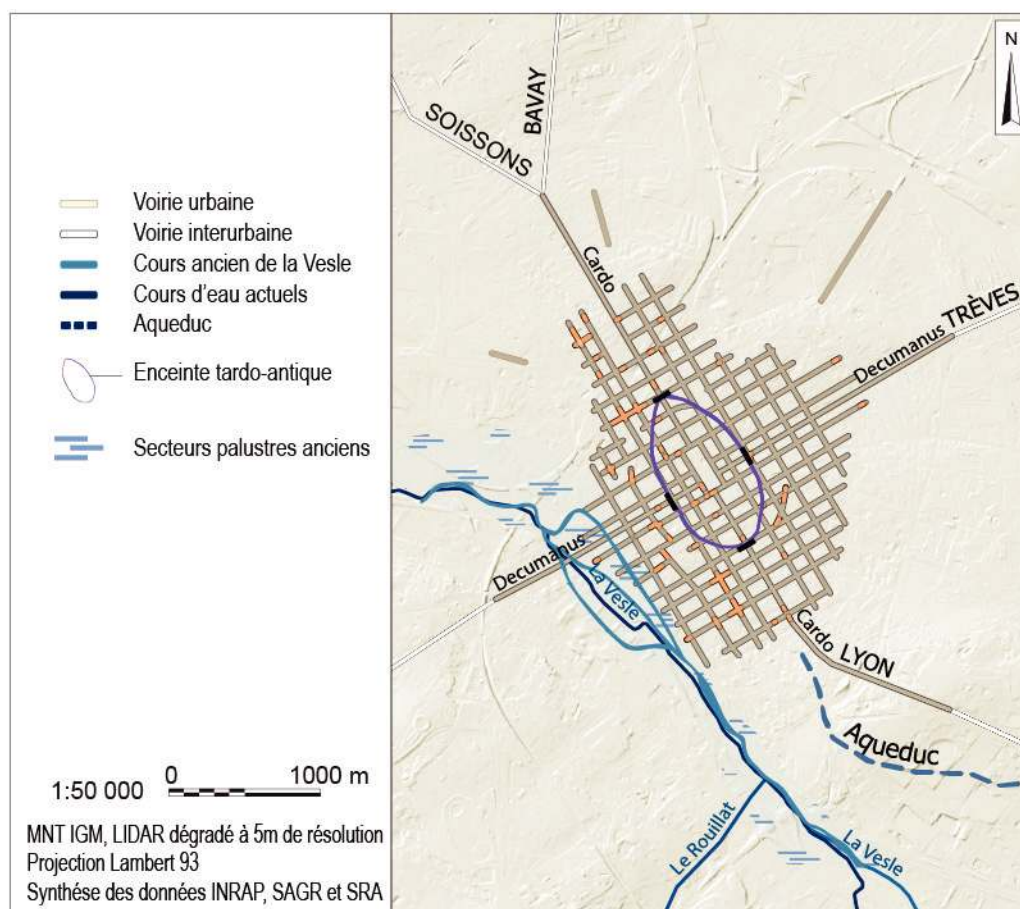


Figure I-45. Contraction urbaine et densification de l'occupation dans l'enceinte tardo-antique (« petite enceinte » par contraste) (Données SRA, Neiss et Rollet 2010).

L'espace suburbain qui s'étend au-delà de la fortification n'est pas totalement abandonné, mais réaffecté au moins en partie à d'autres usages notamment avec l'implantation de nouvelles nécropoles. Les monuments qui s'y trouvent sont progressivement démontés pour permettre le emploi de leurs matériaux (Neiss et Sindonino 2004 ; Brunet-Gaston 2008). Une partie de ces destructions est par ailleurs contemporaine de l'édification du rempart, comme l'atteste l'exhumation de blocs appartenant à des temples en emploi dans les soubassements de la muraille (Neiss 1973 ; Balmelle et Sindonino 2004 ; Brunet-Gaston 2008). D'autres édifices changent radicalement d'affectation, comme les temples de la rue Belin qui voient l'aménagement de puits monumentaux (Rollet 2006 ; Chossenot *et al.* 2010), traduisant l'expression de très importants besoins en eau. La présence de nombreuses pièces d'équipements militaires (en particulier des fers à cheval ou des hipposandales<sup>28</sup> (Terrisse 2000 ; Rollet 2006), relevée lors des fouilles de ces puits a permis de poser l'hypothèse d'une occupation du site par des unités militaires avec des chevaux.

28. Pendant l'Antiquité, en l'absence de ferrure, les sabots des chevaux étaient protégés du contact du sol et de l'usure en résultant d'un appareillage fréquemment en fer, maintenu solidaire par des liens en cuir ou en fibres végétales (Brives 2017).

Un autre témoignage du remploi des matériaux des bâtiments abandonnés est signalé par Brunet-Gaston (2008), qui a observé par ailleurs la présence dans les blocs trouvés à l'occasion d'une fouille de la rue Pontgivart (Lefils 2008), d'éléments lapidaires retaillés dont le module correspondrait à ceux destinés à approvisionner un four à chaux.

La structure du maillage urbain n'évolue qu'à la marge avec le percement d'une nouvelle rue ou chemin de ronde qui longe la partie interne de la fortification (Balmelle et Sindonino 2004). Le maillage intérieur ne semble pas être modifié. La présence continue de bâtiments thermaux successifs sur le site actuel de la Cathédrale depuis le I<sup>er</sup> au V<sup>e</sup> siècle après J.-C. est attestée aussi bien par des traces épigraphiques (Demaison 1885) que par des traces archéologiques observées en 1920, puis entre 1993 et 1995 (Deneux 1944 ; Neiss et Berry 1995). L'inscription dédicatoire de Constantin liée au dernier état de reconstruction des thermes (Demaison 1885) fournit la preuve de la persistance d'un grand dynamisme urbain accompagnant la reconstruction de grands bâtiments publics. Le maintien de ces édifices et d'un habitat de l'élite montre que la ville reste opulente (Balmelle et Neiss 2003 ; Neiss et Sindonino 2004 ; Berthelot *et al.* 2013). L'extension urbaine du XIII<sup>e</sup> siècle sera l'occasion de justifier le remplacement de ce rempart par l'enceinte médiévale (Pichard 2014).

### 3.7. La parure monumentale de la ville à travers l'Antiquité

Si la parure monumentale de la ville originelle reste peu connue, les édifices qui ont été érigés à partir du I<sup>er</sup> siècle après J.-C. sont mieux documentés (Fichtl 2004). Certains d'entre eux restent par ailleurs en activité pendant une longue période, jusqu'à la fin de l'Empire. D'autres sont construits plus tardivement, que ce soit pendant la refondation augustéenne de la ville ou dans l'Antiquité Tardive. Les monuments inventoriés ici sont un reflet de ce qui est connu et documenté à ce jour (Figure I-46 ; Chossenot *et al.* 2010). D'autres édifices uniquement suspectés ou inconnus sont encore susceptibles d'être mis au jour au fur et à mesure des opérations de fouilles entreprises dans la ville.

#### 3.7.1. Le complexe monumental du *forum*

Découvert en 1838, par Brunette (Frezouls 1973), ce grand ensemble monumental a été redécouvert à la fin des années 1930 à l'occasion de la réhabilitation du marché couvert (l'actuelle Place du *forum* était dénommée Place du marché). Un bâtiment de type cryptoportique<sup>29</sup> (Figure I-47) a permis de conclure à l'existence d'un grand forum sur ce site central implanté à la croisée des deux axes majeurs de la ville. Il est constitué d'une grande nef de 57 m de long pour 11 m de large couverte par une voûte en mortier de tuileau portée par des piliers en pierre de taille. La partie du cryptoportique actuellement conservée n'est qu'une petite composante d'un vaste ensemble monumental que Frézouls (1973), le premier à avoir étudié le monument, a initialement comparé à celui de Bavay. D'autres auteurs l'ont également comparé à celui de Trêves (Cüppers 1979 ; Berthelot *et al.* 2013).

29. Cryptoportique : galerie (ou ensemble de galeries) destinée à la circulation ou au stockage et intégrée dans un complexe bâti plus vaste, en usage dans l'Antiquité romaine. Ce terme n'était pas en usage dans l'Antiquité, mais est un néologisme.



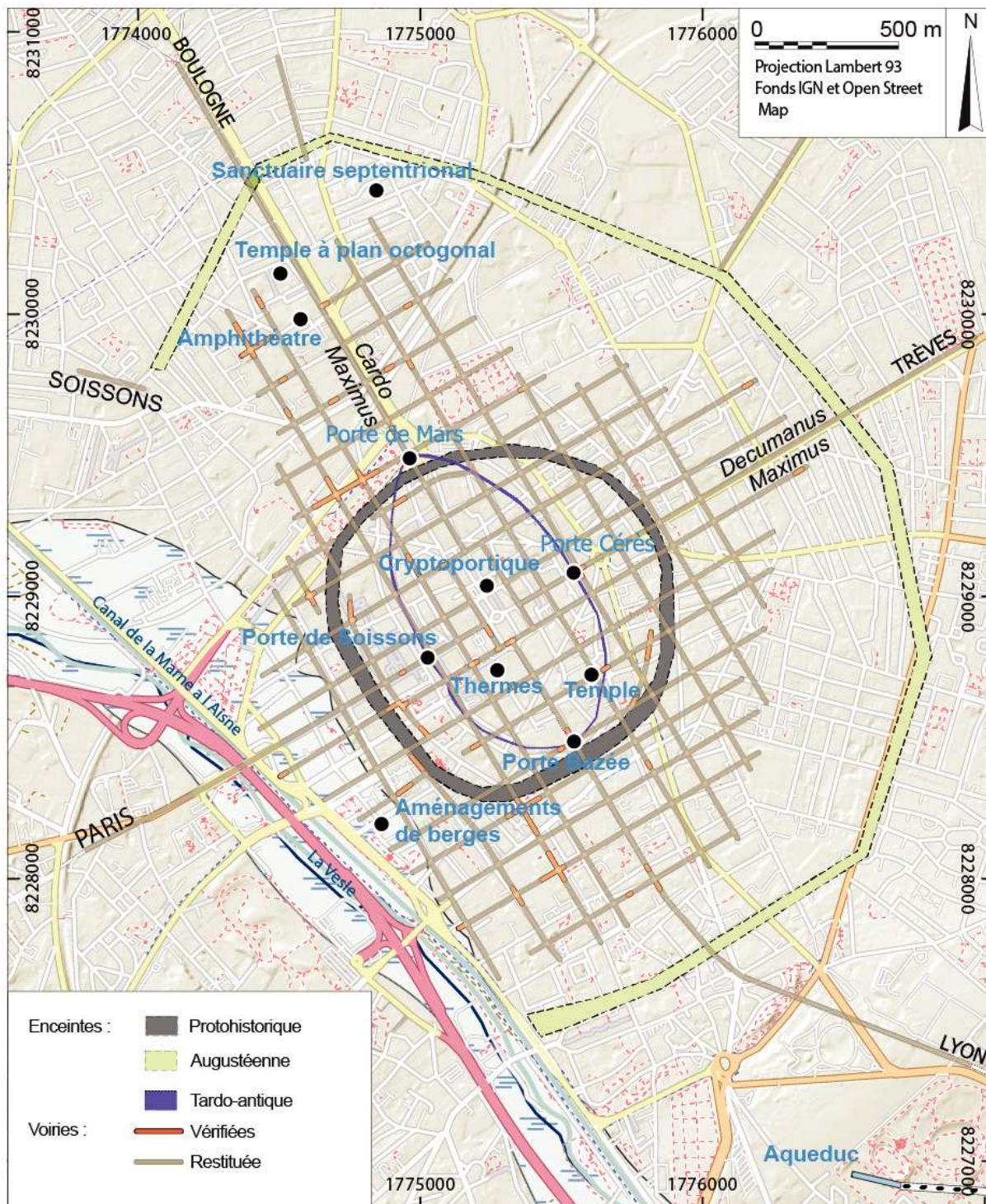


Figure I-46. Localisation des éléments de la parure monumentale et des aménagements de Durocortorum documentés à ce jour (d'après les données du SRA Champagne Ardenne et Péchart et Arnaud 2014 ; Neiss *et al.* 2015 ; Neaud *et al.* à paraître).

Les restitutions actuelles évoquent un schéma de *forum* tripartite à organisation axiale encadrant une grande place centrale (Chossenot *et al.* 2010). Les superstructures n'ont pas laissé de traces, mais les reconstitutions montrent l'existence probable d'une galerie monumentale bordée d'une double rangée de colonnes avec les façades donnant sur la rue bordée de boutiques (Berthelot *et al.* 2009). L'aire intérieure ainsi délimitée par les portiques accueillait probablement l'emplacement d'un temple dont l'emprise ne nous est pas précisément connue (Chossenot *et al.* 2010).

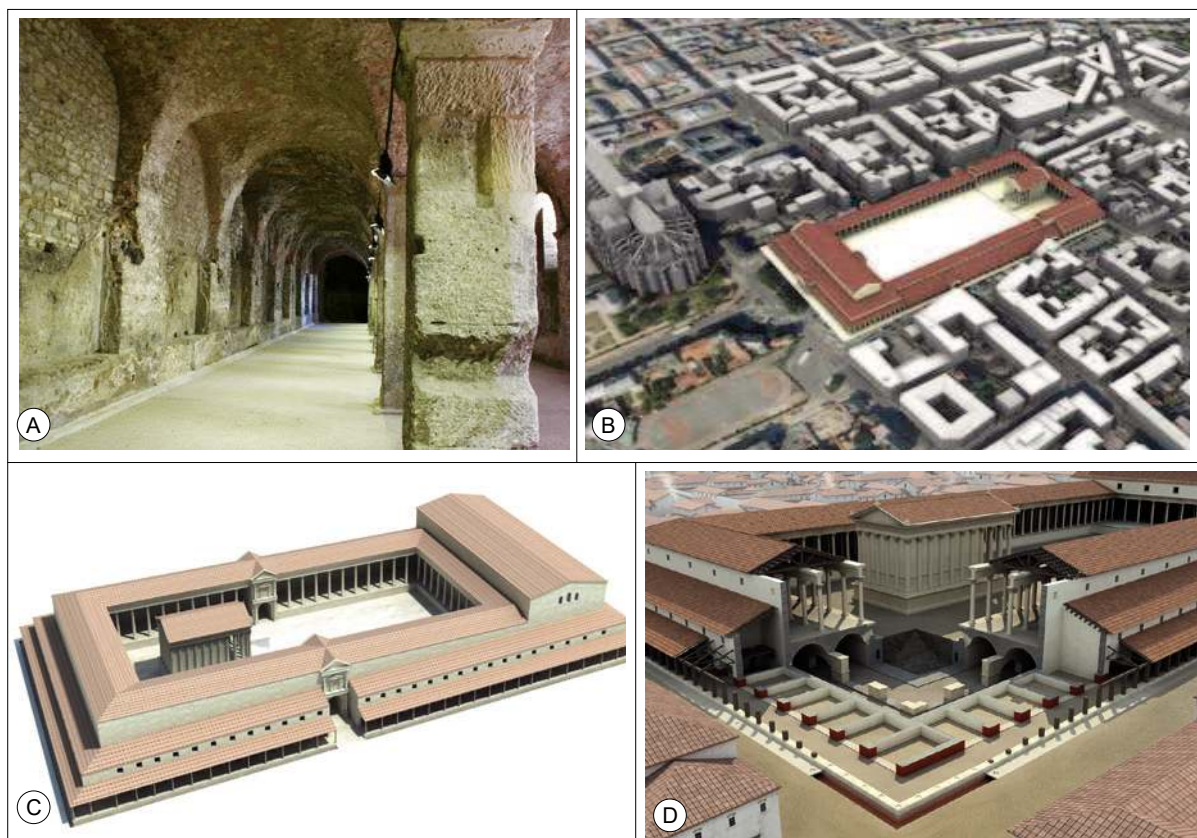


Figure I-47. A. Le cryptoportique de Reims dans son état actuel ; B. Restitution du Forum de *Durocortorum* projeté à son emplacement dans l'urbanisme de Reims (infographie Xavier Briand d'après Maxence Poirier (Berthelot *et al.* 2009) ; C. et D. vues d'ensemble de la reconstitution 3D du *forum* de Lutèce et écorchée sur les boutiques et les cryptoportiques montrant une structure très similaire des deux bâtiments (infographie Archéo 3D ; Collectif 2009).

### 3.7.2. Le Cénotaphe<sup>30</sup> des Dieux Mânes de la jeunesse

Il s'agirait du plus ancien monument connu à Reims (Neiss et Deniaux 1992), probablement érigé au cours du I<sup>er</sup> siècle après J.-C.<sup>31</sup>, les dimensions de la façade du monument atteindraient 6 m de longueur. Plusieurs auteurs ont proposé des localisations pour son édification initiale, selon Neiss (1982) et Vassileiou (1982) il aurait été élevé le long du *Cardo* à l'extrémité de sa branche sud, pour Van Andringa (2017) au contraire, ce monument aurait été élevé dans l'espace central du *forum*, où il constituait tout ou partie du temple central qui n'a pas laissé de traces. En effet, les blocs qui le composent n'ont pas été trouvés sur le site de l'édification du monument, mais en emploi dans les soubassements du rempart tardo-antique au sud de la ville (Neiss 1973) et sont aujourd'hui exposés au musée Saint Remi (Figure I-48).

30. Un cénotaphe est un type de tombeau qui n'est pas destiné à recevoir le corps d'un mort, même s'il prend la forme exacte d'une tombe. Son architecture est celle des monuments funéraires dimensionnés pour qu'il puisse être utilisé à plusieurs reprises (Ginouvens *et al.* 1998). Dans les faits, un cénotaphe est une tombe symbolique pouvant s'assimiler dans sa forme à un temple dédié à des personnages illustres décédés.

31. Communication orale V. Brunet-Gaston pour qui les blocs portant des décors de guirlandes et d'acanthes associés à la dédicace sont typiquement augustéens

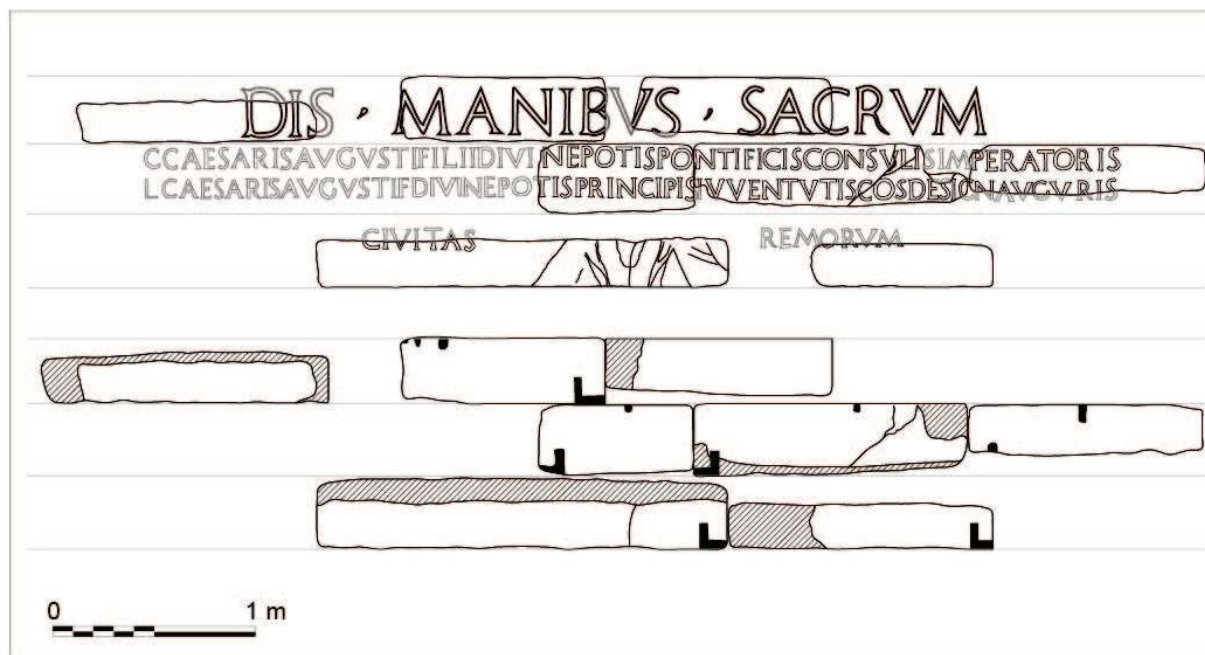


Figure I-48. L'inscription attribuée au cénotaphe des dieux Mânes de la jeunesse tel que reconstitué par Neiss (2016) suite à sa découverte dans les fondations du Rempart de l'Antiquité Tardive et reconstituée au musée Saint Rémi.

Les blocs le constituant ont été exhumés dans les substructures du rempart tardo-antique, au voisinage immédiat de la pile orientale de la Porte Bazée (Neiss 1973), arc monumental enjambant le *Cardo Maximus* dans sa portion sud. Le texte<sup>32</sup> gravé est une dédicace rendant hommage à Caius et Lucius César décédés tous deux dans les premières années du 1<sup>er</sup> siècle :

« *Dis Manibus S(acrum) / C. Caesaris, Augusti fili, divi nepotis / Pontificis consulis imperatoris / L. Caesaris, Augusti fili, divi nepotis, / Principis juventutis, cos designa, Auguris, / Civitas (foederata) Remorum.* »

« Consacré aux dieux Mânes de Caius César, fils d'Auguste, petit-fils du Divin, Pontife, consul, salué *imperator* (et) Lucius César, fils d'Auguste, petit-fils du divin, Prince de la jeunesse, consul désigné, augure. La cité fédérée des *Rèmes* (a dédié) ».

Il a été proposé que cette inscription dominante ait été portée sur la façade d'un temple ou d'un monument à l'image de la « Maison Carrée » de Nîmes (Figure I-49) à la fois contemporaine et dédicacée aux mêmes personnages (Amy 1970 ; Neiss 2016) :

« *C. Caesari. Avgvsti. f. cos. L. Caesari. Avgvsti. f. cos. designato Principibvs . Ivventvtis* »<sup>33</sup>

32. Traduit par Nicole Moine et Thomas Morin (Neiss 2016)

33. « À Caius Caesar consul et Lucius Caesar consul désigné, fils d'Auguste, princes de la jeunesse » (Amy 1970)



Figure I-49. La « Maison carrée » de Nîmes initialement dédiée aux princes de la jeunesse, Caius et Julius César.

### 3.7.3. L'aqueduc

L'aqueduc antique (Figure I-50) bien qu'essentiellement situé en dehors de la ville en est à la fois son émanation et sa justification (Rabasté et Arduin 2010). Il a fait l'objet d'une publication de synthèse qui a permis de faire le point sur les connaissances architecturales de l'ouvrage hydraulique et sur la précision de son tracé sur près de 40 km (Rabasté et Arduin 2010). La construction de cet imposant ouvrage de génie civil se situe dans le premier quart du I<sup>er</sup> siècle de notre ère et il semble avoir été en fonctionnement jusqu'au IV<sup>e</sup> siècle.

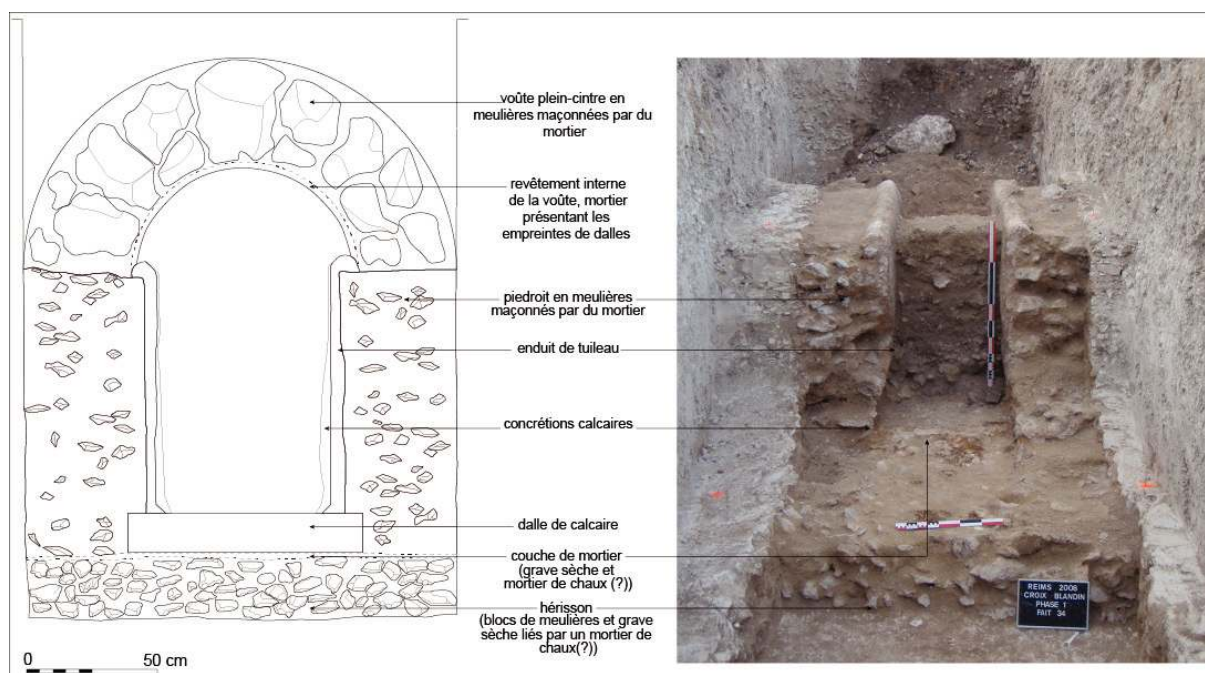


Figure I-50. Coupe et proposition de restitution de l'aqueduc en tranchée (cliché, DAO : Y. Rabasté, INRAP Rabasté et Arduin 2010).

Les matériaux qui le constituent et en particulier les dalles de calcaires formant la base du chenal sont ensuite intensivement récupérées au cours du Moyen-Âge au point qu'il n'en subsiste plus que quelques tronçons en œuvre (Rabasté 2010 ; Fronteau 2010 ; Fronteau *et al.* 2011).

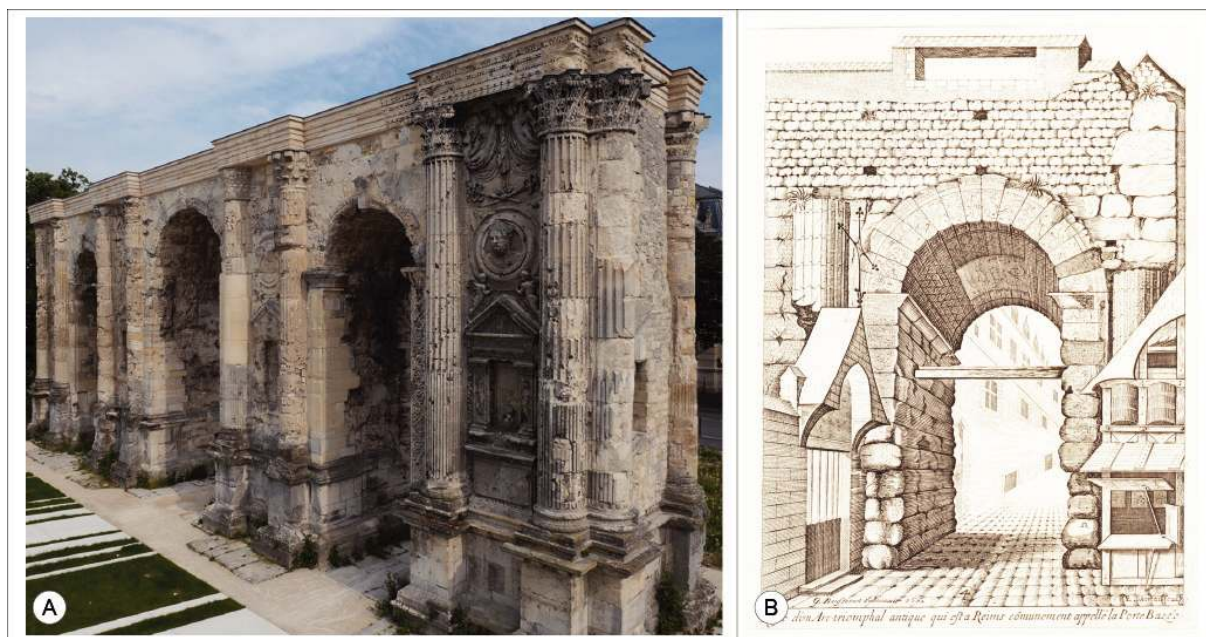
#### 3.7.4. Les arcs monumentaux

Il est traditionnellement admis que quatre arcs monumentaux se sont élevés à l'intérieur de l'enceinte de Reims. Ils ont été érigés à la limite du centre administratif et monumental de la ville, enjambant les principaux axes de circulation. Les noms connus actuellement pour ces monuments ont été, dès le XII<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> siècle, emprunté aux portes médiévales (Demaison 1879 ; Chossenot *et al.* 2010). Ces Arcs monumentaux sont :

- **La Porte de Mars au nord (*Porta Martis*), la seule dont la mémoire du nom initial a traversé l'Histoire ;**
- **La Porte Bazée (ou Porte Collatrice — *Porta Collatia*) au sud ;**
- **La Porte de Soissons (*Porta Suessonica*) ou Porte de Vesle, Porte de Vénus (Lefèvre 1980 ; 1985) à l'ouest ;**
- **Et la Porte de Trêves (*Porta Treverica, Porta Trevirensis* ou Porte Cérés — *Porta Cereris*) à l'est.**

#### La Porte de Mars :

La Porte de Mars (Figure I-51), au nord, est la dernière porte monumentale de la ville encore en élévation. Avec ses 32,5 m de longueur pour 6,5 m de largeur et 12,5 m de hauteur, c'est le plus grand arc connu encore en élévation du monde romain (Lefèvre 1980 ; Lefèvre *et al.* 1985). Elle illustre encore parfaitement l'image ostentatoire et d'opulence que la ville cherchait à donner d'elle-même lors de son érection. Nous reviendrons sur cet édifice plus en détail dans ce travail de thèse, car ses matériaux de construction ont fait l'objet d'une étude complète.



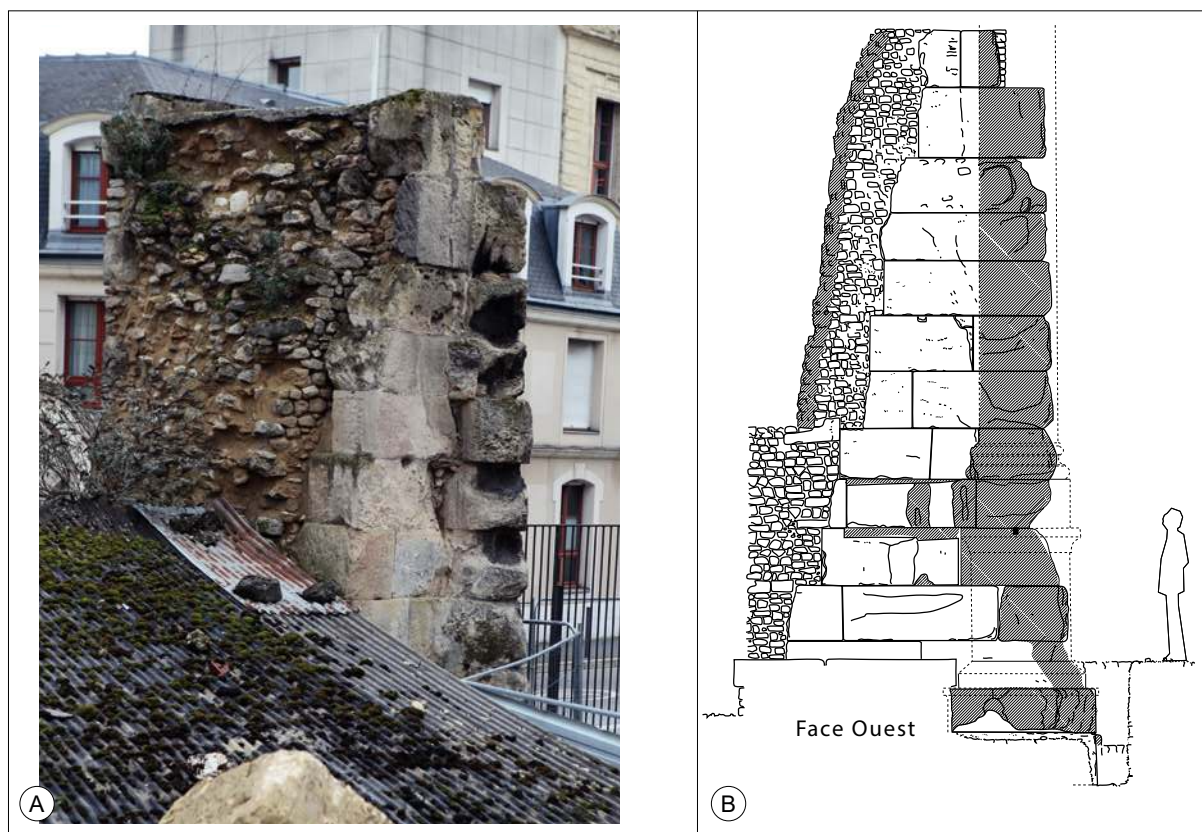


Figure I-52. Les ruines de la Porte Bazée dans l'enceinte du Collège Université à Reims. A. Vue de la face ouest des ruines depuis l'intérieur du collège ; B. Relevé archéologique interprétatif de la même face (Neiss 1973).

### **La Porte Bazée :**

Au sud de la ville antique, en position symétrique de la Porte de Mars par rapport au *forum* dont elle est distante de 400 m, sur le *Cardo maximus* s'élevait la Porte Bazée (Figure I-50 B et Figure I-52). Vraisemblablement de même dimension que la Porte de Mars, elle lui est probablement contemporaine. Dédiée à Bacchus, Flodoard (1824) en fait mention dans ses chroniques sous le nom de *Porta Collaticia* (Porte Collatrice) et de *Porta Basilicaris* (Porte de la Basilique). Son emprise a été attestée par les fouilles de 1972 (Neiss 1973) et de 1991 (Lévêque 1991). Tout comme son homologue du nord de la ville, l'Arc était constitué de trois baies décorées comme l'attestent la gravure de G. Baussonnet (gravé par E. Moreau, *in* N. Bergier, 1635) et les fouilles menées à son pied (Lévêque 1991). L'arcade orientale, seule encore debout au XVIII<sup>e</sup> siècle a été détruite en 1752 (Neiss 1973). Son emplacement est marqué aujourd'hui par les restes ruinés d'un fragment de pile et deux plaques commémoratives de part et d'autre de la rue de l'Université.

### **La Porte de Soissons et La Porte de Trèves :**

L'existence de ces deux Arcs a longtemps été hypothétique. En effet, leurs superstructures semblent avoir disparues assez rapidement et leurs constituants réemployés. C'est pendant l'aménagement du tramway que les vestiges des fondations d'une pile d'un arc ont été mises au jour sur le tracé du *Decumanus maximus* à l'ouest de la ville (Sindonino 2013). Fondations dont les dimensions sont proches encore une fois de celle de la Porte de Mars. Ces vestiges sont comme les précédents associés à la présence d'un égout monumental (Sindonino 2013).

L'Arc dit de Trêves (ou de Cérés) n'est connu que par quelques mentions sur des plans sans toutefois la représenter. Il est possible qu'elle ait été très tôt démantelée pour dégager l'ouverture vers l'est de la ville en plein développement pendant le Moyen-Âge (Chossenot *et al.* 2010).

### 3.7.5. Les thermes

C'est au cours des fouilles de la cathédrale, dans les années 1920-1930, que les vestiges de thermes ont été mis au jour (Deneux 1944). Ces édifices publics étaient situés à proximité du *forum* et « manifeste la pérennité d'une fonction urbaine essentielle, héritée du Haut Empire » (Neiss et Sindonino 2004). Ils s'étendaient à l'emplacement actuel de la cathédrale sur une superficie estimée à plus de 1 ha (Neiss 1984 ; Berthelot *et al.* 2013). Il s'agit non pas d'un édifice isolé, mais d'une succession de thermes établis sur le même site entre le I<sup>er</sup> et le IV<sup>e</sup> siècle après J.-C. (Pietri *et al.* 2006 ; Rabasté et Arduin 2010).

### 3.7.6. L'ensemble monumental culturel septentrional

À la limite septentrionale de l'agglomération s'élevait entre la fin du II<sup>e</sup> siècle-début du III<sup>e</sup> siècle un ensemble cultuel assez vaste comprenant plusieurs temples et sanctuaires (Figure I-53, Figure I-54 et Figure I-35 ; Rollet 2006 ; Péchart et Arnaud 2014 ; Rollet et Jouhet à paraître ; Péchart et Poupon à paraître). Ces ensembles, notamment constitués d'une construction de type cryptoportique, s'étendaient sur une surface restituée correspondant à environ 1 ha qui devait s'étendre à l'ouest du *cardo*, où ont été mises au jour les fondations d'un temple de plan octogonal avec une *cella*<sup>34</sup> circulaire (Péchart et Poupon à paraître).

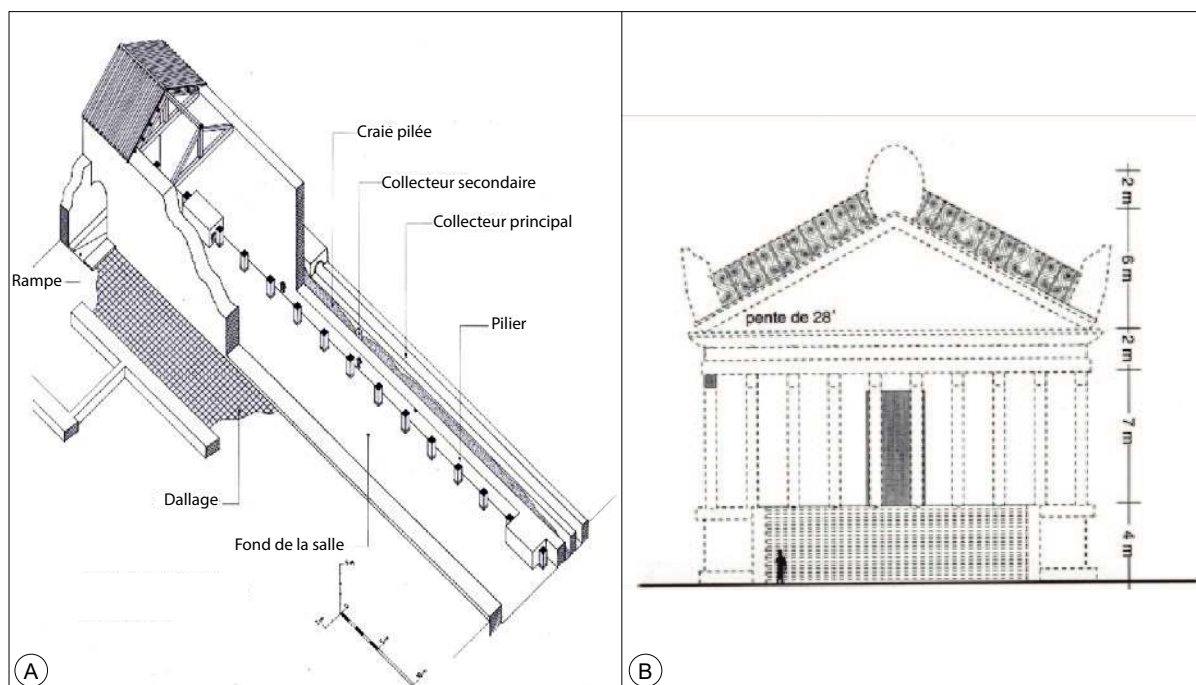


Figure I-53. Différentes restitutions d'un même ensemble architectural : Le sanctuaire monumental de la rue Belin A. Proposition de restitution du complexe (vue axonométrique, Maxence Poirier in Rollet 2006) et B. Seconde proposition de restitution du même édifice après étude des blocs architectoniques relevés lors de l'opération (Brunet-Gaston 2008).

34 La *Cella* désigne le corps d'un temple entouré de murs. Il peut former tout ou partie du monument (Ginouvens *et al.* 1992)

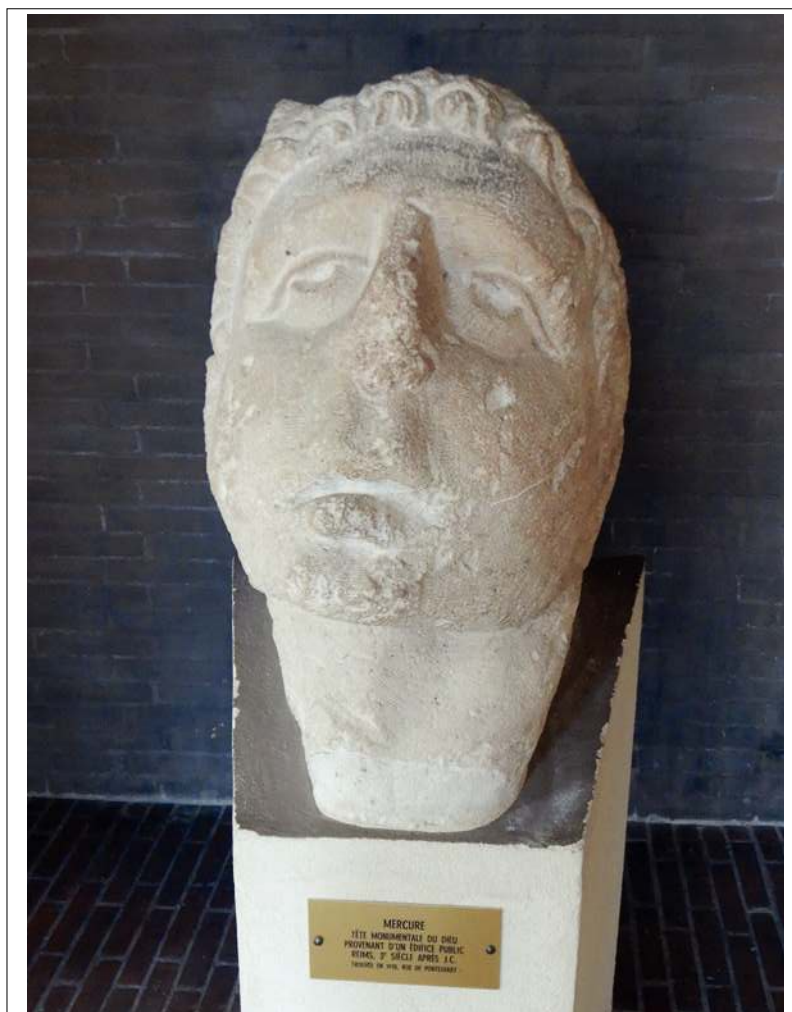


Figure I-54. Tête monumentale du Dieu Mercure trouvée en 1910 rue de Pontgivart sur le site d'un édifice public culturel du III<sup>e</sup> siècle après J.-C., auquel il était dédié (Musée Saint Remi, Reims).

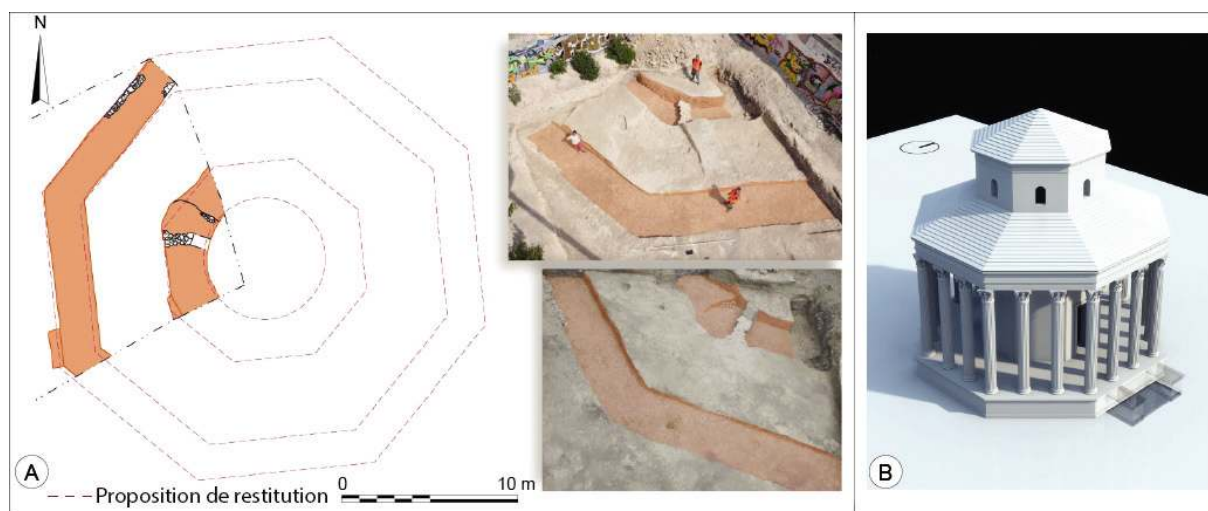


Figure I-55. A. Restitution du tracé des fondations du temple octogonal de la rue Lecointre (Péchart et Arnaud 2014) B. Restitution numérique du temple par modélisation 3D (Poirrier M. et F. Coqueret, *in* Péchart et Arnaud 2014).



En 1910, dans le secteur de la butte des Trois Piliers, rue de Pontgivart, fut exhumée une tête colossale en pierre (Figure I-54). Cet élément de statuaire est susceptible d'avoir été utilisé comme fronton d'un grand édifice public, probablement dédié à Mercure (Chossenot *et al.* 2010). Cette découverte a été réalisée à proximité du lieu où d'importants massifs de maçonnerie « de très belles factures » associées à des éléments de grands appareils ont été mis au jour pendant la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Ces découvertes inciteraient donc à penser à la possible présence d'un ensemble cultuel (sanctuaire), qui aurait été situé dans le secteur de la butte des trois piliers, dominant ainsi nettement la ville (Rollet 2006). Cependant, il n'est à ce jour pas possible de détailler cet ensemble pour lequel les données sont bien trop lacunaires, mais nouvellement objet d'une synthèse (Rollet et Jouhet à paraître).

Pour Berthelot (2013), cette concentration confirme à la fois la vocation culturelle de ce secteur ainsi que la réalité de la mise en scène monumentale privilégiant l'axe nord-sud de la ville. Au cours du III<sup>e</sup> siècle, ces temples sont détruits par un incendie (Rollet 2006) et les bâtiments sont alors exploités en carrière, probablement en partie pour la construction de l'enceinte tardo-antique (Rollet et Jouhet à paraître). Le site du grand sanctuaire est toujours occupé, mais change de destination, deux grands puits possédant des cuvelages monumentaux y sont aménagés. Ce site, et les 450 blocs utilisés pour la construction des puits vont fournir un corpus de géomatériaux abondant et cohérent qui permettra d'établir une référence pour les études de matériaux qui suivront (Fronteau et Paicheler 2005).

### 3.7.7. L'amphithéâtre

L'amphithéâtre<sup>35</sup>, dont l'existence était pourtant connue (Maquart *et al.* 1854), est probablement l'un des derniers monuments de *Durocortorum* dont les vestiges ont été attribués aux constructeurs antiques (Figure I-56 ; Brunette 1861 ; Neiss 1984). Son emplacement était sujet à spéculation depuis les descriptions du XIX<sup>e</sup> siècle et n'a été précisément connu qu'avec les fouilles préalables à la construction de la première ligne du Tramway, rue du Mont d'Arène (Sindonino 2013). Cette opération a permis l'exhumation d'une portion très limitée de l'édifice, montrant principalement deux murs arqués appartenant à la *cavea*<sup>36</sup> de l'édifice.

Les dimensions restituées de l'édifice (122 m x 100 m) le rendent comparable avec les arènes de Lutèce (132 m par 100 m ; Fierro 1996). Il a été estimé que cet édifice avait pu accueillir entre 10 000 et 12 000 personnes (Mathelart 2022). À ce jour, les informations recueillies sur ce bâtiment sont extrêmement ténues. Il semblerait plausible en revanche de considérer qu'en l'absence de relief préexistant, celui-ci devait probablement s'élever sur un massif artificiel de craie (Chossenot *et al.* 2010). Alors qu'aux Lutèce par exemple ou encore à Château-Thierry ou à Barzan, les arènes ont été adossées aux massifs constitués par les déblais produits par le creusement de leurs parties centrales (arènes) et adossées au relief (Blary 1999 ; Nadeau 2008).

La complète récupération de ses matériaux de construction et le nivellement occasionné par la mise en culture du terrain, puis la construction de l'église Saint-Thomas ont totalement oblitéré les traces de sa présence dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle (Neiss et Sindonino 2004 ;

35. Comme son nom l'indique, l'amphithéâtre et un théâtre « des deux côtés », dont les gradins dessinent une figure arrondie complète autour de l'espace destiné aux spectacles. Cette forme est normalement celle d'une ellipse (Ginouvs et al. 1998).

36. La *cavea* est le nom donné à la partie du théâtre réservée aux spectateurs. Il s'agit de la partie maçonnée en arc de cercle (ou ellipse) qui peut être dotée de gradins dans les superstructures (Ginouvs et al. 1998).

Chossenot *et al.* 2010). Les fouilles réalisées lors des travaux du tramway (Sindonino 2013), ont néanmoins précisé la date de sa construction à la fin du I<sup>er</sup> siècle après J.-C. Des mentions de son utilisation comme lieu de réunion démontrent également qu'il a, au moins en partie, subsisté jusqu'au XIII<sup>e</sup> siècle (Demaison *et al.* 1912 ; Neiss et Sindonino 2004).



Figure I-56. Lieu-dit du Mont d'Arène. Vue des vestiges des superstructures de l'amphithéâtre, Restes du Mont-Arène (lithographie d'après les croquis de Mr Maquart dans *Chronique de Champagne* t II p 21 ; BMR n° XXIX, II, 1).

### 3.7.8. Le rempart tardo-antique

Parfois qualifiée « d'enceinte constantinienne » (Chossenot *et al.* 2010), elle est désormais bien connue. Bien qu'en très grande partie démantelée au cours du Moyen-Âge (XII-XIII<sup>e</sup> siècle ; Neiss et Sindonino 2004 ; Pichard 2014) pour laisser place à l'édification d'une nouvelle fortification, les vestiges du rempart ont été observés en plusieurs occasions (Figure I-57). Il a également fait l'objet d'une synthèse au début des années 2000 (Neiss et Sindonino 2004).

Cette fortification monumentale a nécessité pour sa construction la destruction de nombreux monuments antérieurs situés aussi bien à l'intérieur de la nouvelle enceinte (Cénotaphe des dieux Mânes) qu'à l'extérieur de celle-ci (grandes *Domus* et autres monuments dont la destruction est contemporaine). Elle est le symbole des mutations importantes qui ont affecté la ville entre la seconde moitié du III<sup>e</sup> et le V<sup>e</sup> siècle après J.-C. À l'heure actuelle, seuls des éléments de soubassement ont été exhumés pour cet édifice (Neiss 1973, 1991, Balmelle *et al.* 2003, Neiss et Sindonino 2004). À l'occasion de la fouille des alentours de la Porte Bazée a également été dégagé un fragment du parement des élévations de cette enceinte, qui n'ont malheureusement pas été conservés (Neiss et Sindonino 2004).

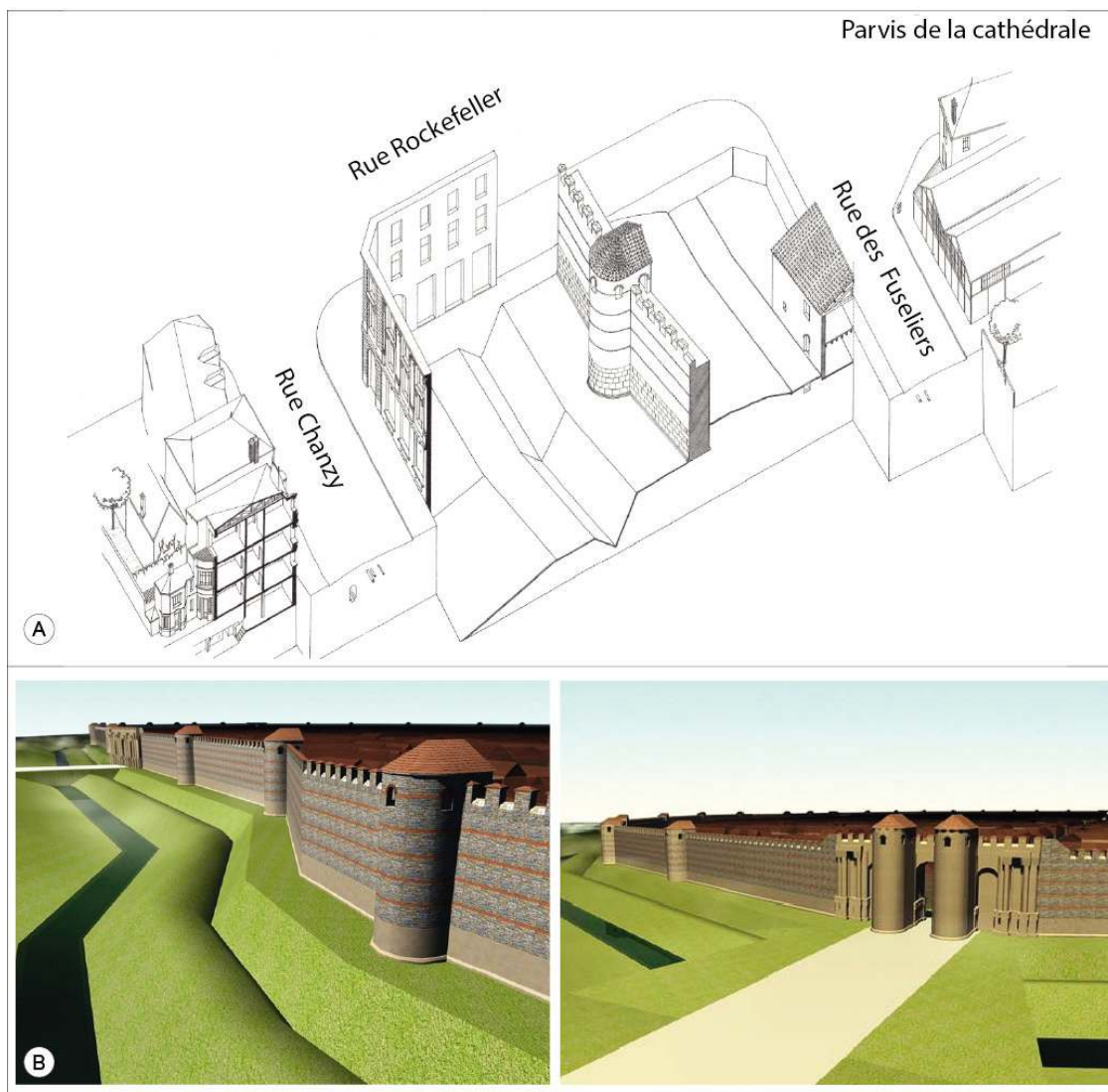


Figure I-57. A. Reconstitution de la portion de rempart exhumée au cours des fouilles de la médiathèque – Rue Rockefeller (Balmelle et Sindonino 2004). B. Restitutions numériques du rempart de la ville tardo-antique au sein duquel s'insèrent les arcs monumentaux reconvertis en portes de ville (M. Poirier in Berthelot et al. 2009).

### 3.7.9. Les bâtiments d'habitation et d'artisanat

Comme le soulignait Neiss dans sa préface de la synthèse sur l'habitat (Balmelle et Neiss 2003), les constructions dévolues à l'habitation et à l'artisanat représentent une composante essentielle du paysage urbain. En effet, elles occupent au sein de la cité une surface considérable au regard des édifices publics et des monuments remarquables. Leur nombre et leur densité sont tellement importants que rares sont les opérations archéologiques réalisées dans le périmètre antique de Reims à ne pas livrer, sur une ou plusieurs de ses couches stratigraphiques des traces d'habitats, ou d'établissements artisanaux. Ces derniers sont répartis entre deux grandes typologies : 1. l'habitat vernaculaire (ou indigène Figure I-58) et 2. l'habitat classique d'influence italique regroupant *domus*, et *insula* (cf. Figure I-32 et Figure I-35). Ces bâtiments ont laissé des empreintes variables dans l'enregistrement archéologique, largement fonction de l'importance de l'utilisation des matériaux périssables dans leur construction. On notera néanmoins que la brique crue ou carreau de terre est utilisée dans tous les types de construction et, comme le souligne Delencre (2017) ce matériau est très spécifique de la partie du territoire des *Rèmes* qui s'étend sur la craie.

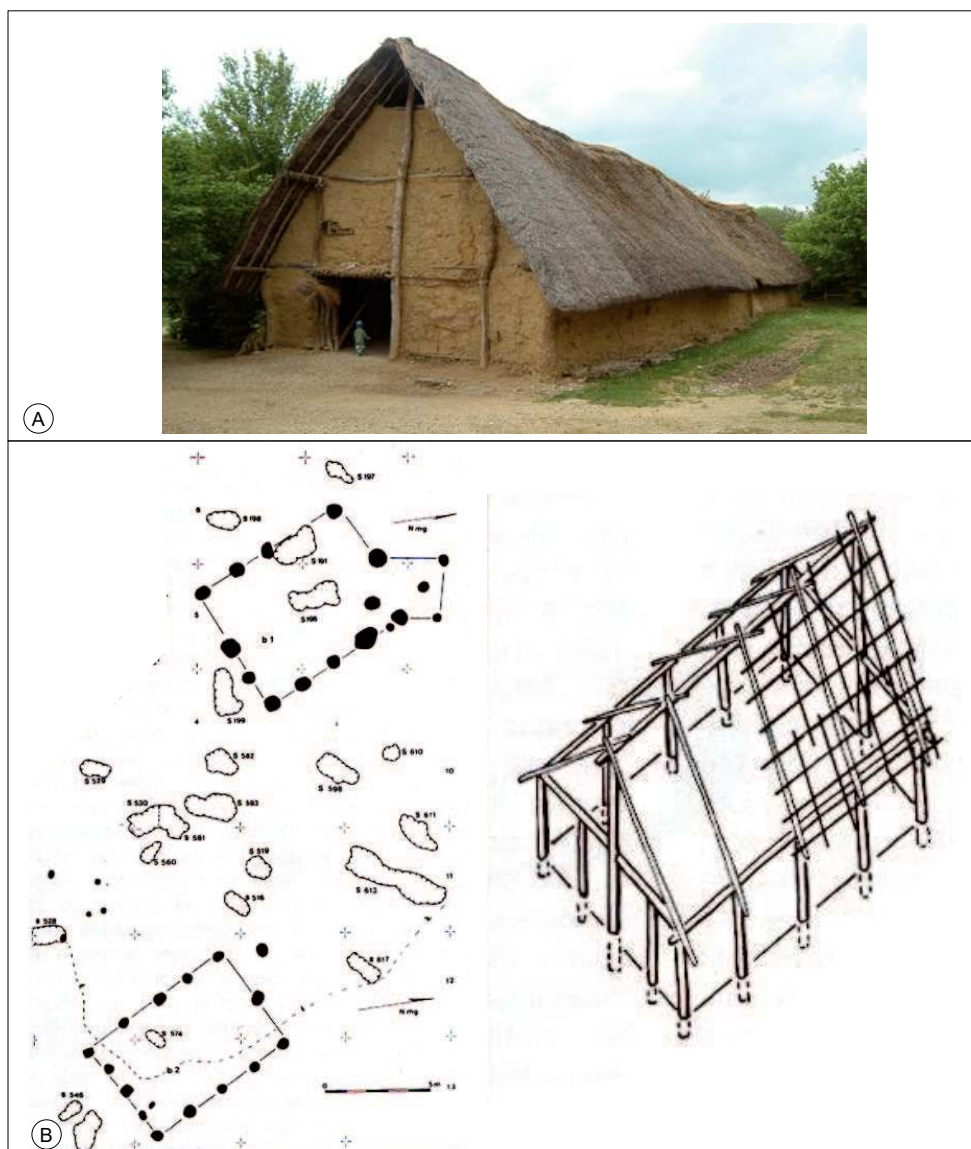


Figure I-58. Reconstitution, plans et superstructures d'habitat protohistorique. A : Reconstitution d'une ferme protohistorique à l'Archéodrome de Beaune (photo C. Finot) B. Maisons rectangulaire de La Tène finale d'Orconte, « Les Noues », Marne (Lusse et Patrolin 1994).

La différence fondamentale de mode de construction entre les *domus* et l'habitat plus modeste (quel qu'il soit) réside dans l'utilisation d'éléments de pierre dans d'autres fonctions que pour les soubassements (colonnes, éléments de chaînage des murs...) et la présence de matériaux décoratifs comme des marbres et des mosaïques (Balmelle et Neiss 2003 ; Neiss et Sindonino 2004). Pour la construction de leurs élévations, ces auteurs rapportent qu'elles étaient assemblées à partir de briques crues (carreaux de terre), chaînés de piles en pierre de taille. Ces assises reposaient sur des fondations en pierre et des soubassements maçonnés (murs bahuts ; cf Figure I-35).

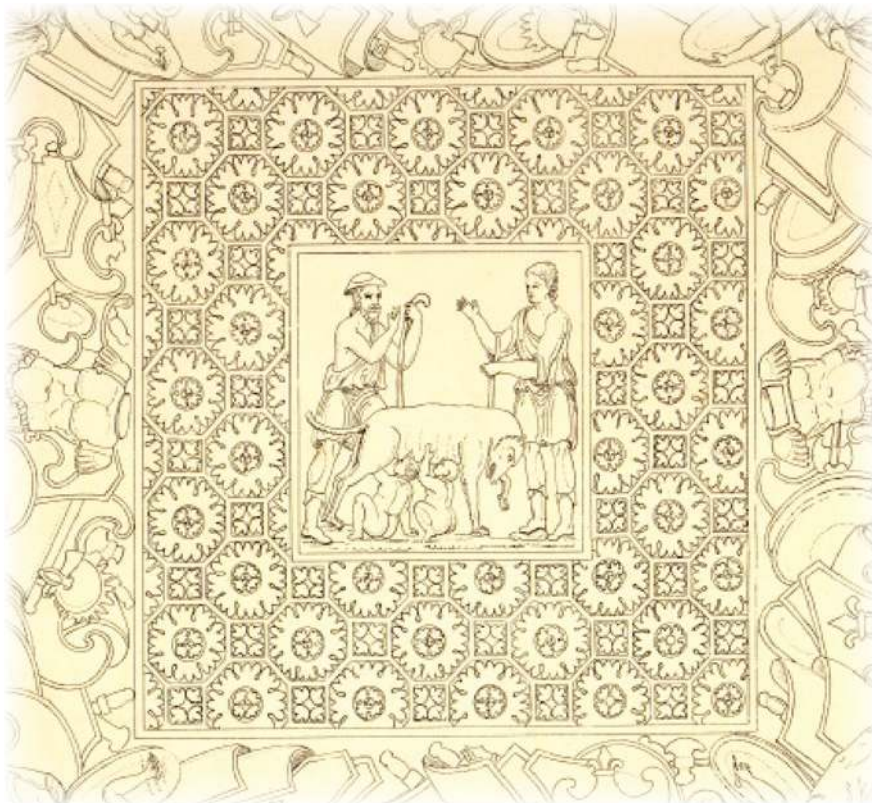
## 4. Synthèse

La ville de Reims a donc été fondée à la limite occidentale de la Champagne crayeuse, dans l'entonnoir de percée cataclinale de la Vesle, au pied des formations sédimentaires tertiaire de la Côte d'Ile-de-France. La ville a été historiquement fondée sur une terrasse alluviale dominant la rivière Vesle sur un substrat composé de craie et de ses produits d'altération. À la périphérie de Reims, des buttes-témoins et avant-buttes (monts de Berru, de Brimont, de Champagne) cernent la ville et en jalonnent l'environnement local limité au sud par le versant septentrional de la Montagne de Reims, et au nord par le massif de Saint-Thierry. Les pentes de ces reliefs rendent accessibles les dépôts sédimentaires du Cénozoïque, qui en fonction de leurs caractéristiques sédimentologiques et stratigraphiques, constituent des matériaux potentiellement disponibles et utilisables pour la construction.

C'est sur ce territoire dépourvu de matériaux de construction de bonne qualité que s'est pourtant développé, d'abord à la fin de la période laténienne la ville de Durocorter, oppidum des Rèmes, qui deviendra Durocortorum dans le giron de l'Empire Romain. La ville a connu un développement rapide et conséquent profitant largement de son positionnement à la croisée de grands axes routiers. Cette expansion économique s'est accompagnée d'une forte croissance économique et démographique qui s'est matérialisée par une augmentation radicale du nombre de bâtiments construits à l'intérieur des enceintes de la ville.

Ce besoin d'ériger de nombreux bâtiments s'est fait en adoptant les canons de l'architecture romaine dans toute sa variété et ses subdivisions classiques. Cette intégration par la population locale des matériaux et des méthodes de construction est également passée par l'intégration et l'adaptation des techniques du bâtiment au contexte de pauvreté en matériaux de la ville. Les très nombreuses opérations archéologiques qui ont été réalisées dans l'agglomération depuis le XIXe siècle ont mis au jour de nombreux vestiges qui ont contribué à dresser le tableau d'une ville ostensiblement opulente, monumentale et étendue pendant le Haut Empire. À cette dernière a succédé, pendant l'Antiquité Tardive, une ville de dimension plus réduite, retranchée derrière une enceinte encore monumentale se voulant encore le reflet de son opulence. C'est dans ce contexte géologique et archéologique que les chapitres suivant questionneront les choix et usages des matériaux de construction de la ville à travers l'Antiquité.

## CHAPITRE II : LES PIERRES DE CONSTRUCTION DE LA REIMS ANTIQUE



Restitution des motifs de la voûte est, la louve allaitant *Remus* et *Romulus*  
(Lithographie, N. Brunette vers 1850, Bibliothèque Municipale de Reims - BMR 22-038)

« Dans un voyage, ce n'est pas la destination qui compte,  
mais toujours le chemin parcouru, et les détours surtout.

Les détours. »

*Philippe Pollet-Villard*  
- Mondial nomade -



Dans ce second chapitre, après avoir présenté les méthodologies utilisées pour ce travail, les différentes origines géologiques des matériaux de construction utilisés dans l'agglomération rémoise seront détaillées. Ils seront décrits en s'appuyant sur des aires d'approvisionnements de rayons croissants afin de refléter les différentes stratégies pour se fournir en matières premières. Enfin, l'examen de quelques cas d'études, intégrés dans une base de données synthétique, apportera des arguments quant à la rationalisation des matériaux dans leur mise en œuvre et sur la typicité des constructions de *Durocortorum*.

En premier lieu, il convient de définir le terme de « géomatériaux ». Pour Parriaux et Arnould (2009), les géomatériaux sont « les produits de l'extraction de matériel d'origine géologique ayant subi un traitement plus ou moins important en vue d'obtenir un matériau pour la construction ». Cette définition peut être élargie pour englober les matériaux utilisés comme matières premières dans l'outillage ou l'industrie (meules, pierres à aiguiser...). Ces matériaux peuvent donc se définir dans une vision large comme l'ensemble des matières premières minérales d'origine naturelle nécessaire à la fabrication des objets de la vie quotidienne. Dans ce travail, l'usage de ce terme est essentiellement utilisé avec une application aux matériaux de construction, et surtout aux pierres de construction. Certains géomatériaux très spécifiques n'ont pas été intégrés à ce travail, par exemple les métaux, le verre, etc., car trop différents des géomatériaux « lithiques ».

## 1. Les types d'usages et approvisionnements en géomatériaux à Reims

### 1.1. L'étude des provenances des matériaux

#### 1.1.1. Les types d'usage des géomatériaux

La diversité des ressources minérales utilisées par l'homme ou présentes dans l'environnement a conduit à l'utilisation d'un vaste champ lexical qu'il est nécessaire de préciser afin d'établir un référentiel commun. Une liste des emplois des matériaux, définie par Fronteau *et al.* (2019), permet d'apporter un essai de vision synthétique des types d'usages des géomatériaux (Tableau II-1).

Cette classification a été établie à partir d'une double approche, d'une part documentaire et d'autre part à partir des études de terrain, notamment sur des corpus archéologiques de Reims et de ses environs. La particularité des matériaux de construction (partiellement partagée avec ceux à usages agricoles et industriel) repose sur l'utilisation de matériaux cohérents (ou consolidés) et les matériaux meubles (ou non-consolidés). Les grandes catégories de matériaux de construction sont subdivisées en sous-catégories plus spécialisées en fonction de leurs usages et rapprochées de leurs différents équivalents terminologiques trouvés en bibliographie.



Catégories de matériaux		Dénominations principales	Autres termes	
Matériaux de construction	Matériaux cohérents	Pierres de taille	Pierres sculptées architectoniques, Modénature	
		Moellons	Pierres brutes ramassées en surface, Pierres tendres pour usage sous abri	
Blocs bruts de grandes dimensions		Ardoises, Lauzes, Pierres tégulaires		
Pierres ornementales		Enrochements, Mégalithes		
Pierres de pavages		Marbres, Pierres Décoratives		
Matériaux meubles	Matériaux meubles	Pierres de seuil et marches	Grès à pavés, Dallages	
		Graviers et sables à mortiers	Graviers, Grèves, Graveluches	
		Terres à briques ou à tuiles	Limons et Argiles	
		Terres à adobes (carreaux de terres crues)		
Matériaux pour objets mobiliers	Argiles à céramiques	Pierres à adobes (carreaux de terres crues)		
		Pierres à chaux		
		Briques de sables	Briques réfractaires en sables	
		Statuaire	Statuaire et décors non architectoniques	Pierres marbrières, Marbres, Albâtres, etc
		Outillage lithique	Silex, Pierres meulières (meules à bras), Pierres à aiguiser, Mortiers, Pierres ollaires, Roches vertes, Autres outils en pierre	
Matériaux pour usages industriels et agricoles	Autres	Pierres funéraires et religieuses	Pierres à sarcophages, pierres tombales, Stèles, Fonds Baptismaux, Bénitiers	
		Pierres pour petits objets	Palettes à fards, Jeux et jouets, autres objets...	
		Pierres	Poids et pesons Castines Meules Abreuvoirs Matériaux pour empièvements de voiries	Lests et poids, Pesons Meules hydrauliques, meules à écraser, à tan, etc Auges
		Matériaux meubles	Matériaux pour amendements des sols Matériaux pour empièvements de voiries Moules à fonderie Pigments Minerais de fer Métaux précieux Autres minerais	Marnes, Cendres, Tourbes Graviers Sables à moules de fonderie Ogres
		Autres	Matériaux énergétiques	Tourbes et charbons

Tableau II-1. Liste simplifiée des géomatériaux classés par type d'emplois (Fronteau *et al.* 2019)

Les usages des matériaux intégrés dans cette liste ne sont, de l'aveu des auteurs, ni exhaustifs ni définitifs. Elle est adaptable à de nombreux cas ou régions d'études. Dans ce travail, seuls les matériaux de construction sont étudiés en détail. Il semble cependant utile de préciser, même si cela peut sembler évident, qu'un même matériau peut être mis en œuvre dans d'autres usages si ses caractéristiques intrinsèques s'y prêtent : par exemple les calcaires peuvent servir, selon les cas où les besoins, pour la pierre de taille, les moellons, les sarcophages, le dallage, la chaux, etc.

### 1.1.2. La hiérarchisation des aires d'approvisionnements

Dans les études antérieures portant sur l'évolution des provenances des différents matériaux de construction à Reims au cours du temps, Fronteau *et al.* (2014) ont adopté une classification hiérarchique des aires d'approvisionnement en fonction de la distance séparant le site d'extraction du site de mise en œuvre (Figure II-1). Dans cette classification sont distinguées cinq aires d'approvisionnement dont il est assumé qu'elles caractérisent des stratégies d'approvisionnement différentes en matériaux, notamment quand il s'agit de matériaux pondéreux comme les pierres à bâtir.

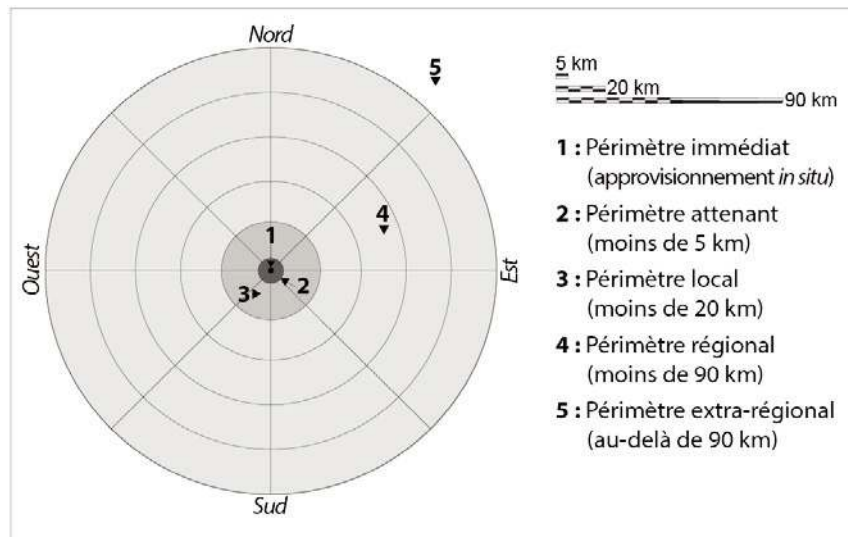


Figure II-1. Échelle de classification des approvisionnements en pierre de la ville de Reims en fonction de la distance entre les sites d'extraction et le site d'emploi du matériau (Extrait de Fronteau et al. 2014 b)

Le **périmètre immédiat ou *in situ*** comprend le site lui-même. Cela concerne l'extraction de ressources du sol et du sous-sol *in situ*, soit directement sur le site de la construction ou sur la parcelle concernée par la construction. Le **périmètre attenant**, quant à lui, est assimilé aux terrains situés à proximité ou encore à courte distance du lieu où les matériaux seront mis en œuvre. Cela concerne un cercle de 5 km de rayon au maximum qui couvre donc l'ensemble de la ville et qui s'étend au-delà de ses limites. Dans cette aire, il est possible de réaliser plusieurs trajets journaliers de courte distance. Ces différenciations se prêtent à l'étude d'un site d'emprise faible. Le présent travail étant réalisé à l'échelle de la ville (5 km de diamètre) les périmètres immédiats et attenants (*sensu* Fronteau et al. 2014) ont été fusionnées en une seule aire : l'aire *in situ*.

Le **périmètre local** est considéré comme la zone dont le rayon correspond à la distance moyenne maximale qui peut être couverte au cours d'un voyage journalier pour les périodes préindustrielles. La distance maximale de 20 km a été conservée bien qu'il soit considéré que, pour l'antiquité, la distance journalière qu'un attelage de bovin utilisé classiquement pour le transport des marchandises pondéreuses, était compris entre 12 et 20 km (Raepsaet 1984 ; Salac 2013 ; Scheidel 2015 ; Scheidel et Meeks 2020). Dans le cas de Reims, les matériaux au sein de cette aire d'approvisionnement, bénéficieraient d'un transport sans rupture de charge depuis leur site d'extraction jusqu'au chantier.

Le **périmètre régional** intègre tous les approvisionnements issus d'une aire de 90 km au maximum. Définie initialement par Fronteau et al. (2014), il correspond à la distance couverte en une journée par un transport fluvial (Scheidel 2015). Là encore, la définition de cette aire a été conservée inchangée permettant des comparaisons avec les périodes historiques suivantes, bien que la présence d'une installation portuaire sur le site de *Durocortorum* soit sujette à controverse (Fronteau et al. 2014 ; Rollet 2016 ; Gucker 2020). Pour les périodes antique et médiévale, cette aire correspond à un transport s'étalant sur plusieurs jours avec potentiellement au moins une rupture de charge (Blary, Gély 2020). Le transport pouvait donc être partagé entre plusieurs acteurs logistiques et éventuellement être polymodal (cumul de plusieurs modes de transport).

Les reports sur la carte géologique du secteur des distances séparant Reims des différentes sources potentielles de géomatériaux (Figure II-2), permettent de mieux appréhender cette notion d'aires d'approvisionnement en l'appliquant à l'agglomération.

Enfin, le **périmètre extrarégional ou transrégional** correspond à toutes les sources d'approvisionnement situées à une distance supérieure à 90 km dont l'importation nécessite un effort conséquent d'un bout à l'autre de la chaîne et le recours à un réseau logistique bien organisé. L'importance des distances à couvrir peut alors nécessiter des moyens de transport polymodaux avec plusieurs ruptures de charge.

Il est également nécessaire d'inclure une possible saisonnalité dans les transports des matériaux pondéreux. En effet, la nature des voies, souvent non stabilisées et de qualités variables (Koehler et Morize 2003 ; Jemin 2012), ainsi que les intempéries (pluies, neige, gel...) peuvent concourir à limiter fortement si ce n'est interdire ce type de chargement (Bauer 2012 ; Salac 2013). Loin d'être possibles sans interruption à l'année, les transports de telles marchandises nécessitent donc une logistique optimisée pour l'approvisionnement des grands chantiers de construction (Blary et Gély 2020).

## 1.2. La description et l'identification des géomatériaux antiques à Reims

Les géomatériaux qui entrent en jeu dans la construction antique sont de natures variées et présentent des intérêts et des usages différents pour les constructeurs. L'une des caractéristiques principales de la construction romaine antique est l'utilisation conjointe de pierres et des terres cuites (cf partie I) à laquelle il faut ajouter les évolutions techniques qui lui sont liées. Mais les pierres identifiées dans les constructions antiques, qu'elles soient encore en élévation ou dans des couches de démolition, sont elles-mêmes de natures très diverses et sont potentiellement issues de plusieurs formations géologiques. Elles comprennent un large éventail de roches de natures et de faciès variés comprenant aussi bien des matériaux meubles que cohérents, mais aussi des matériaux issus d'un processus de transformation comme les terres crues ou les terres cuites. À l'image de ce qui a été démontré dans le cadre du PCR qui leur a été consacrée<sup>37</sup>, les qualités intrinsèques des pierres sont des éléments déterminants dans les choix présidant à l'utilisation de ces matériaux. Compte tenu du contexte géologique du site de Reims cadre de ce travail, ces derniers sont d'origine naturelle, majoritairement calcaire ou silicoclastique (meubles ou indurés). Ils sont des matériaux naturels, complexes, issus d'un processus sédimentaire leur conférant un faciès spécifique, à la fois produit d'un paléoenvironnement et d'une diagenèse qui leur sont propres. Le choix et l'utilisation des pierres en œuvre sont bien souvent issus de la combinaison des propriétés conférées à la roche par cette nature.

Depuis un peu plus d'une vingtaine d'années, de nombreuses fouilles archéologiques à Reims et ses communes environnantes ont permis la réalisation d'études de nombreux corpus de géomatériaux (Fronteau *et al.* 2000 ; Fronteau et Paicheler 2005 ; Fronteau 2010 ; Bontrond 2019 ; Fronteau *et al.* 2011...). Ces ensembles, lithiques et lapidaires, issus de contextes archéologiques variés, ont progressivement permis la construction d'un référentiel robuste des roches utilisées dans la ville de Reims depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours. La grande quantité de données issues de divers sites a donc permis de réaliser des observations dans un large éventail de contextes et de modalités de mises en œuvre différentes et complémentaires (Fronteau *et al.* 2014).

---

<sup>37</sup> PCR « Évolution typologique et technologique des meules du Néolithique à l'An mille » (Buchsenschutz, *et al.* 2017).

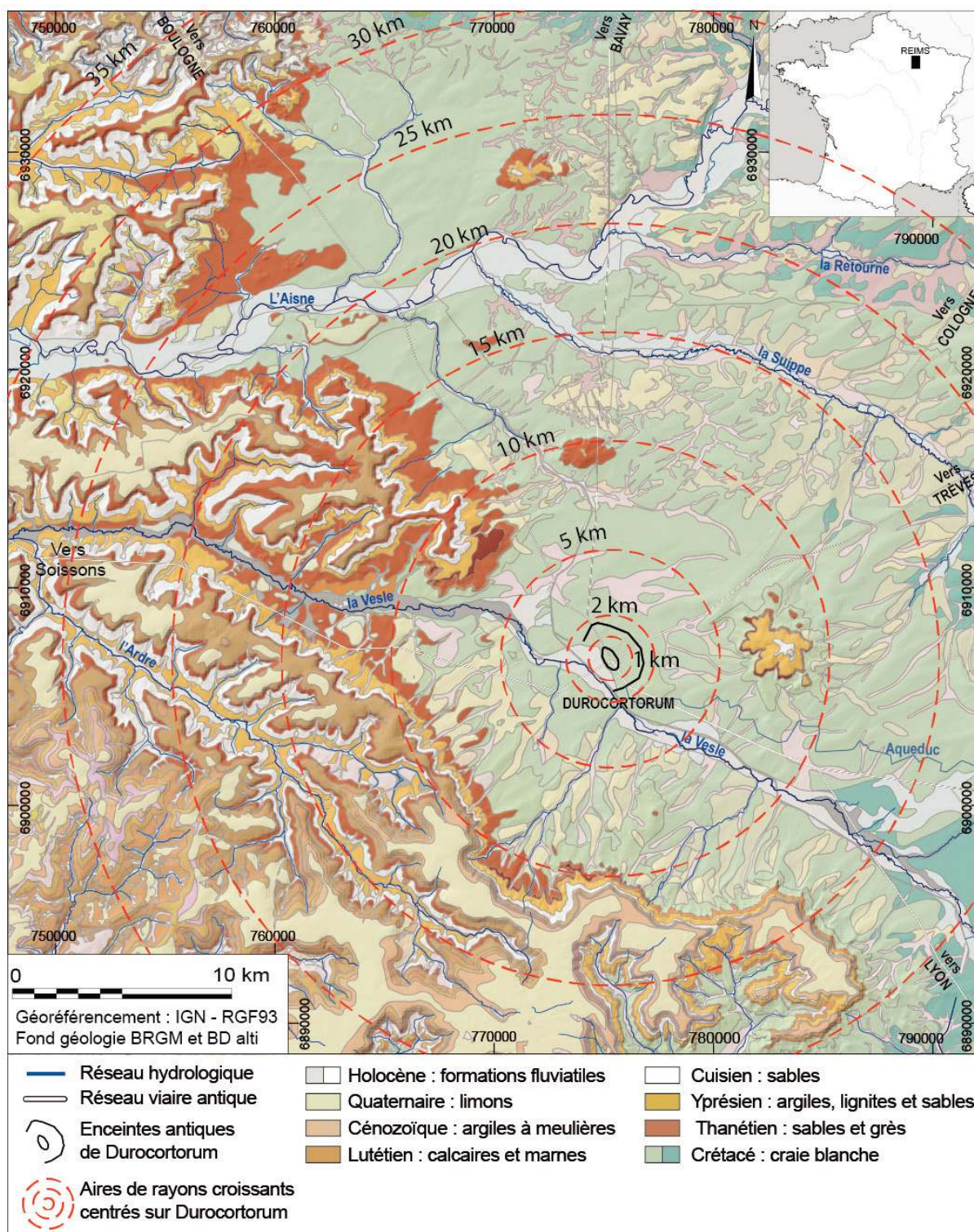


Figure II-2. Carte géologique de la région de Reims. Les cercles concentriques de distances croissantes représentent les distances de Reims aux différents gisements de géomatériaux.

L'étude et la caractérisation des roches en contexte archéologique ont supposé l'existence de certaines contraintes au cours de ce travail. En effet, l'impossibilité de réaliser des prélèvements sur les monuments en œuvre, mais aussi sur les blocs observés en musée (Musée Saint-Rémi de Reims ou encore dans les réserves archéologiques), a nécessairement orienté la méthodologie de description des roches. C'est également la possibilité limitée de réaliser des prélèvements qui a poussé à privilégier l'utilisation d'arguments macroscopiques pour la description des corpus archéologiques. Les observations ont donc été essentiellement réalisées de façon macroscopique avec, quand cela était possible, réalisation d'une petite cassure fraîche pour l'étude à la loupe (loupe à main X10).

La finalité de cette approche est de dresser un tableau le plus large possible de l'utilisation des pierres de construction au cours de l'antiquité à *Durocortorum* dans les contextes les plus diversifiés possible afin de couvrir les différents pans de la construction de l'époque. Les descriptions des matériaux sont mises en relation avec leur contextualisation archéologique (modalité de mise en œuvre, type architectural, origine... Chapitre I.3.3), afin d'en tirer des règles générales d'utilisation des pierres en œuvre. Il s'agira donc de mettre en relation l'origine et la nature des roches avec leur emploi dans les constructions antiques dans l'emprise géographique objet de notre étude.

La méthode de classification des matériaux utilisée, reprend la logique de celle développée pour les matériaux meuliers dans le cadre du PCR « Évolution typologique et technique des meules du Néolithique à l'an mille sur le territoire français » (Buchsenschutz *et al.* 2017). Elle comprend trois niveaux distincts de renseignement, organisés hiérarchiquement du plus général au plus spécifique. Cependant, les groupes de matériaux sont définis selon un référentiel adapté aux géomatériaux du bâti de Reims.

**Description de niveau 1 :** Ce premier niveau correspond à la qualification la plus élémentaire de la pierre à savoir sa lithologie. Elle permet de mettre au même niveau tous les types de roches rencontrées qu'elles soient sédimentaires (calcaires, grès, meulière...), métamorphiques (marbres) ou encore endogènes (basaltes). Elle permet également l'accession à un premier niveau de détail avec un premier niveau d'identification de la roche associé aux différentes classifications pétrologiques.

**Description de niveau 2 :** description synthétique de la roche (détermine un faciès synthétique reprenant le niveau 1). Ce niveau de description est conditionné par une détermination précise de la pierre. Il s'agit pour ce niveau de description d'attribuer à l'échantillon une sous-catégorie qui permet une identification plus précise que celle de niveau 1 et permettant de distinguer des pierres de faciès différents au sein de chaque lithologie. Ce niveau de description est, à l'échelle de ce travail, celui qui est le plus intéressant car le plus synthétique.

**Description de niveau 3 :** Description macroscopique précise de la pierre qui peut être complétée par une description des microfaciès. Cette description inclut les éléments de description des niveaux précédents, la taille des grains, la couleur, des éléments de minéralogie particuliers et la présence de fossiles particuliers (dominants dans la roche ou marqueurs stratigraphiques).

Les descriptions des géomatériaux observés ont été réalisées en appliquant les principes de la sédimentologie de faciès. Celle-ci a pour objectif d'établir une description « standardisée » en s'appuyant d'une part sur la description du lithofaciès de la roche (caractères lithologiques) et d'autre part les biofaciès (caractères paléontologiques). Les pierres datant du Lutétien ont bénéficié d'une méthodologie descriptive très détaillée en raison de la complexité des dépôts de cet étage, qui présentent de nombreux sous faciès, caractérisés par différents biofaciès. Les différents faciès et sous-faciès qui y sont représentés constituent des informations importantes pour l'argumentation des provenances de ces roches ou pour mieux comprendre leur type d'emploi.

Description de niveau 1	Description de niveau 2	Description de niveau 3
<b>Calcaire</b>	"Grès" calcaire à <i>Microcodium</i>	Grès tendre fin à rares fragments de <i>Microcodium</i>
	Calcaire à cérithes	calcaire fin lité, biodétritique à <i>Millioles</i> et à rares cérithes
	Calcaire à <i>Ditrupe</i>	...
	Calcaire à <i>Ditrupe</i> et <i>Orbitolites</i>	Calcaire à <i>Ditrupe</i> et grands <i>Orbitolites</i> , beige à gris, assez tendre et poreux
	Calcaire à plantes	...
	Calcaire à miliolles	...
	Calcaire à Limnées	Calcaire à Limnées, vert olive, homogène à gros tests de
	Calcaire à Limnées et Planorbes	Limnées blanches, micritique, à hydrobies et oogones de
	Calcaire à miliolles ( <i>miliolite</i> )	chara
	Calcaire à <i>Nummulites laevigatus</i>	...
	Calcaire coquillier grossier	Calcaire coquillier grossier, à nombreuses empreintes ou
	Calcaire gréseux glauconieux	coquilles de Bivalves et gastéropodes (dont <i>Turitella</i> ),
	Calcaire fins	miliolles et rares <i>Ditrupe</i> ou <i>Nummulites laevigatus</i>
	Calcaire oolithique vacuolaire	...
Travertin	...	
...	...	
<b>Grès</b>	Galet de grès	Galet de silex, gris noir ou parfois brun, à cassure
	Grès à ciment jaune	conchoïdale, non poreux
	Grès ferrugineux	...
	Grès fin à rares grains grossiers	Grès moyen à grossier, gris à beige, à ciment calcaire
	Grès fin, à glauconie	avec grains de quartz et de glauconie
	Grès glauconieux	Grès fin homogène, à cimentation siliceuse (quartzitique),
	Grès-quartzite gris	de couleur grise à blanchâtre
...	...	
<b>Marbre</b>	Marbre blanc, fin	
	Marbre Vert Antique	
	Marbre Vert	
	...	
<b>Marcassite</b>	Marcassite (boule ou fragment)	
<b>Meulière</b>	Meulière compacte à rares vacuoles	Meulière compacte à rares vacuoles, blanche et bleu-
	Meulière compacte silexoïde brune	tée, faciès dit Œil de perdix
	Meulière indéterminée	...
	Meulière vacuolaire à géodes	Meulière vacuolaire très caverneuse, fortement éveillée,
...	...	sans géodes d'agate (mais silice en "lame" dans alvéoles)
<b>Silex</b>	Galet de silex noir	Galet de silex, gris noir ou parfois brun, à cassure
	Silex - Chaille	conchoïdale, non poreux
<b>Terre cuite</b>	Terre cuite architecturale	...
<b>Indéterminé</b>	Roche indéterminée	...

Tableau II-2. Extrait des premiers niveaux de la classification hiérarchique des matériaux

Les descriptions *in situ*, en réserve ou sur les bâtiments en élévation, ont été réalisées à l'œil nu ou grâce à une loupe (grossissement x 10). Les descriptions comportent l'ensemble des paramètres descriptifs de la roche tels que sa texture, sa couleur, sa porosité apparente, et la nature des éléments figurés (minéraux spécifiques, lithoclastes, macro et microfossiles), ainsi que la nature et l'abondance des phases de liaison. Une attention particulière a également été portée sur les variations de faciès qui, grâce à la taille parfois importante des blocs, étaient parfois visibles.

Les ensembles de roches caractérisées sont constitués par rapprochements sous la forme de groupes de faciès dont la cohérence repose sur les transitions et évolutions des faciès connus au sein des formations dont ils sont issus. Les déterminations de certaines transitions faciologiques ont à l'inverse été fournies par certains éléments de collections où elles sont observables, ceci en l'absence d'observations possibles dans leurs secteurs d'origine.

Du fait de l'intérêt porté par ce travail sur les éléments de construction, il a été nécessaire de se confronter à des blocs de grandes dimensions qui n'autorisaient pas l'examen exhaustif de toutes les surfaces. En outre, la présence de traces d'outils, de mise en forme, voire de stigmates d'incendies présents à la surface des blocs ont également constitué des particularités dont l'enregistrement a été réalisé.

Lorsque cela était indispensable, notamment dans l'étude de la Porte de Mars, des prélèvements ont permis la réalisation et l'étude de lames minces.

## 2. L'inventaire général des géomatériaux observés à Reims

L'apparente simplicité du contexte géologique local de l'agglomération de *Durocortorum* (Cf chapitre I.2.) peut laisser penser à l'existence de stratégies d'approvisionnement en matériaux très simples et homogènes. Cependant, l'étude des corpus lapidaires archéologiques montre que ces approvisionnements sont de natures très différentes et qu'ils suivent des modalités diversifiées. Les matériaux de construction utilisés dans l'agglomération de *Durocortorum* seront décrits dans les prochains paragraphes suivants suivant les aires d'approvisionnements au sein desquelles ces ressources sont disponibles de la plus proche à la plus lointaine. Compte tenu de la situation géographique et le contexte géologique local, c'est à dire à proximité du centre du Bassin de Paris, la quasi-totalité des géomatériaux de construction utilisée à Reims sont des roches sédimentaires.

### 2.1. Les matériaux disponibles *in situ*

La craie sur laquelle a été fondée la ville, dite « Craie de Reims » est datée du Campanien, avant dernier étage du Crétacé supérieur (cf chapitre I). C'est une roche carbonatée d'origine marine, très pure et sans silex, composée essentiellement par une accumulation de coccolithes et qui, paradoxalement, est très pauvre en macrofossiles. Les coccolithes sont des pièces calcaires constitutives des squelettes calcaires d'algues unicellulaires. Les macrofossiles sont essentiellement représentés par des fragments d'échinodermes, de grands lamellibranches à tests prismatiques ou encore d'éponges. Dans les environs de Reims, la présence occasionnelle de rostrés de Bélemnites (*Belemnitella mucronata* en particulier) en constitue bien souvent la seule occurrence (Laurain, *et al.* 1981). C'est principalement pour

cette raison que la stratigraphie de la craie est principalement définie à l'aide de l'étude des biozones de foraminifères. Ces dépôts de craie sont épais de près de 120 m (Laurain *et al.* 1981,) et présentent un léger pendage monoclin vers l'ouest. D'un point de vue pétrographique, la craie est une biomicrite d'après (Folk 1959), *mudstone* à *wackestone*, d'après Dunham).

La craie de Champagne est une formation d'une grande homogénéité lithologique. La cartographie de la craie et des formations issues de son altération (graveluches et colluvionnements) montre qu'il s'agit probablement de la formation la plus étendue, principalement vers l'est de l'agglomération (Figure II-3). Cependant, malgré cette grande extension, l'accessibilité à la roche ainsi que ses altérations et ses caractéristiques intrinsèques peuvent rendre malaisée l'utilisation de cette pierre dans la construction.

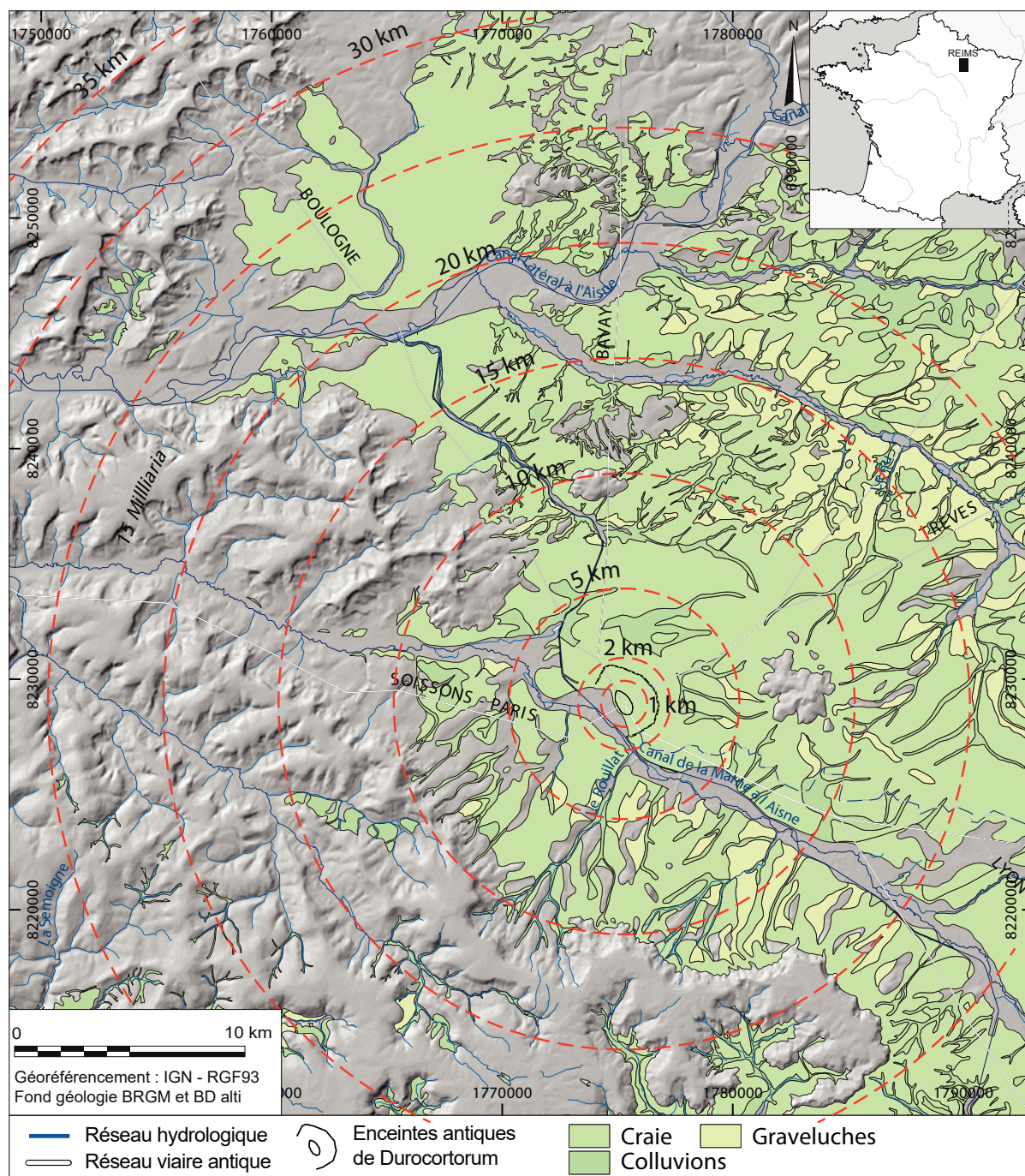


Figure II-3. Carte des affleurements de la craie campanienne et de ses altérites autour de l'agglomération de Durocortorum



Pour comprendre comment la craie et ses produits d'altérations s'organisent dans l'espace, il peut être nécessaire de se référer aux travaux de Laurain *et al.* (1995) et de Coulon (2011) pour l'évolution de la fracturation. Depuis la surface topographique, elle-même fortement modelée par cryofracturation et par l'action des processus d'érosion de surface, les premiers mètres de craie blanche disponible directement depuis la surface sont extrêmement fissurés et peu cohérents bien que correspondant à des niveaux de roches en place. Cet aspect résulte de l'action de l'altération climatique par cryoclastie en lien avec la dernière période glaciaire (Cf chapitre I, Figure I-11 ; Laurain *et al.* 1995 ; Linoir 2014), conjugué avec l'expression d'un réseau dense de fissures et de diaclases préexistantes.

La craie apparaît très fréquemment directement sous un rendosol très peu épais (Ballif *et al.* 1995). En fonction de sa position topographique, cette craie peut être affectée de poches de cryoturbation, fréquemment érodées sur les reliefs, mais qui ont évolué dans les pentes vers des dépôts colluviaux (sols striés, Laurain *et al.* 1995) dont les exemples ne manquent pas autour de Reims (Devos *et al.* 2021). Les coupes montrent ensuite un niveau de craie fortement altéré et intensément fissuré sur des épaisseurs de 3 à 5 m. Coulon (2011) a par ailleurs montré que l'intensité de cette fracturation augmente à mesure que l'on s'approche du centre du couloir alluvial de la Vesle. Localement, ces premiers mètres de craie fracturée sont dénommés « crayon », terme également appliqué à différentes couches de fragments calcaires désolidarisés (Rondot 1843).

L'intensité de l'altération décroît progressivement avec la profondeur pour atteindre les niveaux où la roche devient assez homogène pour être débitée sous forme de moellons de petite dimension. La fracturation décroît avec l'augmentation de la profondeur, pour ne presque plus devenir perceptible vers une dizaine de mètres. Ces niveaux sont cependant difficilement atteignables sur les rives de la Vesle du fait de la présence du toit de la nappe phréatique.



Figure II-4. Exemple d'utilisation de la craie mise en œuvre comme parement des murs d'une cave antique. Fouille des Hautes promenades, Reims (R.O. B. Panouillot, SAGR).

Les utilisations de la craie comme géomatériaux de construction sont très variées (Péchart *et al.* 2019). Par sa nature, la craie est un matériau aisément façonnable sous la forme de **moellons** de modules et de formes variés, elle est ainsi utilisée en moellons dans certaines murs de fondation et hypothétiquement dans les élévations (Figure II-4). L'un des usages avérés de la craie est en petits blocs dans les murs des caves (Figure II-4). Les exemples de cet usage ne manquent pas dans l'enregistrement archéologique (Berthelot *et al.* 1993 ; Balmelle et Neiss 2003 ; Rollet 2004) Panouillot *et al* à paraître...).



Figure II-5. Coupe au carrefour de deux rues sur le chantier du Conservatoire, rue Gambetta, Reims. Les différentes phases d'évolution de la voirie sont soulignées par les recharges régulières en craie concassée qui alternent avec des dépôts de silts argileux grisâtres (photo F. Berthelot, in Chossenot *et al.* 2010)

La craie est également utilisée en **remblais et empierrements**, aussi bien pour niveler des irrégularités du terrain (Figure II-5), comme les fossés d'enceintes (Figure I-43) ou encore comme fourure entre des maçonneries afin d'économiser l'usage de matériaux plus onéreux ou plus rares, comme cela a été proposé pour les superstructures du théâtre (Chossenot *et al.* 2010). Cet usage en fourure est par ailleurs bien documenté pour les maçonneries de soubassement de l'amphithéâtre. Cette utilisation du substrat local est également documentée pour les arènes de Lutèce (Duval 1989 ; De Carbonnières 1997) et de Trêves (Ginouvés *et al.* 1998).

Les excavations des fossés de l'oppidum et de l'enceinte augustéenne sont comblées à l'aide de ce même matériau dans lequel ils ont été creusés et qui a précédemment permis d'élever l'enceinte le flanquait (Figure I-43, page I-83). Les fossés ainsi comblés sont par conséquent aujourd'hui difficilement différenciables de remblais plus modernes.

Dans les **mortiers de maçonnerie**, ce sont les niveaux de craies déstructurés sous la forme de crayon et de graveluches qui sont exploités (Rollet *et al.* 2009). Pour cette utilisation en particulier, les poches de cryoturbation sont directement exploitées, vidées de la partie argilolimoneuse (observation réalisée à l'occasion des fouilles du parvis de la Basilique Saint Rémi). La craie altérée jaunie est alors utilisée comme granulat dans les mortiers.-En mélange avec des limons collectés en surface, les éléments de craie concassée et les graveluches sont également les principaux composants des carreaux de terre (briques crues), omniprésents dans la construction de la Reims antique et ultérieure (Delencre 2017). Ces deux types de matériaux sont discriminés de fait par le degré d'éroulé de leurs arêtes. La craie concassée arborant des arêtes vives tandis que les craies plus superficielles ont été affectées par les processus érosifs de surface.

L'existence dans l'agglomération d'exploitations souterraines de craie au cours de l'Antiquité sous la forme de catiche<sup>38</sup> (Figure II-6) n'a été affirmée, à ce jour que par une seule étude (Tourtebatte 1996). Cependant, aucune autre donnée archéologique n'est venue confirmer la présence de ce type d'exploitation. En revanche, pour cette période, l'existence de carrière à ciel ouvert a été attestée, repoussant la généralisation de l'exploitation souterraine de ce matériau aux périodes médiévale et moderne (Rollet 2006 ; Brkojewitsch 2007 ; Pichard 2014 ; 2018 ; Péchart et al. 2019). Sur un substrat similaire et pour les mêmes périodes comme à Amiens (Somme), les pratiques d'extractions de la craie semblent avoir suivi des évolutions comparables (Rapone 2016; Barrier, Leconte, Pacaud 2020).

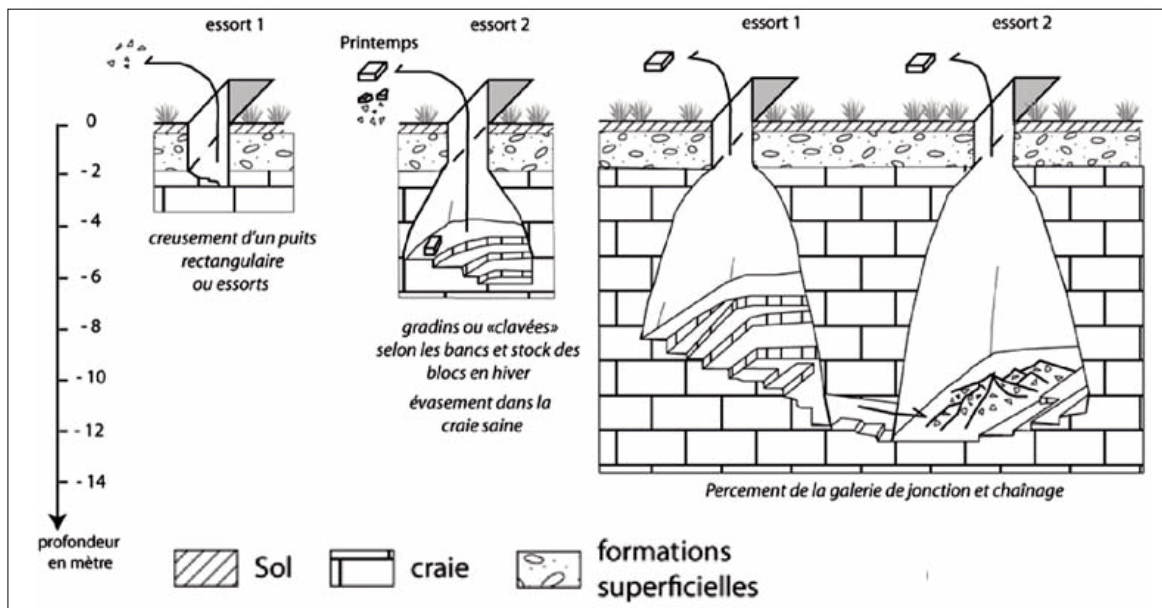


Figure II-6. Schéma des différentes phases de creusement des crayères (Devos et al. 2017)

### 2.1.1. Les formations superficielles

La plus grande part des formations superficielles mises en place à Reims et dans l'aire attenante est représentée par des altérites de la craie et des alluvions (Figure II-7). Les colluvions nappant généralement les pentes des croupes de craie correspondent à des accumulations de graviers de craie roulés (qui sont nommées grèzes litées ou localement « graveluches »). Ces accumulations peuvent également être associées à des dépôts limoneux éoliens (lœss) ou encore colluviaux (issus de la décarbonatation de la craie ; Laurain et al. 1995 ; Linoir 2014). Par ailleurs, certaines petites buttes de craie ont permis l'accumulation d'épaisseurs de limons éoliens assez importantes (Laurain et al. 1995).

Les dépôts alluviaux tendent à échapper à cette monotonie et sont composés d'argiles et de marnes grises et de tourbes (Figure II-44 ; Rollet 2016). Ces formations superficielles, colluviales et colluvo alluviales peuvent présenter dans les fonds de talweg des épaisseurs dépassant 4 m, démontrant l'intensité de l'érosion (en particulier d'origine périglaciaire) à laquelle la craie est particulièrement sensible.

<sup>38</sup> Terme de patois régional désignant un type d'exploitation souterraine de craie qui prenait la forme d'un puits d'extraction s'évasant progressivement pour adopter un profil en bouteille. L'accès en surface sol était scellé par un bouchon en encorbellement à la fin de l'exploitation.

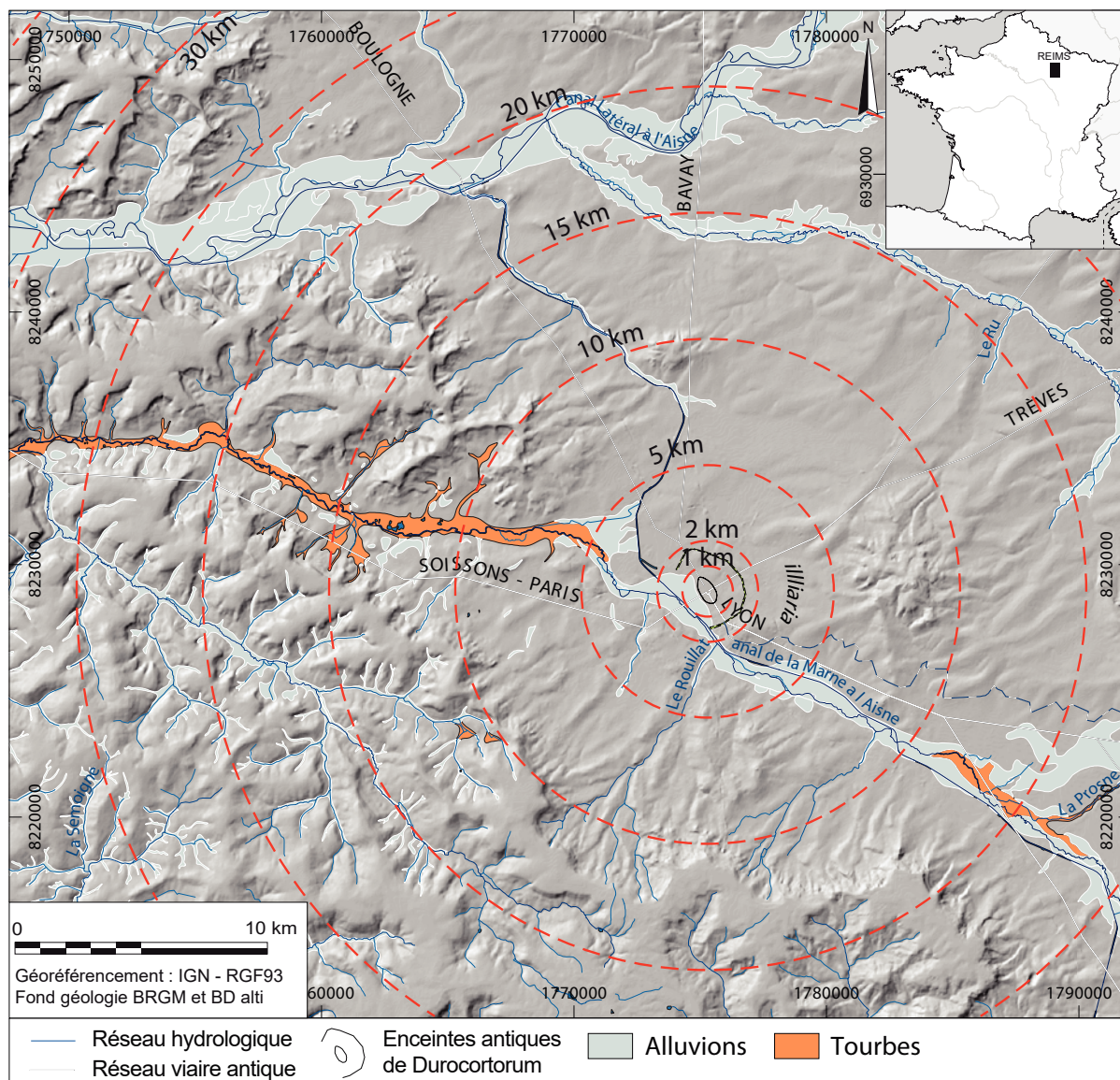


Figure II-7. Carte des formations superficielles alluviales des vallées de la Vesle, de la Suippe et de l'Aisne dans le secteur de l'agglomération de *Durocortorum*.

### 2.1.2. Le cas particulier des carreaux de terre crue

Les carreaux de terre crue apparaissent comme l'un des matériaux de construction omniprésents dans la construction de l'habitat et plus largement du domaine privé (Figure II-8). Leur utilisation très spécifiquement régionale avait encore cours pendant l'entre-deux-guerres. Il s'agit de blocs façonnés à partir de terre crue moulée afin d'obtenir des blocs parallélépipédiques. Ne nécessitant pas de cuisson, mais un simple séchage au soleil, ces briques sont alors obtenues facilement en grande quantité et ont été d'autant plus employées qu'elles permettaient d'ériger des élévations en se passant de systèmes de coffrage (Adam 1984). Les carreaux de terre crue sont utilisés aussi bien pour les maçonneries extérieures que pour les cloisons/murs intérieurs comme cela a été observé lors des fouilles des Hautes promenades (Figure II-8).



Figure II-8. Exemples de découvertes de carreaux de terre dans les élévations de constructions domestiques privées observées lors des fouilles des Hautes promenades à Reims en 2018. A et B restes des élévations d'un mur dont l'effondrement d'un bloc a préservé les matériaux et leur organisation. C. Reliefs de mur enduit en carreaux de terre dont les pans de bois ont disparu. D. Restes de carreaux de terre au pied d'un mur bahut. E. Mur bahut en place surmonté de 3 assises préservées de briques crues. F. Mur en carreaux de terre partiellement effondré.

Pour Delencre (2017), la préparation des carreaux de terre était réalisée directement sur le chantier de construction à partir de matériaux disponibles soit être importés depuis un secteur voisin. Pour Imbault (1986) et pour Royer (2001), la matière mobilisée pour le façonnage des briques de terre crues est issue directement de la craie altérée. Ce qui semble confirmé par l'observation fréquente à proximité des édifices privés de fosses d'extraction à géométrie polylobée au sein desquelles la fraction fine jaunie, des poches de cryoturbations est entièrement exploitée (Laratte in Arnaud *et al*, en cours). La confection *in situ* et à la demande, de cet élément de construction explique bien le fait que ses dimensions ne soient pas standardisées d'un chantier à l'autre. L'assemblage final des blocs étant réalisé très classiquement à l'aide d'un mortier dont la nature n'a pas été précisée.

Les analyses réalisées sur des carreaux de terre ont montré qu'ils sont composés d'une matrice de terre argilolimoneuse plus ou moins crayeuse et ferrugineuse (Fronteau 2011). Cette matrice contient des granulats de craie (des graviers aux cailloux). Ils sont plus ou moins jaunis et anguleux, ce qui trahit une extraction depuis les couches supérieures de la craie altérée (éventuellement complété par des éléments issus d'un concassage). La présence de grains de craie arrondis (graveluches) avec des granulats d'autre nature est également attestée (meulière, quartz, grès, fragments de terres cuites...). Les analyses de répartition spatiale réalisées par Delencre sur ces matériaux ont montré que l'aire dans laquelle l'utilisation antique des carreaux de terres (ou brique crue) est attestée est bien plus large que le secteur de Reims. Leur dispersion serait corrélée aux plateaux et vallées crayeux de l'aire régionale, mais dans des contextes pas toujours bien datés.

Ces matériaux sont omniprésents dans les opérations de fouille concernant des bâtiments d'habitation ou encore artisanaux. Cette fréquence d'observation serait imputable d'une part à l'importance de leur utilisation et très probablement au faible intérêt que leur récupération représente. En effet, le matériau dont ils sont issus est abondant et disponible *in situ*. Il serait également probable que la destruction des maçonneries par le feu pourrait contribuer à les rendre inutilisables et non recyclables.

### 2.1.3. Les matériaux relictuels

Au sein du périmètre attenant, d'autres matériaux sont exploités pour la construction. Il s'agit principalement de blocs relictuels de grès (Figure II-9 A) ou encore de meulières, mais également de petits galets de silex blancs à gris, reliques des cordons littoraux formés au cours de la transgression thanétienne (Laurain et Meyer 1986). Ces silex, généralement guillochés, ne peuvent pas être autochtones de la craie campanienne puisque ces derniers y sont réputés totalement absents. Ils peuvent cependant représenter des formations relictuelles du Maastrichtien dont les dépôts ont été totalement érodés (Laurain et Meyer 1986). De nature identique aux matériaux collectés en plein champ au sein de la même aire d'approvisionnement, ils ne sont par conséquent pas facilement discriminables dans les maçonneries. Ils sont régulièrement utilisés dans les hérissons de fondation (Figure II-9 B et C), dans les soubassements et les blocages des murs ou encore comme pierres de calages (Tableau II-1).



Figure II-9. Aperçus de matériaux relictuels et de leur utilisation dans les soubassements. A. Bloc de grès du Thanétien relictuel dans les limons quaternaires (diagnostic archéologique, Gueux) ; B. et C. Hérissons de fondation d'un grand édifice public obtenu par assemblage de moellons de meulière, de grès et de calcaires silicifiés dont une majorité porte des arêtes émoussées et liées suivant des assises successives par de la craie compactée (Fouilles de la Rue Marie Stuart).

## 2.2. L'emploi des géomatériaux de l'aire locale

L'aire locale correspond à une distance comprise entre 5 et 20 km de l'agglomération ce qui équivaut à une journée de marche en charge. En plus de la craie, présente au nord, à l'est et au sud-est, la présence au sud et sud-ouest des reliefs de la Montagne de Reims et du Massif de Saint-Thierry à l'ouest offrent l'accès à une grande variété de géomatériaux d'origine sédimentaire déposés au cours du Cénozoïque. Les principales roches fournies par ces formations et dont l'usage est attesté dans l'agglomération sont essentiellement des argiles, des sables et des pierres propres au débit de moellons ou de pavages. La production de pierres de taille à partir des calcaires locaux apparaît comme anecdotique au cours de l'Antiquité (1 % des blocs de la rue Belin ; Fronteau *et al.* 2008), alors qu'elle se sera dominante au cours des périodes médiévale et moderne (Fronteau *et al.* 2014).

### 2.2.1. Les argiles

Les opérations de fouilles menées dans l'enceinte de l'agglomération de Reims et dans sa périphérie ont livré à plusieurs reprises des matériaux argileux susceptibles d'avoir été employés comme géomatériaux de construction au cours de l'Antiquité. Il s'agit en particulier des opérations de la rue Maucroix (Rollet *et al.* 2009), du Boulevard Henrot (Rollet 2016), de la rue de l'Équerre, du boulevard de la Paix (Rollet 2004 ; Deru *et al.* 2013 ; Mathelart et Rollet 2019) et plus récemment lors des fouilles de la rue des Élus (Fronteau in Cartron à paraître).

Les analyses minéralogiques de ces matériaux argileux réalisées en diffraction des rayons X (DRX) révèlent qu'ils ne sont pas employés tels qu'ils sont extraits de leurs lieux de production, mais subissent une préparation (Fronteau *et al.* à paraître). Cependant, les analyses minéralogiques montrent l'utilisation contemporaine de plusieurs types d'argiles correspondant à des approvisionnements variés et dédiés à différentes fonctions ou réalisations d'objets.

**Les argiles à *Tegulae*** : ces argiles sont destinées à la fabrication de tuiles (*Tegulae* et *Imbrex*, cf partie II). À ce jour, les ateliers de tuiliers de l'agglomération de Reims et sa périphérie sont encore inconnus (Bontrond et Lenoble 2018). L'origine des matériaux utilisés pour cet usage peut donc faire l'objet de deux hypothèses à savoir :

- Les ateliers de tuiliers utilisaient la même matière première que les ateliers de potiers comme le suggèrent les observations réalisées à Trépail (Deru *et al.* 2003)
- soit, à l'image des ateliers médiévaux et modernes, l'utilisation des formations de l'Éocène supérieur (Craon de Ludes) ou de formations argilolimoneuses quaternaires (Fronteau et al. à paraître).

**Les argiles à céramiques** : Même si cela sort légèrement du cadre de ce travail, il est important de mentionner la grande diversité d'usages artisanaux qu'autorise la variété des argiles disponibles autour de l'agglomération de Reims. Les découvertes et l'analyse d'échantillons d'argiles non cuites dans les ateliers de potiers au cours de la dernière décennie (Deru *et al.* 2013) ont fourni une bonne image des matériaux utilisés. Macroscopiquement, il s'agit d'argiles brunes dont la composition obtenue par diffraction des rayons X a montré la prédominance de kaolinites. Cette composition est compatible avec celle de la couche d'argiles à lignite de l'Yprésien (faciès sparnacien), qui affleure dans les pentes des reliefs cénozoïques notamment au sud de Reims (Figure II-10). Les travaux antérieurs de céramologie ont démontré que cette argile pouvait être transportée sur des distances de 10 à 15 km jusqu'aux ateliers de potiers situés entre Reims et Épernay pour y être façonnée (Biegert *et al.* 2004 ; Deru et Delmaire 2016 ; Mathelart *et al.* 2018). Elle peut également être traitée au plus près du gisement dans des ateliers qui exporteront ensuite les produits finis comme pour les ateliers étudiés à proximité de Trépail (Deru *et al.* 2003).

Enfin, il faut souligner la présence avérée d'**argiles gonflantes**, ou terres à foulon, constituées principalement de smectites ou encore de palygorskite provenant des niveaux de milieu saumâtre ou évaporitique affleurant dans les formations de l'Éocène (Lutétien supérieur, Bartonien). Pour Fronteau *et al.* (à paraître), ces argiles peuvent avoir été utilisés **en pharmacie pour un usage médical ou encore dans le traitement des textiles** (laines et tissus).



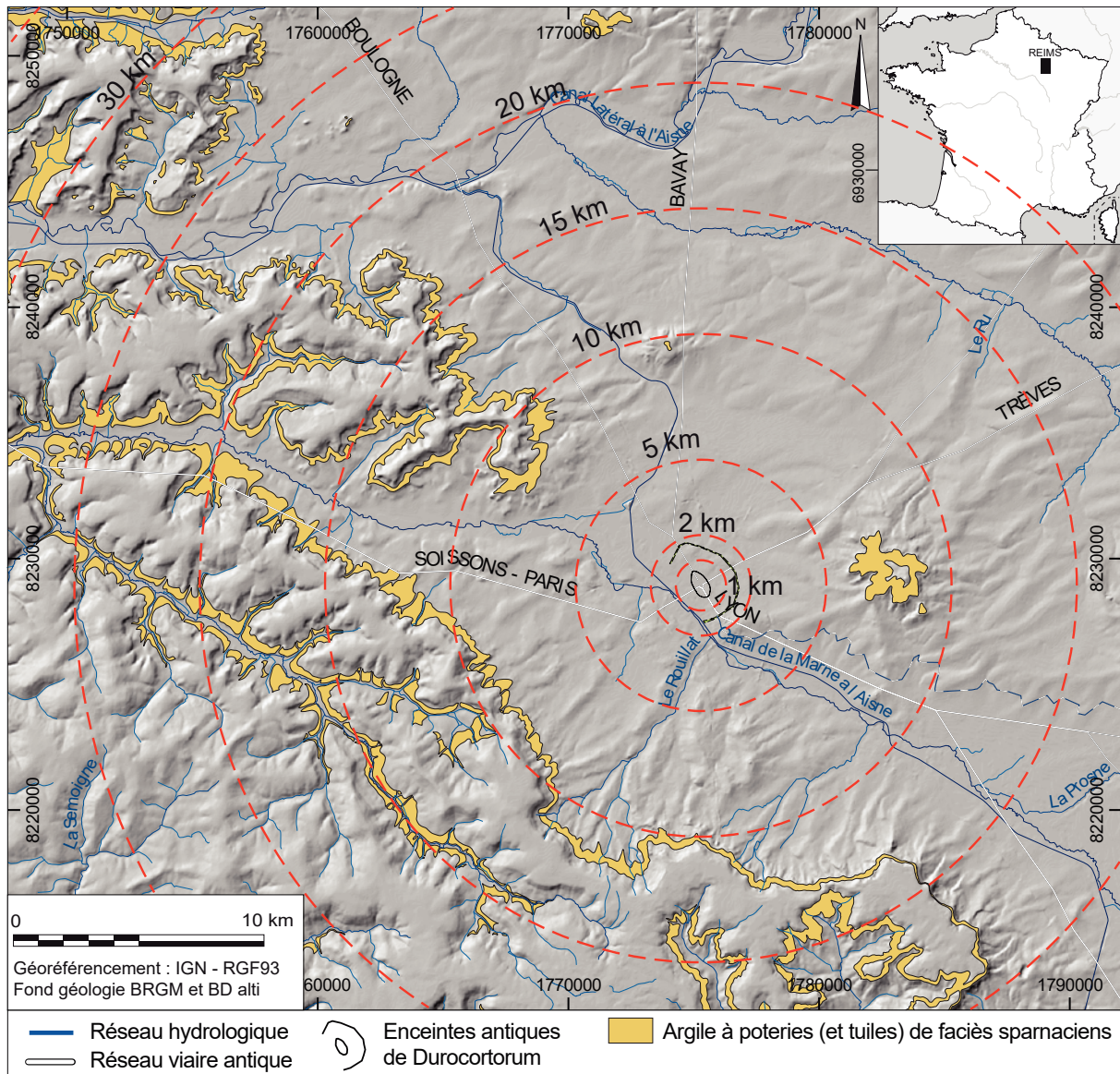


Figure II-10. Carte de répartition des argiles susceptibles d'être utilisées pour la réalisation de divers types de céramiques et de terres cuites autour de l'agglomération de *Durocortorum*

En tout dernier lieu, la découverte récente d'argiles vertes associée à des pigments laisserait supposer qu'elles aient également été employées comme **pigment** ou en lien avec cet usage (Fronteau *in* Cartron *et al.*, à paraître).

### 2.2.2. Les limons et terres à briques

La fabrication de briques et plus largement de terres cuites architecturales nécessite l'utilisation de terres limoneuses auxquelles les artisans briquetiers adjoignent des sables et des graviers. Ces matériaux, qui confèrent une grande partie de son originalité à l'architecture romaine, font l'objet de multiples utilisations dans la ville de *Durocortorum*. Les terres cuites architecturales sont observées sous la forme de briques (pour les élévations, Figure I-37 ou pour les piédroits de l'aqueduc des passages en tunnel (Rabasté, Arduin 2010) pour former des arases de maçonneries, pour façonner les voûtes ou encore pour monter les pilettes des hypocaustes (Figure II-11). Les briques ont alors des formes spécifiques en fonction de leur usage (Adam 1984 ; Ginouvès *et al.* 1985).



Figure II-11. Exemples de l'usage des terres cuites architecturales dans les constructions antiques A et B Terres cuites utilisées en assises de réglage dans les maçonneries des fouilles, de la rue Marie Stuart (A) et des Hautes promenades (B) ; C. et D. Briquettes de terre cuite assemblées en tant que pilettes d'hypocaustes exhumés dans les fouilles des Hautes promenades ; E et F : Utilisation des terres cuites en assises de réglage et comme arc de décharge dans les substructures du Cryptoportique de Reims.

Bien que la pierre soit rare, il semble néanmoins qu'elle ne le soit pas assez pour avoir rendu plus intéressant l'usage de la brique à la manière d'autres villes de l'Empire (comme Rome ou encore Pompéi), qui l'ont intensivement utilisée (Adam 1984). La présence de petits fragments de pierres meulières dans les quelques exemples issus de la cité rémoise attesterait d'une production locale à proximité des formations résiduelles oligocènes du Mont de Berru ou de la Montagne de Reims. Il est cependant possible que les sites de production ne soient pas uniquement concentrés autour de Reims, mais qu'ils soient délocalisés à proximité des gisements de matières, à l'extérieur de l'agglomération, comme pour des argiles de l'Yprésien (Figure II-10), ou encore des limons du Quaternaire (Figure II-12).

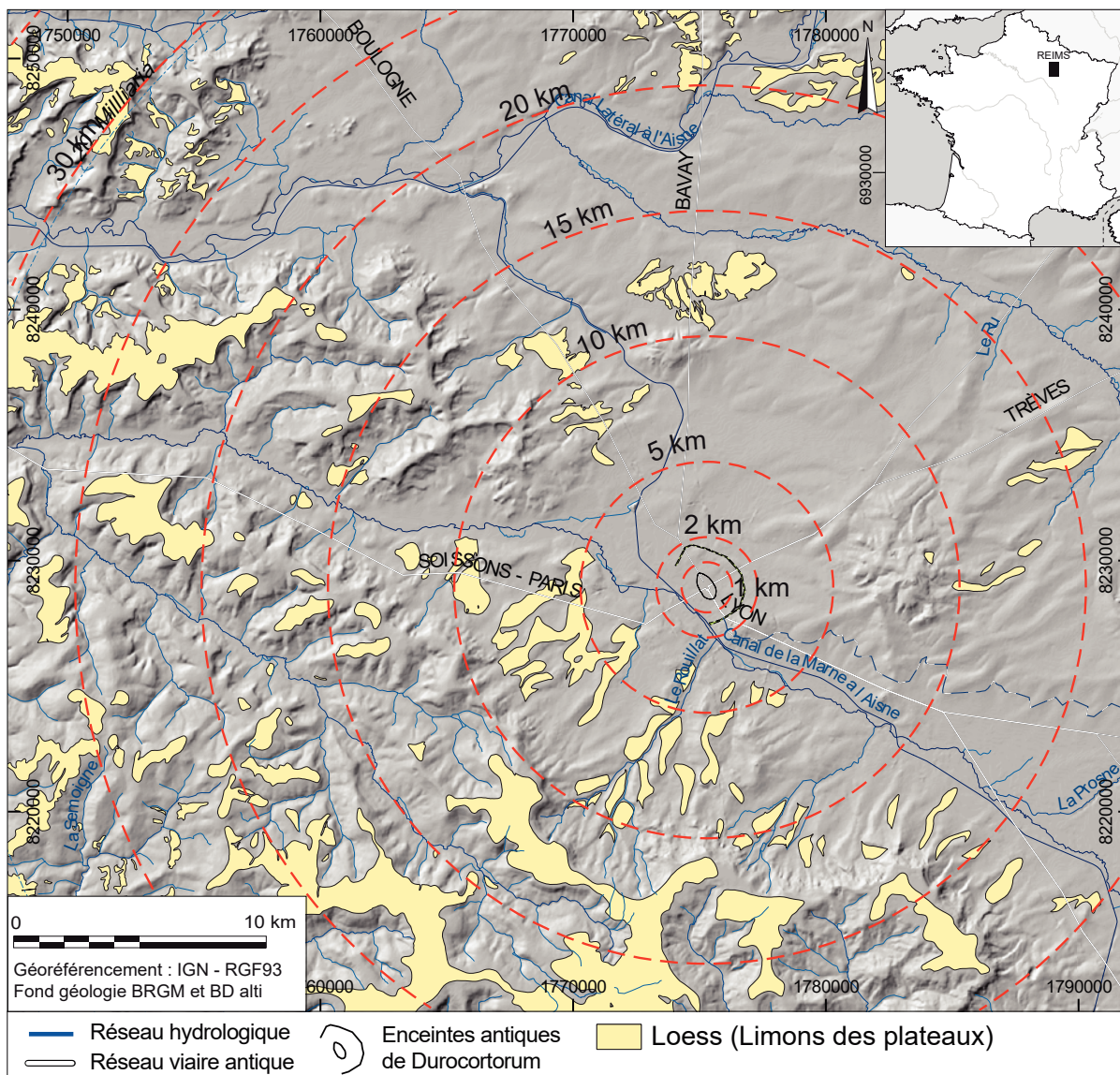


Figure II-12. Carte des affleurements de loess répertoriés comme « limons des plateaux ». Cette cartographie ne comprend pas les affleurements de petite taille qui peuvent exister au revers des croupes crayeuses.

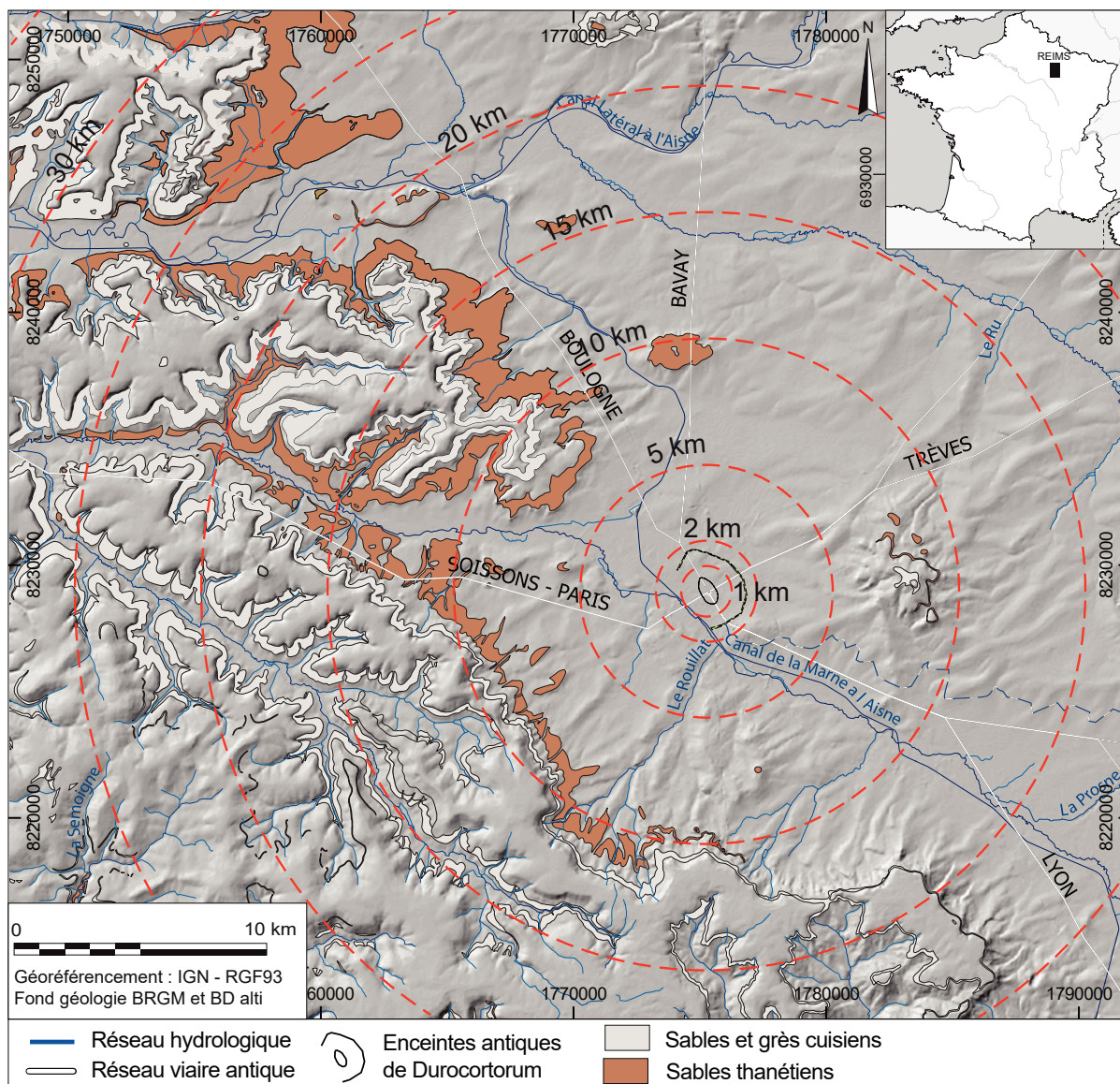


Figure II-13. Carte des affleurements susceptibles de permettre l'extraction de sable autour de l'agglomération de *Durocortorum*

### 2.2.3. Les sables

Plusieurs formations sédimentaires susceptibles de permettre l'extraction de sable sont présentes dans le voisinage de l'agglomération de *Durocortorum* (Figure II-13). Leur présence s'observe sur les versants de tous les reliefs voisins de la ville depuis les buttes-témoins de Berru et de Brimont jusqu'à la Montagne de Reims et du Massif de Saint-Thierry. Il s'agit des sables glauconieux et des sables coquilliers du Thanétien marin que surmontent les sables purs du Thanétien continental, les sables micacés de l'Yprésien à faciès cuisien et enfin des sables grossiers à graviers de quartz et de silex appartenant à la Glauconie grossière (Lutétien inférieur).

Plus au nord, dans le Laonnois sont également disponibles les Sables et grès de Bracheux, cités pour mémoire, car situés bien au-delà des limites de l'aire locale. Ponctuellement, d'autres couches de sables d'extension très limitée sont observables, à l'image des sables argileux de faciès cuisien ou encore des placages de Sables de Fontainebleau relictuels (Laurain *et al.* 1981). Plus spécifiquement, des épandages alluvionnaires appartenant à de hautes terrasses

ont également été exploités spécifiquement pour l'extraction de sables siliceux à proximité de la ville (observés au cours de la fouille du « Bois Doriot » sur la commune de Villers-Allerand ; Bundgen et Richez 2020).

La preuve de l'existence à Reims de ce type d'exploitation a été récemment fournie par la découverte de caissons d'extraction appartenant à une exploitation de sables (Figure II-14) et dans les alentours immédiats de ce site. Ces caissons d'extraction polygonaux, d'une profondeur de près de 3 m, découverts et fouillés en 2016, sont datés de la fin de l'Antiquité grâce à la présence de céramiques (sigillée argonnaise antique) dans leurs comblements (Bundgen et Richez 2020). Le matériau de l'encaissant se compose d'un sable mêlé d'une grande quantité de graviers de calcaire, de silex roulés et de nombreux fossiles de mollusques issus en particulier des dépôts lutétiens. L'analyse granulométrique réalisée alors (Laratte et Conreux 2017), qui compare le remplissage des caissons à la composition de plusieurs lits de l'encaissant, a déterminé que celui-ci était appauvri de sa composante fine tout en présentant une fraction grossière nettement enrichie. Cette différence ne s'expliquant pas par un simple mélange de ces différents sédiments, il a été proposé que l'actuel remplissage de ces caissons correspondait au refus de criblage (assez imparfait) résultant de l'opération de soustraction de la fraction fine du sédiment (d'un diamètre légèrement inférieur à 0,2 mm). La fraction extraite étant alors exportée vers son site d'utilisation, l'usage qui en a été fait reste cependant inconnu.

De manière générale, ces sables n'ont pas été utilisés tels quels dans la construction, mais ils ont participé à l'élaboration des mortiers de maçonnerie. La présence occasionnelle de petits dépôts de sables relevés lors de fouilles dans des contextes variés (ateliers d'artisans, habitations), atteste par ailleurs de leur utilisation dans les activités urbaines sans qu'il ne soit véritablement possible d'identifier une activité préférentielle (Bontrond en cours). Leurs provenances précises sont également un sujet problématique, puisque comme il en a été évoqué précédemment, les sites susceptibles de permettre les extractions de sable sont potentiellement nombreux, aussi bien stratigraphiquement que géographiquement, et peuvent également être de nature surprenante.

Cependant, les nombreuses observations réalisées notamment par Fronteau (Rollet et al. 2011) sur les mortiers de maçonnerie depuis une quinzaine d'années, ont montré que les sables siliceux issus des formations du Cénozoïque ou de remobilisations Quaternaires sont assez peu abondants à Reims, et même parfois complètement absents de certains mortiers de maçonnerie antiques rémois. Les matériaux utilisés comme charges granulaires dans les mortiers de chaux sont plutôt des graviers et sables grossiers calcaires correspondant aux produits d'altération de la craie et seulement dans certains mortiers de véritables sables siliceux.

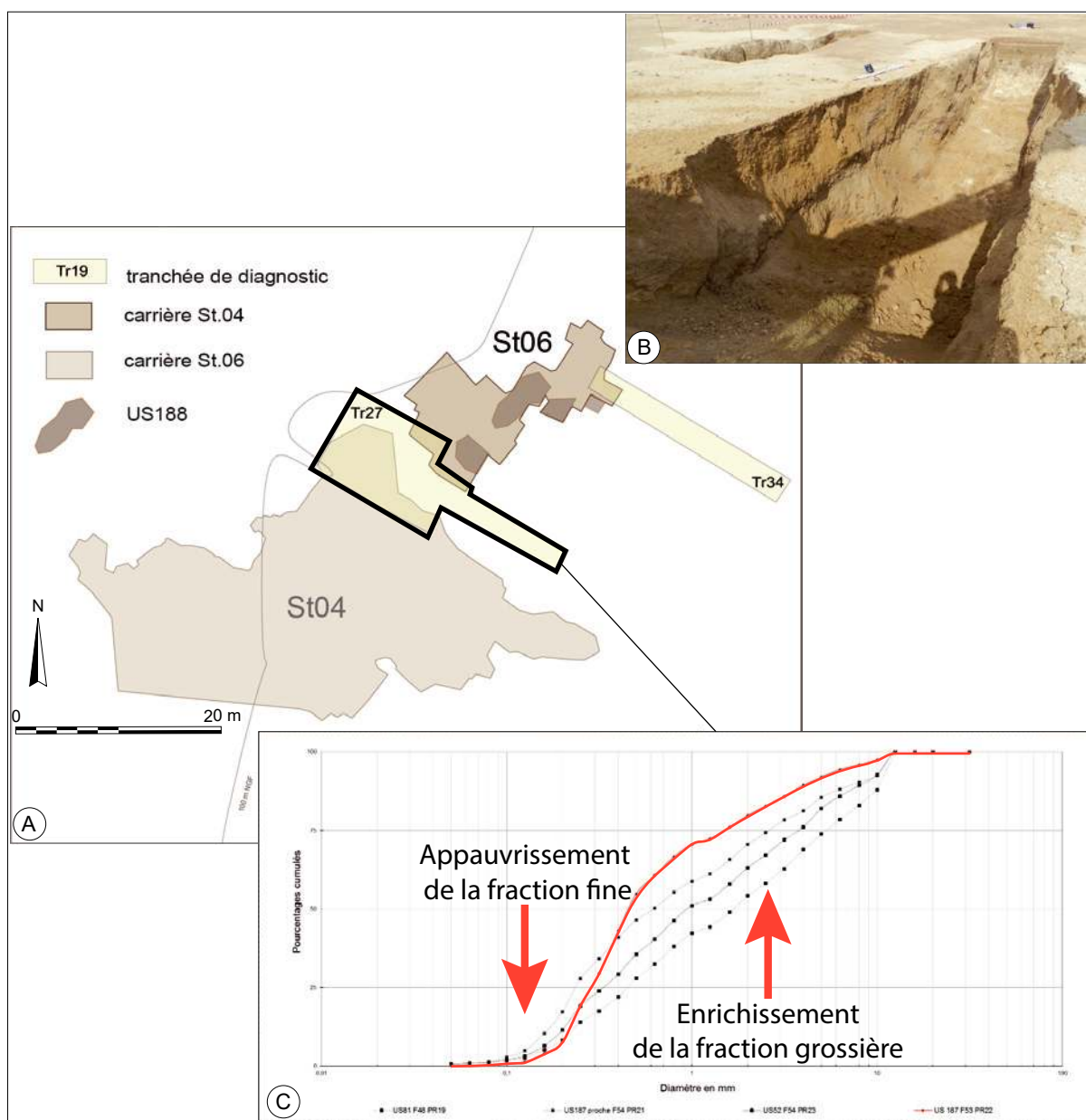


Figure II-14. A. Plan général du secteur des carrières de sables dans l'emprise de la fouille du « Bois Doriot » à Villers-aux-Noeuds (S. Bundgen SAGR) ; B. Photographie d'une coupe traversant un caisson d'extraction et son encaissant (photographie SAGR, Bundgen et Richez 2020) ; C. Analyse granulométrique du comblement d'un caisson d'extraction comparée aux sédiments constituant l'encaissant (S.Laratte in Bundgen et Richez 2020).

#### 2.2.4. Les pierres à moellons et empierrements

Les moellons et les pierres à empierrements constituent le complément essentiel à l'emploi de la craie et des terres crues (briques, adobe et torchis) et justes intermédiaires avec la pierre de taille généralement plus onéreuse. Ils complètent l'éventail des matériaux utilisés dans la construction.



Figure II-15. Exemples d'utilisations de moellons de différentes natures dans des maçonneries. A. Murs de soubassement du Cryptoportique de Reims, seule la partie inférieure (plus sombre) est antique B. Murs bahut de *Domus* aux moellons bien équarris mêlant des pierres de natures très diverses et laissant apparaître au centre de l'image les restes d'une poutre en bois carbonisée (Hautes Promenades) ; C. Mur de soubassement d'un grand édifice public associant des calcaires à des grès quartzite (Rue Marie Stuart, Reims) ; D. Mur d'une *Domus* incendiée en moellons calcaires (*opus incertum* ; Hautes Promenades).

Contrairement à beaucoup d'autres sites antiques, les pierres à moellons font très régulièrement l'objet d'observations dans les constructions de *Durocortorum* (Figure II-15). Ces pierres sont fréquemment employées dans l'édification des murs maçonnés, mais également dans les soubassements (en complément des matériaux résiduels évoqués précédemment, Figure II-15).

Comme le soulignent Fronteau *et al.* (à paraître), les approvisionnements en pierres à moellons dans l'agglomération semblent suivre deux logiques différentes :

- La collecte et l'utilisation de roches variées, très probablement issues de ramassages de blocs « volants » dans les champs et qui intègrent des roches de nature très diverse qui peuvent présenter des éléments légèrement altérés ou érodés
- L'emploi spécifiquement choisi d'un type de pierre unique, qui présente une certaine homogénéité, soit issue, d'une extraction en carrière ou d'une sélection préalable à la construction.

L'usage des moellons semble également répondre à des critères de choix en réponse à des contraintes architecturales. Les pierres à moellons sont choisies parmi les calcaires massifs, les pierres meulières (Figure II-17) et les grès -quartzitiques abondants dans les formations superficielles du Quaternaire (principalement dans les épandages colluviaux et les terrasses alluviales anciennes). Il s'agit donc préférentiellement de matériaux disponibles dans les affleurements de roches cohérentes de l'aire d'approvisionnement locale.

Ce sont soit des calcaires comme cela a été mis au jour lors des fouilles de la rue Belin, ou encore des fouilles de la rue Marie Stuart, ou encore des pierres meulières comme cela est le cas dans les maçonneries du Cryptoportique. Il est d'ailleurs plausible qu'il existe des exploitations d'extraction de pierres à moellons en carrières spécifiques pour chaque pierre :

- dans les affleurements lutétiens du Massif de Saint-Thierry et de la vallée de la Vesle en aval de Reims qui ont fourni des moellons de calcaires massifs à *Ditrupa strangulata* (Figure II-16 et Figure II-18)
- dans les affleurements rupéliens d'argiles à meulières du Mont de Berru (à l'est de Reims), de la Montagne de Reims (au sud) et des formations résiduelles qui ont fourni des moellons de pierre meulière (Figure II-17)
- et enfin dans les affleurements de calcaires continentaux ou saumâtres) d'âges variés.

Les meulières se présentent sous la forme d'un matériel compact et massif ou peuvent être vacuolaires. Elles peuvent avoir une texture bréchique et silexoïde et dans ce cas, elles présentent une cassure conchoïdale. Au microscope, cette roche est constituée de quartz microcristallins, de calcédoine fibreuse et de silice amorphe ou mal cristallisée. Lorsqu'elles présentent des traces de fossiles épigénisés, il s'agit de faunes et de flores à affinité continentale et lacustre (Limnées, Potamides, hydrobies et gyrogonites de Characées ; Courtehoux 1968). Ces roches sont considérées comme très peu capillaires et difficilement façonnables (Turmel 2014).



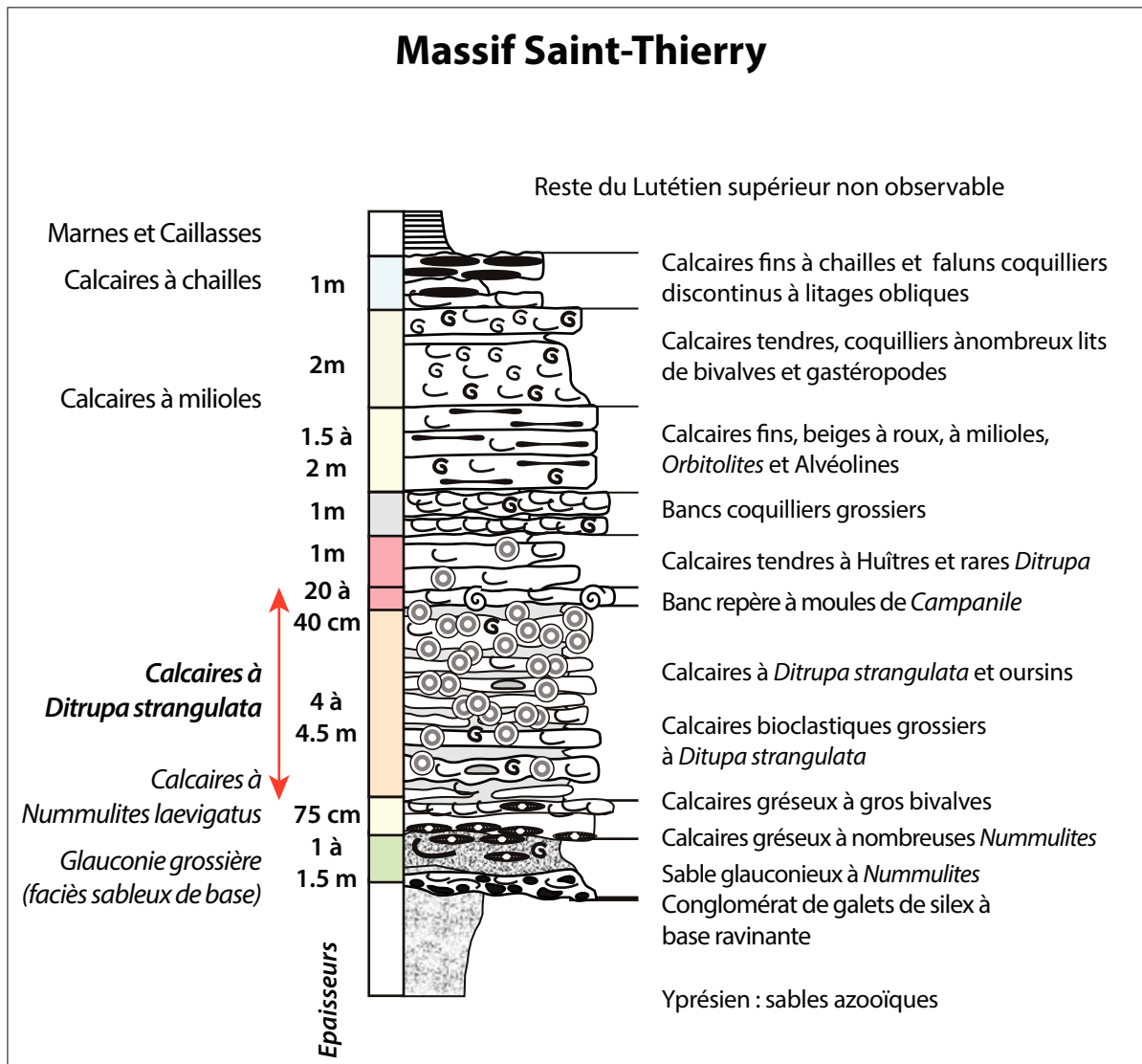


Figure II-16. Coupe simplifiée des dépôts lutétiens à l'ouest de Reims dans le Massif de Saint-Thierry (Prouilly-Trigny, modifié d'après Fronteau, Laratte, Devos 2021).

#### 2.2.5. Les pierres de pavages

Loin de l'image d'Épinal de la voie romaine véhiculée dans l'imaginaire du grand public par les représentations populaires, l'empierrement des voies et espaces publics apparaît comme très hétérogène. Les opérations de fouilles menées dans l'agglomération ont régulièrement recoupé des portions plus ou moins larges de voiries (voies et rues) et ont montré l'existence de traitements différents pour les empierrements de ces chaussées. Celles-ci peuvent consister en des recharges successives de fragments de craie issus de l'aire locale, si ce n'est du voisinage immédiat, concassé et compacté (Figure II-5). Mais, comme l'ont montré Péchart et Arnaud (2014), elles peuvent aussi consister en une couverture de petits blocs de roches de taille décimétrique, émoussés et brisés par le roulement et les piétinements du trafic. Les trop rares cas de ces voiries étudiées dans Reims ont livré des fragments de meulières, de grès -quartzitiques du Thanétien et de calcaires massifs issus des formations du Lutétien supérieur.

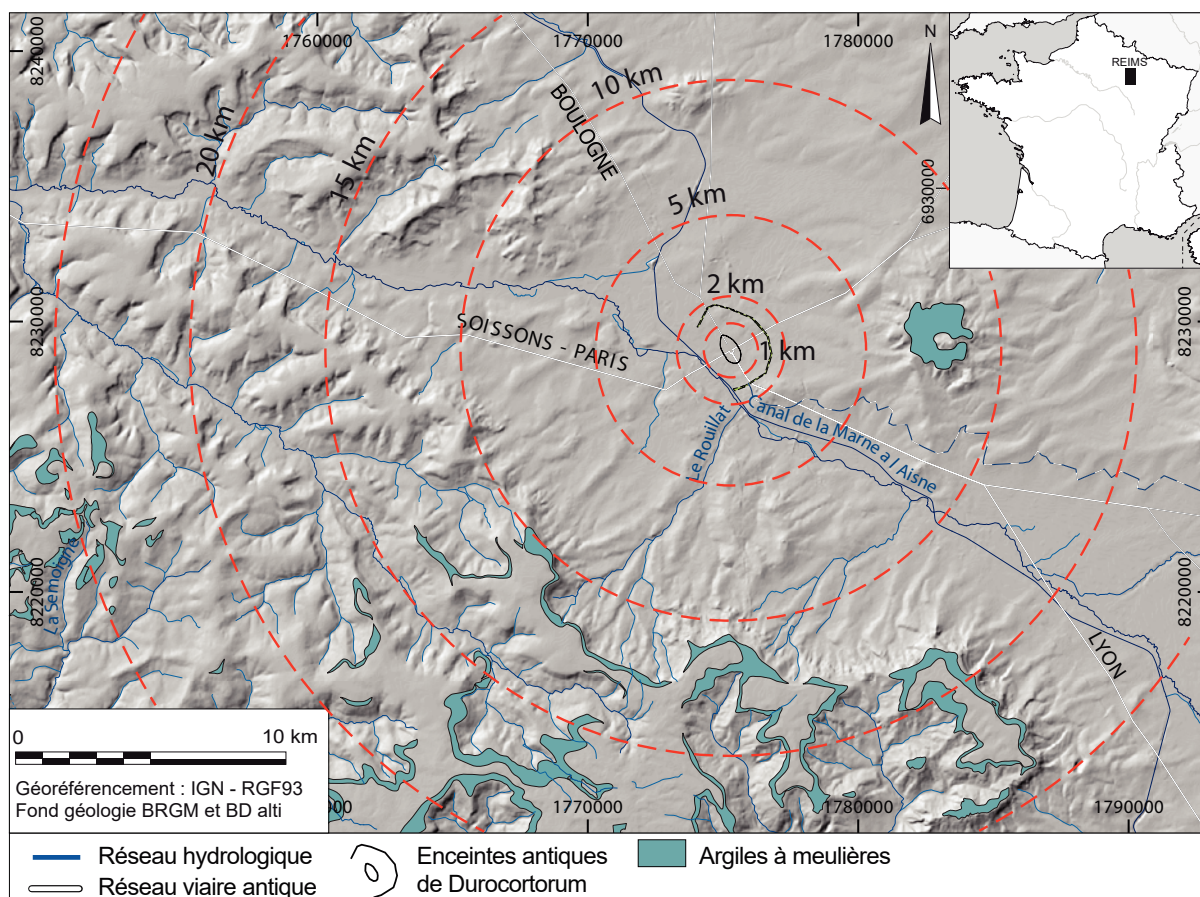


Figure II-17. Carte des principaux affleurements des argiles à Meulières à proximité de l'agglomération de *Durocortorum*

Les grands édifices publics peuvent également posséder des sols pavés, comme le monument public de la rue des Élus (Neaud à paraître) ou encore les dallages de l'assise de réglage de la Porte de Mars. Cependant, ces éléments de sols sont rares, car aisément récupérables dès l'abandon de l'édifice.

Les usages médiévaux privilégient l'utilisation des grès quartzitiques thanétiens issus d'extractions localisées sur le Mont de Brimont dans les pavages de la ville (Jung 1991). Ils ne semblent *a contrario* pas utilisés durant l'Antiquité.

#### 2.2.6. Les pierres de taille locales

Deux ensembles de pierres de taille calcaires figurent parmi les ressources minérales accessibles dans le périmètre de l'aire locale. Il s'agit respectivement des calcarénites à *Microcodium* de la base de l'Yprésien et des calcaires marins du Lutétien.

Même s'ils sont avérés pour les périodes médiévale et moderne (Turmel 2014), aucun élément de calcarénites à *Microcodium* n'a, à ce jour, été observé dans les maçonneries antiques de Reims. Cependant son absence n'est pas pour autant synonyme de la preuve de son non-usage. En effet, cette pierre apparaît extrêmement friable et d'une fragilité telle qu'elle est de conservation très délicate et se désagrège très facilement (Fronteau et al. à paraître). D'origine fluviatile, la formation dont sont issus ces « grès » calcaires peut atteindre une épaisseur de 10 à 15 m (Laurain et Meyer 1986). Elle s'amenuise progressivement vers

l'ouest pour disparaître complètement dans le secteur de Villers-Allerand (Laurain *et al.* 1981 ; Laurain 1985). Latéralement, vers le Massif de Saint-Thierry, cette formation passe à la formation fluvio-tidale des grès du Mont-Chenois.

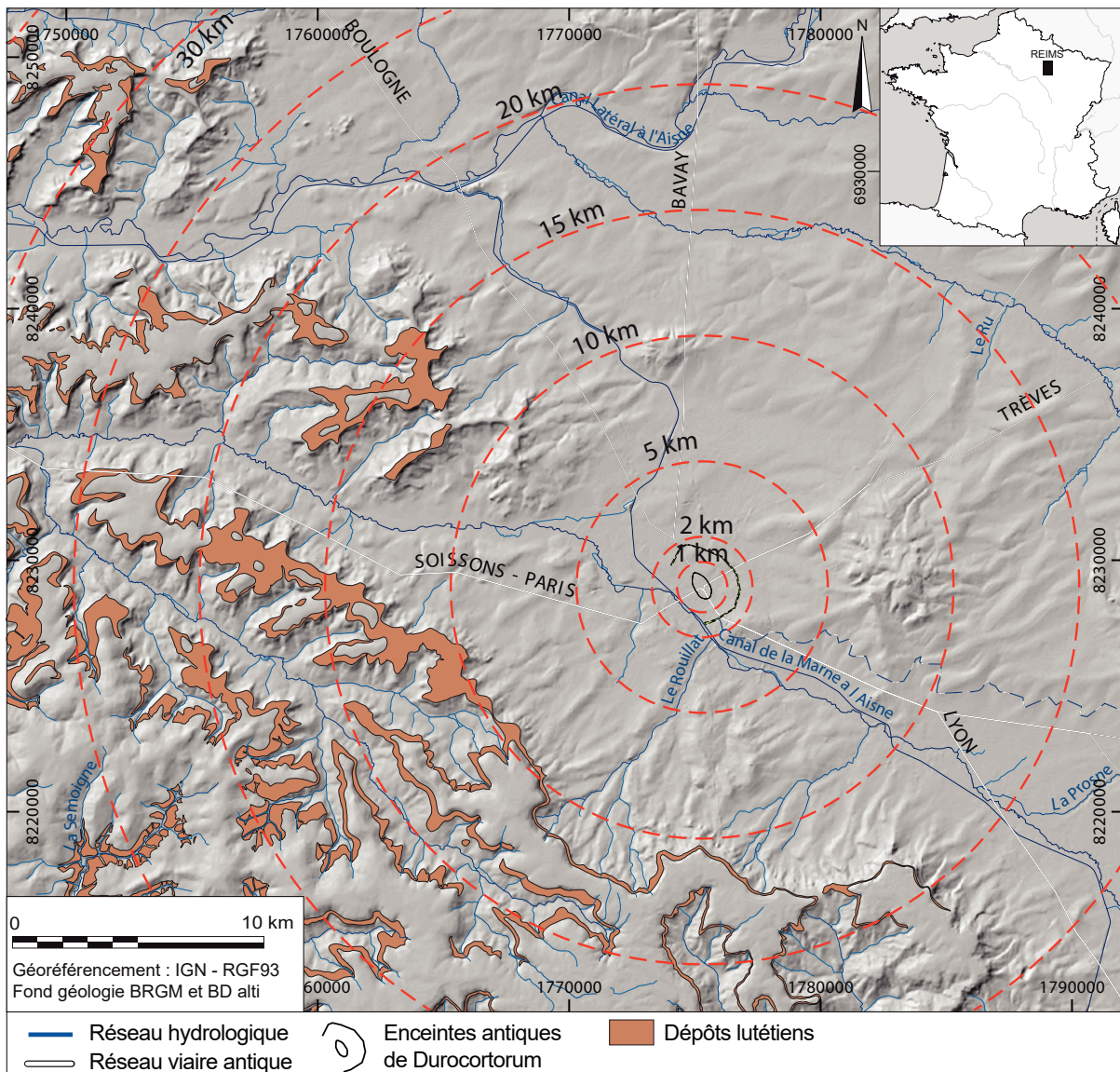


Figure II-18. Carte de répartition des dépôts lutétiens autour de l'agglomération de *Durocortorum* jusqu'aux plateaux du Soissonnais/Laonnois. Les formations composant les dépôts de cet étage ne sont pas différenciées.

Les blocs issus de cette formation se présentent sous la forme d'une calcarénite cimentée par de la calcite, de couleur beige à jaunâtre, montrant des stratifications entrecroisées ou encore obliques (Laurain et Meyer 1986). D'après ces mêmes auteurs, la lithification des sables à *Microcodium* connaît une variabilité telle que ces dépôts ne sont pas exploitables partout ni même sur toute leur épaisseur. Les pierres qui en furent extraites, aux époques médiévale et préindustrielle, ont été dimensionnées pour préparer des éléments de petits et de moyens appareils (Turmel 2014). Ces *Microcodium* sont de petits prismes calcaires qui forment des assemblages en épi résultant de calcification de racines de plantes terrestres (Klappa 1979 ; Košir 2004). Au microscope, ces calcaires gréseux montrent un faciès de calcarénite biodétritique

à la texture microgranulaire. Les pierres de taille issues de l'exploitation des dépôts du Lutétien sont subdivisées en deux groupes de faciès principaux :

- Les calcaires coquilliers à *Ditrupa* représentés par les bancs les plus épais de la base du Lutétien moyen
- Les bancs de pierres rouges situées juste sous les bancs à chailles de la limite Lutétien moyen/Lutétien supérieur (Massif de Saint-Thierry et Vallée de l'Ardre/Tardenois).

L'étude des 450 blocs des parements de deux puits antiques localisés dans le complexe cultuel de la rue Belin (Fronteau et Paicheler 2005 ; Bart *et al.* 2017) a montré que ces pierres « rouges » représentaient moins de 1 % des blocs en remploi (soit 4 blocs). Les autres blocs (446 éléments soit 99 % de l'ensemble), également extraits dans les formations calcaires du Lutétien, appartiennent à des faciès provenant de l'aire régionale.

### 2.3. Les géomatériaux importés de l'aire régionale : les pierres de grand appareil

Les études des matériaux de construction, aussi bien dans l'agglomération rémoise que dans d'autres cités comme *Argentomagus* (Saint-Marcel, Indre ; Allain *et al.* 1992 ; Coulon et Goudineau 1996 ; Lorenz *et al.* 2000), ou Bibracte (Delencre et Garcia 2011) ont d'abord porté sur les éléments les plus frappants, assemblés en grand appareil et sur des ensembles lapidaires plus classiques à l'image des monuments et des stèles funéraires (Revenu 2010).

Il est fait mention, dans le volume de la carte archéologique consacrée à l'agglomération de Reims, de nombreuses occurrences de découvertes lapidaires (Chossenot *et al.* 2010). La réalisation de travaux d'aménagement dans le secteur des Trois Piliers au nord de la ville a également donné l'opportunité de mettre au jour d'importants complexes de grands monuments publics propres à fournir de tels blocs (Rollet 2006). Cela concerne en particulier le site du grand complexe cultuel localisé au nord de l'agglomération, mais aussi les sites où les fondations du rempart tardo-antique ont été exhumées (Porte Bazée, boulevard Rockefeller...).

Ces sites ont livré de grands volumes de pierres que cela soit en position primaire, en remploi ou en position secondaire. Ce travail d'étude du lapidaire a été initié avec l'importante collection de blocs de la Rue Belin (Fronteau et Paicheler 2005 ; Rollet 2006), des blocs en remploi issus du démantèlement des soubassements du rempart tardo-antique rue Rockefeller (Neiss et Sindonino 2004 ; Brunet-Gaston 2008), sans compter les études plus modestes voire ponctuelles non publiées.

Également dans le secteur de Trois Piliers, Brunette (1861) fait mention de restes de colonnes antiques encore en élévation, intégrées à des maçonneries plus récentes alors que des travaux de réaménagements étaient réalisés dans le secteur. Ces découvertes ont été complétées au début du XXe siècle par la découverte des restes de statues monumentales (Figure I-54) aujourd'hui exposées au musée Saint Remi. Ces restes de très grandes dimensions peuvent en termes de module être assimilés à des éléments de grand appareil même s'il est très peu probable que la statue soit monolithe elle n'en reste pas moins de grande dimension. Les pierres mises au jour au cours de la dernière étape du démantèlement de l'amphithéâtre antique décrit par Brunette (1885) et repris par Chossenot (2010) sont assez

peu décrites. Cependant, leur évocation est accompagnée de l'hypothèse d'une provenance régionale de ces pierres.

Ces pierres, uniquement des calcaires, présentent des faciès très différents des calcaires lutétiens des environs de Reims et en particulier ceux des secteurs du Massif de Saint Thierry ou encore ceux de la vallée de l'Ardre jusqu'à Fismes (Fronteau *et al.* 2010 ; Fronteau et Turmel 2017). Elles sont réputées pour un grand nombre d'entre elles très poreuses et plus « tendres ». Ces faciès sont surtout abondants dans les plateaux de l'Aisne, du Soissonnais et du Laonnois (Fronteau *et al.* 2008 ; Fronteau *et al.* 2021) où leurs bancs présentent également d'importantes épaisseurs bien supérieures à celles de calcaires lutétiens locaux.

En plus des faciès tendres des faciès de *grainstone* à milioles et de *packstone/grainstone* à Milioles et cérithes, à l'aspect très massif sont également présents dans les secteurs de Colligis Crandelain. C'est d'ailleurs dans ce secteur que les érudits du XIX<sup>e</sup> siècle situaient l'origine des calcaires utilisés dans la construction antique (Fronteau *et al.* 2008).

Pour l'ensemble des matériaux employés aussi bien dans la construction en grand appareil que pour les éléments de décors urbains (fontaines, colonnes votives, bornes...) tout comme pour les matériaux des monuments funéraires, la convocation d'une origine régionale est systématique.

Les érudits du XIX<sup>e</sup> siècle postulaient déjà que l'origine des blocs de calcaire de la Porte de Mars était à chercher dans le secteur des plateaux du Soissonnais et précisant même leur origine à la commune de Colligis (aujourd'hui Colligis-Crandelain). Ce secteur de plateaux du Soissonnais et du Laonnois a d'ailleurs été reconnu comme un secteur carrier exploité pendant l'Antiquité en particulier grâce à la présence attestée d'une carrière ayant fourni des meules au cours de l'antiquité (Naze *et al.* 2011). L'étude des matériaux destinés à la construction en grand appareil quadrangulaire est abordée dans la suite de ce travail par le biais de l'étude de la Porte de Mars.

## 2.4. L'emploi de géomatériaux extrarégionaux importés

### 2.4.1. Les pierres ornementales (marbres et calcaires marbriers)

Les principaux géomatériaux importés vers l'agglomération de *Durocortorum* pendant l'Antiquité sont représentés par les pierres ornementales, au sein desquelles il faut différencier d'une part les marbres blancs et colorés et d'autre part les calcaires marbriers (Perrier 2004). Si de manière générale, les marbres qu'ils soient blancs ou colorés sont très peu abondants dans les enregistrements archéologiques à Reims, ces derniers ne sont toutefois pas totalement absents. Le plus souvent ils sont retrouvés sous la forme d'éléments de petits modules, généralement sous la forme de plaquettes sciées afin d'être utilisées en parement des murs intérieurs ou encore de petits éléments de soutènement (Van Lynden Tot Oldenaller 2017 ; Cavé à paraître ; à paraître b). Cependant, l'existence d'éléments de plus grande tailles, brisés ou portant des traces de surfacage est également avérée (Figure II-19).



Figure II-19. Bloc de marbre dit « *Cipolino verde* » présentant une face polie, fouilles de la rue des Élus (photo G. Cartron, EVEHA)

Pour les marbres blancs, les analyses de microprélèvements réalisés sur de la statuaire et des pièces de mobilier (Valette, *et al.* 2011), ont démontré l'utilisation de marbres d'origine grecque (Pentélique) et turque (Marmara). Pour les marbres colorés, deux tendances sont constatées, d'une part l'emploi « classique » des marbres du pourtour méditerranéen et d'autre part avec des éléments en provenance du nord-est de l'Empire (Ardenne, Allemagne...).

La réputation de quasi-absence ou d'extrême rareté de ces roches ornementales dans l'agglomération a été remise en cause ces dernières années par l'étude des lapidaires issues de quelques fouilles récentes qui ont notablement inversé cette tendance en livrant d'importants corpus antiques (Brunet-Gaston 2016 ; Van Lynden Tot Oldenaller 2017). Ces éléments ont essentiellement été mis au jour dans le cadre de fouilles de riches habitats privés de type *Domus*.

La découverte récente d'un bloc pluridécimétrique de pierre verte, grenue, d'origine visiblement plutonique, au cours des fouilles d'un complexe cultuel précoce fait figure d'exception à cette réputation de rareté (Neaud *et al.* à paraître ; Figure II-20). Il s'agit plus précisément d'une roche à la texture ophitique contenant des phénocristaux de feldspaths blancs et verts et des aiguilles de plagioclases. Ceux-ci sont très altérés sous forme d'aiguilles de chlorite. De petits cristaux de calcite, de quartz, et d'apatite sont également présents. Celle-ci dépend non pas d'une aire d'approvisionnement située sur les marges du bassin méditerranéen, mais correspondrait à du « *Granito verde a erbetta* » ou diabase de Trier, dont le gisement d'origine serait localisé près de Trèves dans la vallée de la Ruwer (Ruppiene 2018). L'approvisionnement en matériaux décoratifs dans ce secteur de la Gaule du Nord s'observe également pour les approvisionnements en tesselles destinées à la réalisation de mosaïques. Les tesselles utilisées pour la réalisation de mosaïques associant couleurs claires et noires sont débitées à partir de calcaires fins lutétiens (« Liais ») pour les pierres claires et de calcaires marbriers paléozoïques pour les pierres noires.

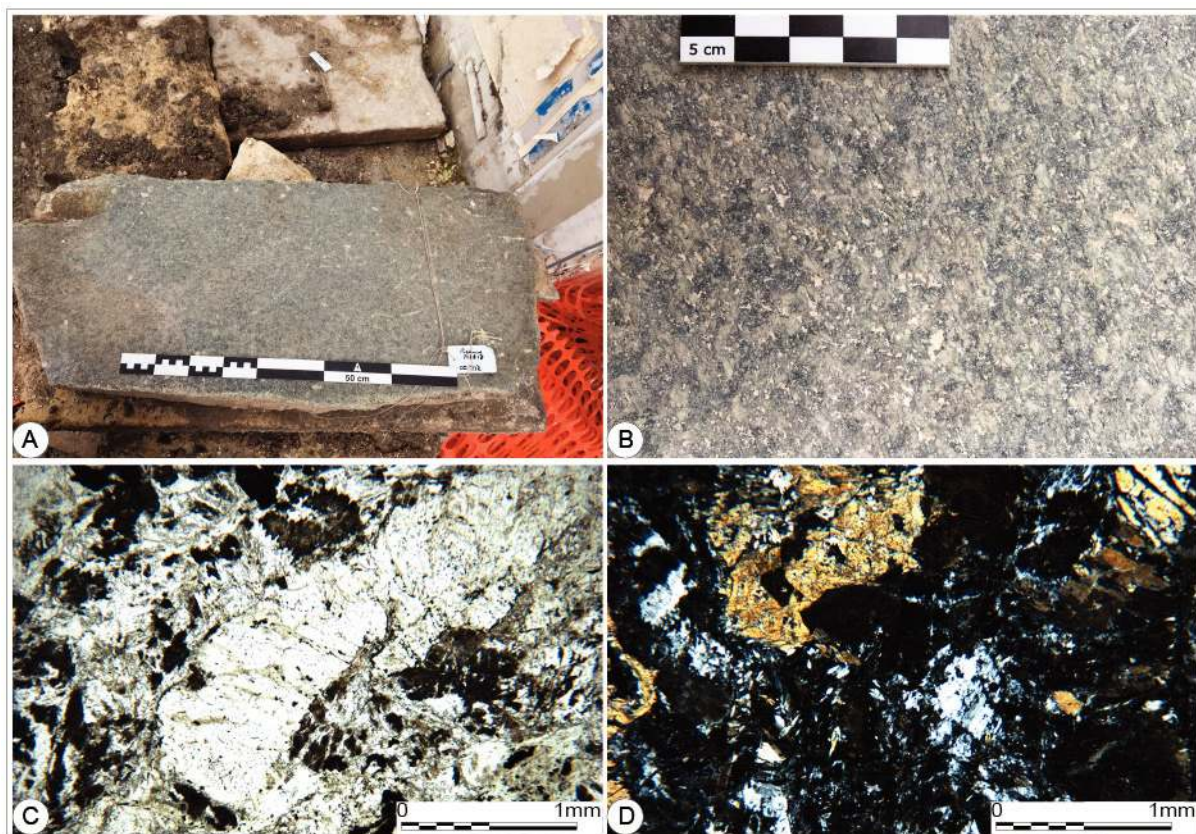


Figure II-20. Bloc de roche marbrière verte (OI212) de la rue Marie Stuart, Reims A. Bloc lors de sa découverte ; B. Faciès du bloc ; C. et D. Microphotographie au microscope polarisant, en lumière naturelle et en lumière polarisée

D'autres matériaux furent aussi utilisés dans la cité rémoise durant l'antiquité en tant que pierre ornementale ; comme les calcaires compacts noirs d'Ardenne (pierres de Givet). Des colonnes monolithes de granites de Troad (ou « *Granito Violetto* » originaire d'Anatolie) ont également été identifiées en remploi sur la façade et dans la nef de la basilique Saint Rémi<sup>39</sup>.

Leur rareté relative s'explique aisément, dans le contexte rémois marqué par l'absence de pierres ornementales, par une récupération intensive et probablement précoce de ces pierres. Les auteurs anciens dont Vitruve<sup>40</sup>, indiquaient en outre que l'utilisation de calcaires purs était préférable à tout autre pour la fabrication de chaux. Les marbres et les calcaires purs notablement absents des blocs de grande taille retrouvés en fouilles ont très probablement été l'objet d'une prédation préférentielle afin d'être réemployés en l'état ou encore, pour partie, passés en four à chaux.

#### 2.4.2. Les ardoises

L'emploi d'ardoises pour la couverture de bâtiments pendant l'Antiquité est avéré dans le nord des Ardennes (Cartron 2019), où des pans de toitures entiers ont été mis au jour (Figure II-21 ; en particulier pour les éléments de couverture mis au jour à Warcq). De tels emplois ne sont en revanche pas à ce jour documentés dans la construction antique de Reims.

39 Communication orale M.Rochette

40 De Architectura, livre 2

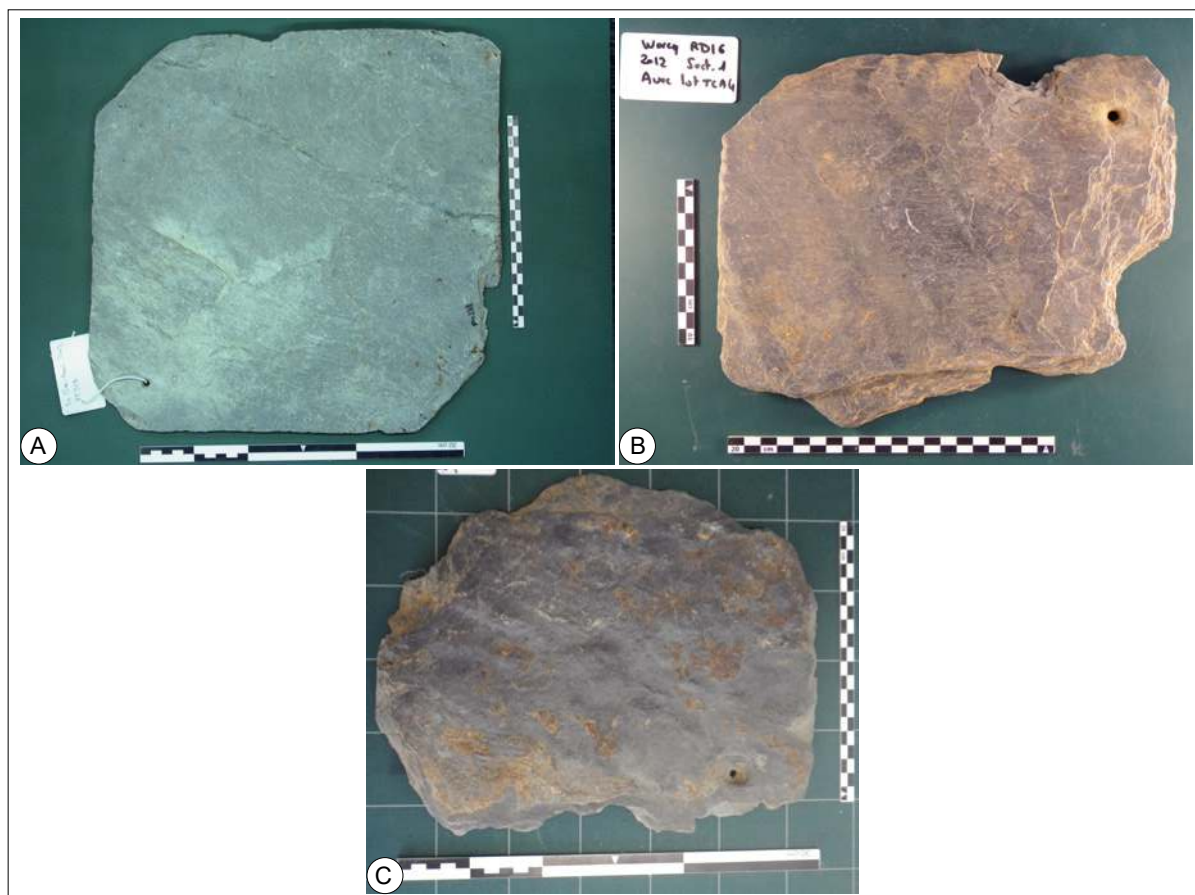


Figure II-21. Exemples de plaques d'ardoise utilisés comme couverture pendant l'Antiquité. A. Plaque de couverture entière trouvée à Charleville-Mézières en 2013 ; B. Fragments de plaques d'Ardoise issues des fouilles de Warcq en 2012 (Laratte, Fronteau 2014)

### 2.4.3. Le cas de l'outillage lithique

Bien que hors du cadre de ce travail, il est cependant fréquent d'observer des éléments de mobilier brisé ou usagé en remploi dans les maçonneries de petit appareil ou dans des fondations/soubassements. À ce titre, ils seront brièvement abordés en tant que matériaux de construction secondaire (remployé). Le commerce et la circulation d'objets en pierre issus d'un artisanat spécialisé ont également été très actifs dans l'agglomération de *Durocortorum*. Celle-ci s'exprime notamment par la présence de nombreux éléments de macro-outillages lithiques comme des meules, des mortiers ou encore des aiguisoirs. Une partie de ces objets a notamment été étudiée dans le cadre d'un Programme de Recherche (« Évolution typologique et technique des meules du Néolithique à l'an mille sur le territoire français ») et a fait l'objet de la publication des Actes du colloque tenu à Reims en 2014 (Buchenschutz *et al.* 2017). La plus grande partie des éléments étudiés est issue de l'agglomération (Jodry *et al.* 2014) et de sa périphérie (Etchart-Salas 2017). Les outils de mouture sont façonnés dans des pierres de lithologies différentes et proviennent d'exploitations lointaines, mais appartenant souvent à l'aire régionale (calcaires lutétiens du Soissonnais et du Laonnais Naze *et al.* 2011), voir extrarégionale comme des grès de type Macquenoise (Dévonien inférieur ; Picavet *et al.* 2018), du Basalte de l'Eifel (sud de l'Allemagne occidentale) ou encore du Massif Central. Plus récemment, les travaux de Picavet (2019) ont également abordé ces aspects à l'échelle du Nord Est de la Gaule.



À ces pièces d'outillages, il faut ajouter les quelques grandes meules de type pompéien<sup>41</sup> (Figure II-22), dont plusieurs moulins ont été trouvés à Reims (Jodry *et al.* 2014). Deux d'entre elles sont exposées dans la section dédiée à l'Antiquité du Musée Saint Rémi. Ces mobiliers sont façonnés dans des matériaux de type « basaltique », mais aussi en grès et calcaires gréseux. En fait de basalte, il s'agit de plusieurs types de roches volcaniques regroupés sous le même terme (foïdites, basanites, téphrites et phonolites ; Gluhak et Hofmeister 2009 ; Gluhak et Wefers 2011). Elles présentent néanmoins toutes un faciès macroscopique similaire de roche microlitique vacuolaire noire à grise et proviennent soit des coulées volcaniques pléistocènes du Massif de l'Eifel à presque 300 km au nord-est de Reims en Allemagne soit du Massif Central (Gluhak et Hofmeister 2009 ; Gluhak et Wefers 2011).



Figure II-22. Meule pompéienne rejetée dans un puits sur le chantier de la rue de Cernay (Photos P. Rollet). A. Avant son dégagement et B. au cours de l'opération d'extraction.

Enfin, il est fait mention dans les corpus lapidaires d'un grand nombre d'aiguiseurs. L'origine de ces objets a été expliquée par la découverte en 2013 par l'INRAP d'un atelier de production de pierres à aiguiser possédant un grand rayonnement commercial, au Châtelet-sur-Sormonne (Ardenne), près de Rimogne (Thiébaux *et al.* 2016). Leur présence démontre l'existence de circuits commerciaux pour des objets pondéreux sont également actifs pour ces objets à l'échelle extra régionale.

## 2.5. Synthèse des approvisionnements pour la construction

Le modèle de rosace simplifiée des approvisionnements utilisé par Fronteau *et al.* (2019), a été employé afin de synthétiser à la fois la diversité des matériaux et la spécificité de leurs aires d'approvisionnements (Figure II-23 et Figure II-24). Cette représentation met en rapport les distances d'approvisionnement et les directions de leurs gisements avec leurs sites d'emploi (dans ce cas, le centre de l'agglomération de *Durocortorum*).

<sup>41</sup> Les moulins de type Pompéi sont d'une certaine manière l'archétype des outils de mouture romain. Les découvertes de meules de ce type dans les boulangeries de Pompéi ou d'Ostie les ont largement diffusés auprès du grand public. Elles sont constituées d'une partie mobile de grande taille en forme de sablier et d'une partie fixe conique. La partie mobile est mise en mouvement par traction animale (Jodry et Longepierre 2011).

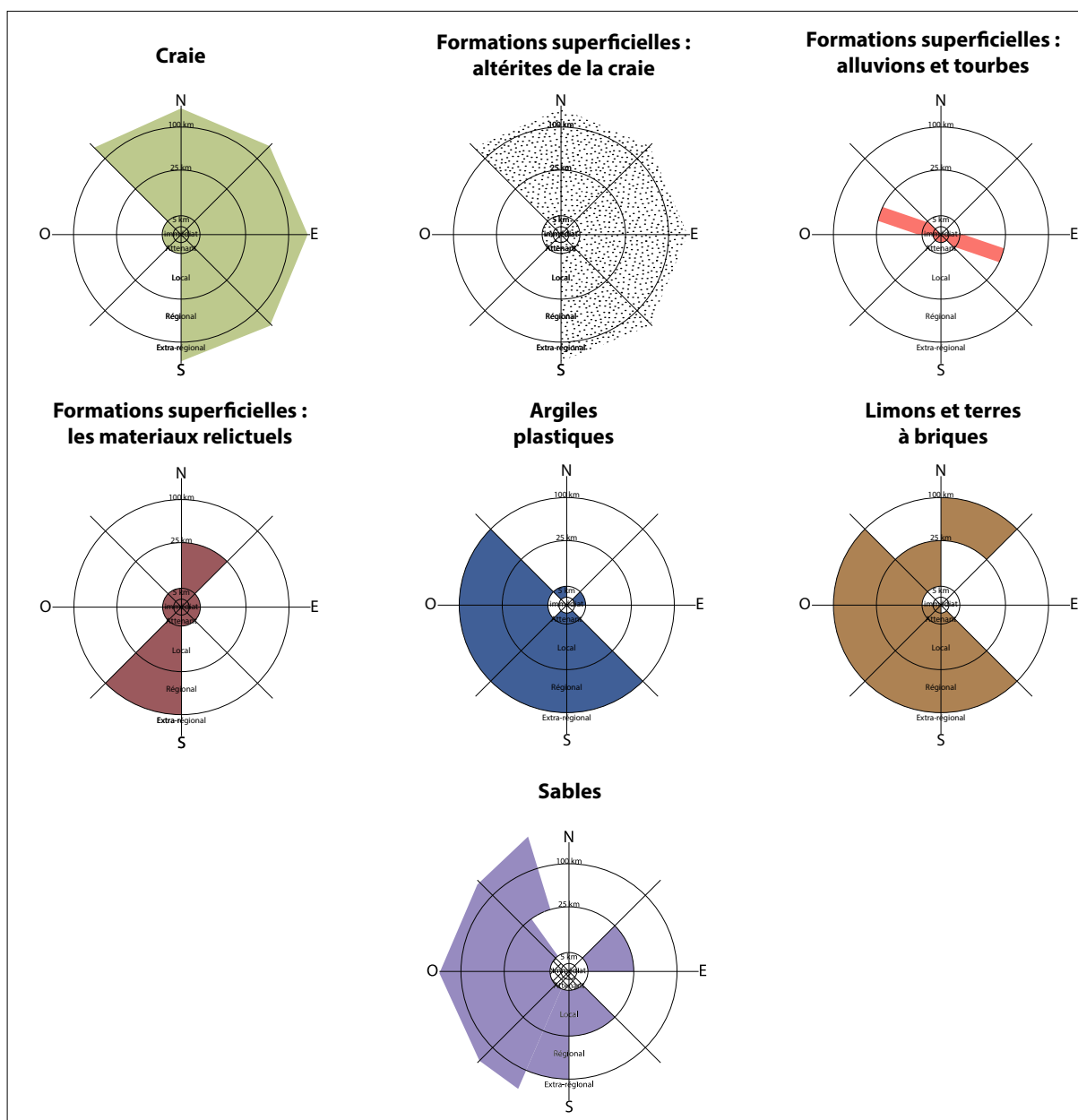


Figure II-23. Synthèse des approvisionnements en matériaux de construction en lien avec leurs aires d'approvisionnement respectives pour l'agglomération de *Durocortorum*.

La situation géographique de *Durocortorum*, au point de rencontre de grands axes de circulation et à la transition entre les reliefs de plaine de la Champagne crayeuse à l'est et la côte d'Île de France à l'ouest, donne accès aux constructeurs à des ressources minérales variées et en quantité importante. Au détail près que ces matériaux n'existent pas dans l'aire d'approvisionnement immédiate de la ville, mais surtout dans son aire locale.

En synthèse, le site sur lequel est fondée l'agglomération est particulièrement apte à fournir des matériaux de construction pour des bâtiments en matériaux périssables (I.3.7.9, page I-98). Les matériaux disponibles dans cette aire sont : la craie et ses altérites, les argiles d'origine alluviale ainsi que des alluvions, les limons et les terres et enfin les formations relictuelles disponibles à la surface du sol. Cet usage des matériaux est d'ailleurs celui qui a été retenu par les populations protohistoriques et de l'habitat vernaculaire, mais également celui qui semble s'être maintenu après la conquête romaine dans la construction rurale (Berthelot

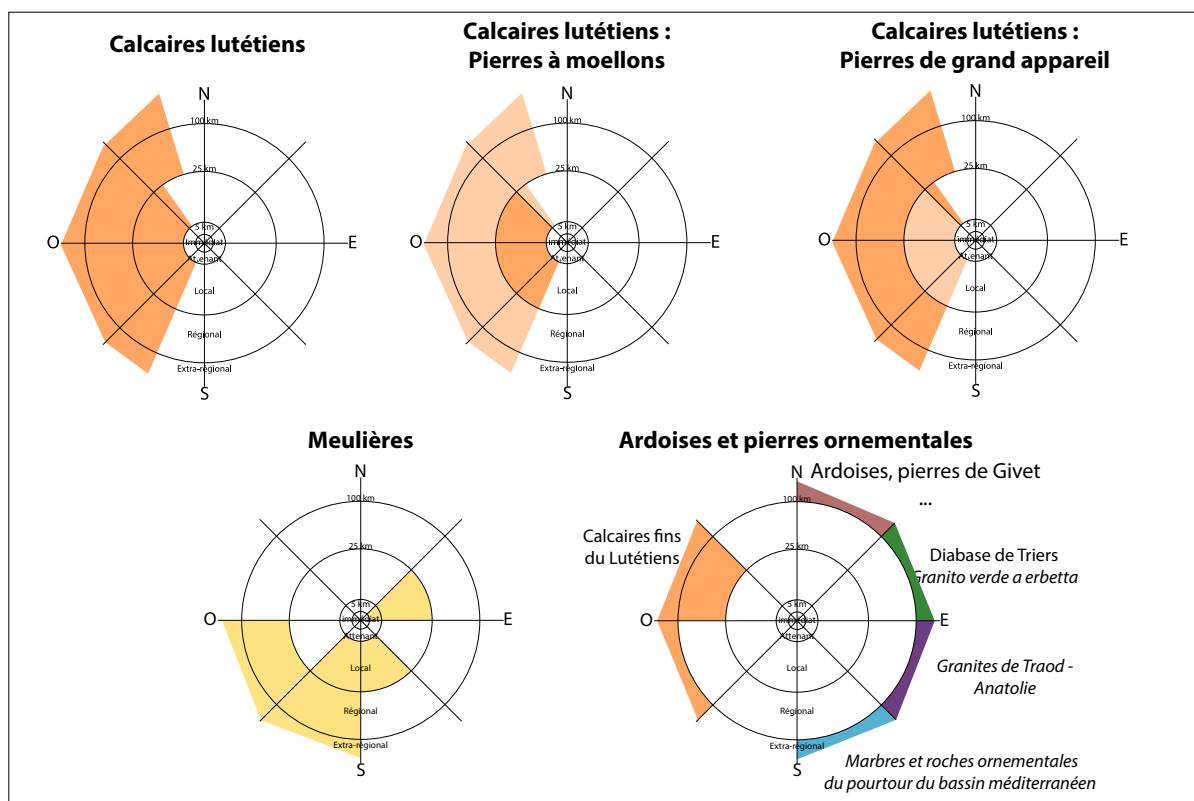


Figure II-24. Synthèse des approvisionnements en pierres de construction et pierres ornementales en lien avec leurs aires d'approvisionnement respectives pour l'agglomération de *Durocortorum*.

*et al.* 2013). Les ressources en pierres aptes à produire des moellons ou des pierres de taille de bonne qualité ne sont disponibles qu'à partir de l'aire locale. Cependant, cela ne va pas sans quelques limites, car les modules des pierres qu'il est possible d'extraire de ces gisements sont fortement limités en taille et pour certains matériaux l'ouvrabilité est médiocre<sup>42</sup>. Les ressources en pierres de qualité, disponibles pour débiter des pierres de de grand appareil, sont presque nulles dans le périmètre attenant à la ville et faible dans l'aire locale. En effet les gisements ont des organisations en petites strates peu épaisses.

### 3. Résultats de l'étude de corpus issus de sites archéologiques de la ville

Au cours de cette étude, plusieurs ensembles de matériaux ont fait l'objet d'une étude quantitative qui s'appuie sur leurs descriptions, leurs contextes archéologiques, leurs modalités d'utilisations architecturales et enfin leurs provenances.

Ces corpus sont constitués d'une part par les matériaux observés au cours d'opérations de fouilles récentes, identifiées et dénombrés sur place ou dans les collections des services archéologiques en charge des fouilles (fouilles de la rue Marie Stuart, Hautes Promenades, Complexes aqualudiques et événementiels...). D'autre part, les monuments antiques encore en élévation ont fait l'objet d'un travail similaire (la Porte de Mars, le Cryptoportique...).

<sup>42</sup> Capacité de la pierre à être mise en forme

Afin de fournir l'image la plus complète des emplois des géomatériaux à Reims, le corpus a été complété par les données issues des sites majeurs publiés (les puits de la Rue Belin, la fouille du boulevard Rockefeller/Médiathèque et l'aqueduc). Le dépouillage des données contenues dans les rapports finaux d'opération n'a pas été intégré tant le volume de données que cela aurait représenté est considérable, l'information redondante et l'homogénéité des descriptions aléatoires. Le corpus réuni pour ce travail a été estimé représentatif de la diversité des modalités architecturales reconnues dans l'agglomération.

**La Porte de Mars** : Arc assimilé à un grand bâtiment public à l'architecture monumentale appartenant à la parure de la ville (bâtiment en élévation ; Figure II-25-1 ; Brunet-Gaston et al. 2020).

**Le Cryptoportique** : grand bâtiment public, reste des substructures du forum antique, dont l'usage était très polyvalent et ne trouve pas d'équivalent moderne strict (monument en élévation ; Figure II-25-2 ; Frezouls 1973)

**Le Musée Saint Rémi** : Musée d'archéologie de la ville de Reims, ce dernier présente de nombreux blocs archéologiques antiques dont des pièces lapidaires issues de fouilles plus anciennes (Figure II-25-3). Y sont exposés notamment l'inscription du « Cénotaphe des dieux Mânes de la Jeunesse » remontée après sa découverte alors que les blocs étaient remployés dans les soubassements du rempart tardo-antique. (N = 68 blocs ; Neiss 1973). Les éléments lapidaires décrits sur ce site sont divers, appartenant aussi bien à l'architecture privée que publique.

D'autre part, les éléments lapidaires étudiés à la faveur de fouilles archéologiques soit directement sur le terrain, soit dans les locaux des entités en charge des opérations de fouille :

- L'ancien « **Collège des jésuites/Couvent des capucins** » (N = 111 blocs ; Figure II-25 point 4 ; SAGR, R.O. : R. Bontrond)
- Les fouilles des « **Hautes promenades** » voisines de la Porte de Mars. (N = 350 blocs ; (Figure II-25 point 5 ; SAGR, R.O. : B. Panouillot)
- Les fouilles de la « **rue des Élus** » (N = 67 blocs ; Figure II-25 point 6, Eveha, R.O. : G. Cartron)
- Les opérations du « **complexe aqualudique** » et celles voisines du « **complexe événementiel** » localisé sur la friche industrielle des entrepôts de l'ancienne SERNAM (N = 67 blocs ; Figure II-25 points 7 & 8 ; INRAP, R.O. : M. Cavé)
- Les fouilles de la « **rue Marie Stuart** » (N = 30 blocs et identifications *in situ* ; Figure II-25 point 14, INRAP, R.O. : P. Neaud)

Et enfin, les opérations antérieures pour lesquels les corpus ont été revus pour être intégrés dans cet ensemble encore plus large :

- Les blocs issus des fouilles de la « **rue Belin** ». (N = 453 blocs ; Figure II-25 point 9, INRAP, P. Rollet ; Rollet 2006)
- Les blocs issus de différentes opérations et préalablement étudiés sur le cours de « **l'aqueduc antique** » (N = 2 706 blocs et maçonneries partiellement en œuvre ; Figure II-25 point 10 ; Rabasté et Arduin 2010).
- Les fouilles de la « **rue Rockefeller** » (N = 45 blocs ; Figure II-25 point 11) principalement issus du remploi d'éléments architecturaux d'une *domus* démantelée dans les soubassements du rempart tardo-antique (INRAP, A. Balmelle ; Brunet-Gaston 2008).

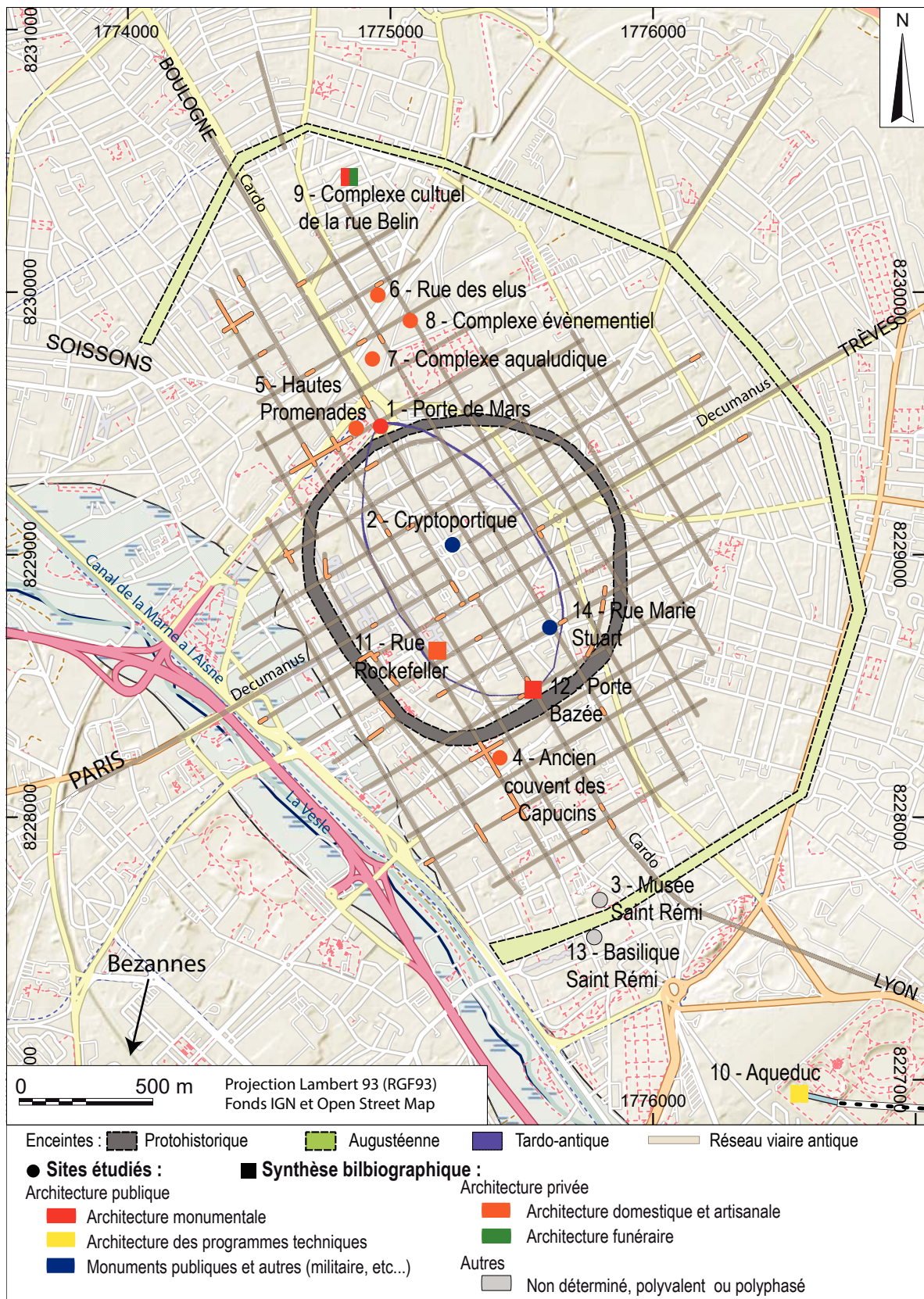


Figure II-25. Carte de localisation et typologie des sites ayant fait l'objet d'une étude des matériaux de construction

Pour préciser les informations contextuelles archéologiques (nature de la construction et période d'appartenance), les éléments lapidaires ont été catégorisés selon plusieurs autres critères. Il s'agit de leurs **descriptions pétrographiques** (descriptions hiérarchisées à 3 niveaux, cf II-1.2) de **l'aire d'approvisionnement** dont ils sont issus (cf 1.1), la **position architecturale** à laquelle les blocs correspondaient (et leur éventuel emploi lorsque celui-ci est avéré). Les informations de datations ont été renseignées pour les sites dont l'information était disponible. Cependant pour nombre de ces sites l'information précise n'était soit pas encore disponible soit complexe à implémenter (possible emploi, réaménagements, reconstructions...). Pour chaque élément lapidaire, en plus des éléments de descriptions, ont également été documentées les informations relatives au **contexte archéologique**. Il s'agit du type de construction dont sont issus les éléments, de telles que le type de construction à laquelle le bloc est éventuellement rattaché, la période spécifique lorsqu'elle est connue. Les positions architecturales envisagées pour la description du corpus s'appuient sur les éléments de descriptions classiques des constructions répondant aux canons architecturaux antiques qui sont par ailleurs ceux sur utilisés dans « l'esquisse du paysage architecturale à *Durocortorum* » de Brunet-Gaston (2008).

Les éléments constitutifs des massifs de **fondations** des maçonneries (ou radiers, hérissons...) constituent la catégorie au sein de laquelle sont rassemblées toutes les structures qui sont mises en place afin de servir de base aux constructions. Les fondations des bâtiments recouvrent de nombreuses formes qui sont adaptées d'une part à la nature du sous-sol du lieu de la construction et d'autre part aux caractéristiques architecturales du bâtiment.

Les **soubassements** correspondent à l'ensemble de structures en maçonneries qui constitue les assises à la base d'un bâtiment. Cette partie comprend d'une part les fondations qui sont intégralement enterrées dans le sol et les parties basses des bâtiments ou **substructions** des édifices. D'après Ginouvès *et al.* (1992) cette conception repose sur une grande diversité de formes archéologiques différentes. Il convient alors d'adopter la définition qu'ils en donnent en considérant dans cette catégorie les substructions visibles des bâtiments et en intégrant les éléments de **fondation** dans une catégorie distincte.

Les **éléments hydrauliques** (Caniveau/Fontaine/margelle/Aqueduc) peuvent en partie être associés aux **équipements techniques de confort** cette dernière catégorie des éléments de confort. Toutefois, la nature architecturale des équipements hydrauliques couvre des domaines assez hétérogènes depuis les éléments de l'aqueduc aux fontaines jusqu'aux éléments de conduites des eaux. Par ailleurs, ces éléments nécessitent à la fois des caractéristiques intrinsèques spécifiques de résistance et de comportement vis-à-vis de l'eau.

Les éléments de **soutènement**, depuis les piliers aux colonnes, revêtent un grand nombre de formes différentes et sont présents dans toutes les formes de l'architecture privée d'habitation, mais aussi dans les canons de l'architecture publique (Brunet-Gaston 2008). Il est adjoint à cette catégorie les éléments appartenant aux **bases, dés et piédestaux** pour lesquels il existe une forte connotation décorative bien que d'un point de vue structurel ces éléments sont fortement apparentés aux parties inférieures des éléments de soutènement.

Les **éléments iconographiques** correspondent à tous les éléments de la statuaire et des stèles gravées et correspondent à des éléments du décor des rues, places et espaces ouverts. Ces éléments ne constituent qu'une très faible proportion du corpus étudié.

Les **placages et les roches ornementales** (Pavage et éléments décoratifs de tous types) sont rassemblés dans une catégorie spécifique qui concerne principalement les pierres marbrières et les matériaux employés avec la volonté de marquer un statut social et qui portent une notion d'apparat.

Les **élévations** constituent ce que Ginouvès *et al.* (1992) qualifient de « supports verticaux continus et qui est constitué d'un ouvrage [...] s'élevant verticalement à partir du sol et dont deux dimensions (longueur et largeur) sont supérieures à une troisième (l'épaisseur) ». Les éléments appartenant correspondent donc à toutes les parties de murs situés au-dessus des soubassements et qui ne portent pas ou peu de décorations. Tous les types d'appareils de moellons ou de blocs qui constituent les murs des bâtiments peuvent donc être inclus dans cet ensemble. Ginouvès *et al.* (1992) les définissent d'ailleurs comme tous les « supports verticaux, continus et qui sont constitués d'ouvrages [...] s'élevant verticalement à partir du sol et dont deux dimensions (longueur et largeur) sont supérieures à une troisième (l'épaisseur) ». Aux éléments d'élévations sont adjoints les éléments **architecturaux** au sens large qui regroupent tous les éléments lapidaires qui portent des décors et qui n'appartiennent pas aux catégories suivantes. La présence de ces décors susceptibles de provenir d'un ordre architectural peut également fournir des informations de datation ou de fonction. Cette catégorie recouvre tous les éléments auxquels une attribution architecturale autre serait problématique tout en étant des éléments à part entière des murs.

Les éléments d'**entablement** qui constituent les parties supérieures des bâtiments et qui font saillie sur la façade et constituent les supports de la charpente et de la toiture. Pour Ginouvès *et al.* (1992) il s'agit de toutes les parties de l'ordre qui passent au-dessus des colonnes ou de tout autre type de support indépendant pour porter un autre ordre, un mur ou une couverture.

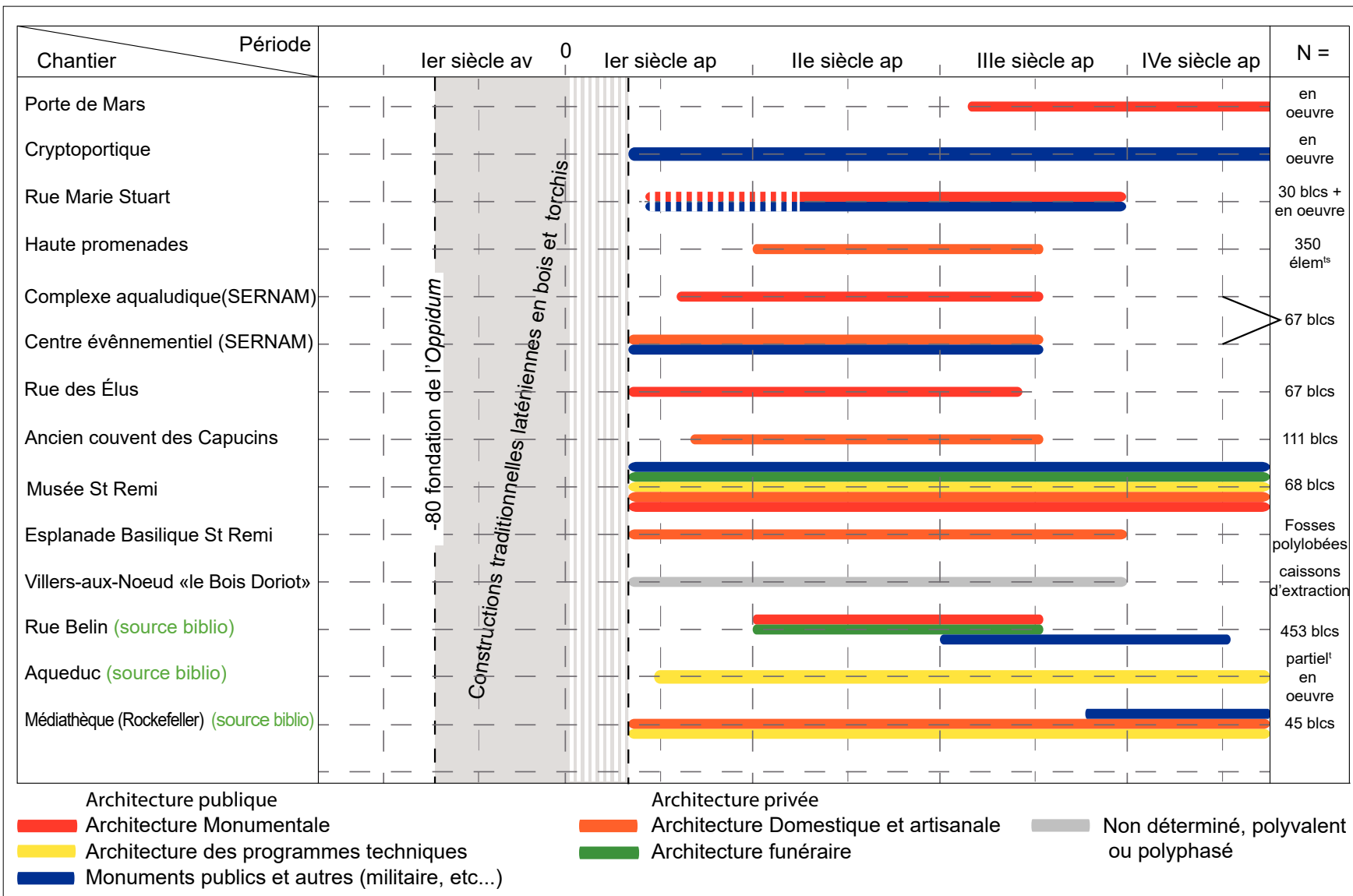
Et enfin, les blocs qui ne présentent pas d'arguments d'identification sur la position architecturale qu'ils occupaient et qui sont donc identifiés comme **éléments indéterminés**. Ces derniers figurent dans les tableaux synthétiques en Annexe 4 à Annexe 7.

Les blocs étudiés sont intégrés dans la catégorie architecturale de leur premier emploi lorsque cela est possible ce qui n'est pas forcément le cas. Le remploi des matériaux dont les preuves ne manquent pas depuis l'antiquité (Brunet-Gaston 2008 ; Fronteau *in* Rabasté et Ardhuin 2010) est un phénomène qui peut être difficile à quantifier tant il est difficile de différencier un bloc issu d'une carrière d'un bloc équivalent utilisé secondairement. En dehors d'une présence de décors ou de traces d'aménagements des blocs qui apparaîtraient en anomalies (comme des trous de louves<sup>43</sup>...), rien ne permet de les différencier.

---

43 La louve est un outil de levage formé de deux ou trois pièces métalliques ou de bois dont la traction provoque un effet d'autoserrage dans une mortaise aménagée dans l'élément à soulever qui est qualifiée de trou de louve (Ginouvès *et al.* 1985)

Tableau II-3. Localisation, typologie et période des sites étudiés





### 3.1. Les matériaux de l'architecture privée

#### 3.1.1. L'habitat urbain et les locaux à vocation artisanale

Les matériaux employés dans cette architecture ont été décrits par le biais de plusieurs sites dont les occupations couvraient l'ensemble de l'Antiquité (Tableau II-3). Les modalités de construction des habitations privées et des locaux artisanaux sont classiquement considérées comme celles de la construction à pan de bois (*Opus craticium*, voir notamment (Balmelle et Neiss 2003 ; Balmelle et Sindonino 2004 ; Fronteau *et al.* 2021 ; Panouillot *et al.* à paraître). Les sites qui ont livré des maçonneries et des aménagements issus de cette catégorie architecturale sont les sites concernés par les aménagements récents de Hautes Promenades (Figure II-25 point 5), des fouilles du complexe aqualudique et du complexe événementiel de la rue Jules César (Figure II-25 point 7 et 8) de la rue des Élus (Figure II-25 point 6) et enfin de l'ancien couvent des Capucins (Figure II-25 point 4). Ces sites ont mis au jour des sites couvrant une grande partie du spectre de l'architecture privée d'habitation et d'artisanat.

Les bâtiments d'habitation se doivent d'être abordés en distinguant d'une part l'habitat de l'élite (*domus*) et l'habitat du commun (*insula*). Ces dernières se caractérisent par des architectures simples inspirées des habitudes de constructions italiques (Chapitre I.3.4) où coexistent pierres et matériaux périssables. Dans le cas des *domus*, habitat de prestige ou de l'élite, la distinction sociale s'établit clairement dans l'emploi de matériaux et de modalités architecturales spécifiques qui en font une construction complexe. Brunet-Gaston (2008) a montré que ces bâtiments se caractérisaient par la mise en œuvre d'un vocabulaire architectural comparable à ceux de l'architecture monumentale, qui peuvent cohabiter avec l'architecture à pan de bois plus commune. Du strict point de vue des matériaux, cela aboutit à l'utilisation simultanée des matériaux disponibles *in situ* jusqu'à ceux de l'aire locale pour une partie des maçonneries et des matériaux de l'aire régionale pour les parties du registre architectural à vocation ostentatoire. Ces constructions font montre d'un grand soin dans l'exécution des structures avec l'utilisation d'éléments de grand appareil en calcaires lutétiens (calcaires blancs à milioles pour les colonnes ou calcaires durs à cérithes et milioles ou calcaires lacustres à Limnées pour les éléments hydrauliques).

Les **soubassements** comprennent l'ensemble des maçonneries qui constitue les assises d'un bâtiment. Dans les cas des édifices dédiés à l'artisanat et à l'habitation, les substructures sont représentées par les murs bahuts (Chapitre I.3.3.2 – Figure I-35) et leurs fondations. Lorsqu'elles ont été observées sur site et en élévation, ces structures ont montré qu'elles pouvaient être assemblées selon toutes les modalités de petit appareil en moellons depuis l'*opus incertum* jusqu'à l'*opus vittatum*. Cependant, l'étude des matériaux montre que, quelles que soient leurs modalités d'assemblage ce sont toujours les mêmes catégories de matériaux qui sont utilisés. Ces maçonneries sont très hétérogènes d'un point de vue lithologique avec 5 à 6 types de roches différentes. Ces maçonneries, assemblées en moellons regroupent, en effet des pierres provenant aussi bien des aires d'approvisionnement *in situ*, attenante et locale que des pierres issues de l'aire régionale. Cependant, la présence de ces éléments est à imputer en grande partie à l'utilisation d'éléments de remploi ou encore de déchets de tailles valorisés en tant que moellons. Il n'est cependant pas possible de différencier ces deux usages en l'absence de traces d'ornementations. Les faciès sont, à l'image des lithologies, très hétérogènes et tendent à constituer une synthèse des pierres utilisées à l'échelle locale pour la confection

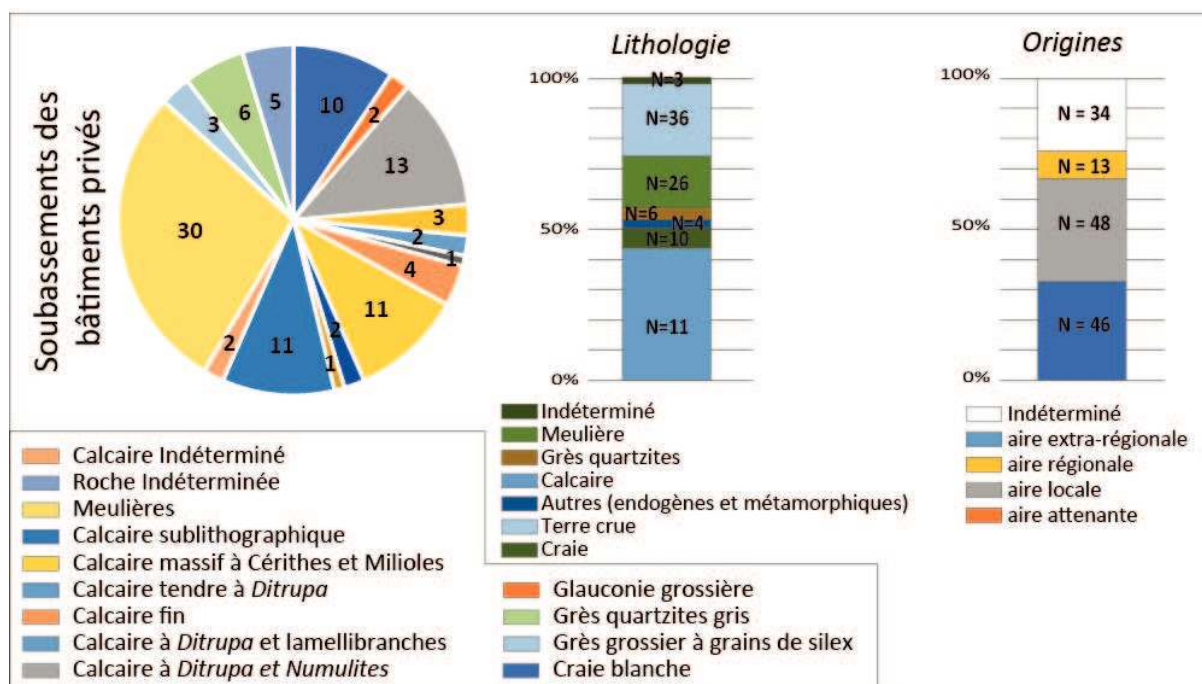


Figure II-26. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction des soubassements et substructures des bâtiments de l'architecture privée.

de moellons. Les observations de ces soubassements sont assez fréquentes à l'échelle de l'agglomération pour qu'il soit possible de constater une différence de qualité d'assemblage entre certains soubassements. Certains semblent en effet assemblés avec un grand soin et une recherche esthétique, arborant des assises de terres cuites tandis que d'autres montrent des assemblages plus grossiers.

Les **fondations** de ces bâtiments (Figure II-26) consistent en des hérissons de moellons frustes, de tailles modestes assemblés selon des assises régulières et liés à l'aide de lits de craie compactée. Les pierres engagées dans ces constructions sont des éléments de grès, de pierres meulières ou de calcaires sublithographiques qui se prêtent très mal à la taille. Il n'a pas été relevé de différence notable entre les constructions modestes et les constructions plus fastueuses pour cet aménagement en particulier.

Les **élévations** des bâtiments d'habitations sont représentées classiquement dans les modalités de construction endémiques de la Champagne crayeuse par des assemblages en briques de terres crues (adobes ou carreaux de terre) dont il a précédemment été fait mention (Delencre 2017). Ces éléments de construction se retrouvent aussi bien dans la construction domestique des maisons « riches » que dans celle des habitations plus modestes. L'utilisation de la pierre est limitée à certains usages spécifiques comme pour les soubassements, où celle-ci n'est pas remplaçable. Il est cependant probable que les modes de construction vernaculaires antérieurs à la Conquête aient persisté dans la ville pour l'édification de bâtiments modestes. Cependant, les matériaux périssables engagés dans ce mode de construction n'ont laissé que peu de traces. Pour ces matériaux, les aires d'approvisionnement *in situ* et attenante sont plus spécifiquement sollicitées. La relative facilité de mise en forme de ce matériau, l'abondance qui lui confère une grande disponibilité et un coût probablement modeste sont des arguments de poids pour expliquer sa très large utilisation dans l'agglomération.



Figure II-27. Aperçus des éléments de l'architecture privée et de l'échelle que les restitutions donnent à ces aménagements (d'après Brunet-Gaston 2008) : A. Proposition de restitution de l'élévation du portique à treillage et imbrications d'ordre composite ; B. Proposition d'association des différents chapiteaux toscans et des bases en fonction de la rétraction possible du diamètre du fût de la colonne ; C. Hypothèse de restitution d'un édifice à portique rhodien à Reims.

**Les éléments de soutènements** : des piliers aux colonnes, les éléments de soutènement revêtent des formes et dimensions différentes. Ils sont présents dans toutes les formes de l'architecture privée d'habitation ainsi que l'a montré Brunet-Gaston dans son esquisse du paysage urbain de *Durocortorum* (2008 ; Figure II-27).

Les matériaux constitutifs de ces dispositifs de soutènements sont lithologiquement très homogènes puisqu'ils sont tous de nature calcaire (Figure II-28 et Figure II-29). Ils sont majoritairement importés depuis l'aire régionale depuis les plateaux axonais autour de Soissons et Laon. Ils sont complétés par quelques éléments d'origine extrarégionale représentée dans ce corpus par des éléments en marbres blancs. Pour les éléments de soutènement, le choix a été fait de séparer les tronçons de base et les tambours pour refléter au mieux la rationalisation des choix de pierres pour ces éléments. Les bases sont principalement de calcaires massifs et de calcaires granulaires et calcaires à milioles et *Ostrea*. Ces éléments sont tous de calcaires

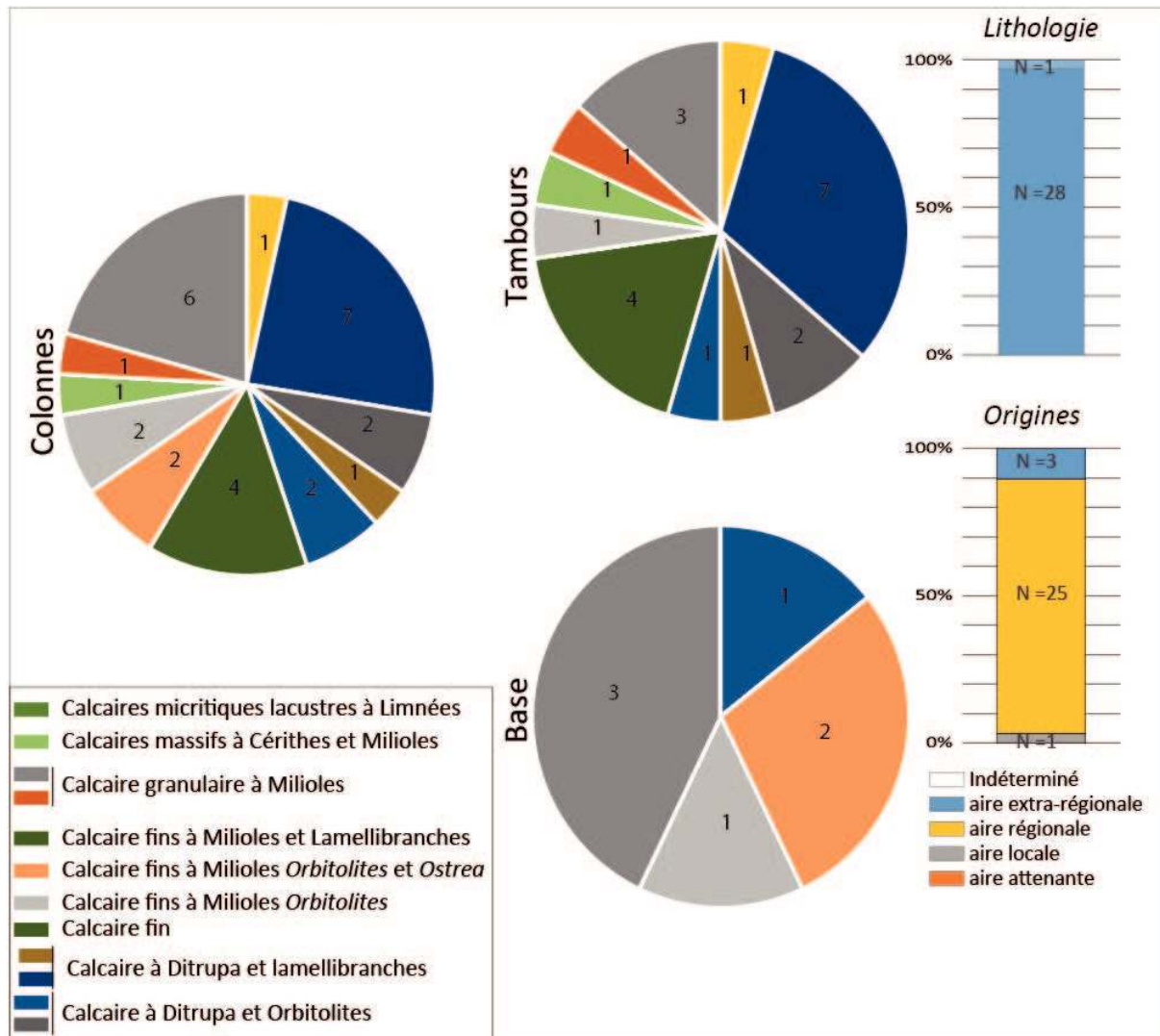


Figure II-28. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction pour les éléments architecturaux des bâtiments de l'architecture privée.

fins et sont très peu diversifiés (Figure II-30). Inversement les tambours montrent une grande diversité de faciès calcaires. La synthèse de ces faciès laisse apparaître la présence dominante de deux ensembles constitués d'une part par les calcaires à *Ditrupa* du Lutétien moyen et d'autre part des calcaires à miliolites de la partie supérieure du Lutétien moyen. Les calcaires granulaires de la base du lutétien supérieur ne sont que peu représentés.

La présence au sein de ces bâtiments d'**équipements techniques dits de confort**, comme les hypocaustes, nécessite d'importantes quantités de terre cuite utilisées pour façonner les éléments de pilettes ainsi que les *tubuli*<sup>44</sup> (cf Figure II-11 C et D). Des sables fins siliceux sont également utilisés pour les assemblages et les joints de ces divers éléments. Ce dispositif technique est complété par de grandes dalles de support de la *suspensura*<sup>45</sup>, dont le

44 Littéralement « tuyau » qui peut être en terre cuite et de formes diverses, dans le contexte d'un hypocauste, cette canalisation permet d'évacuer les fumées et de répartir la chaleur dans les murs (Ginouès *et al.* 1992)

45 La *suspensura* est un radier suspendu/plancher sur des colonnes (pilettes), constitué classiquement de grandes plaques de terre cuite *bipedales* (2 pieds) qui supportent une couche épaisse de mortier qui elle-même porte un sol de plaques de terre cuite ou de mosaïque.

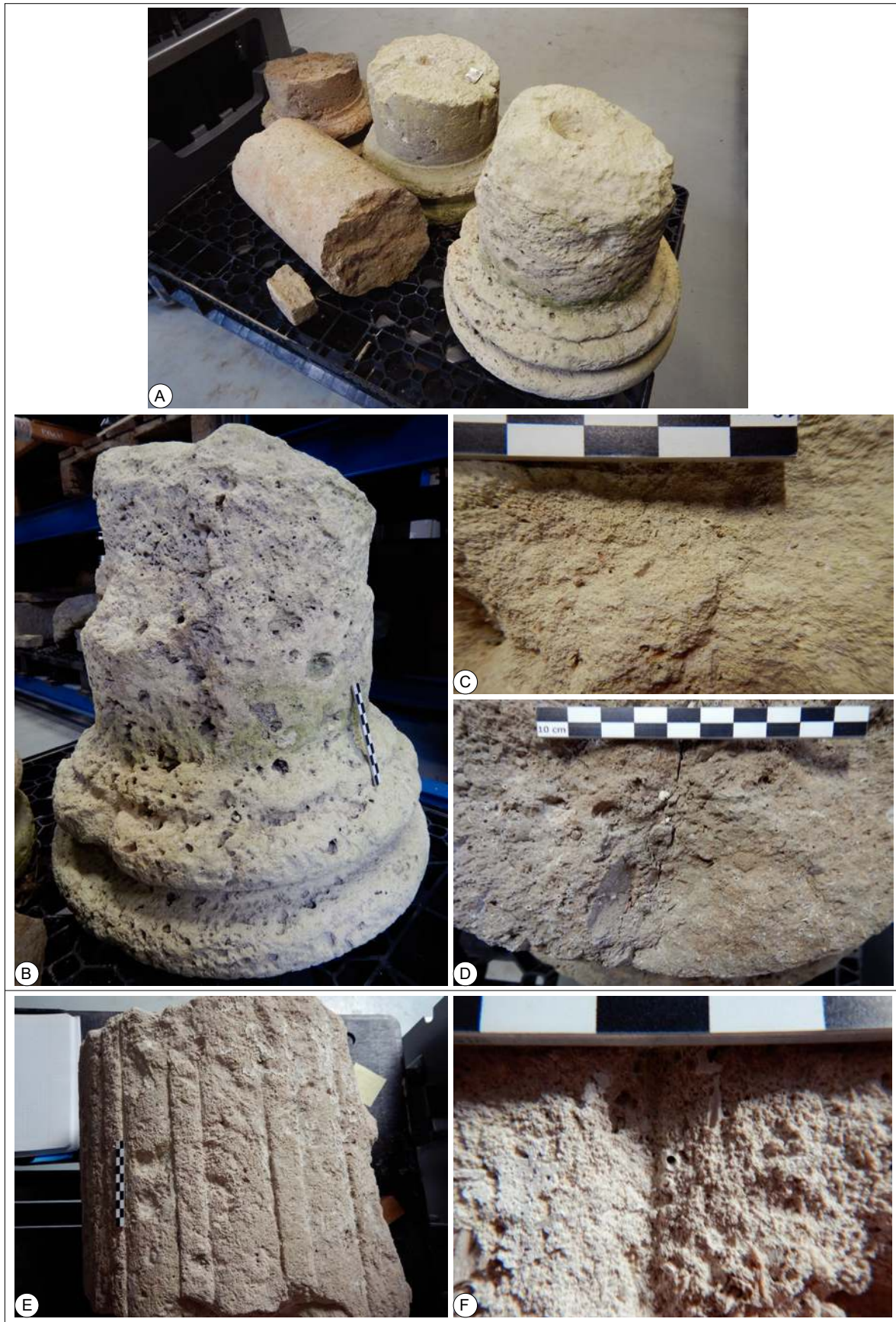


Figure II-29. Aperçus des éléments de soutènement appartenant à des portiques de *domus*. A. Aperçu de quelques éléments de colonne du corpus ; B. Base de colonne toscane en calcaire fin à milioles. C. et D. Aperçu du faciès des calcaires à *Ditrupa* et Milioles. E. et F. Tambour de colonne en calcaire fin à *Ditrupa* et milioles.

béton est fortement chargé en fragments grossiers de tuileau concassé.

Les **éléments décoratifs** d'apparat et de confort qui équipent les *domus* et les résidences de l'élite urbaine montrent clairement la volonté de montrer le rang social des occupants ou un certain prestige. Si la présence de ces équipements pourrait à elle seule être exprimer le statut des occupants de l'édifice, cela s'accompagne également d'un choix des matériaux qui reflètent également cette volonté. Cela se matérialise donc par un usage important d'éléments structuraux et décoratifs en grand appareil. Les roches décoratives utilisées dans ces édifices en compléments des enduits peints sont constituées essentiellement de matériaux importés de l'aire extrarégionale avec en particulier une utilisation de marbres blancs et pierres marbrières colorées (Van Lynden Tot Oldenaller 2017 ; Cavé 2017). Les nombreux éléments de grand appareil du Haut Empire issus du démantèlement de *domus*, trouvés en emploi dans des structures du Bas-Empire (Brunet-Gaston 2008), ont constitué une riche source d'information pour l'utilisation des matériaux dans l'architecture privée en particulier.

Les **éléments architectoniques** se rapportent dans le cas de l'habitat à des blocs de pierre utilisés dans les élévations et portant des éléments décoratifs significatifs. La présence de ces ornements n'est cependant pas suffisante pour en proposer une meilleure attribution architecturale.

Ces éléments sont principalement issus des blocs relevés lors de la fouille de la rue Rockefeller (Figure II-25 point 11 ; Brunet-Gaston 2008). Les éléments architectoniques sont majoritairement de nature calcaire avec très occasionnellement la présence d'éléments de calcaire gréseux. Ces derniers sont issus en grande partie des affleurements de calcaires des l'aire d'approvisionnement régionale et locale. Une très grande majorité de ces éléments présentent des variantes des faciès de calcaires à miliolles (à lamellibranches, *Ostrea* ou encore des calcaires fins) du lutétien moyen et quelques calcaires à miliolles de la base du Lutétien supérieur. Les différents calcaires à *Ditrupea* sont minoritaires sans toutefois que ces derniers ne soient négligeables dans le corpus où ils représentent près de 25 % des éléments observés. À quelques nuances près les éléments architectoniques sont très comparables à la fois par leur nature et par la répartition de leurs faciès des éléments de soutènements. Cette proximité entre ces deux catégories pourrait s'expliquer au moins partiellement par la dimension limitée des chantiers qui permettent alors un approvisionnement homogène auprès d'un nombre limité de fournisseurs. Le nombre limité de carrières sollicité serait un argument pour expliquer le nombre assez restreint de faciès, mais beaucoup de variantes au sein de ces derniers.

Dans les faits, les bâtiments privés sont principalement caractérisés par des modalités de constructions qui engagent des matériaux originaux qui, d'après Delencre (2017), ne semblent exister qu'à l'intérieur de la cité des Rèmes. Le principal d'entre eux associe l'*opus craticium* complété par des murs bahuts assemblés en *opus incertum* ou en petit appareil et auxquels s'ajoutent des élévations en carreau de terre. Delencre (2017) mentionne également que ce mode de construction n'est pas inédit et est même particulièrement répandu en Gaule méridionale en particulier en Arles et à Nîmes (De Chazelles *et al.* 1985). L'usage de ces matériaux n'a, d'une certaine manière, pas permis la préservation de bâtiments en élévation, mais paradoxalement, grâce à leur destruction (accidentelle ou volontaire), cela a facilité la préservation de leurs parties basses. En complément de ces matériaux d'élévation, pour les parements des caves, des petits moellons de craie sont régulièrement décrits (Neiss 1984 ; Péchart *et al.* 2019 ; Panouillot *et al.* à paraître), ainsi que l'usage récurrent des pierres

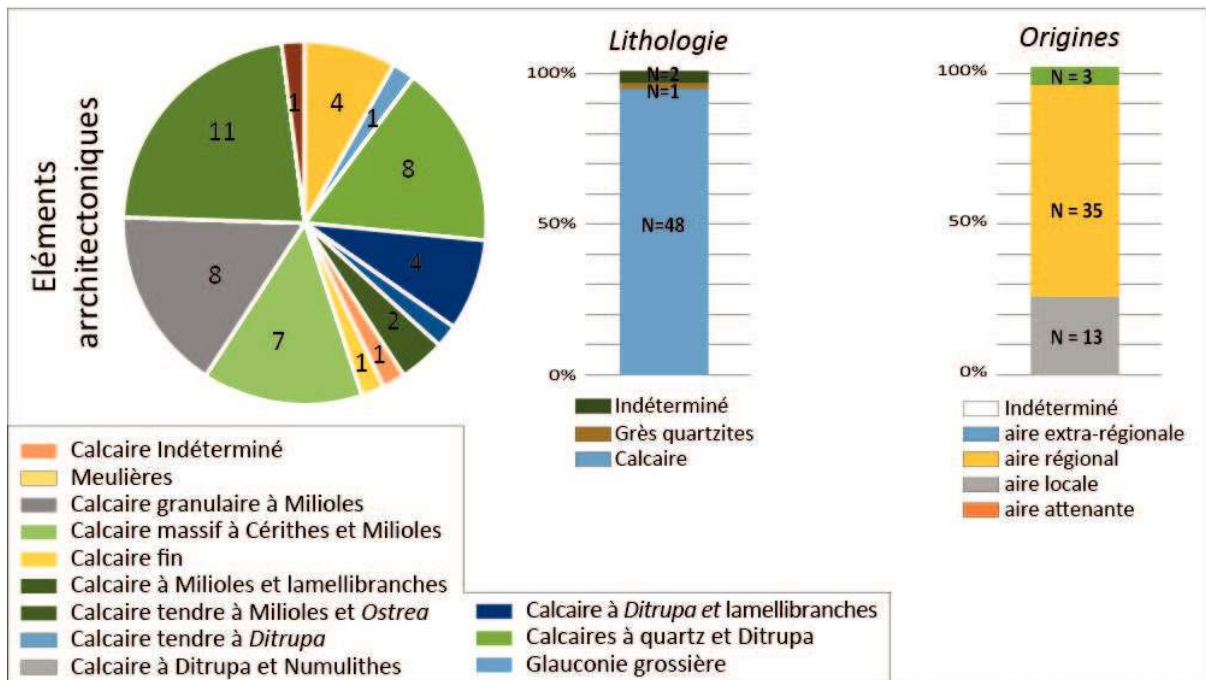


Figure II-30. Calcaires appartenant aux piliers des portiques des habitations (Boulevard Jules César, Reims) A. aperçu des blocs unitaires, qui assemblés forment les piliers de portiques ; B. Calcaire massif à cérithes et à miliolles ; C. Calcaire à miliolles et lamellibranches.

meulières, de calcaires massifs et de grès-quartzites de petits modules dans les radiers de fondation des structures, parfois bordées de blocs nettement plus importants (Rollet 2006).

Enfin les piliers des portiques, extension de l'architecture privée sur le domaine public<sup>46</sup>, dont la présence s'est généralisée dès la période augustéenne, soutiens des étages supérieurs de maisons sont massivement présents dans l'urbanisme de *Durocortorum*. Les estimations de leurs nombres font état d'une présence potentielle de plus de 17 000 piliers (Balmelle et Sindonino 2004 ; Berthelot *et al.* 2013). Cependant, leur étude est rarement possible en raison d'une part de l'efficacité de leur récupération et d'autre part du fait de l'intérêt limité qu'ils représentent dans l'étude archéologique du site. Les rares éléments de ces piliers qui ont été observés (Figure II-31) ont montré qu'ils sont essentiellement constitués d'éléments de calcaires lutétiens locaux (calcaires massifs à *Ditrupe* et calcaires à miliolles du Lutétien supérieur), plus rarement par des éléments de calcaire issus des dépôts lutétiens du Massif de Saint-Thierry, et correspondent à des bancs choisis pour leurs qualités pétrophysiques (en particulier de relativement faibles capillarités (Turmel, 2014).

Les observations réalisées sur ces éléments d'architecture sont rares principalement en raison de la parcimonie avec lesquels ces éléments sont prélevés sur le terrain. Les éléments de piliers de portiques sont en effet rarement l'objet de décoration ou d'inscription recouvrant un intérêt archéologique. Cependant les quelques blocs étudiés possédaient un module carré de dimension proche de 30 cm soit environ 1 pied romain (Pes). En considérant ce module constant pour des hauteurs hypothétiquement comprises entre 1,5 m est 1,8 m (2 m en intégrant le soubassement) il faudrait envisager, uniquement pour cet élément d'architecture urbaine, un volume de calcaires compris entre 0,135 m<sup>3</sup> et 0,18 m<sup>3</sup> par piliers soit un total pour l'agglomération comprise entre 2 295 m<sup>3</sup> et 3 060 m<sup>3</sup>. La masse des éléments lapidaires à importer depuis leur lieu d'extraction situé dans l'aire locale serait dans cette hypothèse, en prenant une densité apparente comprise entre 2 et 2,2 T. m<sup>-3</sup>, de l'ordre de 5 000 T à 6 700 T.

46 La notion de domaine privé et public ne revêt pas le même sens dans l'Antiquité romaine.

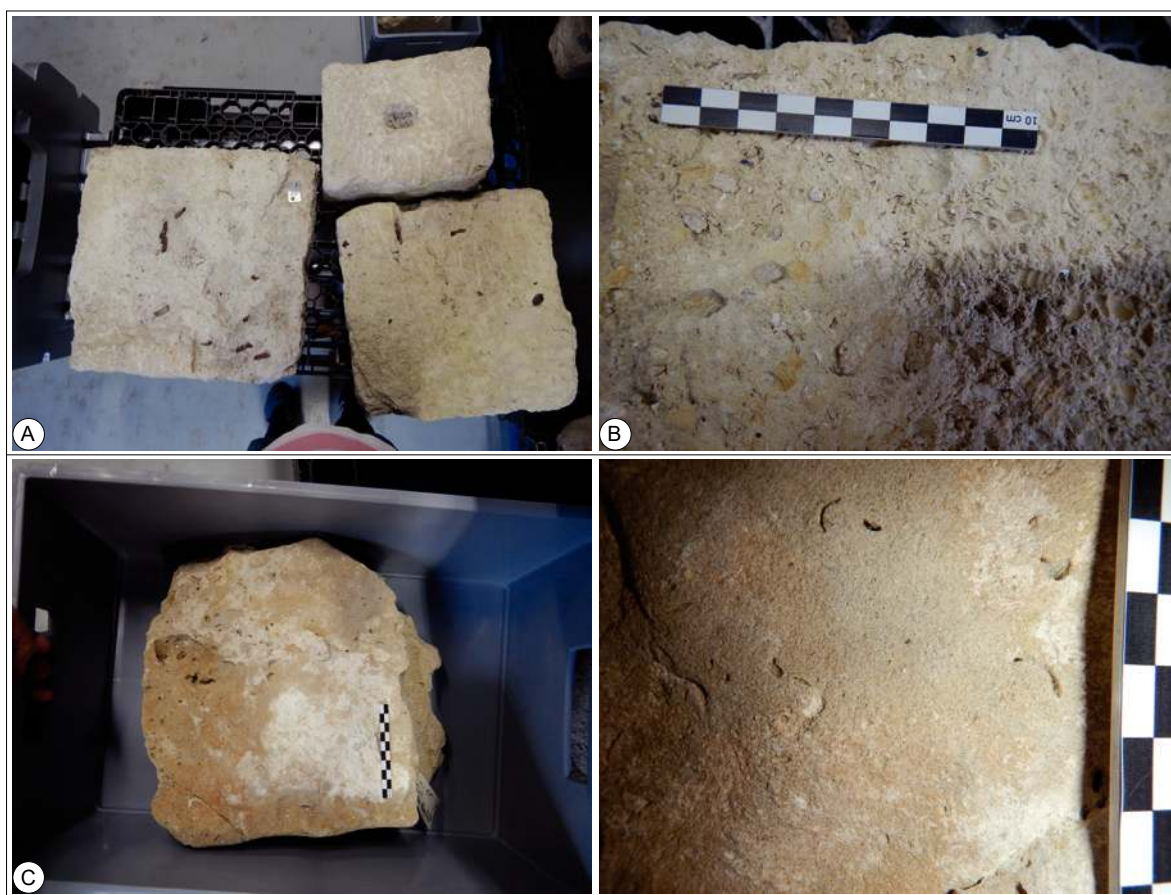


Figure II-31. Calcaires appartenant aux piliers des portiques des habitations (Boulevard Jules César, Reims) A. Aperçu des blocs unitaires, qui assemblés forment les piliers de portiques ; B. Calcaire massif à cérithes et à milioles ; C. Calcaire à milioles et lamellibranches.

En **synthèse**, les constructions associées à l'architecture privée intègrent à la fois des matériaux qui lui sont propres et spécifiques, mais également des matériaux plus polyvalents (Figure II-32). Au regard du volume de matériaux, ce pan de la construction antique rassemble probablement le plus grand volume eu égard au grand nombre de bâtiments concernés à l'échelle de l'agglomération. Cependant, il s'agit probablement aussi du corpus le moins quantifiable de tous en raison de son hétérogénéité et de l'importante incertitude que cela induirait sur les calculs. Ce mode de construction est également le moins durable de tous les modes de construction observés, en raison des matériaux utilisés qui demeurent en grande partie périssables.

Ces derniers sont représentés par les pierres à moellons utilisées dans les **soubassements** (murs bahuts) et les fondations des édifices (radiers). Pour ces parties des constructions, les pierres siliceuses ainsi que les calcaires massifs et sublithographiques sont majoritaires. Pour les **radiers de fondation** ce sont principalement des calcaires siliceux des dépôts du lutétien continental, des grès quartzite et des pierres meulières qui sont préférentiellement utilisées.

Les **soubassements**, élevés en moellons de petit appareil, sont issus de toutes les formations de l'aire d'approvisionnement locale. Ils couvrent tout le spectre des dépôts susceptibles de fournir des pierres aptes à être taillées et présentant des propriétés de résistance intéressantes (ce qui exclut la craie de cet ensemble).



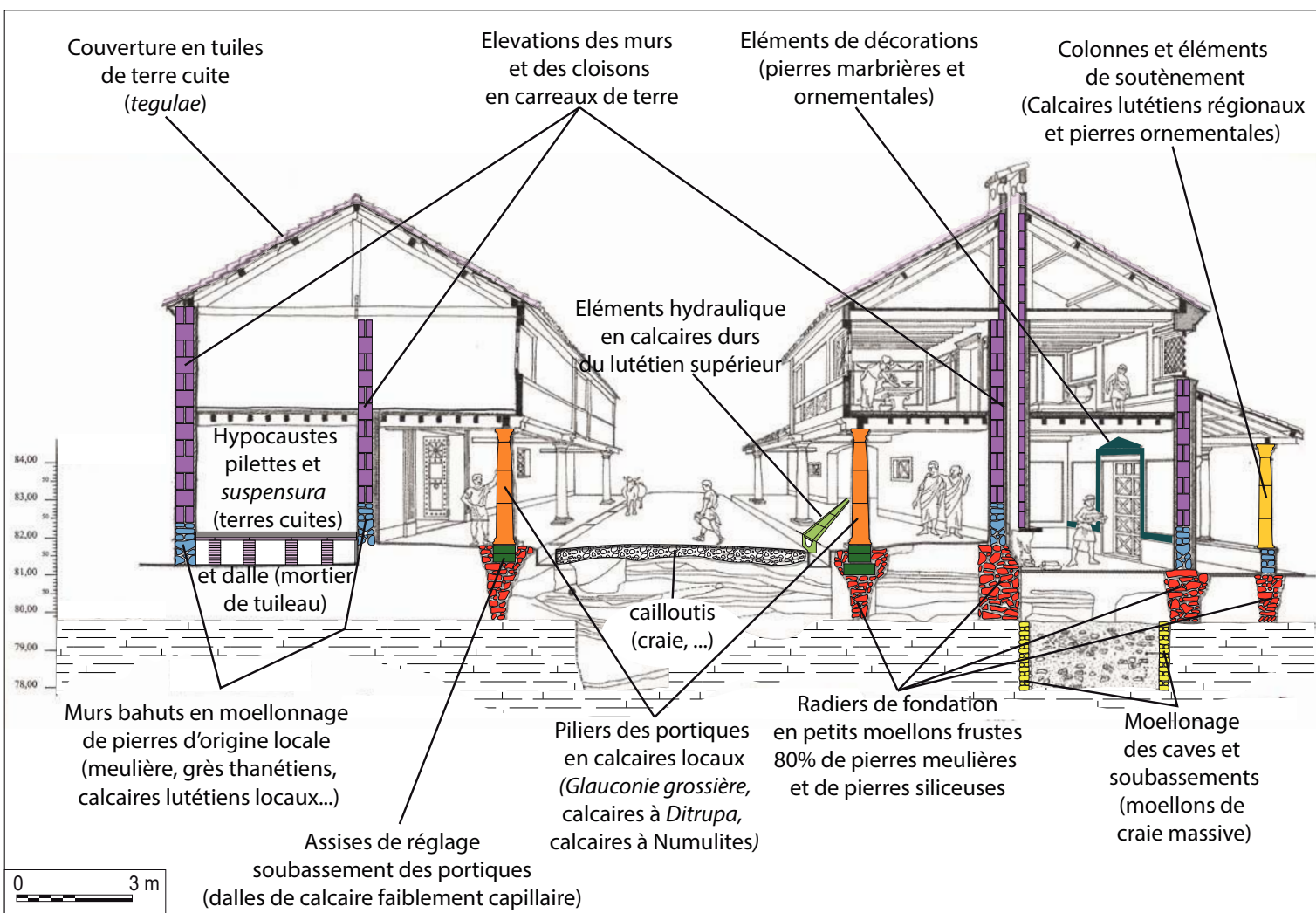


Figure II-32. Les matériaux de l'habitat urbain projetés sur une restitution d'une rue de *Durocortorum* à la fin du II<sup>e</sup> siècle (modifié à partir de la reconstitution de la *Villa de Muranus*, M. Poirier *In Balmeille et Neiss* 2003)

Les **élévations** sont caractérisées par l'utilisation de matériaux très spécifiques que sont les carreaux de terre, propres à l'architecture de la champagne crayeuse (Delencre 2017). L'usage de ce matériau est très répandu dans l'agglomération et sans doute du fait de bonnes qualités intrinsèques, d'une disponibilité importante de la matière première *in-situ*, d'une mise en forme aisée et donc d'un coût probablement très modéré en comparaison de la pierre.

Dans le cas des *domus*, résidences des notables dont l'architecture cherche à s'approcher des canons italiques (Brunet-Gaston 2008) l'aspect ostentatoire repose sur la présence d'une part de **roches décoratives** et d'autre part sur l'utilisation d'éléments d'architecture comme les **portiques** et autres **éléments de soutènement** de grande dimension. Pour ces bâtiments, la présence d'éléments comme les hypocaustes est à la fois un élément de confort et un équipement d'apparat. L'architecture comporte en cela des points communs avec les grands édifices publics. Pour ces éléments, les matériaux engagés sont principalement des calcaires lutétiens issus des affleurements des plateaux du Soissonnais et du Laonnois donc importés depuis l'aire régionale. Ces matériaux, inversement aux matériaux disponibles localement permettent le débit de blocs de grande taille en plus de posséder une vaste gamme de propriétés pétrophysiques qui les rend aptes à de nombreuses utilisations.

Les **aménagements techniques de confort** tels que les hypocaustes et leurs aménagements inféodés mettent en œuvre essentiellement des terres cuites architecturales. Les aménagements hydrauliques en pierres, peu représentés dans le corpus sont quant à eux généralement issus des calcaires de la base du lutétien supérieur du Soissonnais. Il s'agit principalement des calcaires massifs à miliolites, voire de miliolites dont le comportement vis-à-vis de l'eau est excellent.

Outre de probables critères économiques qui tendent à limiter les distances d'approvisionnements pour limiter les coûts, les critères de choix de ces pierres sont guidés par la recherche d'un comportement le plus neutre possible vis-à-vis des transferts hydriques depuis le sol vers les élévations si l'on se réfère aux caractérisations pétrophysiques réalisées par Turmel (2014). Si cette logique s'applique pour toutes les structures des bâtiments, elle s'applique également pour les éléments d'apparats (colonnes de portiques...) qui sont systématiquement isolés du sol par l'intermédiaire de dé ou de soubassements en pierre massifs, supposés peu ou pas capillaires.

### 3.1.2. L'architecture funéraire

Le soin apporté au traitement des défunts et surtout à l'édification de monuments à leurs souvenirs a donné lieu à l'édification de divers monuments. Il s'agit de monuments de taille disparate et mettant à contribution des modalités architecturales variées, depuis les sépultures les plus humbles jusqu'aux plus opulentes. Dans le cadre de ce travail, seules les sépultures en pierres ont été abordées laissant de côté celles constituées d'autres matériaux (*tegulae* en particulier). Tous les types d'inhumation avec leurs évolutions (incinération, inhumation...) n'ont pas été envisagés du point de vue des matériaux que chacune d'elles met à contribution. À l'image de l'habitat et de sa variabilité, l'architecture funéraire se veut un reflet de ce qu'a été le niveau socio-économique de ses commanditaires. Le spectre des modalités architecturales mis à contribution peut donc apparaître vaste (Bart *et al.* 2017). Cependant, les sépultures pour lesquelles la pierre a été utilisée et qui sont encore identifiables en tant que telles sont probablement le propre d'une frange assez aisée de la population tant l'usage de la pierre est limité par son coût.

Si une partie des monuments funéraires ont été préservés, cela est dû en particulier grâce au emploi des matériaux qui les composaient, en particulier dans la construction d'équipements monumentaux tels que le rempart de l'Antiquité Tardive (Balmelle et Sindonino 2004 ; Brunet-Gaston 2008) ou encore le cuvelage des grands puits de la Rue Belin (Fronteau et Paicheler 2005 ; Rollet 2006). D'autres éléments issus de découvertes plus anciennes sont intégrés dans les collections du musée Saint Rémi. La répartition des nécropoles antique de part et d'autre des voies en périphérie de la ville conformément aux habitudes de l'époque, a probablement facilité la récupération des matériaux dans divers objectifs (Misciatelli 1981 ; Bart *et al.* 2017). La récupération presque totale et le emploi des matériaux des monuments funéraires dès l'Antiquité ont de fait entraîné l'absence d'observations de ces constructions sur le terrain. L'organisation des matériaux en fonction de leur position architecturale reste donc une information inaccessible au cours de l'étude de ce corpus.

Les sites ayant fourni les éléments décrits dans cette catégorie sont principalement le site cultuel de la rue Belin (Figure II-25 point 9) et les éléments exposés au musée Saint Rémi (Figure II-25 point 3) rassemblant une partie des découvertes réalisées au cours des fouilles de la Porte Bazée (Figure II-25 point 12). Tous les éléments observés sont des éléments calcaires de grand appareil (soit 147 blocs) dont il convient de préciser que ces blocs appartiennent à divers types de monuments (depuis la stèle jusqu'au petit mausolée ; Figure I-33). Comme le souligne Revenu (2010), les vestiges d'architecture funéraire préservés sont principalement réalisés dans des pierres de taille résistantes (Figure II-33 et Figure II-34). Dans ce corpus, l'ensemble des blocs funéraires observés est constitué de calcaires cénozoïques (lutétiens et bartoniens) d'origine régionale (Chapitre I.2.5). Au sein de ce corpus, très diversifié, trois principaux faciès dominant clairement (les calcaires à *Ditrupa*, les calcaires à limnées, et les calcaires à millioles tous faciès confondus).

Enfin le cas très spécifique de la cuve tombale de « la chasse au lion » (dit tombeau de Jovin) apparaît comme une exception dans le corpus funéraire. Celui-ci a été importé à Reims depuis Rome (où il fut sculpté au IIIe siècle) pendant la période tardo-antique (au IVe siècle ; Chossenot *et al.* 2010 ; Valette *et al.* 2011). Il s'agit d'un sarcophage en marbre blanc de Marmara (Valette *et al.* 2011) dont la préservation est essentiellement due à son emploi dans l'église Saint Nicaise. S'il est à ce jour le seul connu, il est également la preuve que de telles pièces de mobilier étaient susceptibles de voyager jusque dans la partie septentrionale de l'Empire.

### 3.1.3. L'habitat rural et périurbain

Les bâtiments et établissements ruraux mis au jour à la périphérie de l'agglomération, à l'image de ceux décrits sur le secteur abondamment fouillé de la commune de Bezannes (Jemin 2010 ; Achard-Corompt 2011 ; 2011 ; Achard-Corompt et Delor-Ahü 2012 ; Cavé 2016 ; Dumas-Lattaque *et al.* 2012) montrent l'utilisation majoritaire de matériaux périssables pour

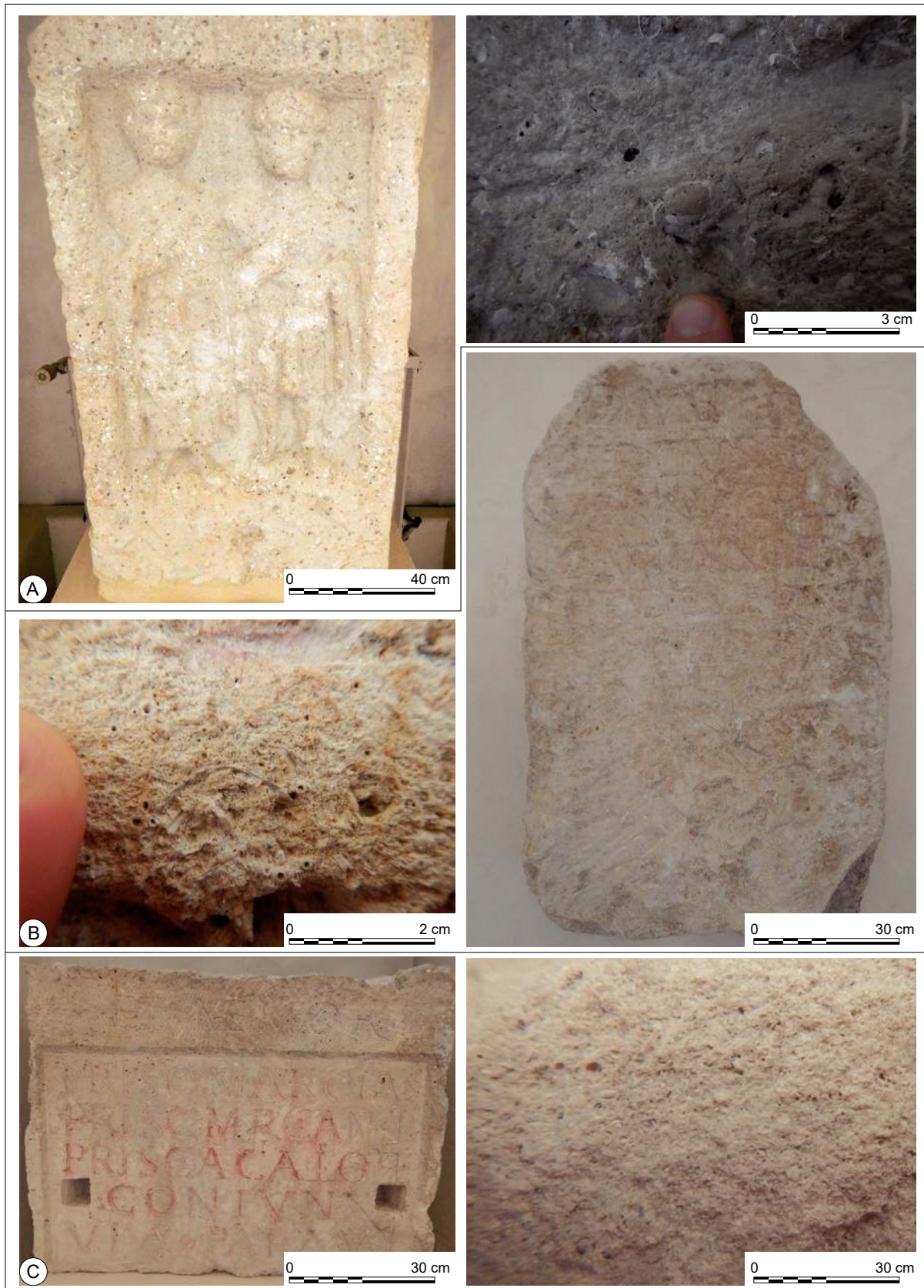


Figure II-33. Aperçu de la diversité des faciès utilisés pour l'architecture funéraire A. Stèle dite « des deux époux » en calcaire micritique à Limnées du Lutétien-Bartonien ; B Épitaphe de l'esclave *Bergussa* en calcaires à Huîtres et *Ditropa* du Lutétien ; C. Épitaphe de l'affranchi *Priscius Marcianus* par son épouse *Priscia Calliope* en calcaires massifs à milioles du Lutétien

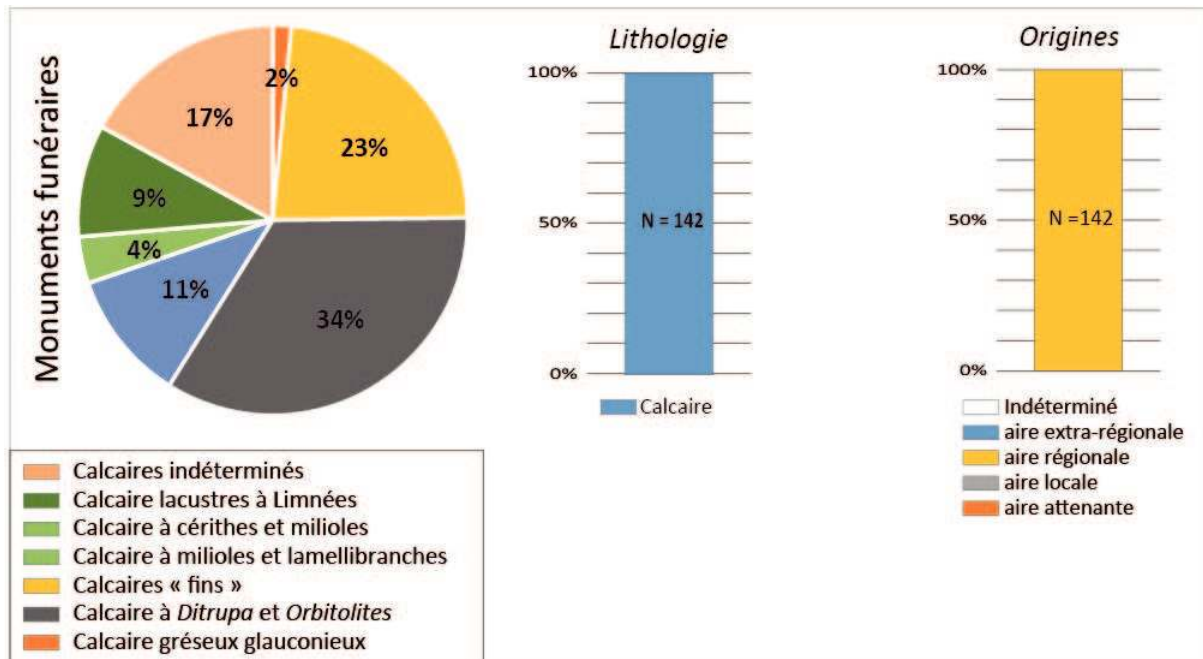


Figure II-34. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction des monuments et stèles funéraires

les parties aériennes. Ces élévations comportent des murs en carreau de terre ou en torchis s'élevant entre des poteaux de bois. Les pierres en tant que matériaux de construction sont essentiellement mises en œuvre dans les parements des caves et des structures de stockage semi-enterrées (Bündgen *et al.* À paraître). Cependant, en raison de l'intensité du phénomène de récupération des matériaux de construction, il est probable que des matériaux plus résistants ainsi que des roches décoratives importées aient été utilisés sans pour autant qu'une trace de cet usage n'ait persisté.

Les géomatériaux utilisés sont alors essentiellement des éléments issus de collectes *in situ* ou de provenance locale comme des moellons de pierre meulière, de craie, de grès thanétiens et de divers calcaires. Fronteau *et al.* (à paraître) rappellent que, dans la commune de Bezannes (au sud de l'agglomération de *Durocortorum*) les études de matériaux ont montré une utilisation soutenue de moellons de calcaires micritiques d'origine lacustres (aux faciès sublithographiques ou à charophytes). Cette roche apparaît spécifiquement pour la confection de moellons, les blocs de grand appareil restent quant à eux de nature similaire à ce qui est observé dans l'enceinte de l'agglomération. Cette sur-représentation de ce faciès particulier, probablement issu des faciès lacustres du Thanétien continental suggère la présence proche d'un affleurement local de cette pierre particulière. Ces auteurs soulignent par ailleurs que ce faciès n'a été que très peu observé à l'intérieur de l'aire urbaine ce qui indiquerait une compartimentation entre les rives de la Vesle). Une hypothèse alternative serait une faible diffusion du matériel lié à la faible taille du gisement ou à des conditions d'extraction complexes d'un affleurement dont la localisation a depuis été perdue (ou totalement épuisé ?).

## 3.2. Les matériaux de l'architecture publique

### 3.2.1. L'aqueduc, grand équipement technique urbain

Des grands équipements urbains antiques dont la ville a vraisemblablement été équipée, seul l'aqueduc est parvenu jusqu'à nos jours (Figure II-25 point 10). Cet aménagement

a fait l'objet d'une synthèse complète (Rabasté et Arduin 2010). Sa construction est datée de la seconde partie du règne d'Auguste, soit dans le premier quart du I<sup>er</sup> siècle ap. J.-C. Cet aménagement hydraulique majeur pour la ville est long de 40 km et permettait de capter l'eau de la rivière Suipe à proximité de Jonchery-sur-Suipe (Arduin 1985), légèrement au sud de Jonchery-sur-Suipe, en traversant l'interfluve avec la vallée de la Vesle. Son tracé bien qu'imparfaitement connu a fait l'objet de tentatives de restitutions dès le XIX<sup>e</sup> siècle (Poinson 1878) jusqu'à celles plus récentes qui s'appuient sur les relevés de prospections aériennes (Figure II-35 ; GEACA dans Rabasté et Arduin 2010). Cette cartographie de l'ouvrage sur tout son développement montre que celui-ci est majoritairement réalisé sous la forme d'une tranchée couverte. Temporairement et pour quelques tronçons seulement, pour le franchissement de reliefs plus importants (interfluves des vallées de la Vesle et de la Suipe), les modalités de construction de l'ouvrage changent et le tracé passe alors en tunnel aménagé dans la craie.

L'existence de deux modes de cheminement a donc conduit les constructeurs à mettre en œuvre deux modes de constructions et donc des matériaux différents adaptés à chacun des cas. Son tracé est globalement rectiligne entre son arrivée à Reims dans la vallée de la Vesle et son point de départ à Jonchery-sur-Suipe dans la vallée de la Suipe (Figure II-35 A). À plus grande échelle, le tracé suit grossièrement les courbes de niveau avec une pente moyenne de l'ordre de 5 %. Sur l'ensemble de son tracé, l'ouvrage est aménagé dans la craie du substrat et les produits de son altération (Figure II-365B).

Sur toutes les sections du tracé en tranchée de l'Aqueduc connue, les fouilles et les prospections ont relevé l'utilisation presque exclusive des roches siliceuses (majoritairement des pierres meulières à 99 % ; Figure II-38). Les études de matériaux réalisées en cours de fouilles sur le secteur de la Croix Blandin (Rabasté 2010) ont montré des proportions respectives de 99 % dans le radier basal du *Specus* et de 83 % des éléments pour les piédroits (Fronteau 2010). Les constituants de la voûte de couverture du canal sont, dans les rares occasions où celle-ci a été observée, également majoritairement dominés par les pierres meulières (Figure II-37). Dans ces deux parties de l'Aqueduc, d'autres pierres issues d'autres formations géologiques ont été recensées. Il s'agit principalement de pierres collectées *in situ* ou dans l'environnement proche du chantier comme des moellons de grès et des galets de silex résiduels (Thanétien).

De manière très anecdotique, des éléments de craies intercalés entre les meulières ont été rapportés. La faible fréquence de leur emploi serait plutôt un argument pour une utilisation accidentelle, voire opportuniste, de ce matériau. Enfin, de rares éléments de terres cuites architecturales et de fragments de terres cuites ont également fait l'objet d'observations bien que très minoritaire dans les corpus étudiés (Fronteau 2010). Mais dans le cas de ces derniers matériaux, ils ne semblent pas occuper de place systématique dans l'ouvrage ni de fonction particulière et correspondent plus à un usage opportuniste (Fronteau et al. à paraître).

Au fond de la tranchée, fondant les maçonneries du *specus*, la présence d'un assemblage de pierres meulières disposées « à sec » c'est-à-dire sans mortier a fait l'objet de plusieurs observations. Il est cependant probable que d'après les différentes coupes observées elles soient liées par de la craie compactée conformément aux pratiques des maçons de l'époque. Le réglage de la pente est assuré par un lit d'épaisseur variable constitué de graveluches et d'altérites meubles de la craie. Cette fondation sert également d'assise de réglage aux dalles calcaires de la base du canal et d'appui aux piédroits. Ces dalles calcaires ont fait l'objet d'une

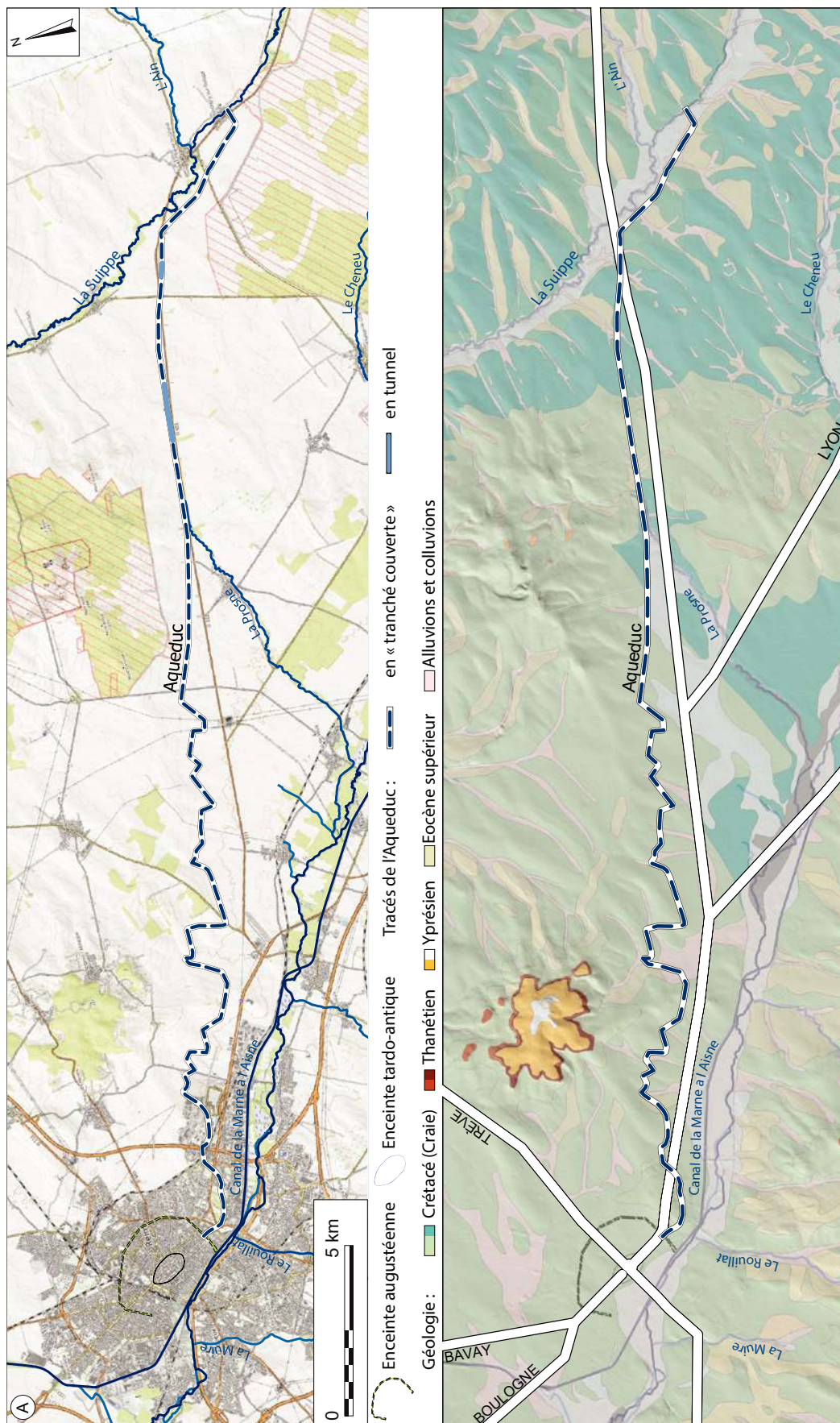


Figure II-35. Carte topographique (A) et géologique (B) du tracé de l'Aqueduc de Reims avec ses différentes modalités de tracé (modifié d'après Rabasté, Arduin 2010) ; Fond de carte Open Street Map et BRGM (RGF 93).



Figure II-36. Aperçu de fragments de piédroits de l'Aqueduc déposé lors des fouilles de Saint Léonard en 2016

récupération particulièrement efficace puisqu'à ce jour elles ne sont documentées que par l'intermédiaire de fragments issus de leur débitage et par de rares fragments de petite taille restés engagés dans les piédroits.

La synthèse des études de matériaux (Rabasté et Arduin 2010 ; Fronteau *et al.* 2011) augmentée de quelques observations récentes menées sur l'aqueduc ont rassemblé le corpus le plus conséquent de ce travail (N=3 089), mais également le moins varié. Du fait de l'intensité de la récupération des matériaux sur de nombreux tronçons de l'ouvrage, les observations ont essentiellement porté sur les rares parties de piédroits qui ont persisté, mais malheureusement jamais intactes. Seuls les piédroits du canal ont pu faire l'objet d'un travail de description. Les dénombrements réalisés (Figure II-39) démontrent l'utilisation préférentielle des pierres meulières dans les assemblages frustes des piédroits. Cela représente donc une continuité de l'usage de ce matériau également utilisé préférentiellement dans les substructures enterrées des ouvrages aériens. Leur usage est complété d'une part avec des matériaux de collectes *in situ* tel que les galets de silex d'âge Thanétien, quelques rares boules de marcassites (indigènes de la craie) ou encore des fragments de craie. Pour ces éléments l'hypothèse d'une présence accidentelle ne peut pas être exclue. D'autres éléments anthropiques ont également été décrits à l'image de fragments de terres cuites architecturales ou de très rares fragments de céramiques. Enfin, la présence de différents grès (ferrugineux ou mamelonnés), dont la présence, bien qu'anecdotique, démontre que la collecte en plein champ a complété les approvisionnements en pierres meulières.

Dans le bilan présenté, piédroits et radiers ne sont pas différenciés, cependant la synthèse réalisée par Fronteau dans l'ouvrage consacré à l'aqueduc (Rabasté et Arduin 2010) montre que ces deux parties de l'ouvrage ne diffèrent que très peu en composition, les éléments semblent être sélectionnés avec plus de rigueur pour le radier, car la proportion de meulières y est écrasante (99 %).





Figure II-37. Aperçu des matériaux de construction des maçonneries des piédroits de l'aqueduc (photos X. Drothière) : A. bloc de meulière siliceoïde (brune à cortex blanc et jaune) ; B. Meulière blanche à cortex jaune ; C. Meulière caverneuse à portants massifs ; D. bloc de grès siliceux mamelonné ; E. Galets de silex gris ; F. bloc de grès ferrugineux.

Bien que les lithologies soient variées dans les inventaires des matériaux de l'aqueduc, il ressort du corpus de cet ouvrage l'impression d'une forte homogénéité (Figure II-38). Ce dernier est très fortement dominé par les pierres meulières qui, toutefois, présentent dans le détail des faciès diversifiés. La diversité des autres pierres dans les assemblages des piédroits relève en grande partie d'une pratique opportuniste et pragmatique de collecte des pierres disponibles dans un rayon indéterminé autour de l'édifice afin de compléter

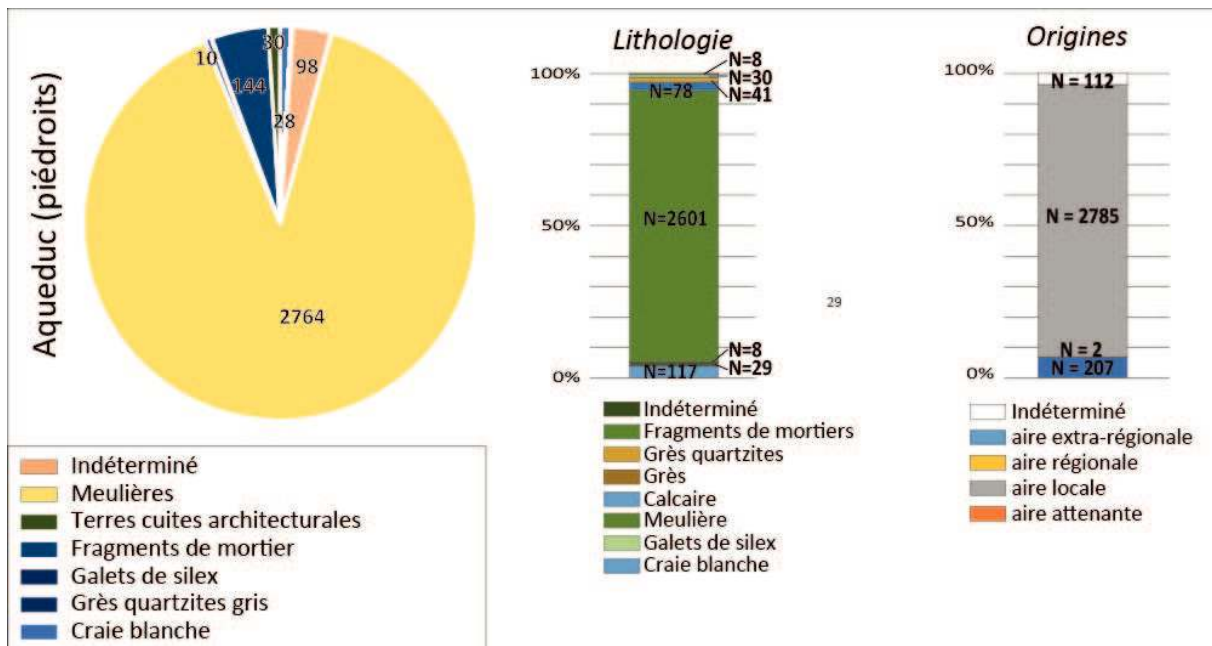


Figure II-38. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des piédroits de l'aqueduc

les approvisionnements en matériaux. Les constructeurs de l'édifice se sont orientés vers l'utilisation de pierres présentant de bonnes propriétés de résistance mécanique et des capacités permettant de limiter les transferts hydriques. Leurs origines montrent d'ailleurs avec clarté deux principales aires d'approvisionnement, l'une directement sur le site du chantier de construction et l'autre locale, prédominante, pour les matériaux adaptés à ce type de construction, mais indisponibles sur place.

Les analyses pétrologiques des nombreux fragments de calcaires retrouvés ont mis en évidence que ces dalles ont été extraites dans les dépôts de la partie supérieure des calcaires marins du Lutétien moyen (Fronteau *in* Rabasté 2010). Trois faciès principaux ont été identifiés (Figure II-39) :

- un calcaire tendre, clair, jaune-beige à gris, à rares bioclastes (dont des tubes de *Ditrupa*, des miliolites, des *Orbitolites*, des empreintes de Bivalves... ; Figure II-39 A)
- un calcaire tendre, clair, beige à presque blanc, à très nombreuses miliolites, *Orbitolites* et *Alvéolines* (mais sans tubes de *Ditrupa* ; Figure II-39 D et F).
- un calcaire à très nombreux *Ditrupa* (dont l'attribution architecturale est discutable ; Figure II-39)

Cependant, pour ce dernier faciès Fronteau (2010) émet des doutes puisque les dimensions du bloc ne permettent pas de le rattacher de manière certaine aux dalles du *specus*. De plus, des blocs de faciès similaires sont régulièrement décrits dans les blocs de la maçonnerie des piédroits. Une unique dalle a été mise au jour en 2008 correspondant à un fond de bassin de décantation (Fronteau *in* Rabasté 2010). Cependant, les observations menées sur celle-ci ont

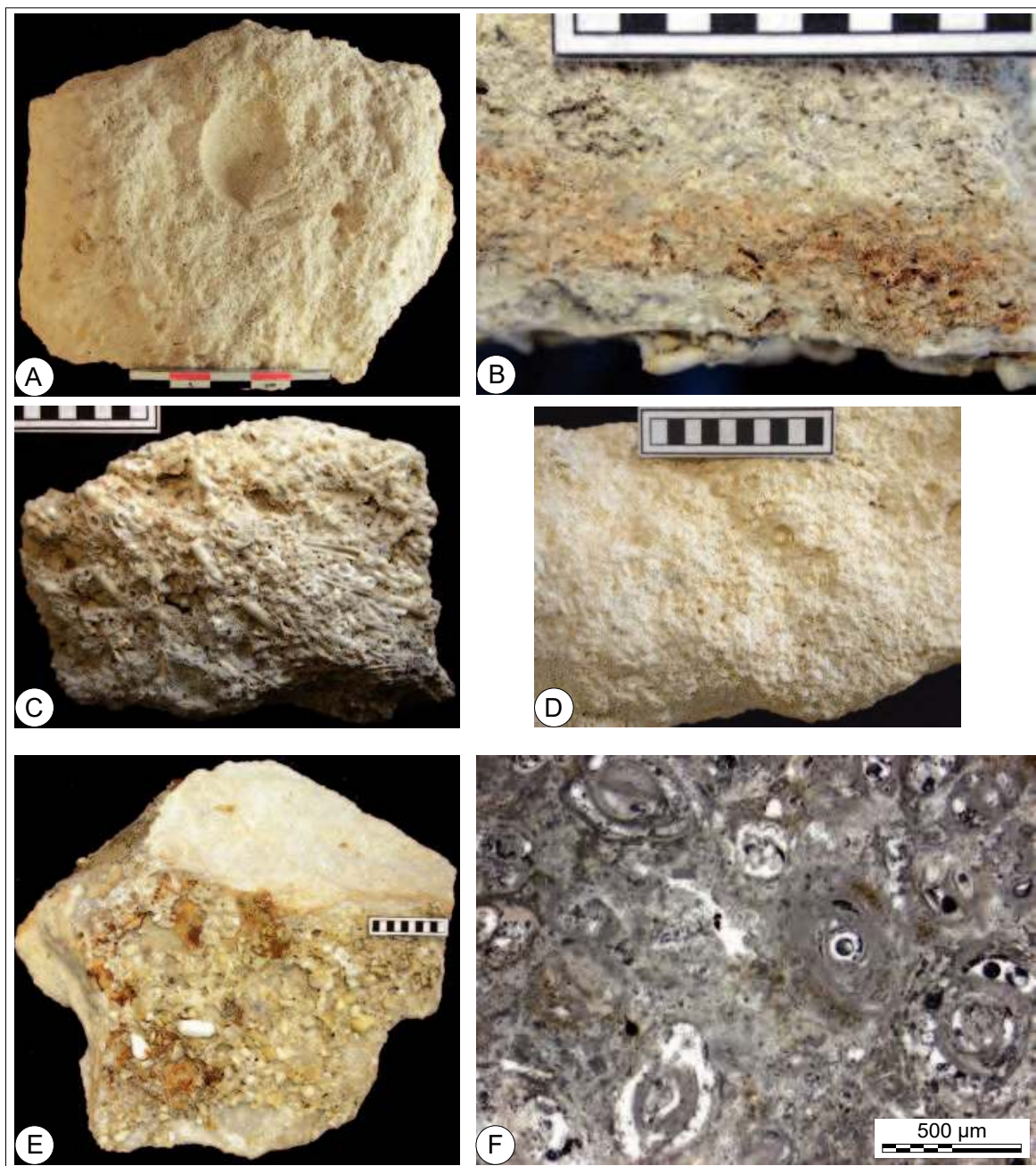


Figure II-39. Calcaires des dalles basales de l'Aqueduc (clichés G. Fronteau) A. Calcaire beige à Miliolites, Ditrupa et Bivalves ; B. Calcaire à très nombreuses miliolites ; C. Calcaire à très nombreux Ditrupa ; D. Calcaire à miliolites, Orbitolites et Alvéolines ; E. ; F. Microphotographie du calcaire à nombreuses miliolites.

par ailleurs montré que son faciès était similaire à celui des autres dalles du canal (Fronteau *in* Rabasté 2010). Les parois du canal sont quant à elles enduites d'un mortier de tuileau dans le but d'assurer l'étanchéité à l'eau de la structure.

Les modalités de construction changent pour les parties en tunnel rendues nécessaires pour réaliser le passage des reliefs formés par les interfluves entre les vallées de la Vesle et de la Suippe. En effet, le choix a été fait, lors de la construction, de substituer les piédroits en maçonnerie de meulière des parties en tranchées couvertes par des assemblages constitués de 15 assises régulières de briques dont les modules sont presque standardisés (Rabasté et

Ardhuin 2010). Malheureusement, ces dernières, mises au jour pour la dernière fois au cours d'un sondage profond, n'ont pas pu être étudiées sous l'angle de la composition du matériau. La voûte de couverture du canal garderait quant à elle ses caractéristiques originales sur toute la longueur de l'ouvrage.

Les importantes quantités de chaux nécessaire à la confection des mortiers avec lesquelles les pierres de construction sont liées peuvent interroger. En effet, bien que les auteurs anciens préconisaient la calcination de marbres<sup>47</sup> pour la confection de chaux (Vitruve), il est très

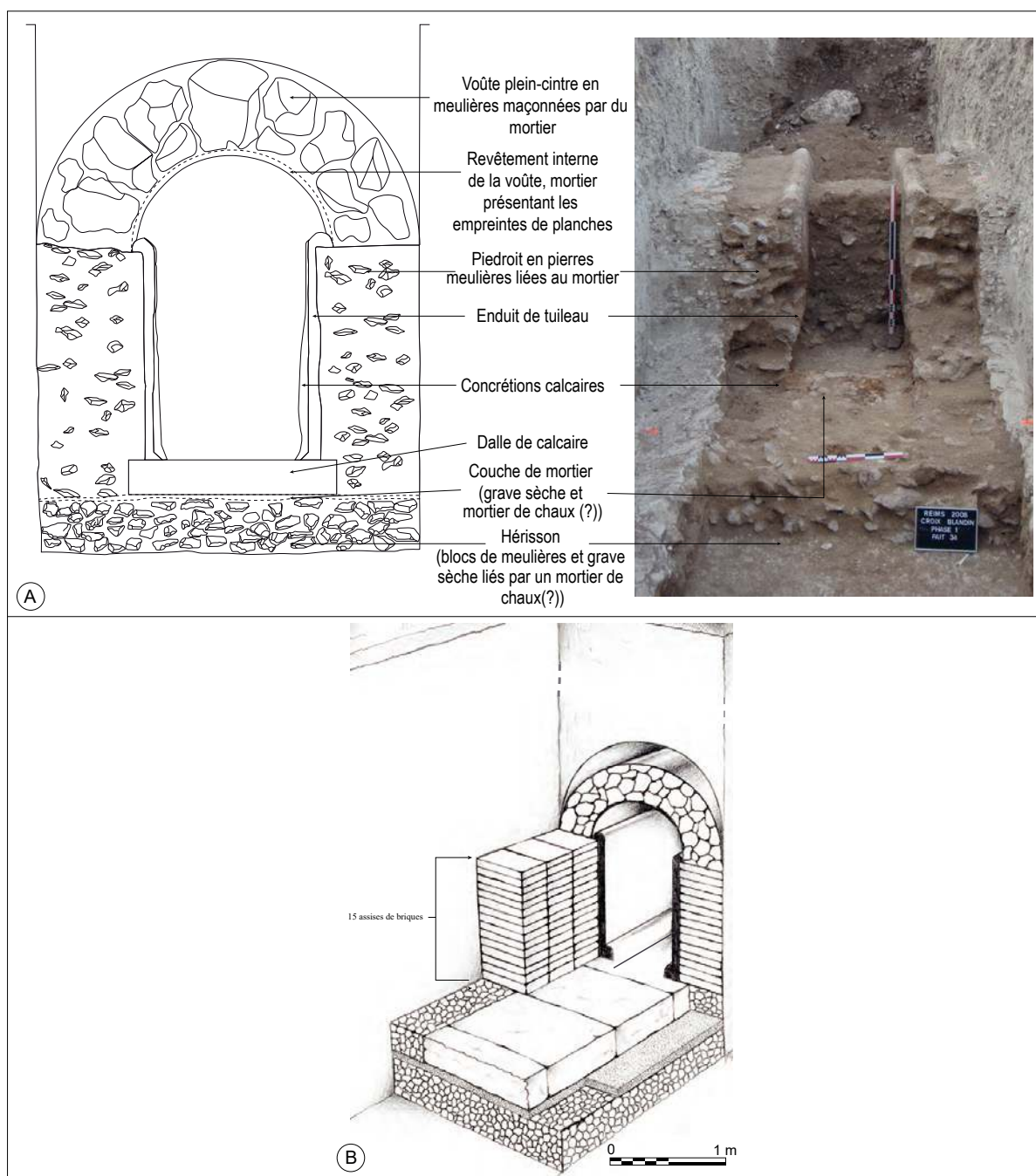


Figure II-40. A. Proposition de restitution annotée du canal de l'aqueduc en tranchée (Rabasté et Ardhuin 2010) ; B. Proposition de restitution du canal de l'aqueduc pour les passages en tunnel (Dessin P. Prillieux Rabasté et Ardhuin 2010)

47 Vitruve argumentait par ailleurs que plus les marbres ils étaient blancs, meilleure la qualité de la chaux serait (Adam 1984).

probable que ce soit la craie dans laquelle la tranchée est percée qui a fourni les importants volumes de carbonates nécessaires à la production de chaux. Les observations réalisées sur des fragments de piédroits ont également mis en avant l'utilisation de granulats de craie issus d'une part de graveluches collectées en surface et d'autre part de blocs de craie concassés comme charge granulaire dans les mortiers des piédroits conformément à ce qui est observé à l'intérieur de l'agglomération (Figure II-36). La production de chaux *in situ* est encore hypothétique faute de trace de four à chaux en lien avéré avec l'ouvrage.

L'estimation des quantités de matériaux mis en œuvre pour la construction de l'édifice est assez aisée puisqu'il suffit de reporter sur l'ensemble de la longueur du tracé de l'ouvrage les estimations des quantités de matériaux élément par élément en fonction de ses modalités de construction (formules développées en Annexe 8).

Ce calcul des longueurs (Tableau II-4) est un préalable nécessaire pour l'estimation des volumes de matériaux engagés dans les maçonneries, l'estimation des proportions respectives des meulières et des mortiers a été effectuée en s'appuyant d'une part sur les estimations

	Longueurs (en m)	Longueurs (en km)	%
Passage du canal en souterrain	3 135	3,13	8%
<i>Specus</i> enterré ou semi-enterré (passage en tranchée)	36 117	36,12	92%
	39 252	39,25	

Tableau II-4. Longueurs de l'Aqueduc et proportions respectives en fonction de la nature de la construction (modifié d'après Rabasté, Arduin 2010)

réalisées lors de fouilles, sur un élément déposé d'un piédroit et par des estimations sur abagues (Tableau II-5 ; Tucker 1991).

Evaluation des surfaces	%
Mortier	40 %
Moellons	60 %
Surface totale	100 %

Tableau II-5. Évaluation des proportions respectives des matériaux dans les piédroits et le radier du *Specus* de l'Aqueduc de Reims

Élément architectural	Volume total	Matériaux	Volumes estimés
<b>Voûtes</b>	32 060 m <sup>3</sup>	Meulières	19 300 m <sup>3</sup>
		Mortier	12 800 m <sup>3</sup>
<b>Specus</b>	39 300 m <sup>3</sup>	Calcaire du Lutétien	5 200 m <sup>3</sup>
		Mortier hydraulique	3 200 m <sup>3</sup>
<b>Piédroits et fondations</b>	60 700 m <sup>3</sup>	Meulières	36 400 m <sup>3</sup>
		Briques	2 100 m <sup>3</sup> (313 500 unités)
		Mortier	24 700 m <sup>3</sup>
		Meulières	55 700 m <sup>3</sup>
<b>Ensemble de l'ouvrage</b>	102 900 m <sup>3</sup>	Briques	2 100 m <sup>3</sup>
		Calcaires Lutétiens	5 200 m <sup>3</sup>
		Mortiers	40 700 m <sup>3</sup>

Tableau II-6. Estimations des volumes de matériaux engagés dans la construction de l'aqueduc.

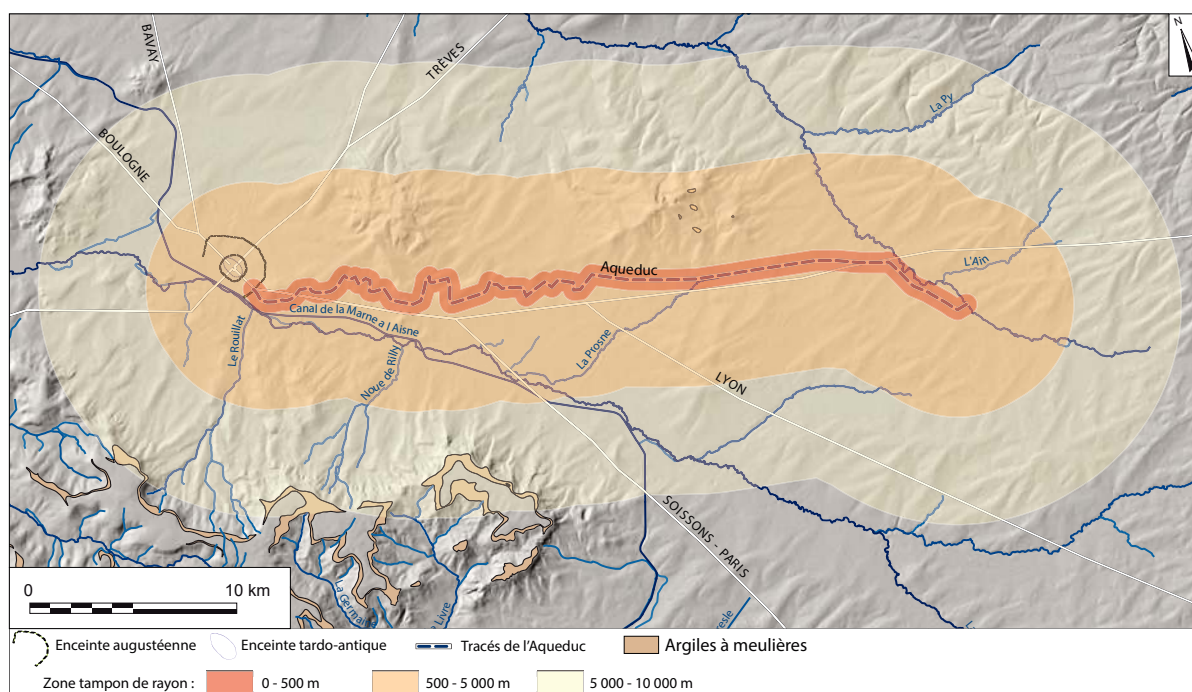


Figure II-41. Zones tampons de rayons croissants déployées autour du tracé de l'aqueduc

Si pour une grande partie des matériaux (craie, silex ou grès) l'origine ne suscite pas de réel questionnement, car leur origine locale ne fait pas de doute, l'origine des meulières utilisées peut en revanche interroger (Tableau II-6). Ces pierres peuvent provenir de deux sources différentes. Pour tout ou partie, elles peuvent provenir soit d'une collecte des matériaux résiduels en plein champ, soit avoir fait l'objet d'une extraction sur un autre site avant d'avoir été transportée sur le chantier. Pour tenter de déterminer quelle serait des deux hypothèses la plus probable, l'estimation des quantités de matériaux concernés réalisée précédemment a été reportée sur de zones tampons de rayon croissant centrées sur l'ouvrage (Figure II-41).

Rayon de la zone tampon	Superficie (km <sup>2</sup> )	Volume de meulière par hectares
500 m	40 km <sup>2</sup>	14 m <sup>3</sup> /ha
5 000 m	432 km <sup>2</sup>	1,3 m <sup>3</sup> /ha
10 000 m	1 009 km <sup>2</sup>	0,55 m <sup>3</sup> /ha
25 000 m	3 800 km <sup>2</sup>	0,15 m <sup>3</sup> /ha

Tableau II-7. Estimation du volume de pierre meulière à collecter par unité de surface à l'intérieur de zones tampons de rayons croissants, rendus nécessaires pour l'édification des maçonneries de l'aqueduc

La carte précédente (Figure II-41) présente différentes hypothèses de zones d'approvisionnement pour les pierres de maçonneries de l'édifice sous la forme de zones tampons de rayon croissant (de 500 à 10 000 m). La plus petite des zones tampons représente une hypothèse raisonnable pour une collecte en plein champ des pierres et en particulier des pierres meulières tandis que la zone tampon la plus large (10 km de rayon) commence à recouvrir des terrains où affleure la formation originelle (Figure II-17).

Au long des près de 40 km de l'édifice, les superficies de ces zones d'approvisionnement évoluent entre 40 km<sup>2</sup> et 1 009 km<sup>2</sup> pour la plus vaste qu'il est raisonnable d'envisager (Tableau II-7). À titre d'information la surface à considérer jusqu'à la limite de l'aire locale (soit 25 km de rayon) a également été calculée avec 3 800 km<sup>2</sup>. En prenant comme hypothèse que la totalité des pierres intégrées dans la construction de cet ouvrage aurait été collectée en plein champ, on peut en déduire les estimations de volumes de pierres à collecter en fonction des zones tampons considérées. Il apparaît donc qu'une collecte qui pourvoirait à l'ensemble des besoins du chantier dans une aire réduite devrait fournir 14 m<sup>3</sup>/ha, 1,3 m<sup>3</sup>/ha pour une aire de 5 km de part et d'autre de l'ouvrage et plus que 0,55 m<sup>3</sup>/ha pour l'approvisionnement le plus vaste. La première hypothèse de ramassage dans un rayon restreint sous-entend donc l'existence d'une couverture de 14 cm de pierres accessibles (sur le sol ou dans l'épaisseur accessible dans un terrain agricole). Dans un rayon de 5 km, cette quantité décroît mécaniquement, mais reste encore importante au regard de la disponibilité constatée actuellement. Il est également nécessaire de signaler que dans ce rayon les premiers gisements susceptibles de fournir ces matériaux sont d'ores et déjà accessibles. Enfin, la surface la plus importante considérée impliquerait la présence préalable de 0,15 m<sup>3</sup>/ha de pierres. Si cette estimation, *a minima* compte tenu des incertitudes sur les modalités de construction de l'édifice, semble réaliste, cette aire d'approvisionnement recouvre en revanche les affleurements d'argiles à meulière susceptibles de fournir des approvisionnements bien plus homogènes et réguliers.

La logistique d'approvisionnement du chantier doit également être intégrée à ce raisonnement. Plus l'aire d'approvisionnement est vaste et plus le coût du transport augmente (Pasquini 2017 ; Delencre 2017). Il faut donc afin de maîtriser cet aspect que les sources des matériaux soient d'une part localisées à des distances raisonnables et d'autre part qu'elles soient le plus ponctuelles possible afin de limiter les ruptures de charges (Blary et Gély 2020).

Les estimations sur les durées de travaux (entre la fin du 1er siècle av J.-C. et la fin du 1er siècle ap J.-C. ; Rabasté et Ardhuin 2010) laissent quant à elle de la place pour envisager des approvisionnements plus variés et réalisés sur le long cours, avec une pression calendaire moindre. La collecte de pierres entassées en bord de champ pour approvisionner la construction pourrait donc en partie couvrir les besoins en pierre et expliquerait la présence de rares éléments qui ne soient pas des meulières. Compte tenu de la nature et de la résistance de cette roche, il semble possible d'envisager également une collecte (au moins partielle) de

ces mêmes pierres dans les dépôts alluviaux exploités par ailleurs. Cette dernière pourrait compléter les approvisionnements en matière première, mais ne serait pas en mesure de couvrir tous les besoins du chantier.

Ces estimations mettent en avant qu'une collecte *in situ* ou dans un périmètre attenant à l'édifice des pierres de construction est impossible, même si la présence de galets de silex notamment, plaide pour que cette voie ait été utilisée en complément. L'approvisionnement du chantier semble donc relever d'une stratégie mettant en relation des extractions réalisées depuis les affleurements d'argiles à meulières. Cette stratégie permet en outre de sécuriser en rendant moins aléatoires les volumes de pierre nécessaires à l'avancée du chantier sur toute sa durée.

À ce jour cependant, de nombreux aspects techniques de l'aqueduc demeurent inconnus. Les dernières centaines de mètres jusqu'à son débouché sur la ville, le château d'eau, déversoir des eaux de l'aqueduc à l'entrée de la ville et éventuel départ des conduites d'adduction pour un réseau de fontaine ou privatif demeurent à localiser. Par ailleurs, l'existence de regards de visites apparaît ici comme une potentialité, car elle n'est pas établie sur les tronçons observés. L'implantation de ces regards est supposée au niveau des changements de direction de la conduite sans toutefois en apporter la preuve définitive. Cependant, Vitruve dans *De Architectura* en justifie l'utilité, l'implantation et l'écartement (120 Pes<sup>48</sup>). Elle est en revanche bien documentée sur d'autres ouvrages exécutés dans des conditions similaires comme à Nîmes (Carbon *et al.* 2005) où les regards sont espacés avec régularité de 43 à 46 m. Cette lacune ne permet par conséquent pas de qualifier la nature et les dimensions des maçonneries qui ont été édifiées pour relier le *specus* depuis le niveau du sol. Au-delà de leur nature, ce pourrait donc être jusqu'à près d'un millier d'ensembles de maçonneries qui échappent à la quantification des matériaux de cet ouvrage sur la partie de son tracé en tranchée couverte. Cependant, l'hypothèse émise que ces accès soient implantés au niveau des changements de direction de la conduite pourrait sensiblement diminuer leur nombre (Rabasté et Arduin 2010).



Figure II-42. Élément de fontaine publique en calcaire à miliolites et à Cérithes (Musée Saint Remi, photographie C. Galopeau de Almeida)

48 soit 35,5 m



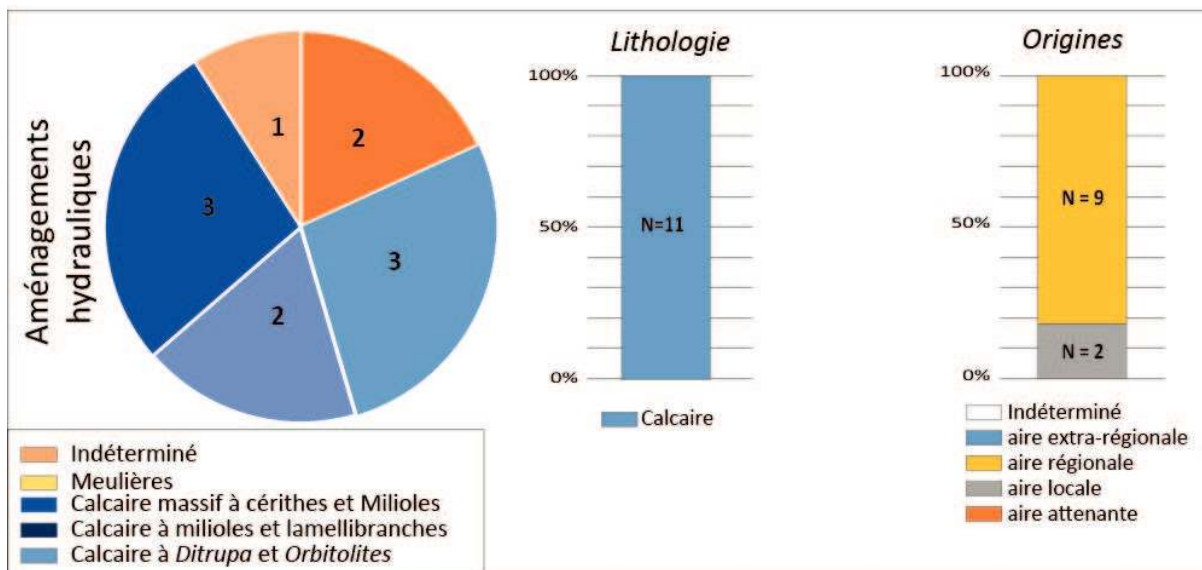


Figure II-43. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction des aménagements hydrauliques urbains.

### 3.2.2. Les aménagements hydrauliques urbains

Ces ensembles concernent tous les éléments façonnés dans l'objectif d'être utilisés dans des contextes destinés à recevoir de l'eau ou à en guider les écoulements. Il peut aussi bien s'agir de fontaines publiques appartenant aux mobiliers d'agrément urbains (Figure II-42) ou encore d'éléments de caniveau, de colonnes évidées afin d'assurer les descentes d'eau pluviale (gouttières) ou enfin d'éléments issus de margelles et de cuvelages de puits. La plus importante contribution dans le corpus à cette catégorie est issue des blocs mis au jour lors de la fouille de la rue Rockefeller (Figure II-25 point 11) et des éléments de fontaines exposés au musée Saint Rémi (Figure II-25 point 3) auxquels s'adjoignent quelques éléments issus des opérations de fouilles récentes.

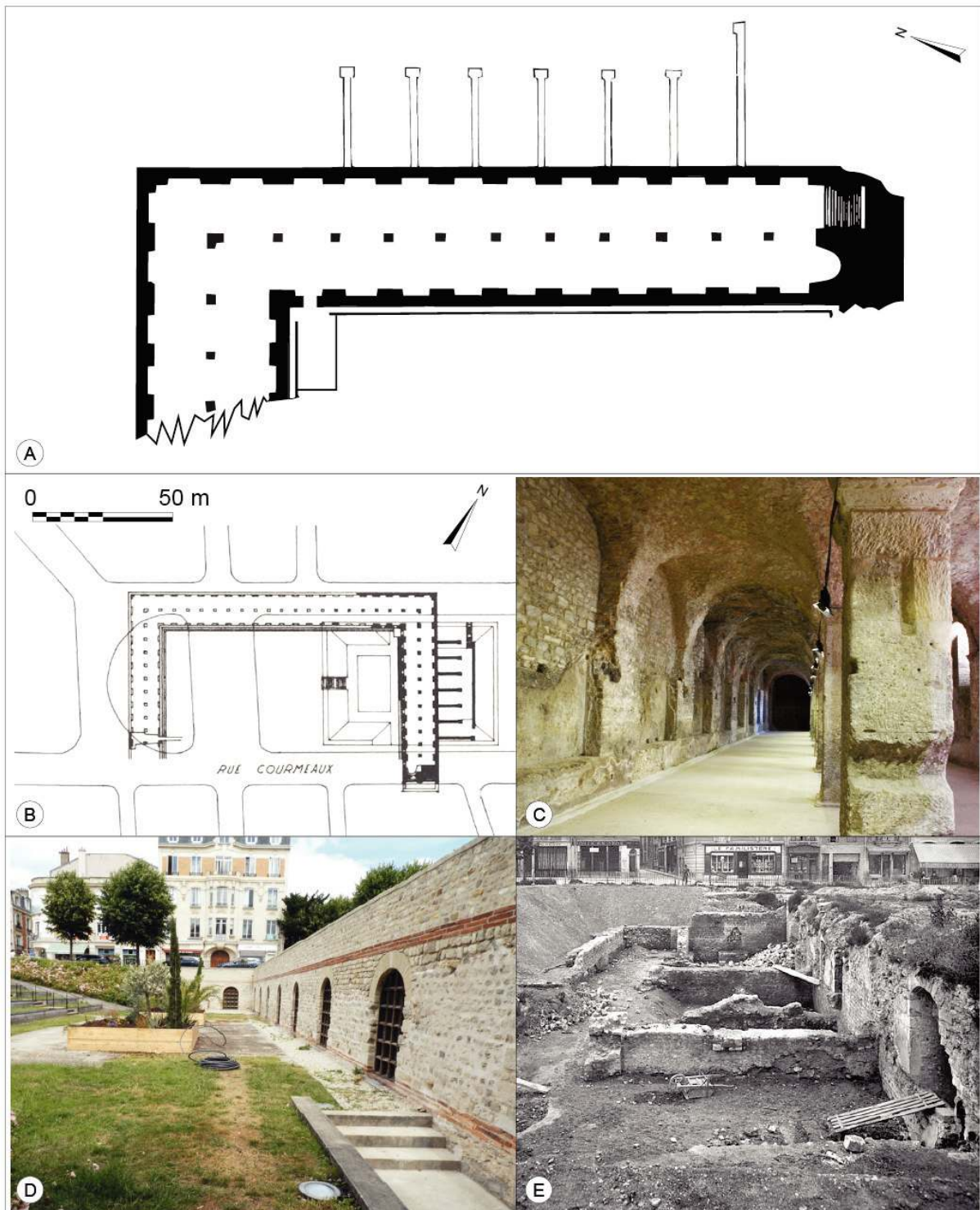


Figure II-44. A. Cryptoportique de Reims. Plan de l'aile est (Frézouls 1973) ; B. Plan d'ensemble de la reconstitution de Frézouls (1973) sur la base du forum de Bavay ; C. Reims, galerie de la nef orientale du Cryptoportique. Au premier plan, pilier en pierre de grand appareil ; D. Vue de la façade ouest du bâtiment ; E. Vue de la façade est du bâtiment au cours de son dégagement en 1929 (cliché : Base Mérimée <https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/PA00078788>, Monuments historiques).

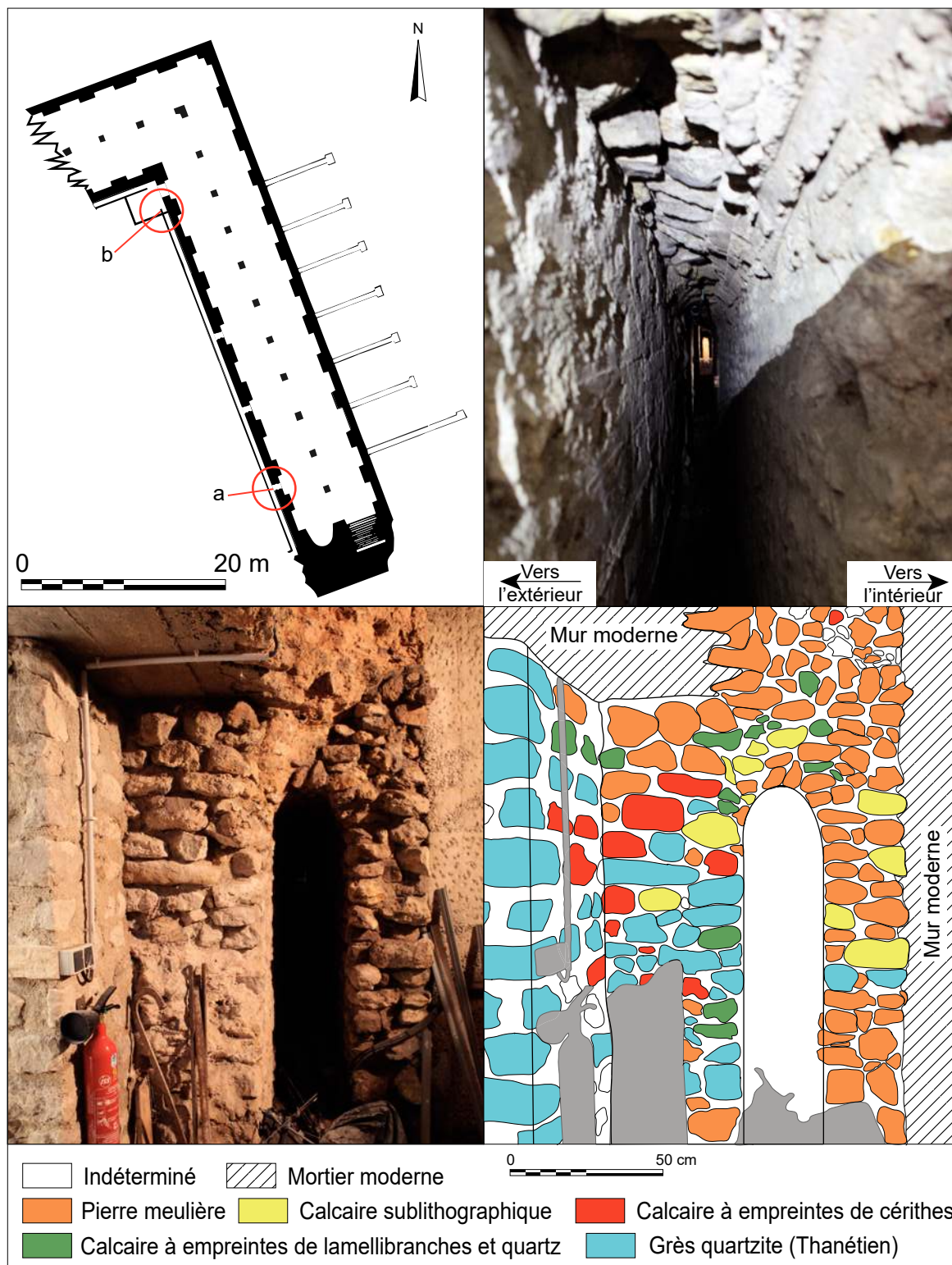


Figure II-45. Analyse de la composition des matériaux des soubassements du Cryptoportique.

Ces éléments, tous de nature calcaire sont très majoritairement issus de l'aire d'approvisionnement régionale (Figure II-43). Il s'agit de calcaires massifs à milioles et de Calcaires à cérithes et de calcaires à milioles et *Orbitolites*. La plupart de ces calcaires sont connus pour avoir un excellent comportement vis-à-vis des transferts hydriques. Cependant, le faible nombre d'éléments intégré dans le corpus apparaît bien trop limité pour qu'il soit considéré comme représentatif de l'ensemble des aménagements de l'agglomération.

### 3.2.3. Les grands bâtiments publics : l'exemple du Cryptoportique

Cet édifice est encore très peu étudié malgré sa découverte initiale au XIX<sup>e</sup> siècle et sa redécouverte dans les années 1930. Il remonterait au I<sup>er</sup> siècle après J.-C. ou au début du II<sup>e</sup> siècle après J.-C. (cf chapitre I.3.7.1). L'aspect initial du bâtiment dans sa totalité reste cependant sujet à hypothèse en l'absence des superstructures originales préservées. Son ampleur est néanmoins attestée par la présence de son aile est et de l'angle qu'elle forme avec l'aile nord, d'un escalier d'accès conservé au bout de l'aile est et par plusieurs observations ponctuelles d'infrastructures intérieures préservées (Figure II-44 A & B). Les quantifications précises des matériaux sur cet édifice représentent à ce jour la difficulté de l'absence d'étude d'archéologie du bâti récente. Les diverses reprises et modifications des maçonneries, depuis sa construction jusqu'à sa redécouverte, ont drastiquement complexifié la lecture architecturale de l'édifice. La difficulté majeure réside donc dans l'attribution fiable des matériaux à une phase de construction ou de modification en particulier.

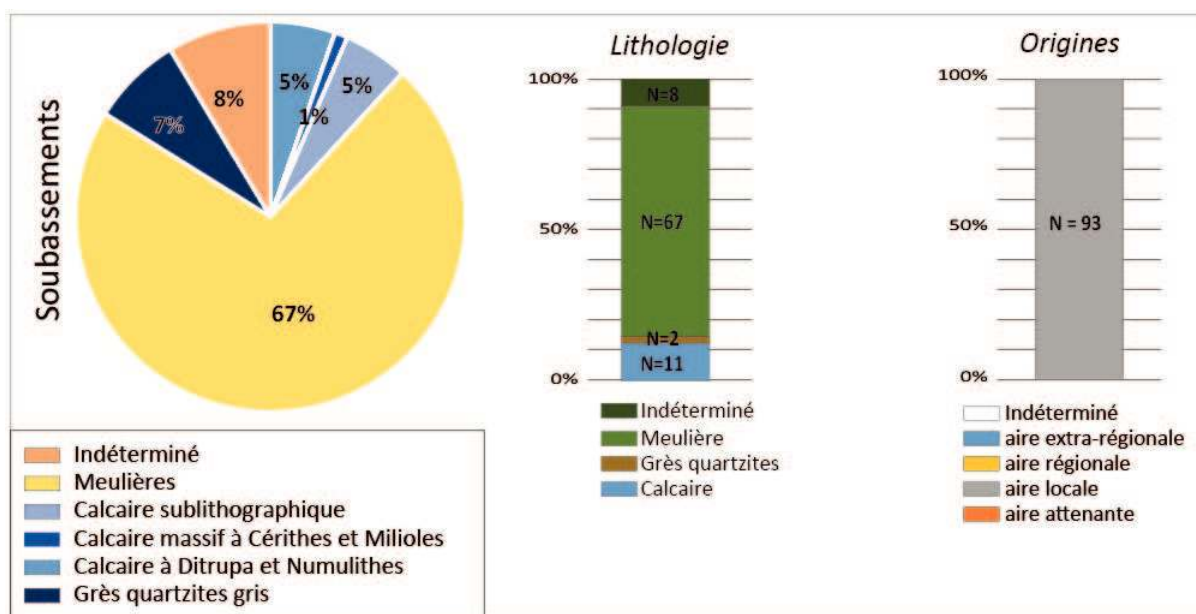


Figure II-46. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des soubassements du Cryptoportique

L'édifice est d'après Frézouls (1973) fondé directement sur la craie, cependant aucune documentation ne permet de le confirmer, ni même si ces fondations se matérialisent sous la forme d'un radier comparable à ceux observés en contexte similaire. Toutefois, ces soubassements possèdent une spécificité à l'échelle de la ville puisque la partie inférieure de la partie ouest est constituée d'une maçonnerie à double paroi sur une hauteur de 2 m (Figure II-44, A et B). En revanche la partie est est exempte. Cette dernière également documentée pour le *forum* de Bavay (Frézouls 1973) est supposée être un moyen de lutter contre l'humidité dans les parties situées sous le niveau du sol.

L'examen des matériaux de cette maçonnerie a montré une autre spécificité à l'échelle de cet aménagement (Figure II-45). En effet, les blocs des parties internes et externes sont de natures très différentes. La paroi externe, en contact avec le sol, est constituée de 95 % de pierres meulières complétées par quelques blocs de calcaires sublithographiques et de rares éléments de calcaires lutétiens massifs. La paroi interne est quant à elle constituée d'un assemblage à parts plus ou moins égales de calcaires à cérithes lutétiens et de grès quartzites du Thanétien. Les parois internes et externes ne sont pas assemblées selon les mêmes modalités. La paroi interne est assemblée selon un petit appareil quadrangulaire formant des assises régulières tandis que la paroi externe (au moins dans sa partie visible) semble assemblée selon un appareil fruste.



Figure II-47. Aperçu des modalités d'assemblage des maçonneries et des faciès les plus représentés dans les moellons des élévations du Cryptoportique (mur de la Façade Est du bâtiment). A et B. Assemblage en petit appareil des élévations du monument ; C. Calcaire massif à nombreux *Ditrupa* et lamellibranches ; D. Calcaire massifs à *Ditrupa* et gros grains de quartz ; E. Moellon de grès quartzite gris F. Moellon de pierre meulière (sa couleur très rouge découle d'une exposition au feu).

Les comptages des matériaux à l'échelle de l'ensemble des parois de soubassements montrent que ses constituants sont de nature hétérogène (Figure II-46). Les comptages montrent une grande majorité de pierres meulières à laquelle est adjointe pour les parties nécessitant l'emploi de matériaux bien équarris de calcaires lutétiens (calcaires massifs à *Ditrupa*, à cérithes et milioles ou encore sublithographiques) ou bien de moellons de grès. Pour ces derniers il s'agit en particulier d'éléments de grès quartzites gris du Thanétien. Bien que les comptages sous-entendent l'emploi majoritaire pour les soubassements de pierres meulières, la réalité montre que comparées aux éléments de la paroi intérieure, celles-ci dominent dans la paroi extérieure, d'un module plus petit et agencé différemment.

Les deux modalités d'assemblages constatées sur ces deux parois semblent découler du choix des matériaux qui les compose. La pierre meulière est en effet très peu adaptée à la taille et donc est plus adaptée à un assemblage fruste. L'homogénéité des choix de matériaux démontre une démarche volontaire d'assembler des matériaux peu ou pas capillaires dans la paroi externe afin de mieux contrôler les transferts hydriques et pour la paroi interne d'utiliser des matériaux permettant une mise en forme plus facile et régulière afin de présenter un compromis entre esthétique et résistance vis-à-vis des transferts hydriques.

L'hétérogénéité lithologique déjà précisée est contrebalancée par l'homogénéité de provenance des matériaux des soubassements. Ces derniers sont en effet tous issus de l'aire d'approvisionnement locale. Toutefois, tous les matériaux n'étant pas disponibles sur les mêmes sites, il y a dans ce cas une forte rationalisation du choix de matériaux susceptibles d'être mis en forme, mais également aptes à limiter les transferts hydriques vers les élévations du bâtiment.

L'aile de galerie encore intacte (Figure II-44 A & B) est remarquable autant par son architecture que par ses dimensions : elle mesure 57 m de long pour 9,5 m de large à l'intérieur (ce qui représente environ 11 m hors œuvre) avec une hauteur maximale sous voûte de 5,7 m. Elle est composée de deux nefs parallèles, à voûtes d'arêtes qui reposent sur une rangée médiane de douze piliers en pierre de taille (Figure II-44 C).

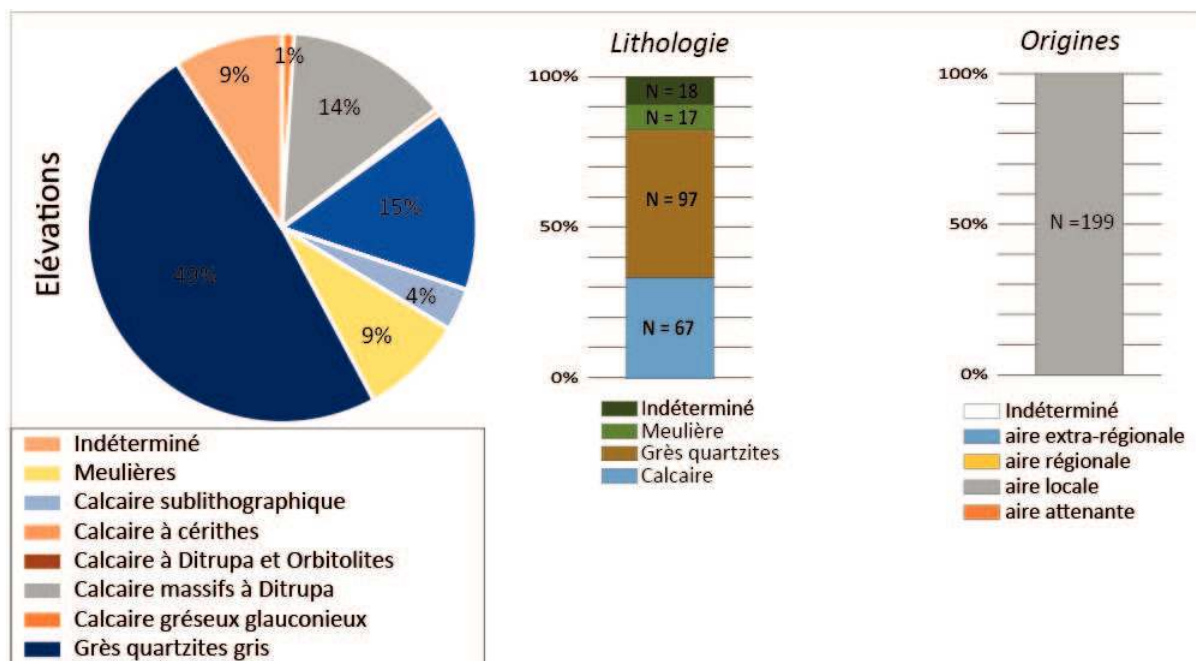


Figure II-48. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des maçonneries des élévations du Cryptoportique

Une grande partie des élévations de l'édifice encore en place actuellement ont fait l'objet de restaurations pendant l'entre-deux guerres, réalisées probablement peu de temps après l'exhumation des maçonneries (Figure II-44 A & B). Elles ont consisté en une réparation des dommages liés au conflit (réparation des voûtes percées par endroit) et de la restitution de la partie haute des élévations. Ces restaurations ont été réalisées à l'époque en introduisant un léger décalage des joints de mortier entre parties d'origines et parties restituées de manière que celles-ci sont aujourd'hui aisément identifiables. Il semble que les matériaux qui ont approvisionné les chantiers de restauration aient été ceux disponibles sur place et probablement en grande partie des matériaux originaux du bâtiment tant leur nature et leur aspect sont proches. Cependant, aucune étude ne l'attestent clairement. L'étude de matériaux s'est focalisée sur les parties d'origine clairement identifiables.

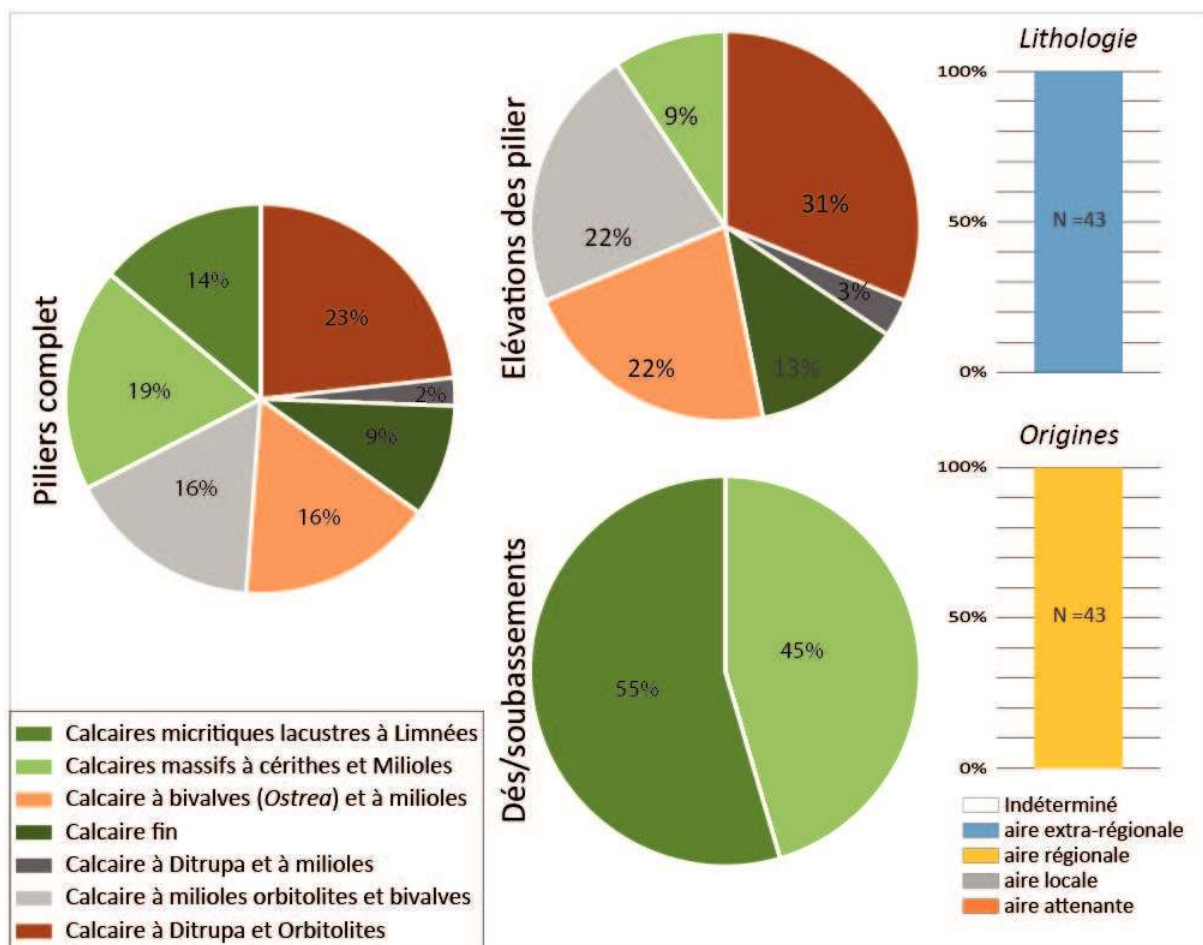


Figure II-49. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des piliers du Cryptoportique

Ces élévations sont assemblées à l'aide de moellons bien équarris selon deux modalités proches, mais inégalement préservées. Les parties basses cumulent un appareil à moellons peu ou pas mis en forme, mais à assises réglées avec, au moins sur la façade nord-est dite des boutiques, la présence de traces très localisées d'un appareil quadrangulaire très régulier (*opus vittatum* ; Figure II-47). Ces maçonneries sont assemblées sur une triple assise de réglage en briques de terre cuite. Les matériaux mis en œuvre sont diversifiés et correspondent à ceux définis précédemment comme appartenant aux catégories des pierres à moellons.

Les comptages réalisés *in situ* (Figure II-48) sur 199 blocs ont montré un assemblage assez hétérogène de matériaux lithiques. Les moellons de grès quartzites gris du Thanétien représente la majorité des moellons (49 %). Ils sont associés à divers faciès de calcaires lutétiens locaux, mais dont la synthèse des blocs reproduit assez fidèlement l'ensemble de la colonne stratigraphique. Enfin, cet assemblage est complété par des moellons de meulière à faciès massif. Les calcaires figurent ce qui semble être une synthèse des faciès disponibles dans les carrières du secteur du massif de Saint-Thierry (Glaucanie grossière, calcaires massifs à *Ditrupa*, calcaires à cérithes et calcaires sublithographiques). L'ensemble de ces éléments de construction est issu de l'aire d'approvisionnement locale.

Les voûtes sont constituées par un assemblage des moellons plats, disposés horizontalement et liés par un mortier de tuileau. Pour Frézouls (1973), ces pierres seraient majoritairement composées de roches siliceuses ce qui est confirmé par nos observations qui, bien que très partielles<sup>49</sup>, ont montré en particulier la présence de petits éléments de grès associé à de rares meulières.

En revanche, les piliers de **soutènement** de la voûte (Figure II-44 C et Figure II-49) sont érigés à l'aide de blocs de calcaires à *Ditrupa* et de calcaires à milioles du lutétien moyen dont les faciès sont caractéristiques des secteurs carriers des plateaux du Laonnois et du Soissonnais d'après Fronteau *et al.* (2014 ; 2021). Ces piliers ne sont pas en contact direct avec le sol, mais disposés sur un bloc (ou dé) formant la première assise des piliers. Ces dés sont constitués indifféremment soit de calcaires à cérithes et à milioles du sommet du Lutétien moyen soit de calcaires à Limnées du Lutétien supérieur/Bartonien.

Pour ces éléments de soutènement, sont utilisés pour les parties en contact direct avec le sol des calcaires de faciès « durs », très peu capillaires, ayant pour vocation de limiter les transferts hydriques depuis le sol vers la maçonnerie et pour les parties hautes de calcaires de faciès « tendres » et poreux. Dans ce cas encore, les constructeurs ont privilégié l'efficacité de ce matériel au regard de sa position architecturale dénotant une bonne connaissance des propriétés intrinsèques de ces pierres.

#### 3.2.4. Les reliefs archéologiques de grands bâtiments publics

Ces grands bâtiments publics représentent de fait la plus grande part du corpus bien qu'en proportion ils ne représentaient qu'une fraction des bâtiments de l'agglomération. Ils sont issus d'un ensemble conséquent de bâtiments dont seul le Cryptoportique est encore en élévation. Les éléments correspondant à cet ensemble architectural sont issus de l'étude de plusieurs sites, avec en particulier les éléments des collections du Musée Saint-Rémi (Figure II-25 point 3), des blocs issus des fouilles de la rue Belin (Figure II-25 point 9 ; Rollet 2006), des éléments lapidaires de la fouille de la rue Rockefeller (Figure II-25 point 11 ; Brunet-Gaston 2008) et enfin des fouilles récentes de la rue Marie Stuart (Figure II-25 point 14 ; Neaud *et al.* à paraître).

Une grande part de ces bâtiments, originellement situés dans l'espace compris entre la grande et la petite enceinte, ont été détruits (comme l'attestent les traces récurrentes d'incendie) avant d'être démantelés dans le but de réemployer leurs matériaux de construction. Une grande partie de ces matériaux a d'ailleurs été utilisée afin d'édifier le rempart de

<sup>49</sup> Les voûtes culminant à 5,7 m ne sont accessibles qu'au droit des deux escaliers d'accès, lieux où elles sont également recouvertes de ce qui semble être une fine pellicule d'enduit.



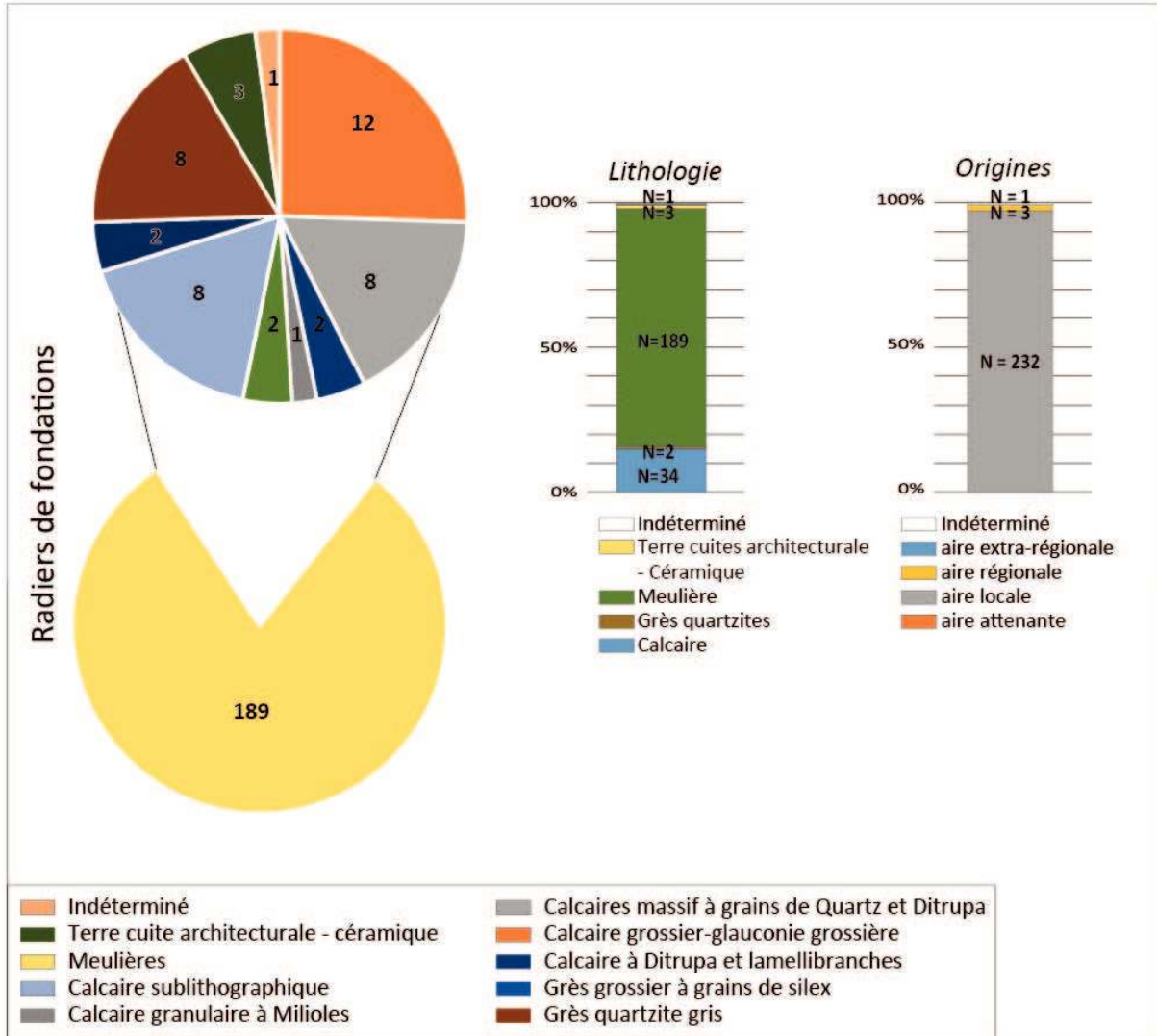


Figure II-50. Répartition en proportion et origines des matériaux des fondations des grands bâtiments publics

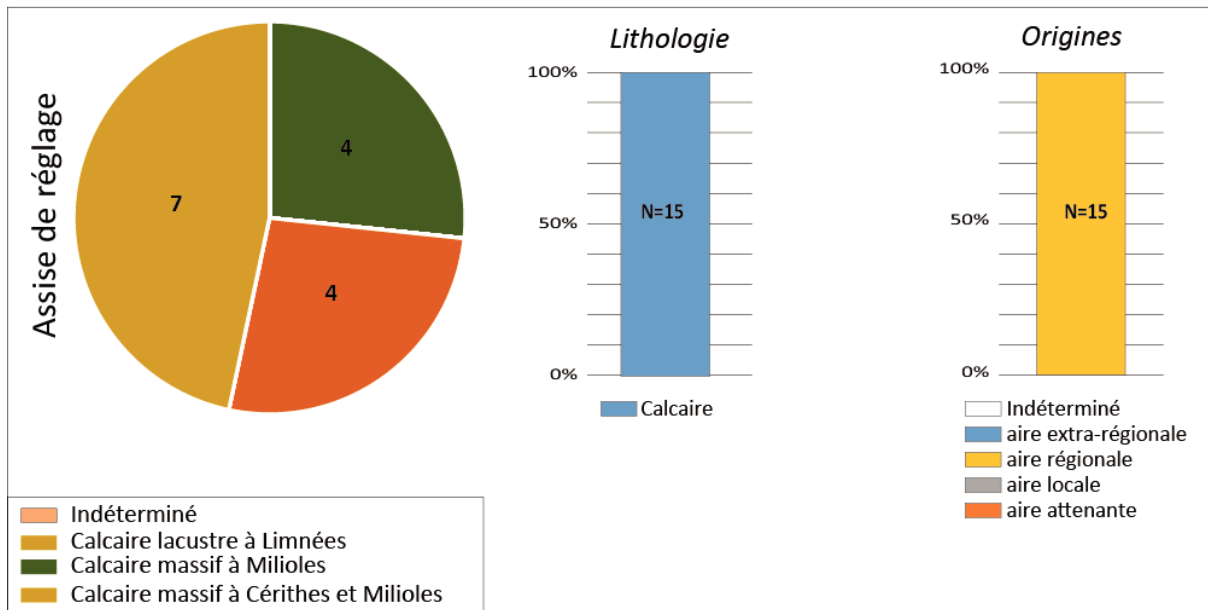


Figure II-51. Répartition en proportion et origines des matériaux des fondations des assises de réglage faisant office de dallage des grands bâtiments publics

l'Antiquité Tardive. Une grande part des éléments étudiés proviennent des soubassements de cette fortification. Il en résulte que, pour le plus grand nombre de ces bâtiments, seuls les soubassements sont préservés au moins partiellement. Les élévations sont en grande partie manquantes. Il n'en subsiste qu'une infime fraction au regard de ce que représentaient les quantités de matériaux initialement en place.

Les **radiers de fondation et les soubassements** (Figure II-50) sont comparables à ceux observés pour les bâtiments d'habitations avec toutefois un soin particulier dans l'ordonnancement des matériaux. Ces derniers sont organisés en couches successives de petits moellons informes, assemblés et rendus solidaires par des couches décimétriques de craie tassée (Figure II-9 B). La composition de ces radiers ne semble pas différer d'un site à l'autre. Les éléments sont dans leur immense majorité d'origine locale, mais occasionnellement peuvent être utilisés des éléments régionaux ou extrarégionaux de remploi. Les éléments sont de nature assez homogène très largement dominée par les meulières et les calcaires, auxquels s'adjoignent quelques éléments siliceux (grès). Si les meulières regroupent tous les faciès présents au voisinage de l'agglomération, il n'en va en revanche pas de même pour les calcaires. Ces éléments regroupent de petits éléments de calcaires massifs issus des affleurements du massif de Saint-Thierry, principalement issus de la base des calcaires grossiers. Les calcaires sublithographiques du lutétien supérieur sont également relativement abondants. Dans leur ensemble, la composition de ces radiers de fondation reflète bien le spectre des pierres dites « à moellons » qui ne prennent pas ou très mal la taille. Ces éléments sont complétés par l'usage sporadique de matériaux de récupération comme des fragments de terres cuites architecturale ou encore de petits fragments de macro-outillage lithique (à l'image des fragments de pierres de Macquenoise probables fragments de meules brisées).

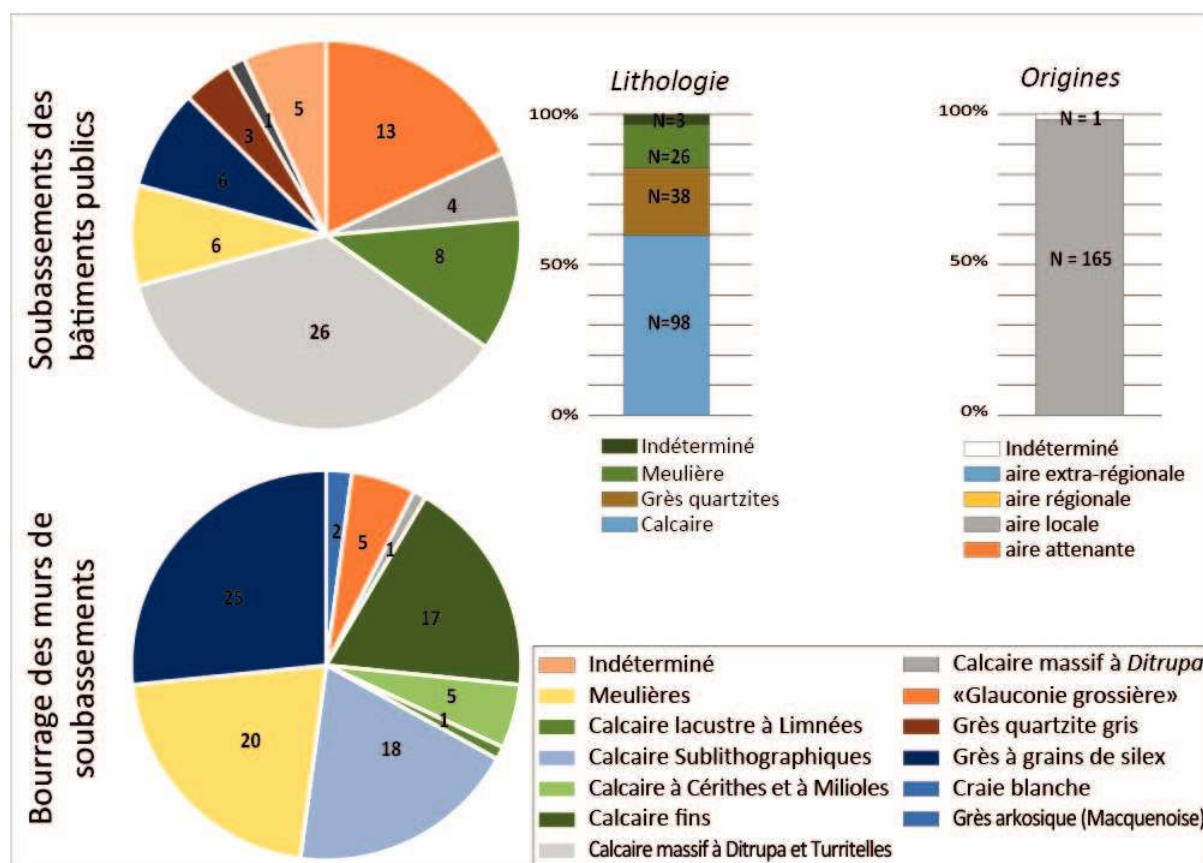


Figure II-52. Répartition en proportion et origines des matériaux des soubassements et substructures des grands bâtiments publics

Les **assises de réglage** des grands bâtiments publics sont constituées par des éléments de grand appareil qui, assemblés, forment le plan de référence de l'édifice et en constituent également son sol (Figure II-51). Les éléments qui le constituent sont tous de nature calcaire originaire de l'aire d'approvisionnement régionale (extraction sur les plateaux du Soissonnais). Les assises de réglages observées en place sont constituées d'un assemblage de 3 faciès qui peuvent être synthétisés en deux grands ensembles. D'une part les calcaires massifs et granulaires à miliolles et d'autre part des calcaires micritiques à Limnées. Ces deux types de calcaires sont utilisés conjointement dans tous les sites où ils étaient encore en place.

Les **substructures** constituant les socles et les parties inférieures des grands bâtiments sont constituées de grands ensembles de types cryptoportiques. Leur organisation générale est globalement donnée par celle du complexe cultuel de la rue Belin. Les soubassements de ces bâtiments sont également très comparables à l'organisation du Cryptoportique. Dans le cas des constructions exhumées lors de cette opération (Figure II-25 point 9) les élévations délimitaient « une vaste salle semi-enterrée, à la manière d'un cryptoportique bordée à l'ouest par un égout monumental et à l'ouest par une surface dallée » (Rollet 2006 ; Bart *et al.* 2017 ; Rollet et Jouhet 2022). Cette vaste salle comportait des alignements de piliers dont certains étaient encore en place sous les décombres de l'incendie qui ravagea l'édifice (Rollet 2006). D'autres soubassements de ce type, également attribués à ce type d'architecture, ont d'ailleurs été mis au jour dans l'enceinte de l'agglomération (Brunet-Gaston 2008). Les identifications de matériaux ont été essentiellement réalisées à partir des parements des maçonneries et lorsque cela était possible sur le noyau interne des murs généralement constitués d'un « fourure » de pierres et de mortier. La plupart des soubassements de grands édifices publics observés sont constitués de maçonneries de taille impressionnante et très épaisse (entre 0,6 m et 1,2 m pour les observations de murs en élévation).

Les matériaux sont bien équarris et se présentent sous la forme de moellons décimétriques assemblés selon diverses modalités du petit appareil, généralement associés à des assises de terres cuites architecturales. Tous les matériaux utilisés sont d'origine locale, mais sont diversifiés, bien que fortement dominés par la présence de calcaires (Figure II-52). Ceux-ci sont associés à des grès quartzites et des pierres meulières. Les terres cuites ont été volontairement exclues des comptages afin de se focaliser sur les matériaux lapidaires.

Les calcaires et les grès, préférentiellement utilisés, font partie des ensembles de pierres dites « à moellons » comme précédemment pour les fondations. Cependant, les parements des murs sont préférentiellement constitués de calcaires et de grès d'origine locale auxquels s'adjoignent de rares meulières. Les calcaires à *Ditrupa* et/ou encore les blocs de glauconie grossière sont nombreux dans ces assemblages. Dans le détail l'emploi des meulières est toujours limité aux parties des murs assemblés en appareil plus fruste. La présence de 2 moellons de craie blanche a été relevée dans ces soubassements. Cependant, cette présence est cantonnée au fourure de la maçonnerie et semble être plutôt une anomalie à l'échelle des murs. La grande quantité de pierres meulières observées se répartit également entre les parements où elles sont très minoritaires et les fourures où elles représentent une proportion bien plus grande (20 moellons soit 76 %). Il existe donc une disparité de nature entre les

moellons utilisés dans les fourures des maçonneries et ceux utilisés dans les parements. Les fourures sont constitués d'éléments de toutes tailles, informes et de nature très diversifiée. Les éléments de parement semblent sélectionnés pour leur capacité à prendre la taille, ceux des fourures semblent en revanche être utilisés pour leur capacité à combler le volume interne du mur tout en remplissant leur rôle structural. La taille des moellons utilisés rend l'usage des matériaux locaux possible pour cette partie des bâtiments.

Les **éléments de soutènement**, principalement représentés par des éléments de colonnes (base, tambour et chapiteaux), mais aussi par leurs bases et dés (Figure II-53). Ces éléments constituent leur jonction avec le sol et leur sont par conséquent indissociables.

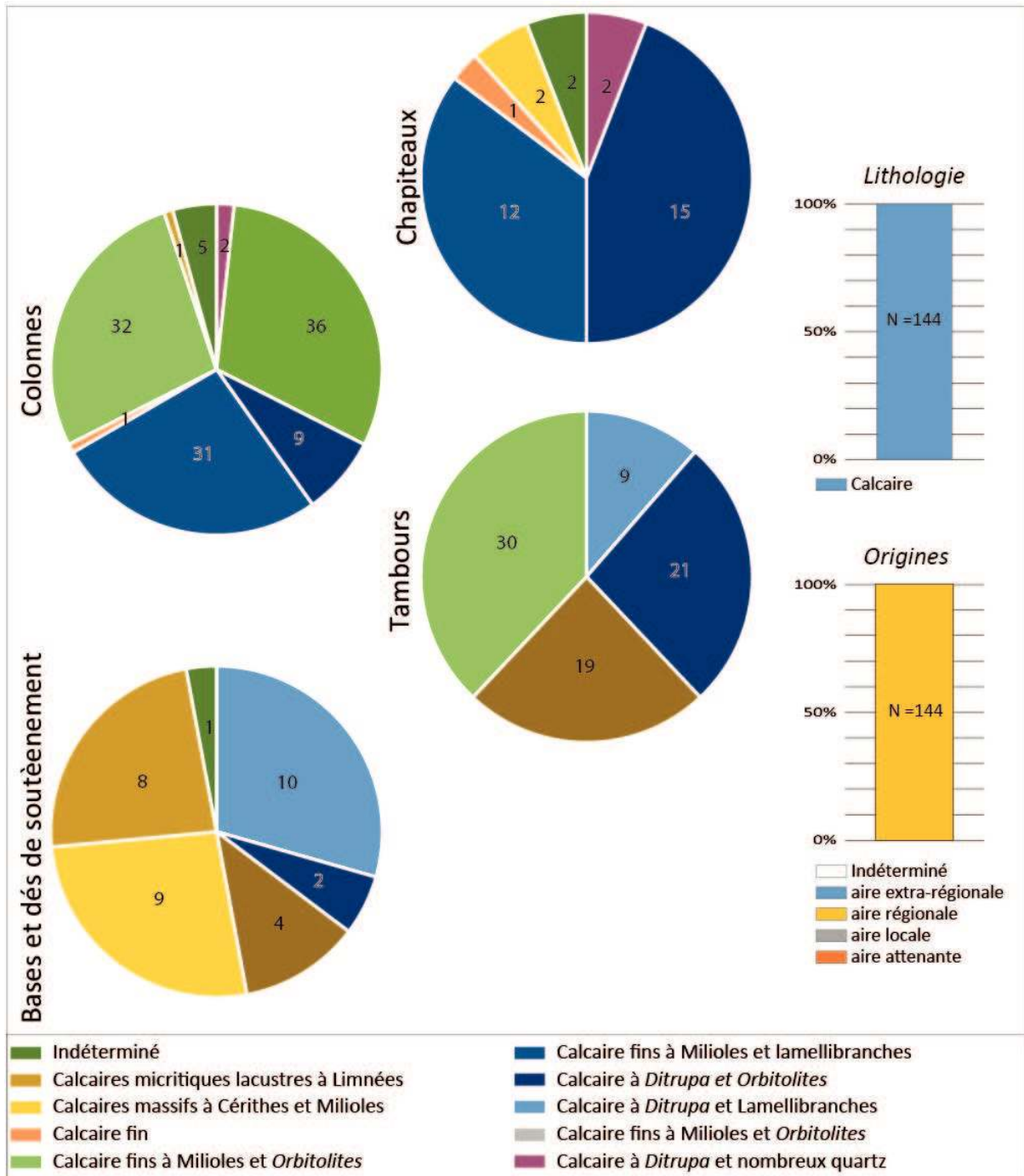


Figure II-53. Répartition en proportion et origines des matériaux des éléments de soutènement des grands bâtiments publics.

Ces éléments sont tous de nature calcaire importée depuis l'aire régionale. Leur provenance très homogène cache en revanche une importante diversité avec des assemblages de faciès particuliers d'une catégorie à l'autre. Les bases et dés, éléments basaux des colonnes sont majoritairement constituées de calcaires à milioles et de calcaires lacustres du Lutétien supérieur. Ils sont complétés par des calcaires à *Ditrupa* dont deux variantes différentes ont été identifiées (faciès à lamellibranches ou à *Orbitolites*) toutes issues de la partie inférieure du Lutétien moyen.

Les **tambours de colonnes** qui constituent leurs élévations présentent des faciès bien plus homogènes, majoritairement représentés par les calcaires fins à milioles et *Orbitolites* (dont différentes variantes de faciès sont représentées) et des éléments de calcaires tendres à *Ditrupa* (principalement des faciès à *Ostrea* ou encore à *Orbitolites* ; Figure II-53).

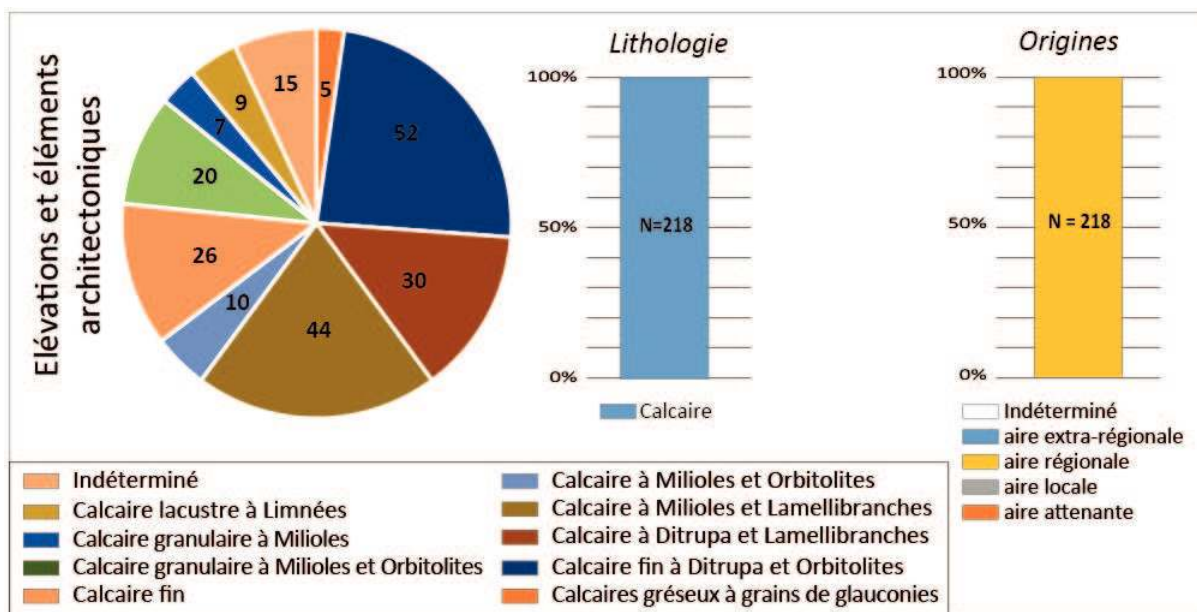


Figure II-54. Répartition en proportion et origines des matériaux des éléments d'élévations et des éléments architectoniques

Pour les **chapiteaux** de colonnes, les faciès observés sont encore plus homogènes puisqu'il s'agit de deux ensembles avec très peu de variantes de faciès (Figure II-53). Les chapiteaux sont donc à parts égales constitués de calcaires fins à *Ditrupa* et *Orbitolites* et de calcaires fins à milioles. Cette subdivision très nette illustre que pour cet élément architectural, très peu de matériaux semblent être privilégiés par les maçons et les sculpteurs. Il n'est néanmoins pas exclu que les éléments de cette catégorie soient in fine issus du démantèlement d'un nombre limité d'édifices qui renvoient une image très homogène.

Les **éléments d'élévation et architectoniques** sont majoritairement représentés par des éléments composants les murs des bâtiments et pouvant comporter des décors. Ces grands bâtiments respectent les canons de l'architecture romaine et sont érigés à partir de blocs de grand appareil quadrangulaires. Cette modalité de construction a été confirmée par les études d'archéologie du bâti réalisées dans les différents sites connus à ce jour (Brunet-Gaston 2008). C'est dans cette catégorie qu'ont été intégrés les blocs du « Cénotaphe des Dieux Mânes de la jeunesse » (cf Chapitre I 3.7.2, page I-89 ; Figure I-46). En l'absence d'une catégorisation architecturale précise permettant de les intégrer plus finement à un registre architectural, ces éléments sont intégrés aux blocs utilisés dans les élévations des bâtiments.

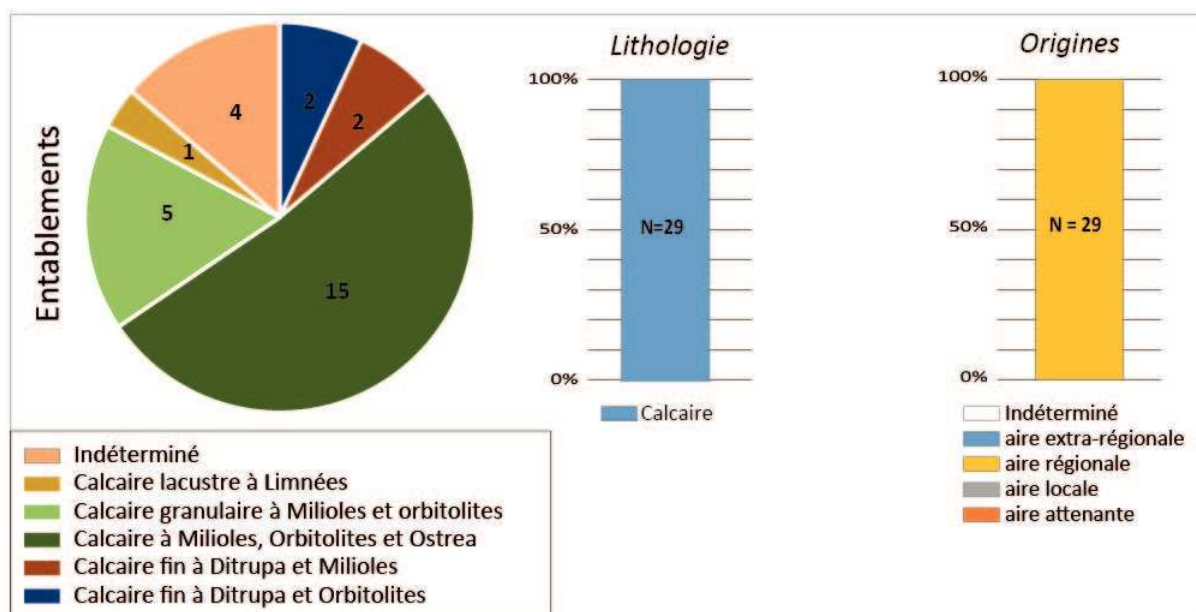


Figure II-55. Répartition en proportion et origines des matériaux des éléments d'entablements des grands bâtiments publics

Comme pour les catégories précédentes, ce corpus est composé exclusivement de calcaires importés depuis l'aire régionale et toujours depuis les plateaux du Soissonnais (Figure II-54). Ces calcaires présentent des faciès très diversifiés, mais arborent comme principale caractéristique d'être majoritairement issus des calcaires fins et poreux du Lutétien moyen qui incluent le banc à vérins. Ainsi, la majorité des blocs observés sont constitués de calcaires à *Ditrupa* contenant soit des *Orbitolites* soit à *Ostrea* ou encore des calcaires à milioles à lamelibranches ou à *Orbitolites*. Ces derniers sont complétés dans une moindre mesure par des calcaires granulaires à milioles (et *Orbitolites*) du Lutétien supérieur et de quelques blocs de calcaires fins. La présence de quelques blocs de calcaires micritiques lacustres semble être ici une anomalie. Cependant il n'est pas possible d'exclure que ces calcaires aient été occasionnellement utilisés dans les élévations des bâtiments afin de répondre à une exigence ponctuelle.

Les **corniches et éléments d'entablement**, plus rares sont également caractérisés par une grande homogénéité à la fois de provenance et de nature. Ils sont intégralement représentés par des blocs de calcaires issus de l'aire d'approvisionnement régionale (Figure II-55). Les faciès sont des pierres sont en revanche plus diversifiées. Le corpus est dominé par les Calcaires à milioles avec plusieurs faciès appartenant au Lutétien supérieur. Il s'agit donc de calcaires à milioles et *Orbitolites* avec ou sans *Ostrea*.

Un élément de calcaire à Limnée a également été observé, cependant sa présence semble représenter une anomalie en raison de la meilleure adaptation de ce faciès aux soubassements (à la vue de sa fréquence d'apparition dans cette catégorie). Ces faciès sont complétés par des calcaires tendres à *Ditrupa* (à *Orbitolites* ou à Milioles). Les matériaux engagés dans les entablements sont donc finalement caractérisés par une homogénéité importante des faciès et des provenances qu'il conviendrait probablement d'analyser au sein d'un même bâtiment. Le corpus est constitué en grande majorité d'éléments de remploi trouvés en position secondaire. Il ne permet donc pas de proposer l'attribution d'un calcaire en particulier à un édifice spécifique et encore moins d'affiner leurs usages dans du registre architectural.

En synthèse, les matériaux engagés dans ce type d'architecture sont présentés au sein de la figure suivante (Figure II-56) en fonction de leurs usages. Pour les grands bâtiments publics de l'agglomération et leurs équipements/parures, les matériaux de l'architecture sont largement dominés par les calcaires issus des affleurements de l'aire régionale. Cette provenance est envisagée depuis le XIXe siècle pour ces matériaux qui était alors attribué aux « calcaires de Coligis », localité située au cœur des plateaux Soissonnais et laonnois. L'exploitation de ces calcaires est réalisée sur l'ensemble de leur épaisseur, depuis leur partie inférieure (calcaires gréseux de la glauconie grossière) jusqu'à leur sommet y compris les dépôts de calcaires lacustres du Cénozoïque. L'usage de chaque banc est alors rationalisé en fonction de ses propriétés intrinsèques. Il est également probable que les caractéristiques dimensionnelles des bancs influent également sur leurs usages. L'exploitation du corpus d'éléments lapidaires en mettant en regard de leur nature lithologique et leurs positions architecturales a également mis en relief leur utilisation très optimisée. L'adaptation des canons architecturaux pour les soubassements des grands édifices d'une part fait apparaître une volonté de privilégier les matériaux locaux pour ces parties des édifices qui, éventuellement plaquées ou enduites, peuvent aisément être soustraites aux regards. En revanche, pour certaines substructions et surtout pour toutes les élévations la construction en grand appareil quadrangulaire semble être incontournable. Cette nécessité, avant tout symbolique de marquer la puissance publique et ostentatoire afin de projeter une image de richesse de l'agglomération, se répercute sur les matériaux utilisés de plusieurs manières. Le mode d'assemblage choisi nécessite des blocs de grande dimension et donc des contraintes stratonomiques fortes pour les carrières dont ils sont extraits. L'absence de matériaux répondant à cette contrainte dans l'aire locale a encouragé l'approvisionnement dans le secteur du Soissonnais en raison de la préexistence d'exploitations sur ces sites et des liens sociopolitiques qui liaient Rèmes et Suessions.

Les éléments architecturaux qui forment le vocabulaire architectural de ces bâtiments présents des assemblages de matériaux dans l'ensemble proches les uns des autres, mais qui dans le détail constituent des ensembles cohérents. Les soubassements et les dés, jonction des éléments avec le sol, sont érigés à l'aide de calcaires massifs, denses et présentant des propriétés hydriques intéressantes (peu poreux et peu capillaires (Turmel 2014 ; Turmel *et al.* 2014 ; Fronteau *et al.* 2014). Pour les élévations, les constructeurs ont privilégié les calcaires fins, du Lutétien moyen au sein desquels plusieurs faciès s'expriment. Les éléments de soutènement sont constitués de calcaires fins assez similaires à ceux des élévations. Les chapiteaux enfin sont constitués de calcaires très fins à *Ditrupa* ou à milioles apparemment sélectionnés pour leur facilité de mise en forme. Pour les éléments d'entablement et de couronnement des édifices, les calcaires utilisés apparaissent là aussi très homogènes et semblent privilégier l'utilisation de matériaux très granulaires avec de très intéressantes propriétés vis-à-vis des transferts hydriques qui leur confèrent une grande durabilité (Turmel 2014 ; Turmel *et al.* 2014)

Toutefois, il existe une exception notable à ce qui se dessine comme une règle générale pour les grands bâtiments publics de l'agglomération. Celle-ci a été observée pour le temple à base octogonale de la rue Lecointre (cf Chapitre I.3.7.6 ; Figure I-55 ; Péchart et Arnaud 2014). Les substructures de cet édifice, bien que totalement récupérées, ont été reconstituées sous la forme de blocs de grand appareil ce qui laisse entendre que des bâtiments publics de cette dimension ou organisés sur ce plan, sont fondés et érigés intégralement en grand appareil. On peut alors raisonnablement supposer que ces blocs soient également issus des affleurements de calcaires lutétiens de l'aire d'approvisionnement régionale (secteur du chemin des Dames).

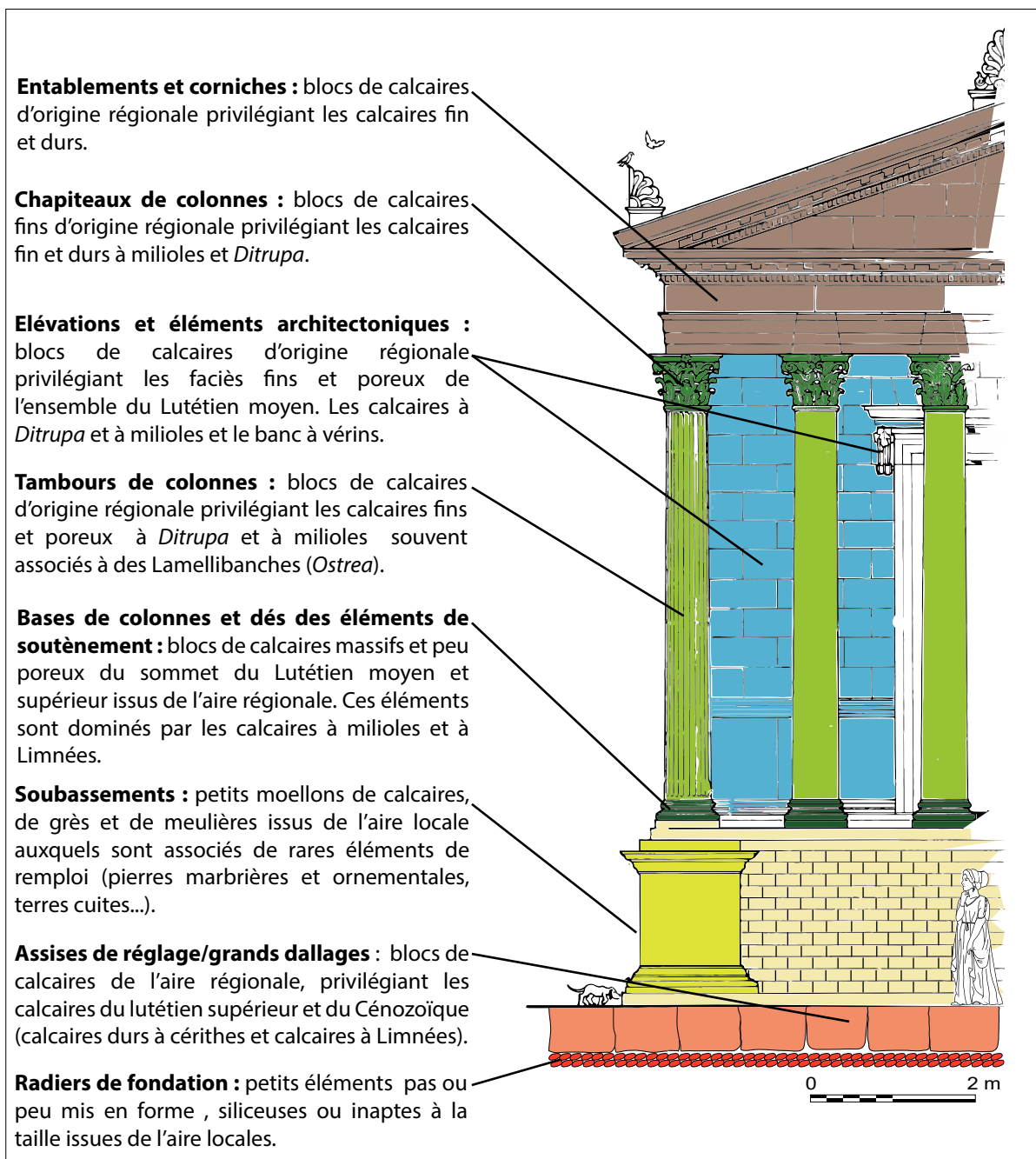


Figure II-56. Synthèse des matériaux mis en œuvre dans la construction des grands bâtiments publics de *Durocortorum* (modifié d'après Adam, 1984)



### 3.2.5. Les éléments iconographiques et de décors

Les blocs appartenant à cette catégorie sont issus majoritairement de l'étude des collections du Musée Saint-Rémi (Figure II-25 Point 3, Figure II-57). Les éléments de décors de l'agglomération sont extrêmement rares dans l'enregistrement archéologique. Dans le corpus réuni dans le cadre de ce travail cela se résume à 7 blocs en tout donc uniquement deux représentants de la statuaire. Cette rareté s'explique en partie par la forte dégradation de certaines pièces de mobiliers (passage au feu, présence d'enduit) ou encore par l'inaccessibilité d'autres pièces exposées en vitrines. Brunet-Gaston (2008) signale par ailleurs l'existence d'autre pièce de mobilier similaire, mais celles-ci ne comportent qu'une étude de matériaux sommaire.

Très peu nombreux et donc probablement bien peu représentatifs de ce qu'étaient les éléments de décors antiques et encore moins représentatifs des matériaux avec lesquels ils étaient bâti, ces blocs sont néanmoins présentés ici sans toutefois qu'il ne soit raisonnable d'en étendre les conclusions. Ces éléments, tous en calcaires, sont représentés par trois grands ensembles de faciès. Ces faciès proviennent tous des affleurements lutétiens des plateaux du Soissonnais et du Laonnois, donc importés de l'aire d'approvisionnement régionale : les calcaires lacustres à Limnées, les calcaires à milioles (de différents faciès) et des calcaires tendres à *Ditrupa*. Si les deux premiers ensembles de faciès sont utilisés pour les piédestaux les stèles et les bornes, les calcaires à *Ditrupa* sont utilisés pour la statuaire (Tête de Mercure).

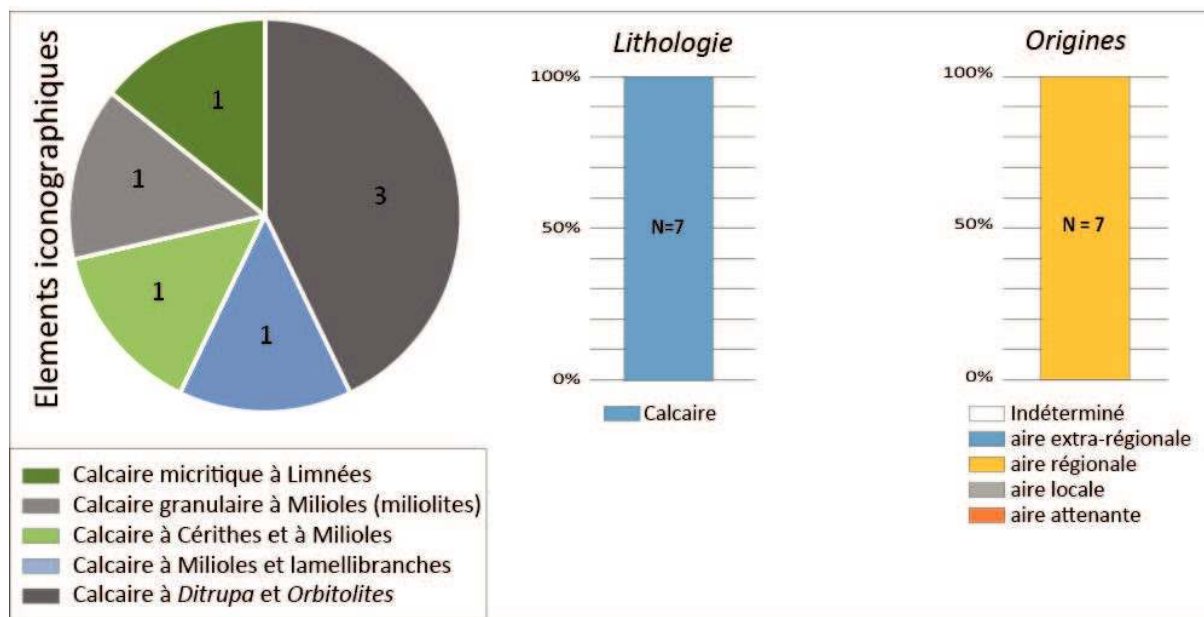


Figure II-57. Répartition en proportion et origines des calcaires de construction des éléments iconographiques et de décors

### 3.2.6. La parure urbaine de la ville : les arcs monumentaux

L'arc monumental dit « Porte de Mars » (Figure I-51, Figure I-52 et Figure II-25 point 1), unique représentant encore en élévation des quatre arcs qui flanquaient le centre urbain antique a fait l'objet d'une étude spécifique de ses matériaux, est présentée dans le chapitre suivant. Cependant, il existe un autre représentant de ces monuments complètement ruiné. Il s'agit de la Porte Bazée, homologue de la Porte de Mars sur la section sud du *Cardo* antique dont l'accès n'a cependant pas été possible en raison de travaux dans son voisinage immédiat.

### 3.3. Synthèse

Ce chapitre a commencé avec le tableau figurant la liste simplifiée des matériaux en fonction de leur emploi de construction (Tableau II-1 ; Fronteau *et al.* 2019), c'est donc naturellement que celui-ci est clos avec un tableau de synthèse récapitulant les utilisations des matériaux lithiques et lapidaires dans les constructions antiques de *Durocortorum*. Cette synthèse a été établie à partir des observations et descriptions menées lors de fouilles récentes, mais aussi dans les collections du musée d'archéologie de la ville et enfin à partir des études de matériaux antérieures. Elle s'est également appuyée sur l'inventaire des matériaux lithiques utilisables dans la construction et disponibles pour approvisionner les chantiers de la ville. Le tableau suivant apporte ce regard synthétique sur les usages de ces matériaux au sein d'un spectre très large de contexte architectural (Tableau II-8).

Architecture	Positions architecturales	Modalités d'assemblages	Matériaux	Homogénéité d'approvisionnement	Provenance /Aire		
Privée	Habitats	Apparat et marqueur social	Éléments de soutènements	Grand appareil	Calcaires lutétiens	Assez homogène	Régionale
		Éléments architectoniques	Grand appareil	Calcaires lutétiens	Assez homogène	Locale et régionale	
		Placages et roches décoratives	Placage et autres	Pierres marbrières d'origine métamorphique ou plutonique	inconnu	Extrarégionale	
		Éléments de confort	Variables — <i>Opus testaceum</i>	Éléments de terres cuites production locale	Homogène	Locale	
	Élévations	Petit appareil de briques de terre crue	Carreaux de terre	Homogène	In situ — attenante		
	Soubassement	Petit moellon avec divers degrés de mise en forme	Pierres à moellons (calcaires, grès, craie dans certaines caves, meulières...)	Hétérogène	Locale		
	Substructures						
	Fondations (radiers)	Hérisson	Pierres meulières et pierres faiblement taillables	Homogène			
Architecture funéraire	Grand appareil	Calcaires lutétiens	Homogène	Régionale			
Publique	Bâtiments publics	Entablements et Corniches	Calcaires lutétiens	Grand appareil	Calcaires fins et poreux	Homogène	Régionale
		Élévations et éléments architectoniques					
		Soutènements (colonnes et piliers)					
		Base et dés					
	Substructures et soubassements	Petit appareil	Pierres à moellons (calcaires, grès, meulières...)	Hétérogène	Locaux		
	Assises de réglage	Grand appareil	Calcaires lutétiens	Grand appareil	Régionale		
	Fondations radiaires	Hérisson	Matériaux siliceux ou impropres à la taille	Assez homogène	Locale		
	Éléments iconographiques et décoratifs urbains	Grand appareil	Calcaires lutétiens	Grand appareil et sans objets	Régionale		
	Grands équipements techniques	Dalles du <i>Specus et des bassins de décantation</i>	Dalles dimensionnées spécifiquement pour cet usage	Calcaires lutétiens	Inconnu	Régionale	
		Voûtes	<i>Opus caementicium</i>	Pierres meulières et pierres faiblement taillables	Homogène	Locale	
Piédroit		<i>Opus caementicium et opus testaceum</i>	Pierres meulières, pierres faiblement taillables et briques	Homogène	Locale		
Radiers		<i>Opus caementicium</i>	Pierres meulières et pierres faiblement taillables	Homogène	Locale		
Aménagements hydrauliques urbains	Grand appareil	Calcaires lutétiens massifs	Homogène	Régionale			

Tableau II-8. Synthèse des matériaux de construction du bâti antique de *Durocortorum*

## 4. Conclusions partielles

La situation particulière de l'agglomération de *Durocortorum*, au carrefour des grandes voies régionales, lui ouvre un accès à de nombreuses ressources naturelles et en particulier à une grande variété de matériaux de construction. Cette situation permet de dépasser un certain déterminisme géologique régional qui semble au premier abord assez peu favorable à la pleine expression d'une culture de bâtisseurs centrés sur la pierre. Cette localisation semble avoir au contraire permis l'expression d'une grande diversité dans les matériaux employés, eux-mêmes issus de plusieurs types d'environnements. Ces derniers se déclinent depuis les plaines crayeuses jusqu'aux coiffes des plateaux et des « Monts » et enfin des flancs des plateaux cénozoïques qui dominent la ville. Ces contraintes héritées du choix du lieu d'implantation de la ville protohistorique qui semblait alors propice en raison de la disponibilité des matériaux adaptés à la mise en œuvre dans l'architecture vernaculaire ont, par la suite, fait peser une contrainte d'approvisionnement à l'occasion d'une évolution des paradigmes de la construction qui s'exprime avec **l'explosion de l'utilisation de la pierre et son utilisation devenue préférentielle au cours de l'Antiquité.**

L'étude d'un corpus couvrant le spectre des modalités architecturales disponibles dans l'agglomération en complément de la constitution d'un inventaire des matériaux utilisés pendant l'Antiquité pour la construction démontre que, très rapidement, plusieurs comportements et stratégies d'approvisionnement ont été mis en place, mais la perception de leurs successions temporelles précises reste difficile à éclaircir :

- **L'usage très optimisé des matériaux disponibles *in situ* et localement** avec en particulier l'exemple de la craie et de ses diverses formes d'altérations. Toutes les formes de ce matériau font l'objet d'une application qui leur semble spécifique. L'utilisation des limons crayeux et des colluvions crayeuses (graveluches) dans la conception des carreaux de terre ou encore de la craie fracturée disponible en surface pour les empièvements ou les remblais à l'intérieur des grandes maçonneries et enfin le débit de moellons dans les blocs de craie plus massive en sont de très bons exemples ;
- La fourniture en **moellons est réalisée depuis l'ensemble de la périphérie de l'agglomération**, en privilégiant toutefois des zones d'extraction localisées dans un large secteur compris entre le sud et l'ouest de la ville. Pour cet usage, différentes modalités d'exploitations des ressources sont identifiées avec d'une part des **extractions en carrières de pierres ou de matériaux meubles** (calcaires à *Ditrupa*, calcaires continentaux, grès quartzites, argiles, terres à foulon...) et d'autre part le recours à des pratiques de collectes de matériaux à la surface des terrains. Cette seconde modalité qui pourrait apparaître comme plus opportuniste concerne essentiellement des matériaux pour lesquels l'usage ne nécessite pas ou peu de mise en forme ou destinés à des constructions pour lesquelles les qualités esthétiques ne sont pas ou peu requises (à l'image de blocs erratiques de grès-quartzitiques, des galets de silex thanétiens ou encore d'une partie des pierres meulières aux arêtes émoussées) ;
- Les estimations des quantités de pierres employées dans les constructions examinées présupposent qu'afin de réaliser leur extraction aient été ouvertes de **très grandes carrières de pierres de taille calcaires afin d'approvisionner l'agglomération en éléments de grand module** (dalle de base de l'aqueduc, grands monuments, stèles funéraires, etc.). Dans la construction en grand appareil quadrangulaire et pour les éléments d'apparat,

ce sont des calcaires poreux du Lutétien moyen et des calcaires un peu plus résistants du Lutétien supérieur n'existant pas dans le périmètre proche de l'agglomération qui sont importés depuis les plateaux du Soissonnais et du Laonnois. Ces grandes exploitations devaient également être adossées à des réseaux logistiques extrêmement performants capables d'approvisionner les différents chantiers en matériaux correspondant aux besoins exprimés par les constructeurs. La présence de ces exploitations est par ailleurs déjà documentée pour les périodes laténiennes (La Tène D ; Pommepuy 1999 ; Buchsenschutz *et al.* 2017) où elles ont fourni de très nombreuses meules rotatives destinées à la mouture du grain. Cet aspect en particulier pourrait tendre à relativiser l'habituelle notion d'acculturation/romanisation avec l'utilisation spécifique de la pierre à partir de la Conquête. Cela semble en revanche se vérifier pour les couvertures de *tegulae* et plus largement de l'emploi des terres cuites architecturales.

**Les importations de pierres issues de l'aire extrarégionale** dont le commerce et le transport ont accompagné l'expression des besoins de confort et d'ostentation. Pour les macro-outillages lithiques en revanche la question d'une adaptation à une évolution technique spécifique se pose également à l'image de ce qui a été constaté pour les outils de mouture. L'évolution des disponibilités que cela soit sur des critères techniques d'accessibilité à une ressource ou sur des critères sociopolitiques voire économiques. Pour l'ensemble de la période, les apparitions de nouvelles demandes en pierre ainsi que l'évolution des disponibilités en fonction des contextes socio-économiques et politiques sont également sensibles à l'échelle de la cité, en particulier lors de la transition entre le Haut Empire et la période Tardo-antique. C'est en particulier lors de cette période que l'expression des besoins en matériaux est progressivement passée d'un pôle centré sur des échanges distants depuis des sites carriers vers un modèle de recyclage et de remploi des matériaux *in situ* ou dans le voisinage immédiat. Ce constat se vérifie également avec les pierres décoratives marbrières ou encore avec le macro-outillage lithique beaucoup plus influencé par les évolutions techniques, les effets de modes ou encore les évolutions commerciales. Pour ces deux types de matériaux, les échanges sont réalisés à l'échelle de l'Europe de l'Ouest (Massif ardennais, l'Allemagne, l'Île-de-France...) et englobe également l'aire Périméditerranéenne.

Le remplacement dans la construction des modalités de construction laténienne par les modalités architecturales romaines privilégiaient l'utilisation la pierre et la terre cuite (dans ses canons) s'est accomplie en même temps que prenait corps une **connaissance empirique fine des matériaux de construction depuis leur extraction jusqu'à leur utilisation**. Si ce savoir a probablement été nourri de l'expérience de populations et d'artisans romains ou encore des troupes du génie des légions de l'Empire, il semble néanmoins que ce savoir était déjà présent. Ce développement technique serait apparu très tôt puisque les traces de son application apparaissent très rapidement après l'établissement de l'agglomération. Ces savoirs sont peut-être antérieurs à l'Empire puisqu'à l'époque de la fondation de l'agglomération l'extraction de pierres était documentée régionalement avec une remarquable adéquation entre faciès et utilisation (Pommepuy 1999 ; Buchsenschutz, *et al.* 2017).

À titre d'exemple, ce savoir prend corps avec le constat que les **matériaux sont très spécifiquement mis en œuvre dans des positions et des modes architecturaux bien déterminés**. Il en découle une utilisation très rationnelle des matériaux lithiques afin de tenter de tirer le meilleur parti de leurs caractéristiques intrinsèques, vis-à-vis des transferts hydriques et de leurs capacités à être mis en forme (ouvrabilité). L'exemple le plus précis est l'utilisation des pierres meulières et des calcaires siliceux dans les radiers de fondation, dans les

soubassements ou encore dans les piédroits de l'aqueduc. Les constructeurs tirent donc parti de l'aspect non capillaire de ces matériaux, bien que ces derniers nécessitent un transport depuis l'aire locale. Les soubassements des murs bahuts sont constitués de moellons soit calcaires soit de grès issus de cette même aire. De même, les matériaux nécessaires au grand appareil ou à destination de l'architecture funéraire, portant une fonction symbolique forte (en plus de l'aspect structurel pour les éléments de soutènement), sont tous issus des dépôts de calcaires lutétiens des plateaux du Laonnois et du Soissonnais. Enfin, les matériaux lapidaires adaptés à une utilisation en contexte hydraulique sont également issus des affleurements du Soissonnais et sont représentés par des calcaires massifs à milioles. Ces derniers étant également proches de ceux utilisés pour les soubassements et les socles des grands édifices publics. Il semble que le remploi des matériaux dans un usage spécifique ait débouché sur une sélection des pierres au sein d'un stock préalablement constitué, en fonction des caractéristiques intrinsèques des pierres. Ce choix se faisant d'une part pour satisfaire aux critères de leur (ré)utilisation, mais aussi probablement sur des critères de modules des éléments. Cette caractéristique se perçoit particulièrement dans l'utilisation qui a été faite des stèles funéraires des puits de la Rue Belin.

### CHAPITRE III : ÉTUDE DE CAS : LA PORTE DE MARS



Maquette numérique 3D obtenue par photogrammétrie de la  
Porte de Mars, Reims

« En pareil cas, il ne faut pas prétendre faire bien,  
ne pas faire mal est déjà beaucoup »

*Prosper Mérimée*  
(1803-1870)



Ce chapitre est consacré à l'étude de la Porte de Mars, l'un des deux seuls monuments antiques encore en élévation dans la ville de Reims, mais aussi l'un de ses monuments emblématiques. Après une présentation et un historique du monument, les méthodes utilisées pour le documenter et l'étudier seront présentées. Puis les pierres de construction de l'édifice ainsi que les matériaux de restaurations seront identifiés et catégorisés. Le constat des dégradations présentes sur les façades du bâtiment sera suivi de la caractérisation pétrophysique des principaux matériaux en œuvre et d'équivalents probables aux pierres de l'édifice, issus de prélèvements sur le terrain. Ces caractérisations permettront d'une part d'explorer les critères rationnels de leur usage et d'autre part d'argumenter l'évaluation de la susceptibilité des matériaux vis-à-vis de l'environnement.

## 1. L'historique de la Porte de Mars

### 1.1. Présentation du monument dans son contexte actuel

L'arc dit « Porte de Mars » de Reims est un arc monumental à trois baies situé dans le centre de la ville moderne (Figure III-1, Figure I-46). Il est constitué de trois très hautes arcades (9,67 m, 10,62 m et 9,66 m.) aux voûtes décorées qui prennent appui sur quatre pylônes. Chacun d'entre eux est composé d'une base qui forme le socle des élévations portant de nombreuses niches et bas-reliefs. Les façades de chaque pilier sont flanquées de colonnes engagées sur le tiers de leur volume dans les façades (Lefèvre *et al.* 1985). La maçonnerie des élévations est constituée de 19 assises de calcaires de grand appareil quadrangulaire (*opus quadratum*) pseudo-isodome<sup>50</sup> assemblées à joints vifs c'est-à-dire sans liant (Brunet-Gaston *et al.* 2020). Les blocs étaient initialement solidarités par des agrafes de fer scellées au plomb avant que la plupart d'entre elles ne soient l'objet d'une récupération assez agressive (trous de prédatons). Les hauteurs des assises varient entre 40 cm à 75 cm en fonction de la position architecturale occupée dans l'arc en réponse aux contraintes structurales et stylistiques. L'absence de l'entablement et de l'attique du monument, disparus à une date non précisément définie faute de source fiable, ne permet pas de savoir de quelle manière ces deux éléments participaient à la composition géométrique globale de l'édifice (Brunet-Gaston *et al.* 2020). La restitution de son aspect original complet n'est donc qu'hypothétique.

Depuis son édification, le monument a connu de nombreuses modifications et destructions partielles. Entre le XIX<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> siècle, les restaurations successives ont engagé plusieurs architectes qui ont eu recours à des techniques et des matériaux très différents à la fois entre eux, mais également de ceux de l'Antiquité.

### 1.2. Sa construction au III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C.

L'Arc a été érigé au cours du premier quart du III<sup>e</sup> siècle ap. J.-C., sur le tracé du *Cardo maximus* de la ville antique à proximité immédiate d'un carrefour avec un *Decumanus*

50 Un appareil rectangulaire pseudo-isodome se caractérise par des assises de hauteur inégales, mais avec un rythme d'alternance régulier ; les blocs sont de longueurs égales ou liées par un rapport simple. Si les blocs sont de longueur inégale, l'appareil est alors qualifié d'assemblage pseudo-isodome imparfait (Ginouès *et al.* 1985).





Figure III-1. Vue générale de la Façade Nord de la Porte de Mars

(cf chapitre I-42). La présence de ce carrefour est déduite d'après les fouilles du Boulevard Joffre (Balmelle *et al.* 1988) et confortée par les fouilles récentes (Bontrond 2018). L'étude archéologique la plus récente menée sur l'édifice (Brunet-Gaston *et al.* 2020), souligne que ce dernier représente un monument unique dans le répertoire des arcs antiques du monde romain. Il présente cependant des critères communs avec d'autres bâtiments tels que la porte du forum de Trajan, ou avec l'arc de Caracalla à Volubilis (Figure III-2 ; Picard 1974) dont il serait synchrone.

Les premières modifications de l'édifice dont les traces sont encore visibles interviendront lors de l'édification du rempart tardo-antique.



Figure III-2. Vue de la façade orientale de l'Arc de Caracalla à Volubilis, Tunisie (Domergue 1963)

### 1.3. Son intégration au système défensif tardo-antique

Au début du IV<sup>e</sup> siècle ap. J.-C., la Porte de Mars comme ses trois homologues est intégrée au rempart alors que simultanément la ville se contracte derrière celui-ci (cf Chapitre I). Les maçonneries de la muraille s'appuient alors sur les monuments antérieurs (cf illustration de la reconstruction de la Porte Bazée tardo-antique) et les bâtiments voisins sont détruits pour aménager un chemin de ronde (Neiss et Sindonino 2004). Les baies restent néanmoins ouvertes afin d'autoriser la circulation entre la ville et l'extérieur.

Cependant, pour la Porte de Mars, Bontrond *et al* (2015) mentionnent qu'aucun vestige permettant de préciser les relations de la Porte de Mars avec la muraille n'a été mis au jour au cours des fouilles menées en 2013. Il est cependant probable que les restes du soubassement de cet aménagement aient subsisté au droit de la façade est de l'Arc (Neiss et Sindonino 2004). L'existence sur certaines représentations d'au moins une tour latérale à la porte (Figure I-57) n'est néanmoins pas démontrée par de quelconques découvertes archéologiques récentes. Cependant, N. Brunette (1861) mentionne la découverte de reliefs de construction antiques dans les soubassements d'une tour à proximité du monument.

L'absence de certitude quant à la présence d'un tel aménagement adossé à l'Arc et de traces perceptibles d'une liaison physique entre la porte et l'enceinte ne nous permettent pas de préciser l'impact qu'aurait eu la fortification sur les maçonneries du monument.

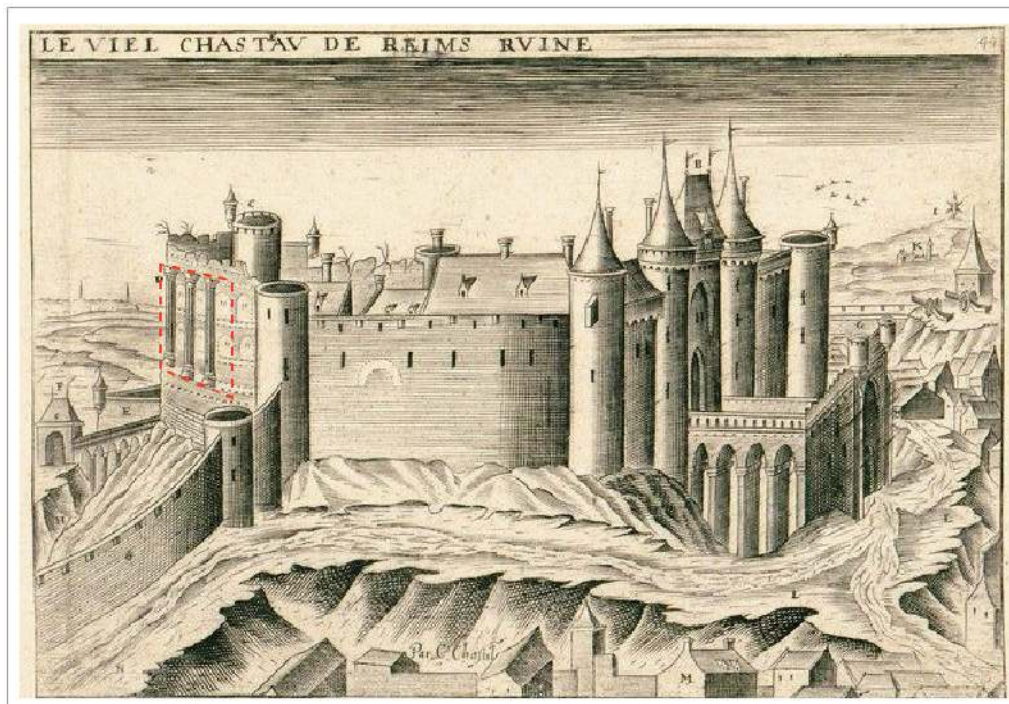


Figure III-3. Les ruines du château des Archevêques vers 1595 où on distingue ce qui serait la Porte de Mars insérée dans l'enceinte castrale « *Le viel chastav de Reims rviné* », Chastillon, BMR 20-008 & 010.

### 1.4. L'intégration au château des Archevêques

Les diverses représentations et mentions dans les textes semblent indiquer que la porte soit restée au moins partiellement dégagée jusqu'au cours du X<sup>e</sup> siècle, date à laquelle Flodoard décrit les décors des voûtes (Flodoart 1824).

L'enceinte tardo-antique dont il n'est plus fait mention semble alors démantelée. Le reste du rempart est formé d'une élévation de 10 m de hauteur constituée de terre et de craie (Bernot 1995 ; Pichard *et al.* 2010). L'arc annexé au rempart est ensuite englobé dans la construction du château des archevêques au XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècle (Figure III-4 ; Tarbé 1844 ; Lefèvre 1980 ; Demouy 2005).



Figure III-4. À. vue de la Porte de Mars, Silvestre, seconde moitié du XVII<sup>e</sup> siècle. L'emprise de la porte est soulignée par le tireté rouge (BMR XXX\_I\_3\_5) ; B. vue de la Porte de Mars à Reims vers 1817-1825, Goblain (BMR XXX\_I\_3\_4).

À partir du XIV<sup>e</sup> siècle, l'accès à la ville se fera exclusivement par d'autres passages et en particulier une nouvelle Porte de Mars décalée de quelques dizaines de mètres vers l'est, en conséquence de quoi les baies de l'arc antique sont alors murées (Tarbé 1844). L'intégration précise de l'arc au château reste assez largement méconnue, car elle n'est représentée qu'à une occasion (Figure III-3).

Cette représentation a par la suite été abondamment copiée et adaptée à de nombreuses reprises avec des degrés de fiabilité discutables si ce n'est fantaisiste (Demouy *et al.* 1985 ; Demouy 2005).

Le château est démilitarisé et abandonné au cours du XIV<sup>e</sup> siècle avant d'être détruit par un incendie en mars 1422 (Tarbé 1844 ; Lefèvre 1974 ; Lefèvre *et al.* 1985). Il ne sera reconstruit que très partiellement par la suite, une grande partie sera laissée ruinée.

### 1.5. L'intégration au rempart médiéval et son dégagement

Au cours du XVI<sup>e</sup> siècle, l'Arc est totalement enfoui et inscrit à l'intérieur d'une nouvelle génération de rempart constituant les fortifications de la partie nord de la ville (Figure III-4 ; Bergier 1622 ; Tarbé 1844 ; Lefèvre 1974). Ses baies resteront murées jusqu'à la destruction des ruines du château des Archevêques au cours desquelles l'arcade orientale fut exhumée. Cette dernière a été transformée en plateforme d'artillerie et une partie aménagée en dépôt de munitions (Bergier 1622 ; Tarbé 1844 ; Brunette 1885).

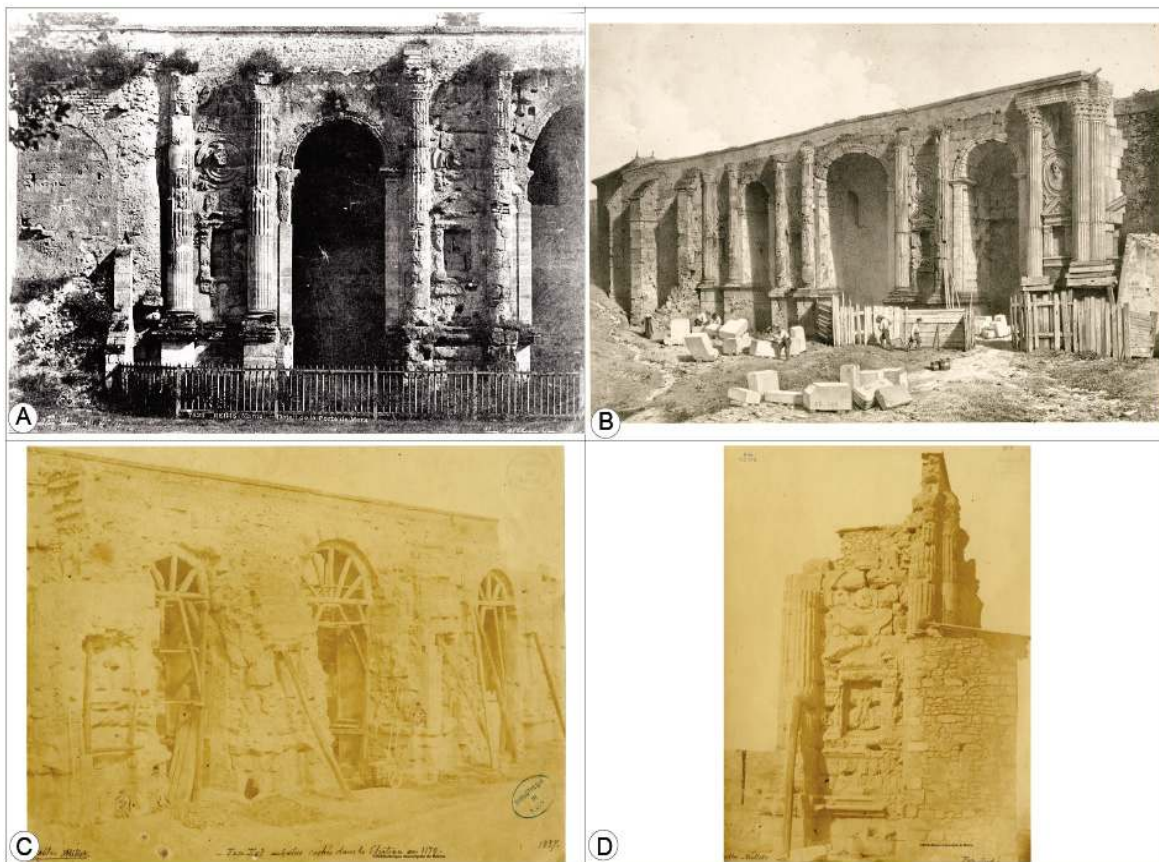


Figure III-5. A. Détail de la partie est de la façade nord de la Porte de Mars (cliché de Martin-Sabon, 1851, ministère de la Culture) ; B. Représentation des travaux de reconstruction de la pile ouest de la Porte de Mars par Brunette en 1844 (Dauzats, 1844, BMR XXX\_I\_4\_51) ; C. Vu de la façade sud en 1858. À l'issue de son dégagement, les maçonneries sont étayées (BMR XXX\_I\_3\_14) ; D. Vue de la façade est en 1857 lors de son dégagement des maçonneries du rempart (BMR XXX\_I\_3\_15).

Le monument restera engagé dans les remparts de la ville jusqu'à leur démantèlement débuté en 1840 (Brunette 1846a). Cependant la façade nord de la Porte, restée plus ou moins apparente par les remblais est accessible. La quantité de terres dans les baies conditionnant leur accessibilité varie sensiblement sur les représentations historiques en lien avec des tentatives ponctuelles de dégagement ou encore de modifications d'aménagements voisins. Avant son dégagement complet, les maçonneries de la Porte encore apparentes dans le rempart ont été concernées par deux campagnes de restaurations.

La volonté des édiles de la ville consistait alors à ouvrir l'espace et offrir des perspectives urbaines au public en décroissant les espaces du centre-ville vers la gare ferroviaire. L'installation de celle-ci se fera de l'autre côté des promenades nouvellement percées (Pichard 2014 ; Fronteau *et al.* 2014).

### 1.6. Les restaurations du XIX<sup>e</sup> siècle

Depuis sa construction l'Arc a connu de nombreuses interventions de nature très diverse qui ont pour certaines d'entre elles laissé une trace importante sur l'édifice. Pendant la période au cours de laquelle la Porte a été intégrée à d'autres bâtiments<sup>51</sup>, celle-ci n'a été marquée que par des travaux ponctuels de dégagement ou d'aménagement. Elle va de nouveau être l'objet de travaux de dégagement et de restaurations dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle. L'Arc redevient à partir de ce moment l'objet central des travaux de confortement, d'abord, puis de restitution d'un état antérieur supposé (Figure III-6). Ces travaux sont entrepris dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, avec les premières opérations de reprise des soubassements et de confortements notables de l'édifice.

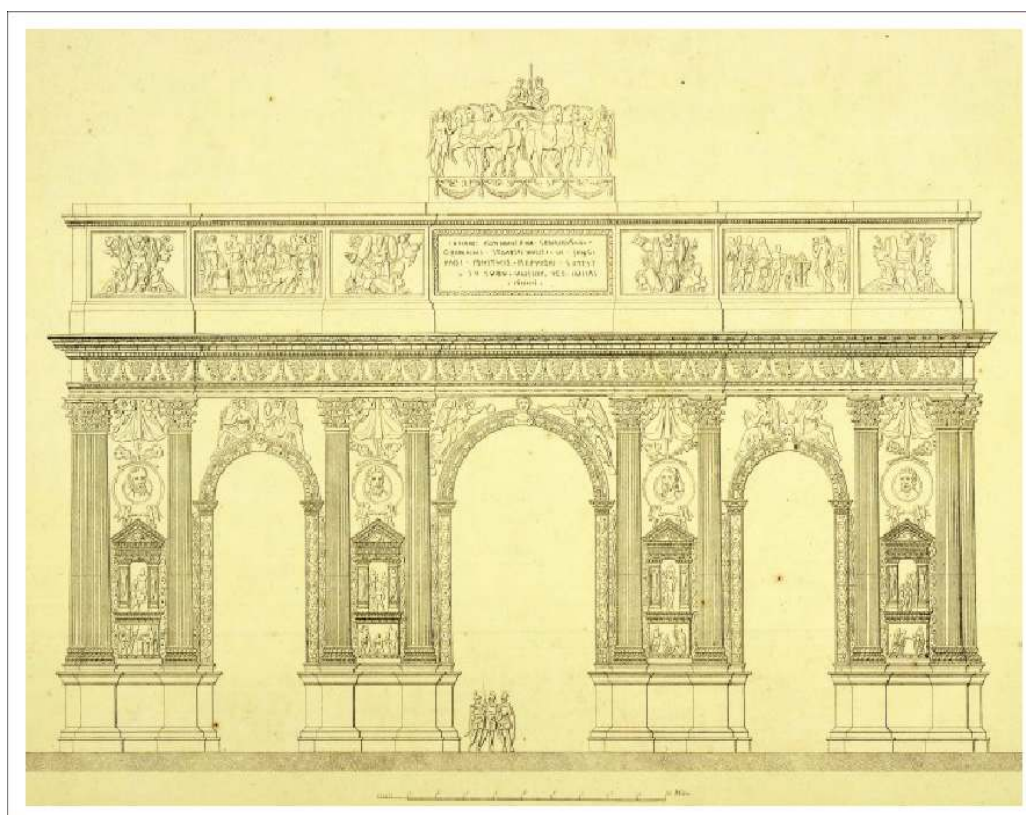


Figure III-6. Proposition de restitution de la Porte de Mars antique par N. Brunette vers 1830 (B.M.R. 22-036)

51 Rempart tardo-antique, fortifications médiévales, château des Archevêques, etc.

Ce n'est qu'à partir du début du XIX<sup>e</sup> siècle que ces travaux peuvent réellement être qualifiés de restaurations puisque ces derniers n'ont plus visé à aménager le monument, mais au contraire à en assurer l'intégrité structurelle si ce n'est sa longévité. Car il faut bien ici parler de longévité et non de pérennité, car celle-ci a été remise en cause avant son classement à l'inventaire national des Monuments historique par Prosper Mérimée en 1840 (Notice des monuments historiques, 1993). Un bilan de ces interventions a été réalisé à l'occasion de l'étude pluridisciplinaire de l'Arc finalisée en 2020 (Brunet-Gaston *et al.* 2020). C'est à partir de cette synthèse qu'ont été extraites les principales phases de restauration du monument synthétisées dans le tableau suivant (Tableau III-1).

Date	Nature des travaux
1804	Reprise en sous œuvre des soubassements (architecte : Serrurier)
1812	Consolidation des soubassements et reprise de deux bases de colonnes par Serrurier, déblaiement de la base des pylones (architecte : Serrurier)
1816-1818	Dégagement des façades et restaurations de l'arcade orientale
1844 -1845	Reconstruction de la pile Ouest et mise en place d'une couverture de béton et d'asphalte (architecte : Brunette)
1856	Construction de contreforts pour le soutènement de l'Arc (Architecte : Millet)
1859	Réparation de la façade sud avec reprise des socles, tympans et colonnes, en emploi de matériaux antiques et en moellons de récupération
1864	Refaction de la couverture en ciment de 1844-1845 par Ouradou, reprise des chapiteau manquants en moellons de Pierre de Savonnière.
1866	Reprise locale de la maçonnerie
1899 -1901	Réfaction de la couverture et reprise de la corniche
1923	Réparation des dommages causés par les impacts de quelques obus sur la façade Nord au cours de la Première Guerre Mondiale
1927	Réfaction des joints au ciment de Portland et réparations mineures (non documentées)
1976 -1979	Réparations ponctuelles de la couverture
1982	Réfaction de la couverture en béton armé, nettoyage et réparation légère du parement et reprise des joints sur les façades.
2016	Réfaction de la couverture de 1982 et purges de blocs fortement dégradés

Tableau III-1. Inventaire synthétique des travaux de restauration réalisé sur le monument depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle

### 1.7. Les avanies du XX<sup>e</sup> siècle

Dégagée du rempart et restituée dans un état lui garantissant une pérennité inenvisageable avant la reconstruction de la façade sud, la Porte ne fut pas longtemps épargnée par les dégradations. À l'image des monuments rémois de l'époque, elle n'a pas traversé le premier conflit mondial sans en connaître les outrages. Les combats et bombardements ont très profondément marqué l'édifice et ses sculptures, fait sauter les enduits et des portions entières de maçonnerie (Figure III-7). Si la majorité des dommages consistent en des impacts ayant causé des arrachements de matière, un autre aspect concerne l'insertion de fragments

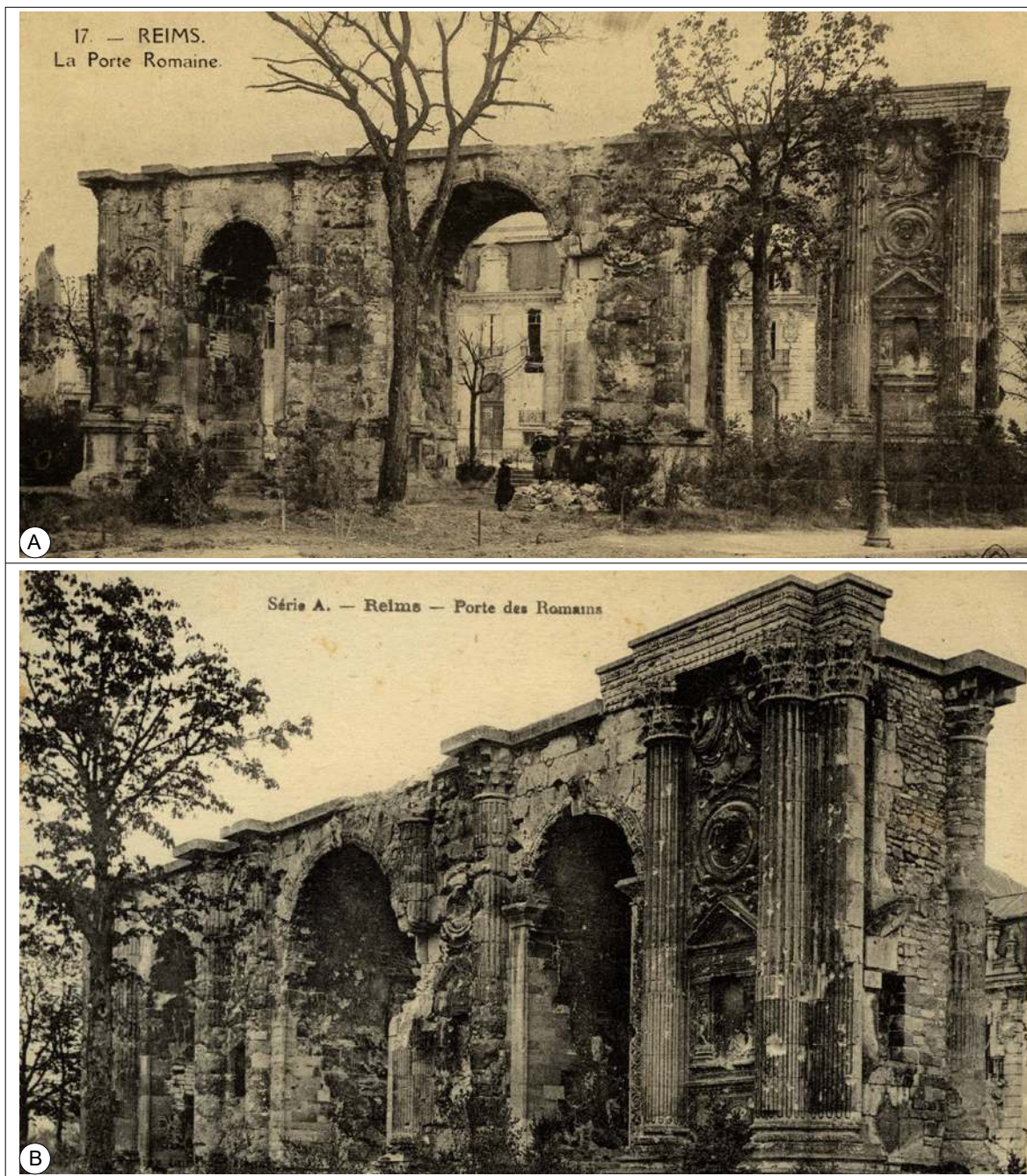


Figure III-7. A et B vus sous différents angles des dégâts infligés au monument pendant la Première Guerre Mondiale. Il s'agit majoritairement d'impacts de projectiles divers que l'on discerne par la marque claire qu'ils ont laissée (Carte postale, anonyme, vers 1918).

métalliques issus des munitions dans et entre les pierres. L'un des plus violents coups portés à l'édifice a causé l'arrachement de grandes portions de maçonnerie dont plusieurs tambours de colonne, d'une portion de piédroit et d'un chapiteau sur la façade nord. Les dégâts qu'aurait subis la façade sud sont bien moins facilement identifiables eu égard à la nature de ses maçonneries en petits moellons.

Les paragraphes précédents mettent en avant une histoire aussi longue que riche en travaux (d'adaptation ou de restauration). Au-delà des aspects historiques, beaucoup d'informations d'ordre structurel ou ornemental peuvent être interrogées dans le cadre de l'étude de ce monument. La hiérarchisation de telles informations au sein d'un support unique suppose l'utilisation d'un outil adapté à cet usage. C'est la construction de cet outil qui sera maintenant décrite.

## **2. Les méthodes de documentation du bâtiment utilisées**

### **2.1. La représentation des données**

La documentation du monument regroupe de nombreuses informations comme les données historiques, les données graphiques et sémantiques de nature diverse. Ces informations d'origine variée devront être collectées et concaténées dans un support permettant leur exploitation dans l'étude du bâti. Le choix et l'alimentation de ce support posent de nombreuses difficultés au premier rang desquelles se placent les choix théoriques et techniques préalables à sa constitution. C'est le détail de ce cheminement qui est présenté dans les pages suivantes.

#### **2.1.1. La représentation et la gestion des informations**

Comment maintenir l'enregistrement de plusieurs degrés d'informations de natures différentes issues de l'étude pluridisciplinaire d'un édifice en élévation ?

En l'absence d'un support géométriquement fiable pour décrire les matériaux d'un monument (relevé architectural, plan de calepinage), il est nécessaire de recourir à une méthode permettant d'en faire le relevé. Pour Maumont (2010), ce relevé consiste en un enregistrement de données spatiales collectées et restituées sur un support, graphique ou numérique. Ainsi, ce relevé n'est pas un simple rendu brut, il correspondra au résultat d'une chaîne opératoire, spatialisée à partir de points connus dans l'espace jusqu'à un modèle dont les spécificités sont définies en fonction des applications auxquelles elles sont destinées. Il apparaît donc primordial de bien définir le cahier des charges de l'étude en amont. Se placer dans le cadre de l'étude d'objets patrimoniaux impose de réaliser des choix techniques raisonnés (Letellier 2015; Letellier et Eppich 2015). Ces choix reposent également sur la nécessité de réaliser une documentation ouverte au plus grand nombre et couvrant un large éventail d'informations relatives à l'objet, dans une enveloppe budgétaire nécessairement faible. Il s'agira donc d'opter pour des outils de représentation en adéquation avec l'édifice concerné et de considérer sa documentation sous l'angle le plus complet possible eu égard à la problématique posée.



Quatre grands types de modèles d'informations (Figure III-8) peuvent être considérés (Yang *et al.* 2020) :

- **Les modèles géométriques** : qui reconstruisent les entités réelles sous une forme holistique (3D avec l'association d'une base de données géométrique et physico-chimique structurée et d'informations spatialisées).
- **Les modèles sémantiques** : ils confèrent une signification aux éléments du bâti, mais accordent plus d'attention à ses aspects sémantiques qu'aux aspects géométriques. Elle intègre au sein d'un modèle unique tous les objets et les concepts relevant d'un domaine d'étude spécifique en les organisant de manière la plus économique possible, tout en les circonscrivant selon des critères de pertinence.
- **Les modèles paramétriques** : ils définissent des éléments unitaires grâce aux paramètres qui les définissent (dimensions, matière, fonction, date de mise en œuvre...).
- **Les modèles ontologiques** : qui représentent les entités du patrimoine grâce à des paramètres variés, dont sa configuration physique, son état, son histoire, ainsi qu'un grand nombre d'informations d'origines sociales, politiques, économiques et culturelles liées à l'environnement extérieur.

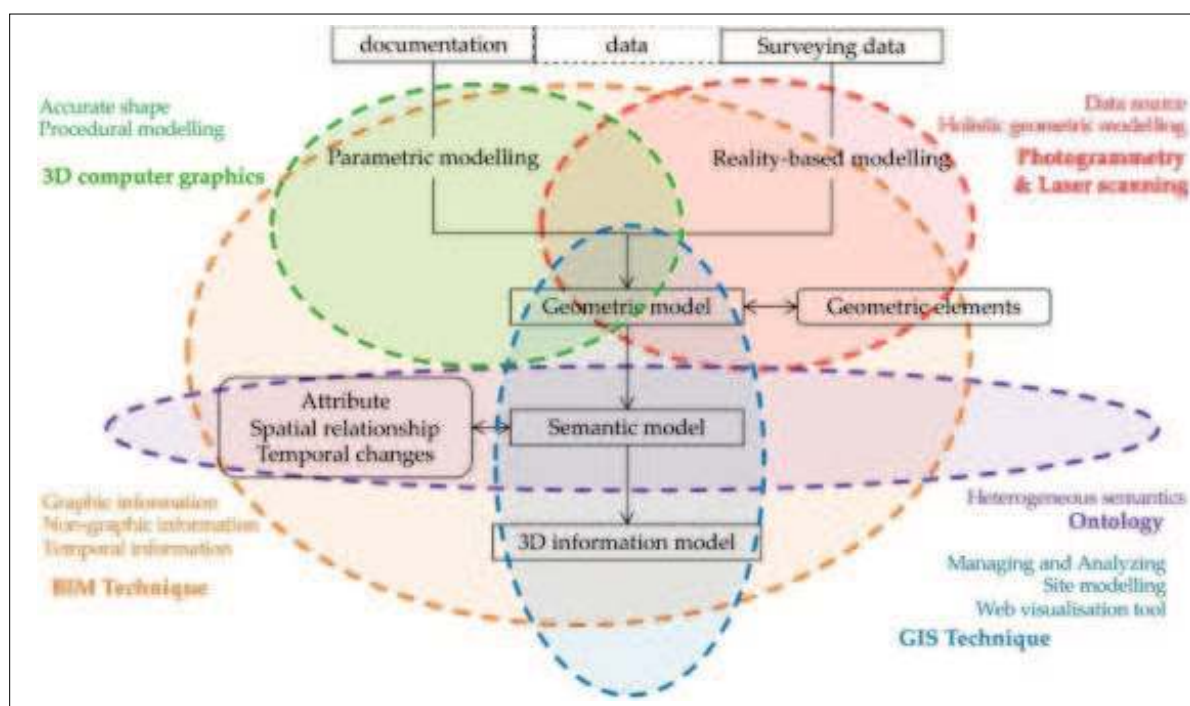


Figure III-8. Schéma global des différents types de modélisation du patrimoine bâti avec des interactions de techniques combinées (Yang *et al.* 2020)

Les **modèles ontologiques** sont tournés vers la collecte et l'utilisation de données essentiellement sociohistoriques qui ne semblent pas laisser de place à la représentation naturaliste de l'information géométrique (Acierno *et al.* 2017). En revanche, ce type d'approche pourrait être complémentaire d'une étude de matériaux, en permettant de constituer un cadre pour un modèle géométrique enrichi loin de la problématique de généralisation conceptuelle propre à ces modèles (Doerr 2003).

Les **modèles sémantiques** permettent de spatialiser des données au sein d'un modèle 3D sous la forme d'annotations et de liens vers des objets multimédias (Letellier et Eppich 2015). Citons comme exemple la plateforme Aïoli du MAP<sup>52</sup> (Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine), où une importante contribution a été réalisée pour permettre l'association spatiale entre des données descriptives et un modèle en trois dimensions. Ces avancées ont été réalisées au sein du projet NUBES (Brunetaud *et al.* 2012 ; Stefani *et al.* 2014 ; Janvier-Badosa *et al.* 2015), avec l'appariement sur internet entre une maquette 3D d'un bâtiment, subdivisée en unités architecturales et annotées sur des couches séparées. Cependant, cette approche requiert encore une forte implication de la part de spécialistes en informatique et semble rendre les opérations de traitement de l'information partiellement inaccessibles aux utilisateurs.

Les représentations sémantiques, bien qu'étant d'un grand intérêt pour le collationnement et la conservation d'informations portant sur des objets patrimoniaux (monuments, frises, bas-reliefs, sculptures ou éléments de sculptures...), ne semblent répondre que partiellement à certaines problématiques de notre travail en particulier sur la nécessité de stocker et d'exploiter des données quantitatives. En effet, la plateforme Aïoli initialement développée dans un objectif de documentation et comme support d'information, permet l'enregistrement d'annotations collaboratives et potentiellement de natures très diverses. Cependant, dans le cadre de ce travail, les données ne semblent pas pouvoir être exploitées par croisement du contenu de plusieurs couches entre elles à l'image de ce que proposent des solutions de type SIG ou BIM.

Parmi les approches de documentation qui viennent d'être décrites (cf Figure III-8), deux méthodes sont susceptibles de répondre à la problématique de la représentation des données dans ce travail : **les modélisations paramétriques (BIM) et sémantiques (SIG)**.

### 2.1.2. La modélisation paramétrique : le Modèle d'Information du Bâtiment

Les logiciels de Modélisation de l'Information du Bâtiment (BIM- *Building Information Modelling* – Modélisation des Informations du Bâtiment ; Yang *et al.* 2020) et leur déclinaison pour le patrimoine bâti (H-BIM) consiste en une approche paramétrique de la conception et de la modélisation du bâtiment (Ake 2016). Ce type d'approche est assez récente puisque la désignation de BIM et les premiers outils informatiques qui lui sont consacrés ne se sont diffusés que dans les années 2000 (Yang *et al.* 2016). Leur intérêt tient principalement dans l'intégration des données issues de tous les corps de métier du bâtiment depuis sa conception jusqu'à son démantèlement. Cette centralisation de l'information permet d'associer au sein du même outil une base de données et une modélisation 3D paramétrique pour tous ses composants.

Le modèle paramétrique définit la morphologie et les relations spatiales entre les éléments constitutifs d'un bâtiment par des paramètres qui permettent également de considérer les modifications de ce dernier en cours de projet (Figure III-9 ; Nieto *et al.* 2016 ; Valente et Barazzetti 2020; Antón *et al.* 2018). Il y a donc plusieurs niveaux de paramétrages possibles (le bloc, l'élément architectural, le mur, etc.). En parallèle, la base de données attachée au modèle 3D contient des données attributaires qui peuvent aller plus loin que la simple géométrie (composition, datation, relations hiérarchiques avec d'autres objets, etc.). La philosophie de ces logiciels permet d'effectuer un travail de création d'un bâtiment ex nihilo en intégrant

52 [http://www.aioli.cloud/?page\\_id=2219&lang=fr&the-video=0](http://www.aioli.cloud/?page_id=2219&lang=fr&the-video=0)

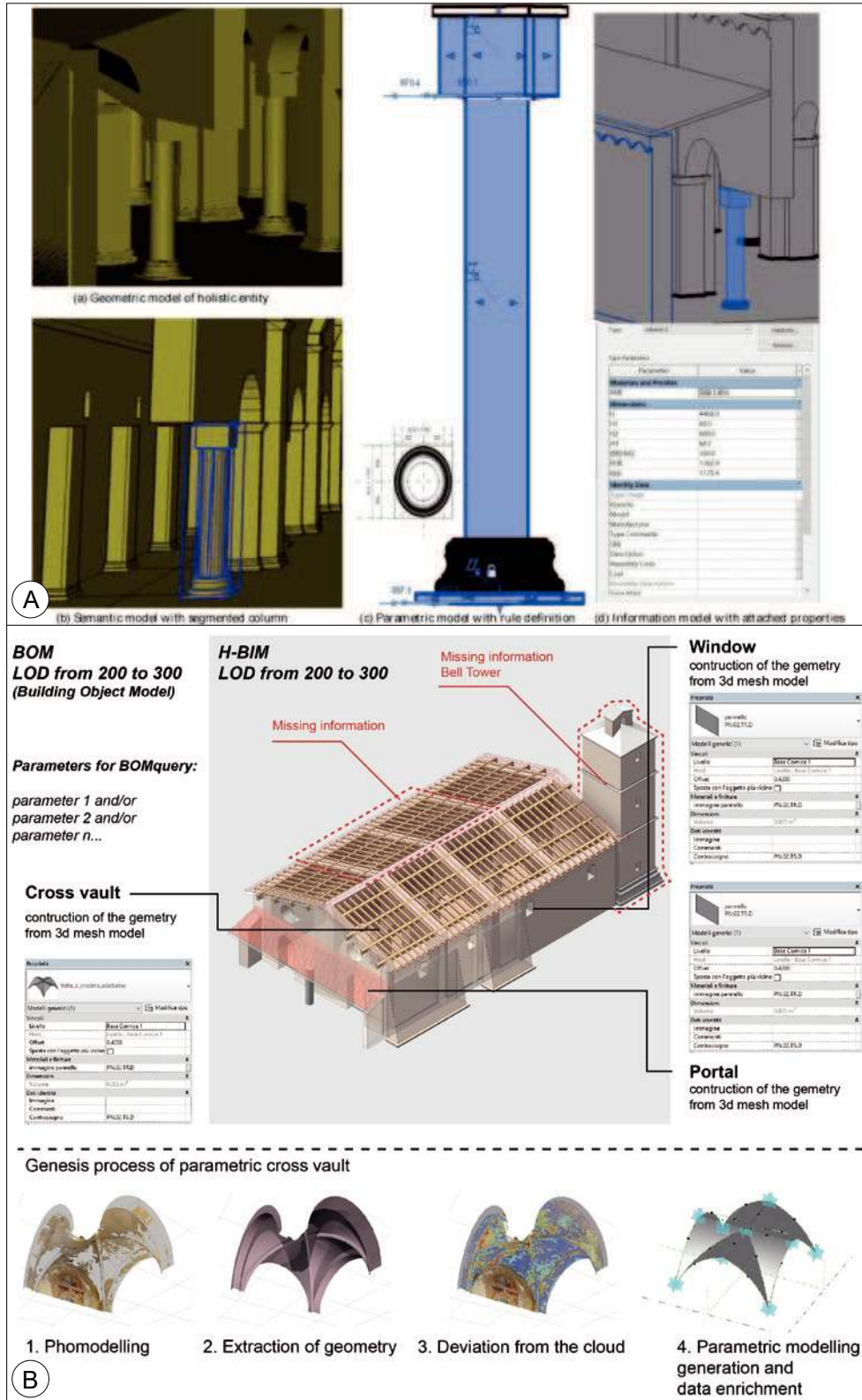


Figure III-9. Deux exemples de modélisation BIM de monuments A. Exemple de la modélisation paramétrique d’une colonne répétée à l’identique dans tout le modèle ; B. Modélisation H-BIM de l’église San Salvatore (Campi di Norcia) détruite au cours d’un séisme (Donato et al., 2017).

toutes ses parties une à une. Cette approche permet également de documenter un document déjà existant et d'en enregistrer ses caractéristiques élément par élément. En 2009, Murphy *et al.* (2009) définissent le H-BIM (*Heritage BIM*), dédié à la modélisation de l'information du patrimoine bâti. L'intégration d'une enveloppe virtuelle du bâtiment (maquette numérique) peut y être importée afin de baser l'ensemble des démarches de renseignements autour de la construction (Gómez-García-Bermejo *et al.* 2013). Les modèles de type BIM conservent des attributs métriques et, à ce titre, sont réalistes et représentatifs. Ils sont facilement visualisables (contrairement aux modèles ontologiques), mesurables, navigables et leurs composants sont « facilement » interrogeables par des requêtes informatiques. Cette approche ne se limite donc pas à son aspect purement géométrique.

Il existe aujourd'hui beaucoup de plateformes logicielles de BIM, et la plupart sont des solutions commerciales portées par les grands acteurs historiques de la conception industrielle et du bâtiment. Les principales sont ArchiCad<sup>53</sup>, Autodesk Revit<sup>54</sup> ou encore AllPlan<sup>55</sup>. Elles possèdent des déclinaisons et des concurrents gratuits, mais ces derniers comportent des limitations de fonctionnalités telles que l'adoption de formats de données spécifiques limitant les interopérabilités ou l'impossibilité d'intégrer facilement une maquette 3D préexistante. Les logiciels gratuits et open sources existent avec divers degrés de fonctionnalités et de facilité d'accès. On pourra citer TAD<sup>56</sup>, CAD BIM gratuit<sup>57</sup> ou encore Revit LT<sup>58</sup>.

Bien que les logiciels BIM soient des outils surtout conçus pour la planification et la conception de nouvelles constructions, ou pour étendre l'efficacité de la gestion des édifices tout au long de leur cycle de vie, ils peuvent également être très utiles pour les études archéologiques et la gestion du patrimoine bâti. Le plein potentiel de la démarche BIM est actuellement exploré dans le cadre de différents projets d'étude et de documentation de sites archéologiques (Scianna *et al.* 2014 ; Reinoso-Gordo *et al.* 2018 ; 2019 ; Bagnolo *et al.* 2019).

En revanche, ces modèles ne sont pas exempts de défauts (Scianna *et al.* 2014). L'un des principaux découle de l'aspect paramétrique de la démarche. Le BIM permet plusieurs niveaux de détails régis notamment par ses paramètres géométriques. Or, dans le cas d'un bâtiment ancien, restauré à de nombreuses reprises, et dont certaines modalités de construction soulèvent encore des questions, la démarche devient plus ardue. En effet, les éléments de construction n'y sont pas standardisés (variations géométriques importantes, incertitudes sur les modalités de montage de la maçonnerie...) et souvent altérés (apparition d'irrégularités de surface et de volume). Le nombre de paramètres à intégrer dans le BIM tend alors à approcher le nombre de blocs cartographiés. L'approche descriptive à la résolution la plus élevée, c'est-à-dire au niveau du bloc ou du moellon, revient donc à considérer la modélisation de chacun des blocs soit donc à reconstruire virtuellement le bâtiment pierre à pierre. Cette reconstruction s'accompagne alors de l'intégration d'un ensemble de partis pris sur les problématiques de construction du bâtiment et donc de l'intégration d'un biais conséquent qui sera susceptible d'influencer la documentation du monument.

---

53 <https://archicad.fr/>

54 <https://www.autodesk.fr/products/revit/overview>

55 <https://www.allplan.com/fr/>

56 <https://www.teamtad.com/>

57 <https://bimtoolbox.org/>

58 <https://www.autodesk.fr/products/revit-lt/overview>

### 2.1.3. La modélisation sémantique : Système d'Information Géographique (SIG)

Un système d'information géographique (SIG) peut être considéré comme la fusion de la cartographie, de l'informatique et de la technologie des bases de données (Figure III-8). Clarke (1986) en donne une définition plus fine : « un système d'information géographique peut être défini comme un système assisté par ordinateur pour capturer, stocker, récupérer, analyser et afficher des données spatialisées ». Comme cette définition le laisse entendre, ces logiciels ont été développés dans l'objectif de constituer un outil de géographie qui identifie, croise et représente des informations dans l'espace. À ce titre, les SIG s'attachent à gérer, interroger et analyser les informations spatialisées, les attributs et les relations entre divers éléments. Ils peuvent donc intégrer des bases de données pour les sites et monuments à des niveaux très différents (Richards 1998 ; von Schwerin *et al.* 2013) et sont capables de les organiser afin de réaliser des analyses spatiales complexes (Cerutti, Noardo, Spanò 2015). Ces outils sont aujourd'hui nombreux, depuis les applications les plus simples et grand public, accessible depuis un navigateur internet (Géoportail<sup>59</sup>, Infoterre<sup>60</sup>, Google Maps<sup>61</sup>...), aux plus complets et complexes à manipuler (Esri ArcGis<sup>62</sup>, Map Info<sup>63</sup>, QGis<sup>64</sup> ...) qui offrent des outils de publications variés vers les supports papiers classiques, mais également vers l'internet.

L'utilisation classique des SIG consiste en une représentation de données sous forme de cartes en 2 dimensions qui peuvent se subdiviser en diverses couches de données (Figure III-10). Selon le logiciel utilisé, chacune de ces couches peut être soit typologique, soit thématique, ce qui nécessite une grande rigueur dans l'organisation des bases de données et des supports cartographiques. Les SIG peuvent également utiliser et tirer profit de données tridimensionnelles avec notamment la prise en charge de modèles numériques (de terrain, d'élévation...), qui autorisent l'intégration de représentation topographique ou de l'altitude/profondeur (Cowen 1988). Mais à ce jour, les outils de SIG ne permettent pas encore de manipuler des données en 3D véritable. En effet, les formats adoptés pour leur fonctionnement ne peuvent considérer qu'une seule valeur d'altitude pour chaque coordonnée géographique X et Y. Cette limitation semble cependant s'effacer peu à peu face à l'expression de plus en plus insistante des acteurs du domaine de pouvoir intégrer des données issues de bâtiments.

En pratique, les SIG sont structurés autour de deux noyaux, l'un étant la base de données et l'autre étant le dessin assisté par ordinateur (CAD, Cowen 1988). Un satellite peut se greffer autour de ce système binaire sous la forme de boîte à outils d'analyse spatiale. Cette position à l'interface de deux grands domaines permet de manipuler, interagir et croiser un grand nombre de types de données. Classiquement il peut s'agir de données socio-économiques, historiques, techniques, naturelles que l'on souhaitera quantifier, corrélérer ou traiter de manière à identifier des tendances, des mécaniques sous-jacentes ou encore à les valoriser.

D'une utilisation devenue commune et classique en Sciences de la Terre, les SIG sont utilisés dans de nombreux domaines depuis les sciences naturelles aux sciences humaines et sociales. Ils contribuent à la représentation des données spatialisées et pour l'aide à la décision grâce aux outils de traitement très performants dont ils sont dotés.

---

59 <https://www.geoportail.gouv.fr/>

60 <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>

61 <https://maps.google.fr/>

62 <https://www.esrifrance.fr/arcgis.aspx>

63 <https://www.infosig.net/mapinfo-professional-la-gamme-mapinfo-mapinfo-pro/>

64 <https://www.qgis.org/fr/site/>

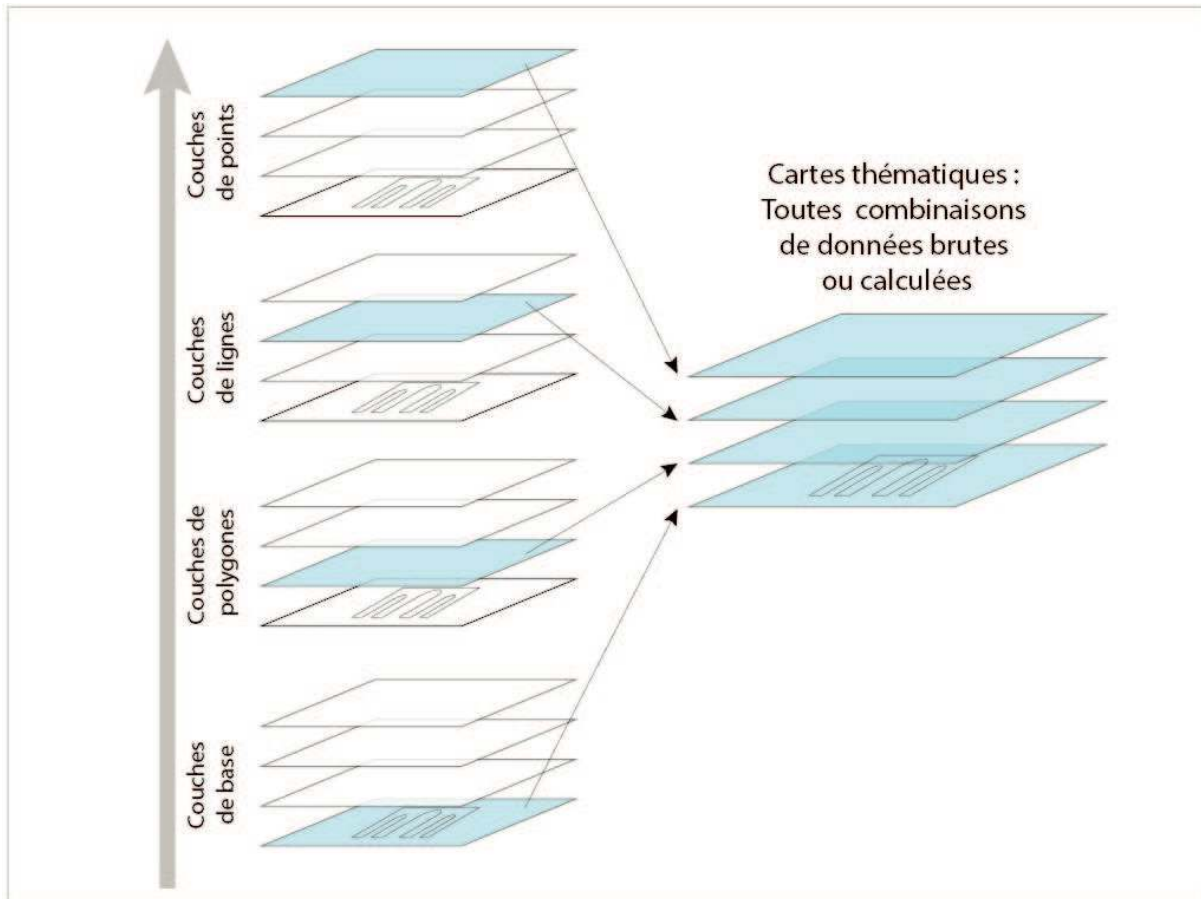


Figure III-10. Exemple de structuration en couches typologiques et thématiques d'un SIG (modifié d'après Letellier et Eppich 2015)

Depuis le début des années 2000, l'utilisation des SIG aux fins de documentation du patrimoine culturel s'est progressivement développée à l'image du Projet Collectif de Recherche mené entre 1998 et 2000 qui a débouché sur la cartographie numérique des données archéologiques du Berry pour l'Antiquité (Batardy *et al.* 2001). Leurs capacités de gestion des données graphiques et sémantiques deviennent alors partie intégrante des outils de la conservation du patrimoine. En effet, ce type de solution est très présente dans le domaine patrimonial, principalement afin de réaliser des cartographies à l'échelle d'une ville, d'une région ou à plus grande échelle (Apollonio *et al.* 2012 ; Hussein et Bali 2015 ; Agapiou *et al.* 2016). Mais elle peut également être mise en œuvre à l'échelle intra site avec la réalisation de cartographies à plus petite échelle (parcelle, pièce...), comme c'est classiquement le cas dans les opérations archéologiques. La plupart de ces approches sont réalisées dans un contexte très classique dans lequel les données sont visualisées et analysées depuis un point de vue zénithal. Cependant, certaines études ont pris le parti d'utiliser les capacités des SIG pour projeter des données issues de surfaces verticales à la manière de données issues de plans horizontaux. Ces rares études (Inkpen *et al.* 2001 ; 2008 ; Delegou *et al.* 2011 ; 2013 ; Moropoulou *et al.* 2015 ; Campanaro *et al.* 2016 ; Bitelli *et al.* 2019) ont permis de réaliser des cartographies précises des éléments constitutifs de façades de monuments et bâtiments remarquables à diverses échelles.

Les différentes réflexions et avancées des SIG ont abouti à en faire une des plateformes de visualisation des données du patrimoine « naturel » qui permet l'agglomération des différents types de données (Opitz et Nowlin 2012 ; Dell'Unto *et al.* 2013 ; Dell'Unto 2014 ; De Reu *et al.* 2013). L'utilisation des SIG de plus en plus répandue a d'ailleurs installé dans les usages courants cette méthode de gestion et d'analyse des informations du patrimoine par essence localisées dans l'espace (Ebert 1992 ; Richards *et al.* 1997 ; Wheatley et Gillings 2002). Certains y ont d'ailleurs vu un outil qui offrait des capacités d'évaluation critique, technique et historique de l'ensemble du processus de conservation du patrimoine.

#### 2.1.4. La comparaison pratique entre BIM et SIG

Les solutions logicielles évoquées précédemment comportent leurs avantages et inconvénients propres qui leur permettent de répondre de différentes façons aux exigences du cahier des charges fixé pour cette étude.

L'interpénétration des deux approches n'apparaît pas nécessairement évidente tant les domaines d'application, les problématiques et les populations d'utilisateurs sont issus de domaines professionnels très différents. Cependant, il existe des tentatives d'intégration de BIM dans des SIG depuis quelques années (El-Mekawy *et al.* 2012 ; Ma et Ren 2017).

Contrairement aux BIM, les SIG ont été développés pour répondre à des besoins de cartographie classique en deux dimensions où la troisième dimension est projetée pour construire des supports plans. Cette contrainte n'est à l'heure actuelle pas entièrement levée malgré l'apparition d'outils de traitement 3D au sein des SIG classiques et le développement de solutions de partage de l'information (ESRI CityEngine<sup>65</sup> par exemple). Les SIG actuels ne permettent donc pas l'intégration directe de données tridimensionnelles telle qu'un modèle fin de bâtiment. En effet, pour leur plus grand nombre, les standards de données utilisés ne permettent la correspondance que d'une seule coordonnée Z pour tous couples X et Y.

Dans le domaine de la recherche et de la protection patrimoniale, les SIG constituent des supports d'intérêt pour collaborer et communiquer efficacement (von Schwerin *et al.* 2013 ; Auer *et al.* 2014 ; von Schwerin *et al.* 2016 ; Richards-Rissetto, von Schwerin 2017). Cependant, ces modélisations n'autorisent toujours pas la création d'un SIG intégré directement à un volume complexe comme un bâtiment. De plus, ils ne garantissent pas nécessairement une possibilité de collaboration entre acteurs poussée au-delà de la simple consultation d'une base centralisée. Dépasser cette limitation suggérerait d'adosser l'étude à une infrastructure numérique dédiée préexistante.

D'un côté comme de l'autre, ces deux approches nécessitent une formation ad hoc qui s'accompagne d'une grande rigueur dans le formatage et la présentation des données. À cette première contrainte s'ajoutent d'autres inconvénients comme l'impossibilité pour les BIM de prendre en charge des éléments de taille non standardisée sans avoir recours à un paramétrage élément par élément ou encore pour les SIG de ne pas prendre en charge de données 3D natives. Or, dans le cas du BIM, la formation requiert des compétences dans le domaine de la modélisation 3D dite paramétrique et des bases d'architecture afin de rendre le modèle réaliste. De plus, ces connaissances doivent être partagées à travers plusieurs corps de métiers dont les champs de compétences respectives les éloignent diversement de cette technique.

---

65 <https://www.esrifrance.fr/cityengine.aspx>

L'accessibilité des deux solutions est également hétérogène. La plupart des solutions de BIM existantes sont à la fois spécifiques aux métiers du bâtiment et sont très onéreuses. Même si des conditions spécifiques sont prévues pour les établissements d'enseignement et de recherche, le déploiement de ces plateformes vers des acteurs partenaires s'en trouverait compromises. Dans le cas des SIG, la disponibilité de logiciels libres et gratuits, d'emploi courant et répandu (notamment dans les corps de métier de l'archéologie) permet d'aisément généraliser cette solution.

Enfin, l'exigence actuelle de générer des données ouvertes et interopérables est aussi à prendre en compte. Cette interopérabilité se définit comme étant la capacité d'un format de données à être importé, exporté et lu sans qu'il ne soit nécessaire de requérir à une conversion ou à une solution de tierce partie. L'examen de cette caractéristique technique pour chacune des deux approches est donc un critère de première importance à intégrer afin de réaliser le choix technique entre BIM et SIG. Ainsi, les principales suites logicielles de BIM se sont développées parallèlement à partir de logiciels déjà existants et parfois déjà considérés comme des standards professionnels. C'est par exemple le cas d'AutoCad et de Revit. Le choix de conception a donc été de conserver un format propre à ces logiciels. En revanche, les SIG sont nés progressivement et se sont rapidement structurés avec l'émergence *de facto* du standard « *shapefile* » pour les données (ESRI 1998). Ainsi, tous les programmes de cette famille sont capables de travailler avec des données au même format standard, que ce soit avec des logiciels payants ou libres.

La collaboration des usagers du SIG avec le monde de la topographie a aussi favorisé la compatibilité des formats de fichiers informatiques avec de nombreux logiciels classiquement utilisés dans ce corps de métier (. dxf et .dwg utilisés notamment par AutoCad).

Les deux approches peuvent donc prétendre être mises en œuvre dans le cadre de la construction d'un outil de documentation des données d'un bâtiment tel qu'un monument historique. Cependant, le poids important du format ouvert et interopérable des données et la nécessité d'une formation lourde désavantagent grandement une solution de type BIM. Solution qui se trouve également en difficulté devant l'impératif d'accessibilité des informations sur le bâtiment en dehors de la plateforme logicielle dédiée.

Une voie médiane peut cependant être explorée à l'image de l'utilisation du SIG pour la gestion de documents d'archives architecturales (Bitelli *et al.* 2019) ou de la documentation de paramètres physico-chimiques relevés sur des monuments antiques gréco-romains (Delegou *et al.* 2013 ; Moropoulou *et al.* 2015 ; López González 2015 ; Adamopoulos *et al.* 2017). Avec ce type d'approche, la contrainte liée à la composante 3D des données est écartée en ne considérant que la projection sur des plans de chaque façade qui est alors traitée comme un plan distinct des autres avec des coordonnées métriques propres. Le modèle 3D est alors nécessaire uniquement pour un de ses sous-produits : l'orthophotographie.

La dualité de nature du SIG (Dessin par Ordinateur et Base de données) prend alors tout son sens avec la possibilité de considérer des entrées documentaires de nature, d'origine et d'âge différents au sein du même document informatique. C'est avant tout la capacité à intégrer des données graphiques, numériques et typologiques (catégorielles) sous des formes diversifiées dans une plateforme ouverte qui constitue le principal avantage de cette solution.



Dans ce travail, le choix s'est porté vers l'utilisation d'un logiciel de type **SIG** avec une architecture de hiérarchisation des données assez classique. Pour la mise en œuvre, le choix s'est porté vers un **logiciel gratuit et open source** : **QGis** dans sa version 3.10 (version stable dite LTR pour *Long Term Running*). Ce choix logiciel s'est appuyé sur la meilleure adéquation entre les besoins opérationnels (compatibilité, fonctionnalité, diffusion de son utilisation) et les capacités techniques du logiciel.

## 2.2. L'obtention de supports réalistes et fiables : modélisation 3D

### 2.2.1. Les choix méthodologiques

La nécessité de produire un modèle géométrique 3D cohérent, fiable et aisément manipulable impose le choix d'une méthodologie d'acquisition. Parmi les technologies d'acquisition et de modélisation des objets en 3D, deux familles de techniques d'acquisition coexistent :

- **Les techniques de balayage laser** (aériens ou terrestre) avec des précisions et des capacités d'enregistrement adaptées à de nombreux cas de déploiement
- **Les techniques de relevés photogrammétriques**, qui consistent en une méthode d'acquisition de photographies formant des couples stéréoscopiques.

Ces méthodologies d'acquisition peuvent toutes deux être déployées dans un contexte patrimonial intra urbain. Cependant, la nature des informations recueillies diffère sensiblement.

La photogrammétrie permet d'obtenir rapidement et avec fiabilité un modèle de surface texturé et des orthophotographies. Cette méthode est considérée comme efficace et très peu onéreuse (Maumont 2010 ; Letellier et Eppich 2015 ; Luhmann *et al.* 2020 ; Jones et Church 2020).

Les technologies du balayage laser sont adaptées pour des acquisitions de données rapides, de grands bâtiments ou de surfaces complexes (Grussenmeyer *et al.* 2008 ; Grussenmeyer et Landes 2011). Elles peuvent être réalisées depuis le sol ou depuis un vecteur aéroporté (avion ou drone) en fonction de l'objectif. Leur fonctionnement est basé sur l'utilisation d'un faisceau laser dont l'appareil calculera « le temps de vol<sup>66</sup> », la différence de phase, la direction et l'angle d'émission pour déterminer les coordonnées de la cible dans l'espace. Ces modèles sont extrêmement précis (résolution millimétrique) et comportent fréquemment des millions de points spatialisés.

Pour les deux méthodes présentées, la nature des acquisitions sous la forme de nuages de points impose une importante phase d'interprétation des scènes (nettoyage des points issus de la végétation, des passants et des points aberrants).

Il existe de nombreuses études au sein desquelles ces deux méthodes sont comparées et leurs résultats examinés dans le cadre de plusieurs disciplines (Wilkinson *et al.* 2016 ; Skarlatos et Kiparissi 2012 ; Guarnieri *et al.* 2004 ; Bendicho *et al.* 2017 ; Lato *et al.* 2015 ; Peña-Villasenín *et al.* 2019). Les grandes lignes des avantages et inconvénients des deux méthodes de captation de la réalité en 3D sont synthétisées dans les tableaux ci-après (Tableau III-3 et Tableau III-2).

---

66 Mesure du temps entre l'impulsion Laser émise et l'impulsion reçue.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiabilité de l'acquisition</li> <li>• Rapidité d'acquisition</li> <li>• Très bon rendu sur des monuments en pierre</li> <li>• Pas de conditions d'éclairage minimum nécessaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevé du matériel (à l'achat ou à la location)</li> <li>• Matériel peu onéreux possède une faible profondeur de champ qui le rend inadapté</li> <li>• Nécessite une formation ad-hoc pour l'acquisition et le traitement des données</li> <li>• Peu adapté en contexte exigü avec des obstacles ou peu de recul</li> <li>• Modèle produit n'est pas texturé, passage obligatoire par l'acquisition de photos à haute résolution (et d'un logiciel complémentaire)</li> <li>• Matériel encombrant (scanner, trépieds et cibles complémentaires)</li> </ul>

Tableau III-3. Avantages et Inconvénients de la lasergrammétrie

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût du matériel et des solutions logiciels abordables</li> <li>• Matériel aisément transportable par un opérateur seul</li> <li>• Mise en œuvre « simple » qui ne demande que la maîtrise d'un appareil photographique</li> <li>• Il n'est pas nécessaire de réaliser les prises de vue en une seule session</li> <li>• Facilité de travail en zone encombrée</li> <li>• Capacité à produire des modèles texturés sans appel à une autre technique</li> <li>• Grande variété de profondeur de champ en fonction des objectifs utilisés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les Conditions d'éclairage sont à contrôler et à maîtriser</li> <li>• Acquisition nécessairement de jour pour les monuments</li> <li>• Acquisition longue pouvant durer plusieurs heures</li> <li>• Difficultés importantes pour traiter des surfaces transparentes, réfléchissantes ou trop uniformes</li> <li>• Qualification des données plus complexe que pour la lasergrammétrie malgré les progrès des algorithmes en la matière.</li> </ul>

Tableau III-2. Avantages et Inconvénients de la Photogrammétrie

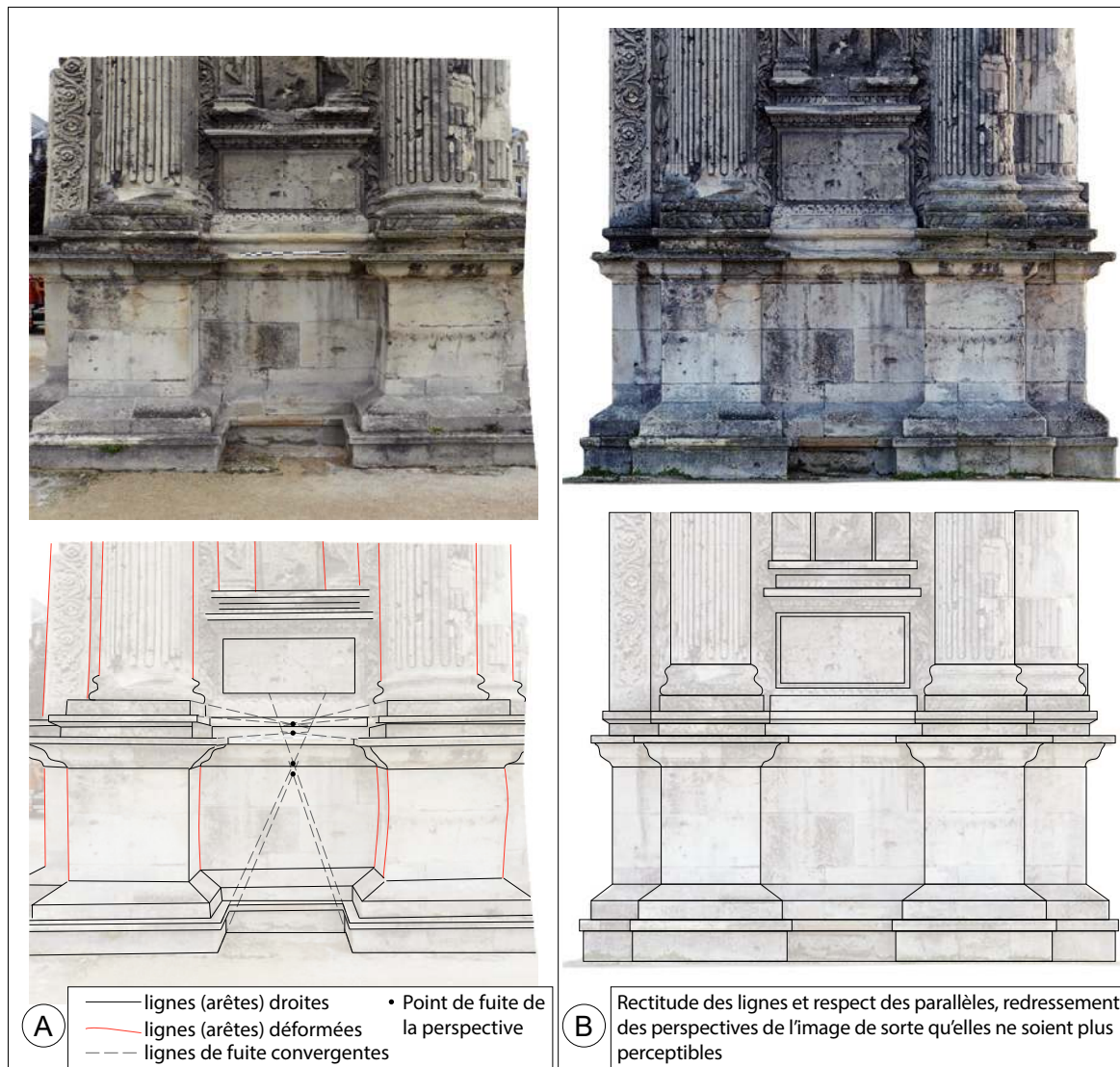
Les contraintes inhérentes à l'utilisation d'un scanner laser s'avèrent complexes dans de nombreuses conditions comme l'absence de recul ou la présence d'obstacles, malgré la très grande précision de cette approche. Cependant, l'usage d'une approche polyvalente et fiable au détriment d'une multiplicité des méthodes optimiserait d'autant plus la démarche. La présence d'un échafaudage bâché autour du principal terrain d'application a par ailleurs orienté très précocement le choix méthodologique. Comme l'ont montré d'autres études comparatives, le choix optimal de la technique dépend avant tout de l'objet à modéliser et des conditions effectives de réalisation de travail (Baltsavias 1999 ; Grussenmeyer *et al.* 2008). **La diversité des conditions dans lesquelles les modélisations devaient être réalisées ainsi que la diversité de taille des objets considérés nous ont très rapidement orientés vers les méthodes de photogrammétrie**

### 2.2.2. La photographie redressée ou Orthophotographie ?

Pour la représentation des façades du bâtiment, il est nécessaire de préciser les différences qui existent entre une orthophotographie et une simple photographie redressée. Ce dernier cas peut être considéré comme suffisant dans certains cas dans lequel l'objet étudié associe petites dimensions et géométrie simple.

Une orthophotographie est une image photographique dont les distorsions optiques de l'objectif, les déformations dues au relief et à l'inclinaison de l'axe de prise de vues ont été corrigées mathématiquement (Granier *et al.* 2019). Il s'agit d'un support superposable à une carte (géoréférencée) et facilement intégrable dans un Système d'Information Géographique (SIG), dans des logiciels de DAO, PAO... Les mesures effectuées sur un tel support sont considérées comme réalistes et fiables.

Une photographie redressée est une image dont seules les déformations liées à l'inclinaison de l'axe de prise de vue ont été corrigées grâce à l'intervention d'un logiciel de traitement d'image. La simple rectification d'une image unique vise à supprimer l'inclinaison et quelques distorsions géométriques, mais cela n'est efficace que sur une partie de l'image (en général le centre). De plus, les déformations géométriques de l'objectif ne sont pas corrigées (certaines sont même amplifiées) et aucune coordonnée spatiale n'est associée aux pixels de l'image. De plus, l'image n'est qu'imparfaitement superposable à une carte ou un plan du fait du maintien des perspectives (Figure III-11).



### 2.2.3. La méthodologie retenue pour l'étude

Travailler sur photographie redressée peut sembler un important gain de temps cependant ces supports ne peuvent être utilisés efficacement sur l'ensemble d'un bâtiment. Le modèle numérique de surface dérivé de la modélisation photogrammétrique permet de prendre en compte les effets du relief et d'autres distorsions géométriques, de sorte que l'orthophotographie résultante est exempte de ces distorsions. **L'orthophotographie est donc le support qui a été utilisé dans cette étude afin de représenter les élévations. Les effets de perspective ont été supprimés et les mesures ont pu être prises de manière fiable à partir de n'importe quelle partie de l'image.**

En synthèse, à la suite de l'exposé des méthodologies existantes à ce jour pour la réalisation de ce travail, le tableau suivant propose de préciser celles qui ont été choisies et effectivement mises en œuvre pour mener à bien ce travail Tableau III-4.

Objet	Méthodologie
Modélisation 3D construction d'une maquette numérique	<b>Photogrammétrie (photomodélisation)</b>
Supports raster non déformés et à l'échelle	<b>Orthophotographies dérivées de la photomodélisation</b>
Support à la documentation du bâti	<b>SIG constitué de couches thématiques (bâtiment, stylistique, historiographie, matériaux, alterations, prélèvements...)</b>

Tableau III-4. Approches techniques retenues pour la construction de la documentation des bâtiments

## 2.3. L'élaboration d'une maquette numérique en 3D

### 2.3.1. Le principe de la méthode

La photogrammétrie (où *Structure from Motion* ou encore *close range Photogrammetry*) est une méthode qui permet la construction de maquettes volumétriques numériques à partir de photographies (Green *et al.* 2014 ; Howland *et al.* 2014 ; Sanz *et al.* 2010 ; Prins *et al.* 2014). Historiquement très ancienne puisque développée au XIX<sup>e</sup> siècle (Laussedat 1859), la photogrammétrie était mise en œuvre avec des outils analogiques puis analytiques avant de devenir numériques (Figure III-12). Il s'agissait avant tout d'une discipline de spécialistes au savoir-faire rare (Samaan 2016). Elle s'est particulièrement développée avec la considérable augmentation de puissance des ordinateurs, parallèlement au gain de qualité des capteurs des appareils photographiques numériques (et de la baisse de leur coût). Ses utilisations se sont répandues dans de nombreuses disciplines, aussi bien dans les domaines des sciences de la Terre que dans ceux de l'archéologie (Tableau III-5).

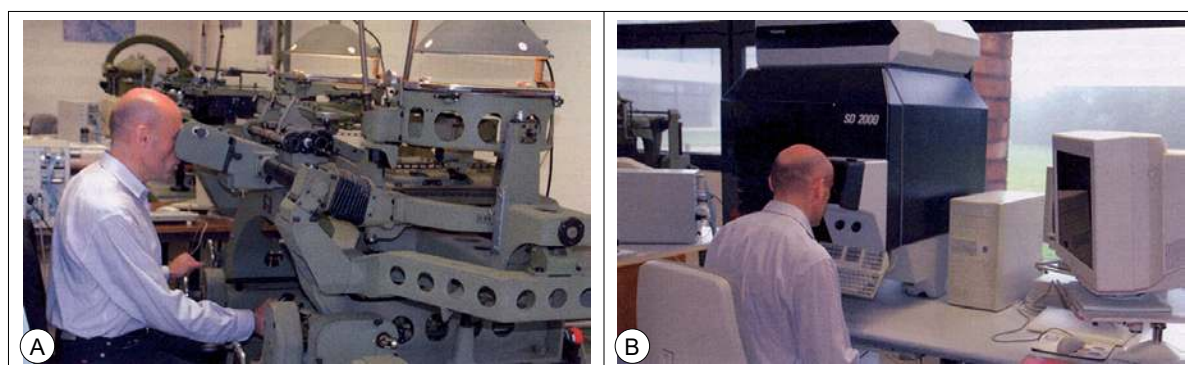


Figure III-12. Restituteur analogique (A) et analytique (B) (Photographies L. Polidori in Maumont 2010)

La photogrammétrie repose sur l'exploitation d'un ensemble de couples d'images stéréoscopiques qui présentent des qualités géométriques et photographiques analogues afin de reproduire la 3<sup>e</sup> dimension. Cette méthode mime donc la manière qu'a le cerveau de reconstituer le relief à partir des images indépendantes fournies par chacun des yeux (Green *et al.*, 2014). La corrélation des pixels homologues des images deux à deux permet la première génération d'un nuage de points de coordonnées dans l'espace connues (XYZ, même dans un référentiel métrique ou non métrique). Le produit final de travail est une maquette numérique tridimensionnelle, texturée, hautement détaillée et à l'échelle.

<b>Applications en géologie</b>	
Évolution des paysages	Cunliffe, Brazier et Anderson 2016; Kalacska <i>et al.</i> 2017; Cucchiaro <i>et al.</i> 2020
Topographie des rivières et de leurs berges	Barker, Dixon et Hooke 1997; Pyle, Richards et Chandler 1997; Lane 2000; Karmacharya <i>et al.</i> 2021
Quantification de l'érosion	Marzloff et Poesen 2009; Gonçalves <i>et al.</i> 2021
Géologie et géomorphologie glaciaire	Keutterling, Thomas 2006; Kraaijenbrink <i>et al.</i> 2016; Śledź, Ewertowski et Piekarczyk 2021
Analyse de la stabilité des pentes	Haneberg 2008; Congress, Puppala 2021; Yang <i>et al.</i> 2021
<b>Application en archéologie</b>	
Cartographie	Hixon <i>et al.</i> 2018
Géoarchéologie	Cucchiaro <i>et al.</i> 2020
Enregistrement des surfaces, épigraphie	Carrero -Pazos et Espinosa-Espinosa 2018; Andreu et Serrano 2019; Valente et Barazzetti 2020
Anthropologie	Wong <i>et al.</i> 2008; Fourie <i>et al.</i> 2011; Omari <i>et al.</i> 2021
Sauvegarde, reproduction, protection patrimoniale	Maumont 2010; Noardo 2018; Jalón <i>et al.</i> 2021

Tableau III-5. Exemples d'études dans divers domaines de la géologie et de l'archéologie qui utilisent des techniques de photogrammétrie

### 2.3.2. L'acquisition des données pour la photogrammétrie

**Choix de l'outil numérique :** Les logiciels de photogrammétrie sont nombreux, mais les logiciels commerciaux comme Metashape<sup>67</sup> d'Agisoft (ex Photoscan) figurent parmi les plus populaires (Verhoeven *et al.* 2012 ; De Reu *et al.* 2013 ; 2014 ; Howland *et al.* 2014 ; Jones et Church 2020). Il existe cependant d'autres logiciels commerciaux (Pix4D<sup>68</sup> ou ReCap<sup>69</sup>)

67 Site web : <https://www.agisoft.com/>

68 Site web : <https://www.pix4d.com/>

69 Site web : <https://www.autodesk.fr/products/recap/features>

ou encore des programmes open source gratuits : MicMac<sup>70</sup>, Bundler<sup>71</sup>, ou Meshroom<sup>72</sup> et Patch-Based Multi-View Stereo (PMVS)<sup>73</sup>. Le choix d'un logiciel commercial dans le cadre de cette étude résulte des études comparatives sur la précision et la pertinence des rendus des différentes solutions logicielles (Green *et al.* 2014 ; Sordini *et al.* 2014 ; Casella *et al.* 2020 ; Elkhrachy 2021). Chaque solution logicielle utilise des formats classiques et répandus dans la 3D (.obj .fbx .rcm .rcs...), en plus de ses formats propriétaires, ce qui facilite l'interopérabilité de chaque solution.

Il existe depuis quelques années des possibilités de traitement à distance (ReCap d'Autodesk par exemple) qui permettent de ne pas avoir à investir dans des ordinateurs puissants pour réaliser les calculs. Mais ces dernières présentent souvent le défaut d'être peu, voire pas paramétrables. Leur fonctionnement et les réglages sont donc de type « boîte noire » et leurs résultats aléatoires puisqu'il n'est pas possible d'intervenir entre chaque étape du calcul (Jones, Church 2020).

La capacité intégrée à réaliser toutes les tâches demandées, la relative facilité d'apprentissage, de prise en main et l'abondance de la documentation sont les principaux arguments qui ont influencé le choix de l'utilisation de Metashape pour ce travail.

**Planification et prises de vue :** En amont de l'acquisition, il a paru indispensable, pour la planification technique des prises de vue photogrammétriques et les étapes successives de la modélisation, de se référer à des documents de références (Sordini *et al.* 2014 ; Samaan 2016 ; Historic England 2017 ; Xavier *et al.* 2019 ; Luhmann *et al.* 2020) qui définissent de « bonnes pratiques » et des critères de qualité à respecter pour espérer obtenir des représentations 3D fiables et précises. Par exemple : les meilleures conditions d'éclairages correspondent à celles d'une journée avec un ciel homogènement couvert qui produit une lumière diffuse.

Les prises de vue ont été réalisées en privilégiant l'ouverture par rapport aux autres paramètres, en utilisant le mode « Av » qui permet à la fois de limiter les aberrations chromatiques et les déformations optiques. L'ouverture du diaphragme a été fixée à f6.3 pour garantir une bonne profondeur de champ (plage de netteté des photos) conformément aux préconisations vues dans la littérature (Historic England 2017 ; Xavier *et al.* 2019). Cette valeur d'ouverture a été systématiquement reprise afin d'éviter les hétérogénéités de réglage entre collections de photographies. Ces précautions sont prises pour faciliter l'éventuel ajout ultérieur de clichés en fonction des points du modèle à préciser.

Les points de contrôle au sol sont des points de coordonnées XYZ connues, souvent obtenus à l'aide d'une station totale<sup>74</sup> (Jones et Church 2020). Ces points sont utilisés comme référence lors de la mise à l'échelle d'un modèle. Ces coordonnées spatiales sont également utilisées pour quantifier la représentativité du modèle et évaluer son réalisme (Bianco *et al.* 2018). Les points sont intégrés dans le modèle manuellement sous la forme de points de repère en préalable au calcul de mise à l'échelle des nuages de points. Dans le cas de la modélisation de la Porte de Mars, ces points ont été tirés des rapports des fouilles réalisés au pied du

---

70 (Pierrot-Deseilligny, De Luca, Remondino 2011) Site web : <http://logiciels.ign.fr/?Micmac> - <https://micmac.engg.eu/>

71 (Snavely *et al.* 2008) Site web : <https://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>

72 (Snavely *et al.* 2008) Site web : <https://alicevision.org/>

73 (Furukawa et Ponce 2007 ; 2010) <https://www.di.ens.fr/pmvs/>

74 Ils peuvent être fournis par un topographe ou obtenus à partir de relevés plus anciens.

monument (Bontrond 2019 ; Bontrond *et al.* 2015).

Les appareils photographiques utilisés sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Constructeur	Modèle	Type de capteur	Résolution	Taille des photosites	Télécommande
Nikon	B700	APS-C / CMOS	20,3 Mp	1,2 $\mu\text{m}$	Wi-Fi & bluetooth par smartphone
Canon	EOS 5D Mark II	Plein format (24 x 36 mm) CMOS	21 Mp	6,3 $\mu\text{m}$	Filaire et infra rouge

Tableau III-6. Caractéristiques des appareils photographiques utilisés

Le modèle d'appareil photographique utilisé pour une partie de l'acquisition (Nikon Coolpix B700) intègre une fonctionnalité de télécommande par un smartphone. Les concepteurs du logiciel ont incorporé dans l'application la capacité d'encoder pour chaque photo les coordonnées GPS du téléphone. Chaque photographie de la collection issue de cet appareil possède donc des coordonnées spatiales. Même si l'ellipsoïde d'erreur de ce type de GPS est importante, le grand nombre de photographies considérées permet d'obtenir une représentativité raisonnable pour la spatialisation. Et pour se prémunir des déformations géométriques, les distances entre des points dont les positions sont connues ont été mesurées à l'aide d'un distancemètre laser (Leica Disto D2®). Ces distances (20 couples de mesures) ont ensuite été reportées manuellement sous la forme de barres d'échelles.

Une seconde campagne de prises de vue afin d'augmenter la résolution et le niveau de détail en particulier sous les voûtes de l'arc, a été réalisée avec un appareil reflex de type plein format (Canon EOS 5D mark II) équipé d'une optique grand-angle. Ce type d'appareil a été privilégié dans la seconde campagne, car cette dernière ne nécessitait plus que les photos intègrent leurs coordonnées géographiques, mais qu'elles soient de très bonne qualité malgré des conditions d'éclairages difficiles. Le capteur plein format trouve donc ici toute son utilité avec des photosites<sup>75</sup> de plus grande taille, à résolution équivalente, autorisant la captation de plus de détails en basse lumière et en particulier avec des focales importantes (causant plus de diffraction sur les capteurs).

Cependant, l'acquisition d'une collection de photographies peut être réalisée sans point de contrôle. Les dimensions du modèle qui en découlera n'auront pas de valeur métrique et des déformations géométriques pourront subsister qui n'autoriseront pas la réalisation de comparaisons avec d'autres modèles (Schöning et Heidemann 2015).

La qualité de la prise de vue est le facteur initial déterminant pour la qualité finale du modèle 3D (Xavier *et al.* 2019 ; Luhmann *et al.* 2020 ; Samaan 2016 ; Historic England 2017). Dans le cas d'objets complexes tels que la plupart des objets naturels ou anthropiques, un seul couple d'images stéréoscopiques est insuffisant à la reconstruction de l'ensemble de l'objet (Westoby *et al.* 2012 ; Historic England 2017; Granier *et al.* 2019). Il faut donc réaliser l'acquisition de plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de photographies pour couvrir

<sup>75</sup> Le photosite peut être assimilé au « pixel » d'un capteur (Herschdorfer 2015). Il s'agit de l'entité unique capable de capter la lumière. Ainsi, deux capteurs de résolution égale peuvent produire des images de qualité très différentes en fonction de la taille des photosites, la meilleure sera produite par les capteurs les plus grands et pas par ceux ayant la plus grande résolution.



l'ensemble de l'objet à modéliser (Samaan 2016 ; Xavier *et al.* 2019). Il faut donc multiplier les prises de vues avec trois impératifs :

- 1) le capteur de la caméra doit rester parallèle aux surfaces à l'objet (éventuellement complété par des images obliques d'après Nocerino *et al.* 2014) ;
- 2) les images doivent avoir une grande proportion de recouvrement (idéalement un chevauchement latéral de 80 % pour un recouvrement longitudinal compris entre 60 et 80 %) ;
- 3) les réglages de la caméra doivent rester inchangés au cours de l'ensemble de la prise de vue. Elle est naturellement à adapter aux contraintes du lieu ou de l'objet à modéliser. La stratégie de prise de vue doit donc être soigneusement planifiée. Dans le cas d'un monument, il convient de privilégier une stratégie de prise de vue convergente « normale » aux différentes surfaces considérées (Figure III-13).

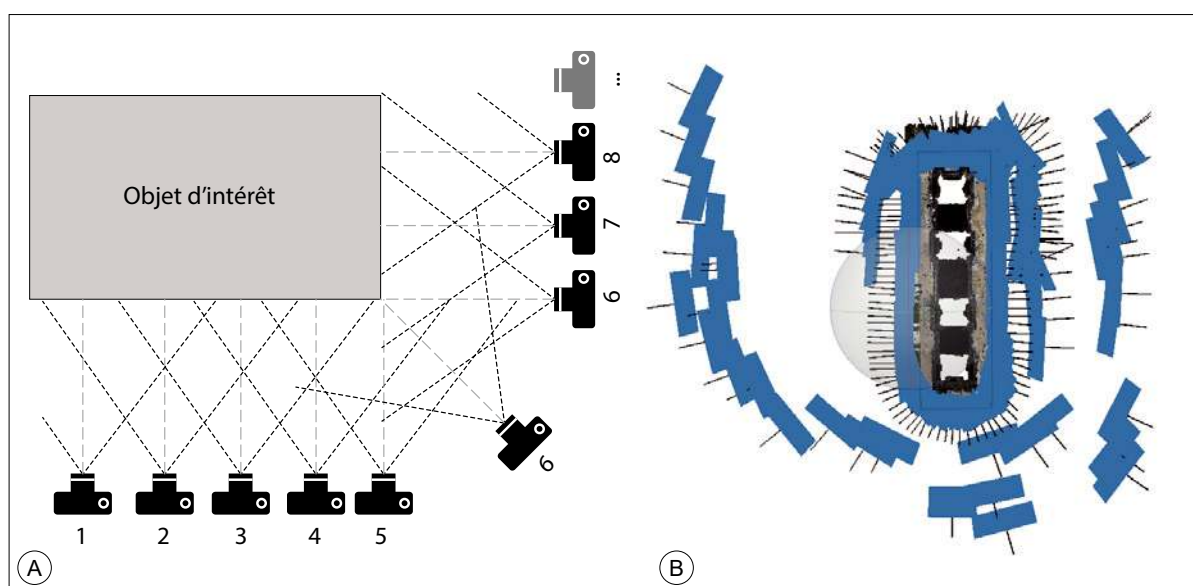


Figure III-13. A. Acquisition d'une multitude de « couples » stéréoscopiques dans une configuration convergente « normale » autour d'un objet d'intérêt (d'après Historic England 2017). B. Position des prises de vues illustrant les positions des prises de vues dans le cas de la modélisation photogrammétrique de la Porte de Mars.

L'exploitation d'un grand nombre d'images peut s'avérer lourde, mais elle est cependant devenue moins difficile grâce à l'augmentation importante des capacités de calcul sur les ordinateurs actuels et notamment l'utilisation du calcul sur carte graphique (GPU).

### 2.3.3. Le traitement des données pour la photogrammétrie

**Qualification des images et masquage** : malgré l'attention portée à la réalisation des photographies, une étape supplémentaire de qualification des images est nécessaire pour s'assurer de leur qualité (Xavier *et al.* 2019 ; Luhmann *et al.* 2020). L'exposition et la netteté des images font donc l'objet d'une attention particulière tant ces deux paramètres sont difficilement appréciables sur site. Il sera attendu que la maquette numérique soit fidèle dans sa géométrie et sa colorimétrie. Cela suggère assez explicitement que l'efficacité avec laquelle la modélisation va être réalisée dépend directement de la rigueur de la prise de vue et de la qualité des optiques utilisées (Figure III-14). Metashape© dispose d'un algorithme de traitement qui permet d'évaluer les critères de qualité pour chaque collection de photographies

et de leur attribuer une note de 1 (mauvais) à 10 (excellent). En cas de score inférieur au seuil de qualité requis, l'image est exclue des processus de traitement ultérieurs. Dans ce travail, les photographies dont la valeur de qualité était inférieure à 5 ont été exclues du traitement photogrammétrique. Ce filtre a causé l'exclusion de 15 clichés du fait de légers flous (de bougé ou du fait d'un objet en mouvement comme une voiture ou un passant).



Figure III-14. Déformations géométriques induites par l'optique utilisée pour la prise de vue et par l'absence de calage géométrique du modèle exemple du sarcophage de la chasse au lion dit Tombeau de Jovin, Musée Saint Remi. A. La photographie présente une aberration optique liée à l'objectif utilisé, les surfaces parallèles deviennent courbes (photo C. Devleeschauwer – Musée Saint Remi ; B Le modèle n'a pas été « mis à l'échelle avec des points de contrôle provoquant une légère déformation géométrique : la partie droite est plus haute que la partie gauche.

Le processus de modélisation se déroule en plusieurs étapes successives. Chaque partie du processus génère un ensemble de données intermédiaires (Figure III-15) qu'il convient d'examiner et de valider avec attention pour se prémunir de l'apparition de distorsions, d'aberrations ou encore pour nettoyer/simplifier le modèle des points excédentaires.

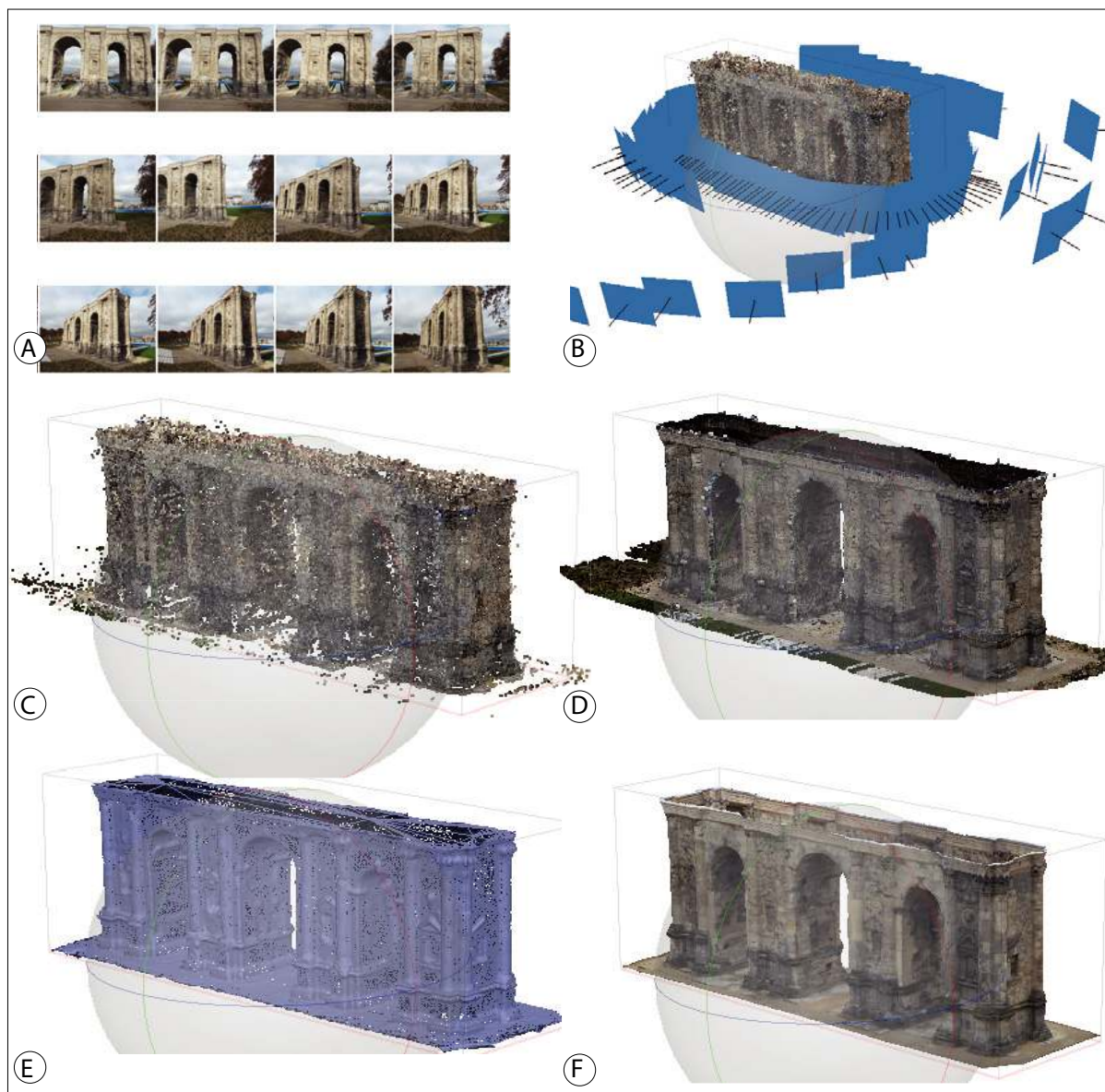


Figure III-15. Aperçu des différentes étapes de la modélisation photogrammétrique : A. Collection de photographie stéréoscopique ; B. Spatialisation des photos et calage du modèle ; C. Calcul d'un nuage de point clairsemé ; D. Calcul d'un nuage de point dense ; E. Génération d'un maillage ; F. Calcul d'une texture.

L'algorithme d'alignement des images fonctionne grâce à l'appariement de points communs aux différentes images d'une collection. Or sur certains clichés peuvent figurer des éléments soit indésirables, soit en mouvement (ou les deux). C'est, par exemple, le cas d'un passant, d'un véhicule, de la flèche d'une grue (...) pour lesquels le logiciel va corrélérer le déplacement entre deux photos et donc interpréter des décalages sur l'objet d'intérêt. Cet élément doit donc être exclu de la modélisation dès le début du processus par une opération de masquage. Cette opération préliminaire est réalisée d'une part pour alléger un calcul qui demande d'importantes ressources informatiques, d'autre part pour ne pas

généraliser d'aberrations géométriques liées à la corrélation de deux points identiques, mais en mouvement. La recherche de ces objets indésirables doit être effectuée manuellement pour toutes les photographies de la collection en amont des premières étapes de calcul.

#### 2.3.4. Synthèse

- Le logiciel utilisé, dont la chaîne opératoire est présentée dans le schéma suivant (Figure III-15), offre la possibilité intéressante d'intervenir entre toutes les étapes intermédiaires de la modélisation. Cette capacité permet la réalisation de modifications ou encore de procéder à des traitements de classification ou de nettoyage/décimation du résultat. Ce processus de décimation consiste en une simplification du modèle en diminuant sa résolution géométrique. Le logiciel met en œuvre différents algorithmes correspondant à diverses phases du processus :
  - Alignement des photos : construction du nuage clairsemé ;
  - Construction du nuage de points dense ;
  - Construction d'un maillage ;
  - Construction d'une texture.

**Alignement des photos :** L'algorithme utilisé au cours de cette première étape permet de reconstituer la position de chaque photographie par triangulation inverse. Simultanément une première géométrie de l'objet est ébauchée grâce à un algorithme basé sur la corrélation des points homologues de la collection d'images (Green *et al.* 2014 ; Westoby *et al.* 2012). Les coordonnées de la caméra peuvent être directement lues dans les métadonnées de la photographie (fichier Exif) lorsque l'appareil photographique dispose d'un GPS interne ou d'une connexion avec un GPS. Ce premier nuage de points peut également être traité pour être optimisé afin de tenir compte des déformations liées à l'objectif de l'appareil utilisé.

**Construction du nuage de points dense :** Cette étape de la modélisation consiste à la reconstruction d'un nuage de points localisé dans l'espace par application d'un algorithme du type DMVS (Dense Multi View Stereo) (Scharstein, Szeliski 2002). Ce calcul permet d'apparier les pixels présents sur les photos en leur associant des coordonnées spatiales dans un espace à trois dimensions. À ce stade, le nuage présente une très grande densité et comporte plusieurs millions de points. C'est à la fin de cette opération que le nuage de points subit un nettoyage des pixels aberrants dans un premier temps manuellement, puis en utilisant une sélection graduelle selon le critère de l'incertitude de reconstruction (Agisoft 2019). La grande densité de points obtenue peut également conduire à effectuer une décimation du nuage pour le ramener à une taille plus facilement manipulable. C'est également au cours de cette étape que sont appliquées les coordonnées spatiales absolues et que les mesures réalisées sur le terrain sont reportées. Le modèle devient alors une ébauche de maquette à l'échelle.

**Construction d'un maillage :** Le nuage de points est ensuite transformé en un nuage de millions de points qui permettent de construire un modèle de maillage selon un algorithme de triangulation irrégulière (*Triangular Irregular Network* : TIN).

**Construction d'une texture :** Enfin, la texture photoréaliste du modèle est obtenue par la projection sur le modèle de portions de photographies afin d'en isoler les couleurs et en déduire une texture (Westoby *et al.* 2012 ; Agisoft 2019 ; Jones et Church 2020). Au stade final de la modélisation, la définition de la résolution du modèle revêt une grande importance. Une

trop haute résolution, donc un modèle très précis (à résolution millimétrique) va nécessiter une augmentation exponentielle du temps de calcul et il en résultera des fichiers difficilement manipulables. Inversement, une résolution trop faible (centimétrique) requerra moins de temps de traitement, mais ne portera pas l'information requise pour être réellement utile.

Les dernières imperfections du modèle peuvent encore être traitées par les outils intégrés ou grâce à des logiciels tiers (Blender<sup>76</sup> notamment, ou CloudCompare<sup>77</sup>). Cette étape de traitement a pour but de simplifier les géométries trop complexes, de boucher ses trous (artefacts des traitements précédents) et d'apporter à l'ensemble une cohérence graphique (Annexe 10). La maquette numérique ainsi construite pourra ensuite être traitée par différents algorithmes pour en extraire des données dérivées comme des cartes de profondeurs, des plans et sections à l'échelle, des modèles numériques d'élévation (MNE) et des orthophotographies.

Les caractéristiques des différentes étapes de la modélisation de la Porte de Mars réalisée dans le cadre de ce travail sont regroupées dans le tableau suivant :

La modélisation 3D de la Porte de Mars, dont les différentes étapes sont synthétisées par la figure suivante (Figure III-16) nous a permis de construire une maquette 3D fiable et réaliste qui rend compte de la géométrie globale du monument (Annexe 9 & Annexe 10),

<b>Acquisition</b>	381 clichés	380 stations de caméras	36 repères	20 mesures d'échelles métriques
<b>système de coordonnées</b>	Lambert 93 (CC49 / EPSG 2154 reprojeté à partir du WGS84 du GPS interne)			
		Temps de calcul	Nombre d'entités	
<b>Nuage de points clairsemés</b>		36 min	1 214 882 points	
<b>Cartes de profondeurs</b>		53 h	380 cartes	
<b>Nuage de points dense</b>		86 h	92 138 372 points	
<b>Modèle</b>		56 h 6 min	9 110 006 polygones	
<b>Résolution maximum (m)</b>	0,128 cm		<b>Erreur de reprojection : 0,679 px</b>	
<b>Roor Medium Square Error RMSE (m)</b>	0,00024 m			

Tableau III-7. Caractéristiques techniques (données chiffrées) du processus de modélisation 3D de la Porte de Mars

mais aussi de modéliser son état de surface. La texture qui a été construite possède une résolution millimétrique et apporte un rendu photoréaliste à l'objet (résolution maximum = 1.28 mm, Tableau III-7). C'est donc après avoir d'une part calculé une maquette numérique et d'autre part générée son texturage photoréaliste, qu'il est possible de réaliser la construction d'orthophotographies à résolution millimétrique de toutes les façades du bâtiment<sup>78</sup> (Figure III-17).

76 <https://www.blender.org/>

77 <http://cloudcompare.org/>

78 le calcul de rendu des développées des voûtes peut être réalisé grâce à une fonctionnalité de déroulé cylindrique des surfaces du modèle implémenté dans le logiciel de photogrammétrie.

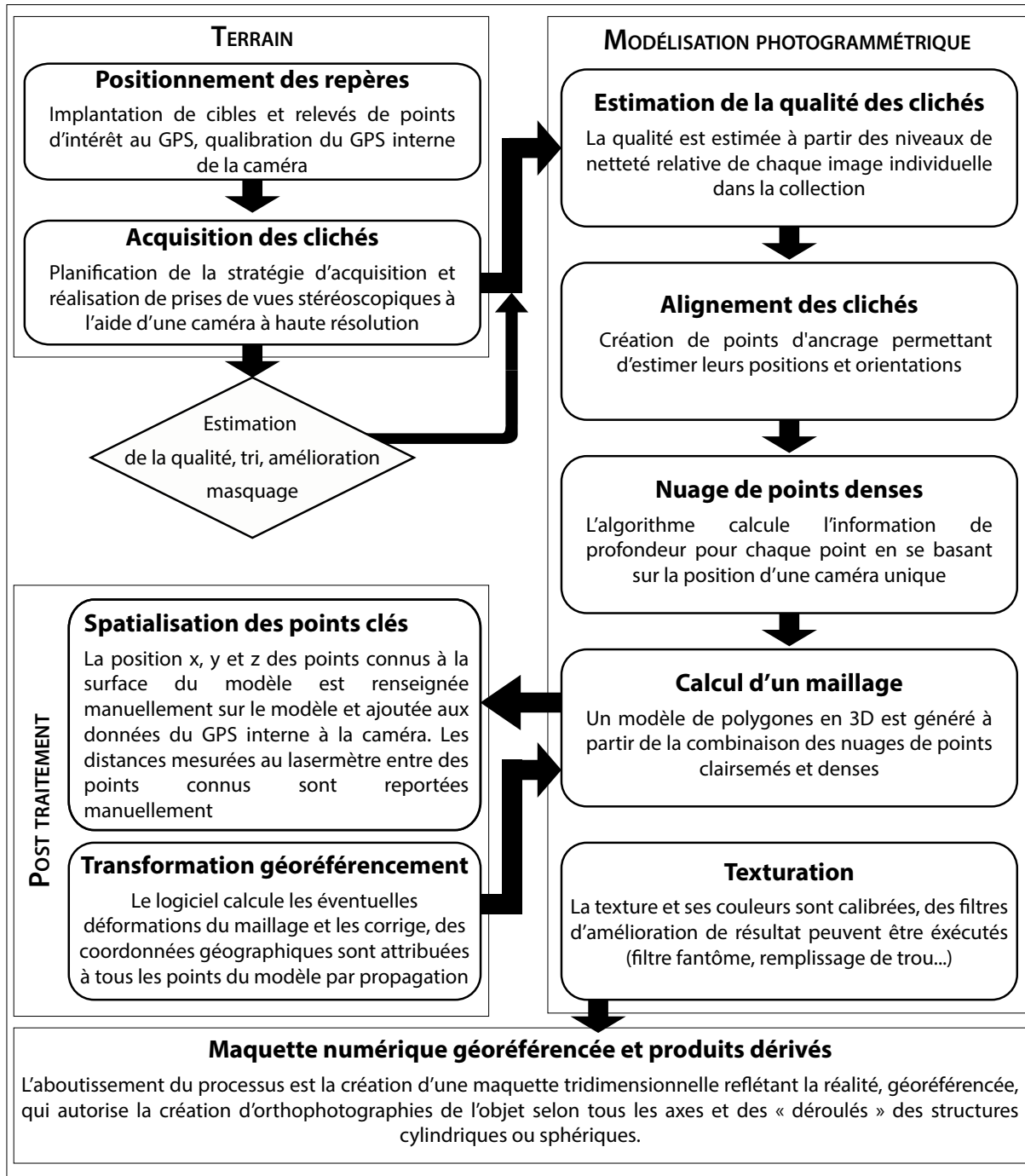


Figure III-16. De la photographie jusqu'au modèle 3D, la chaîne opératoire de l'acquisition et du traitement photogrammétrique avec Agisoft Metashape©

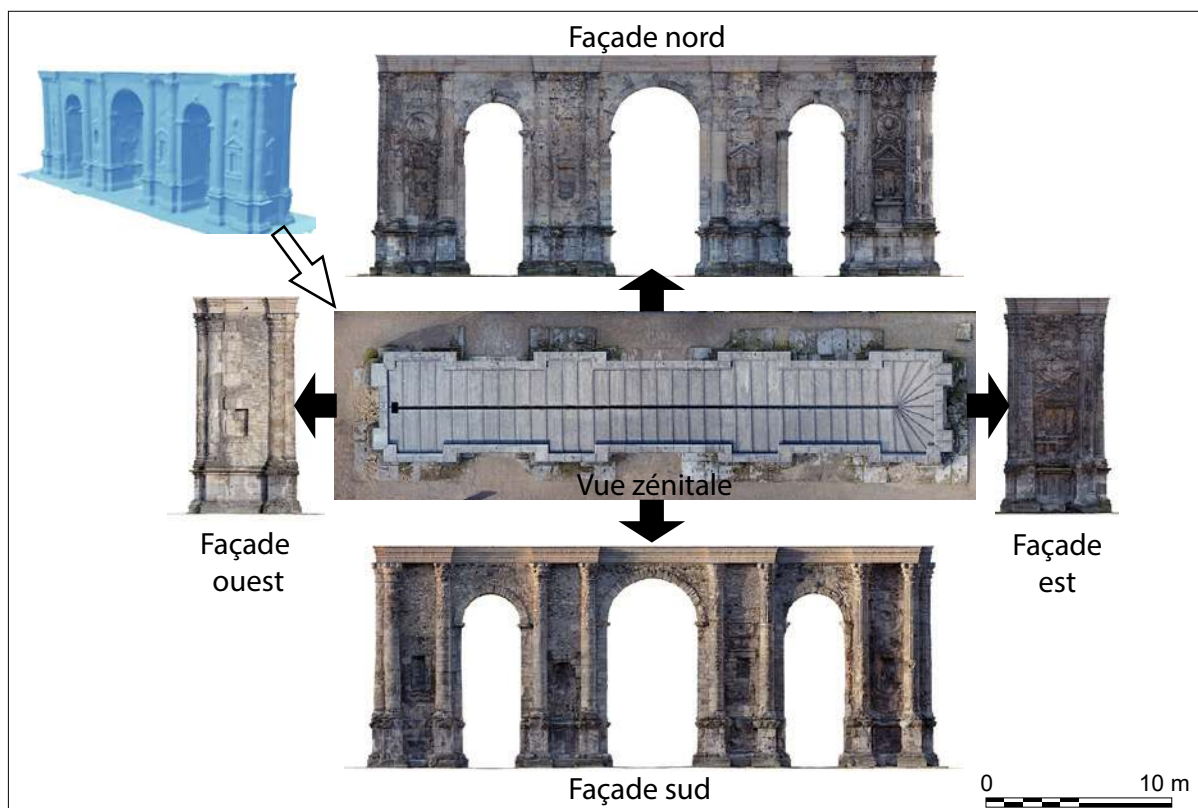


Figure III-17. Extraction des orthophotographies de chaque façade de la Porte de Mars à partir du modèle 3D texturé à haute résolution

## 2.4. La construction du SIG

### 2.4.1. Les prérequis

La recherche sur les techniques 3D dans la gestion de la préservation a été principalement axée sur la visualisation des données plutôt que sur leur analyse. (Campanaro *et al.* 2016). En effet, l'évolution des techniques de l'information et des outils informatiques a naturellement conduit à l'incursion de ces techniques dans les SIG (Berndt et Carlos 2000), à la fois comme instrument de vulgarisation et comme un moyen d'étude du patrimoine dans son contexte historique (Pieraccini *et al.* 2001). L'émergence de questions méthodologiques a naturellement permis de nouvelles applications autour d'études de cas comme Pompéi (Dell'Unto *et al.* 2016), où la documentation du patrimoine a fait l'objet d'analyses thématiques de bâtiments : maçonnerie, dégradations, restaurations et reconstructions... (Salonia et Negri 2003).

Des données documentaires patrimoniales peuvent donc faire l'objet de représentations au sein de systèmes de classification et d'organisation des données spatialisées tels que des SIG. Les formes de représentations canoniques des données du bâtiment (plans, relevés de calepinages et orthophotographies des façades) sont alors réunies au sein d'un ensemble de données unifiées (Campanaro *et al.* 2016). La capacité des SIG à maintenir des données sous forme d'images (plans anciens, photographies, iconographies diverses) dites raster et des données vectorielles (points, lignes et polygones) de significations variées dans le même environnement cohérent apparaît donc comme essentielle. Cependant, malgré l'avantage de disposer des outils d'analyse des SIG, cette solution comporte quelques inconvénients, le principal étant la gestion des géométries complexes (murs courbes, voûtes...) pour lesquelles il est nécessaire de trouver des solutions pratiques pertinentes et géométriquement fiables.

### 2.4.2. Les objectifs de l'outil

Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons construire un ensemble de données structurées à partir de l'étude des matériaux de construction d'un monument antique, la documentation issue de ce travail devant intégrer une étude pluridisciplinaire associant archéologie, archéologie du bâti, et étude stylistique (Brunet-Gaston *et al.* 2020). La structuration de cette base devait donc répondre à des impératifs techniques :

- Rassembler une grande variété de documentation de natures et d'origines variées (orthophotographies, archives, documents archéologiques...);
- Supporter une importante variété d'analyses pour étudier les structures et documenter leurs dégradations (requêtes thématiques, croisements de données, sélections multicritères...);
- Construire des statistiques permettant d'avoir une vision plus claire de l'utilisation des matériaux en fonction de leur période de mise en œuvre (et des éventuelles dégradations du monument);
- Construire de nouvelles cartes thématiques susceptibles de répondre à des interrogations spécifiques (cartes de restaurations, d'authenticité, natures et types des matériaux...).

Dans ce but, le logiciel open source QGIS a été utilisé. Ce choix repose sur l'utilisation de plus en plus généralisée de cet outil libre parmi les différents acteurs du patrimoine et de l'archéologie (services archéologiques, SRA...). Il repose également sur des avantages pratiques dont la possibilité d'importer et d'exporter facilement des ensembles de données aussi bien alphanumériques vers des outils de calcul que des données graphiques vers des formats classiquement utilisés par les « logiciels métiers ». Cet outil contient donc une interface à la dualité affirmée, d'une part graphique autorisant la représentation des données et d'autre part sémantique représentée par les tables de données attributaires liées aux objets (Figure III-18, page III-224).

### 2.4.3. L'organisation générale des données spatialisées

Afin de construire et d'organiser le SIG, nous avons réalisé les opérations suivantes :

- Le géoréférencement sur des coordonnées connues d'un plan d'architecte synthétique (Eugene Architectes du Patrimoine 2018). Ce document est utilisé comme la référence pour tous les relevés concernant l'enveloppe globale du bâtiment. C'est lui qui assure en grande partie la compatibilité géométrique du support.
- Le géoréférencement des données rasters dans le système de coordonnées du projet (dont les données de terrain temporairement intégrées au SIG);
- Le géoréférencement sur les mêmes coordonnées des dérivés du modèle 3D (orthophotographies et modèles numériques d'élévation), afin qu'ils constituent des supports aux digitalisations ultérieures.
- L'organisation des ensembles de données selon des groupes de couches thématiques logiques;
- La digitalisation des données vectorielles depuis les supports rasters.

Les éléments significatifs de l'architecture (attique, colonnes, corniches, socle, dés...)



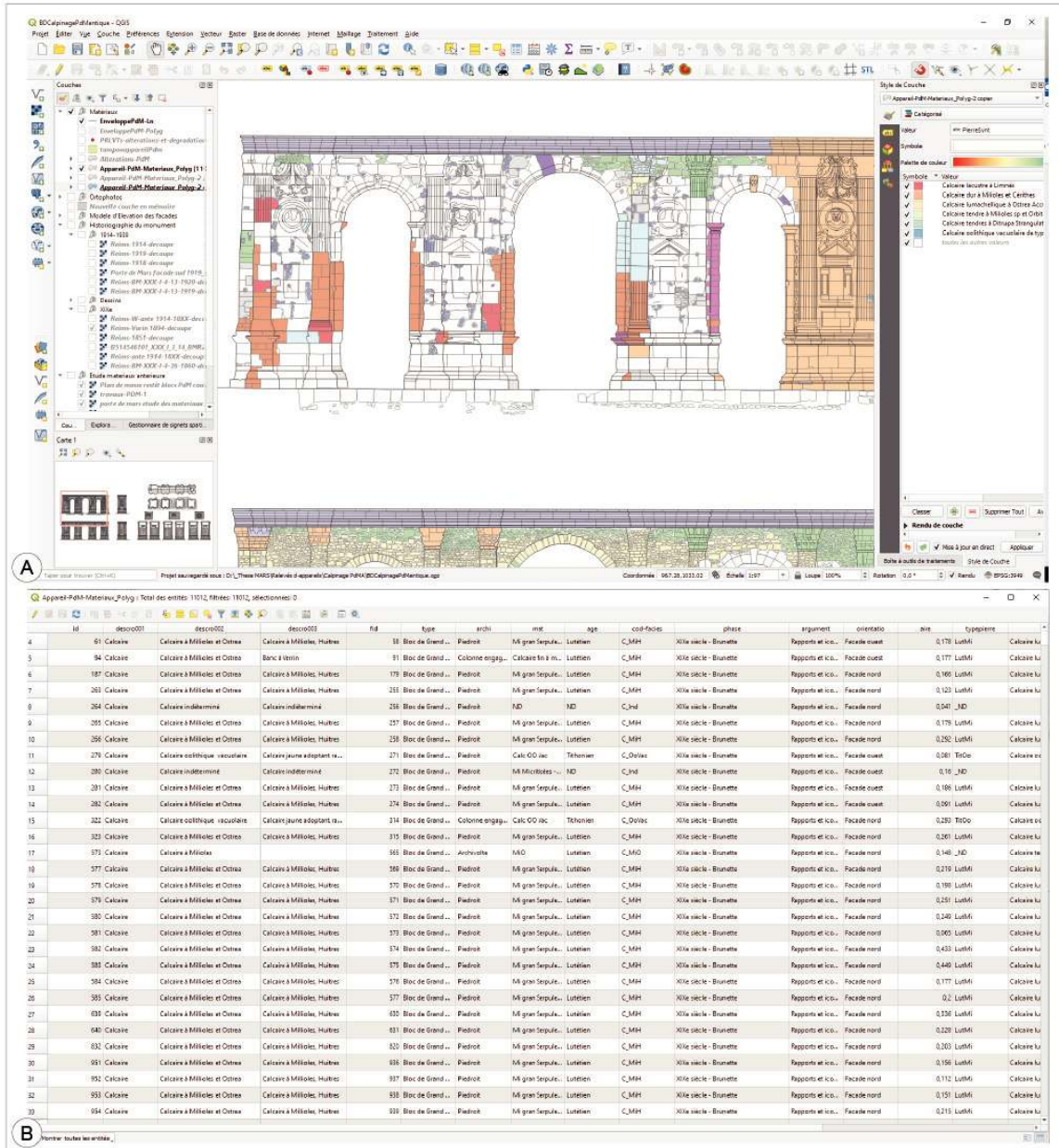


Figure III-18. A. Fenêtre de travail dans QGIS avec analyse thématique ; B. Fenêtre de la base de données des matériaux de la Porte de Mars

sont digitalisés sous la forme de polygones vectoriels et disposés en groupes, selon le type de dessin auquel ils se réfèrent dans un groupe thématique spécifique. Au-delà de leur valeur uniquement esthétique, ces éléments ont vocation à faciliter la prise de repères sur les différentes façades. Ce choix purement sémiologique vise à donner une meilleure lisibilité des représentations à petite échelle, même si les supports photographiques les représentent clairement.

Les relevés réalisés sur le terrain (série de calepinages constituant les minutes de terrain), sont numérisés avant d'être géoréférencés et projetés temporairement pour la durée de la construction du SIG afin d'argumenter le relevé de calepinage. En effet, le plan d'architecte initialement fourni ne reflétait que très imparfaitement le calepinage réalisé dans le cadre de ce groupe de travail et la seule lecture des orthophotographies n'est pas toujours

suffisante pour retrouver un tracé précis. Ces documents permettent également de soutenir la documentation de la base de données des matériaux.

- La vectorisation des portions du monument liées à la couverture surfacique des documents uniques maintenus dans la base de données, et l'établissement d'un lien correspondant ;
- La digitalisation exhaustive des éléments de construction et de la base de données associée. Les éléments partagés entre plusieurs façades sont numériquement fusionnés pour éviter de faire l'objet de comptages multiples ;
- La digitalisation des données vectorielles depuis les supports rasters.

#### 2.4.4. Construction des couches thématiques

**Le géoréférencement des données** : Le dessin d'architecte normalisé au 1/50e de toutes les façades du bâtiment a été fourni par le cabinet d'architecture en charge de la restauration de la Porte de Mars (Eugene Architectes du Patrimoine 2018). Ce dessin a été géoréférencé dans un système de coordonnées métrique (RGF 93 CC49- EPSG3949). Puis, afin de contourner l'impossibilité de représenter dans un SIG des données sur une même verticale, les représentations des façades ont toutes été projetées sur un même plan et organisées de manière à faciliter la compréhension des relations spatiales qui les lient. Enfin, les coordonnées de 16 à 32 points clés par façades, de coordonnées connues, et répartis de manière homogène ont enfin été intégrées pour assurer un calage spatial de qualité optimale. L'agencement obtenu permet de réaliser simplement des mesures à valeur métrique susceptibles d'être comparées les unes aux autres, tout en autorisant la visualisation simultanée de tout le bâtiment (Annexe 17).

**La documentation historico-archéologique** : À l'image de la méthode décrite par Bitelli *et al.* (2019) une collection de documents d'archives historique et archéologique (photographies, plans, relevés et gravures) a été constituée. Ces documents permettent d'obtenir une meilleure compréhension de l'évolution du bâtiment et de son histoire. En effet, certaines phases de restauration sont très peu documentées ce qui justifie pleinement l'usage de documents iconographiques pour identifier des modifications d'état du bâtiment (Adamopoulos *et al.* 2017). Comme le soulignent Bitelli *et al.* (2019), cette opération est facilitée par la structuration spécifique des données, conceptuellement similaire à une organisation d'archives, dans laquelle les données sont référencées numériquement et visuellement.

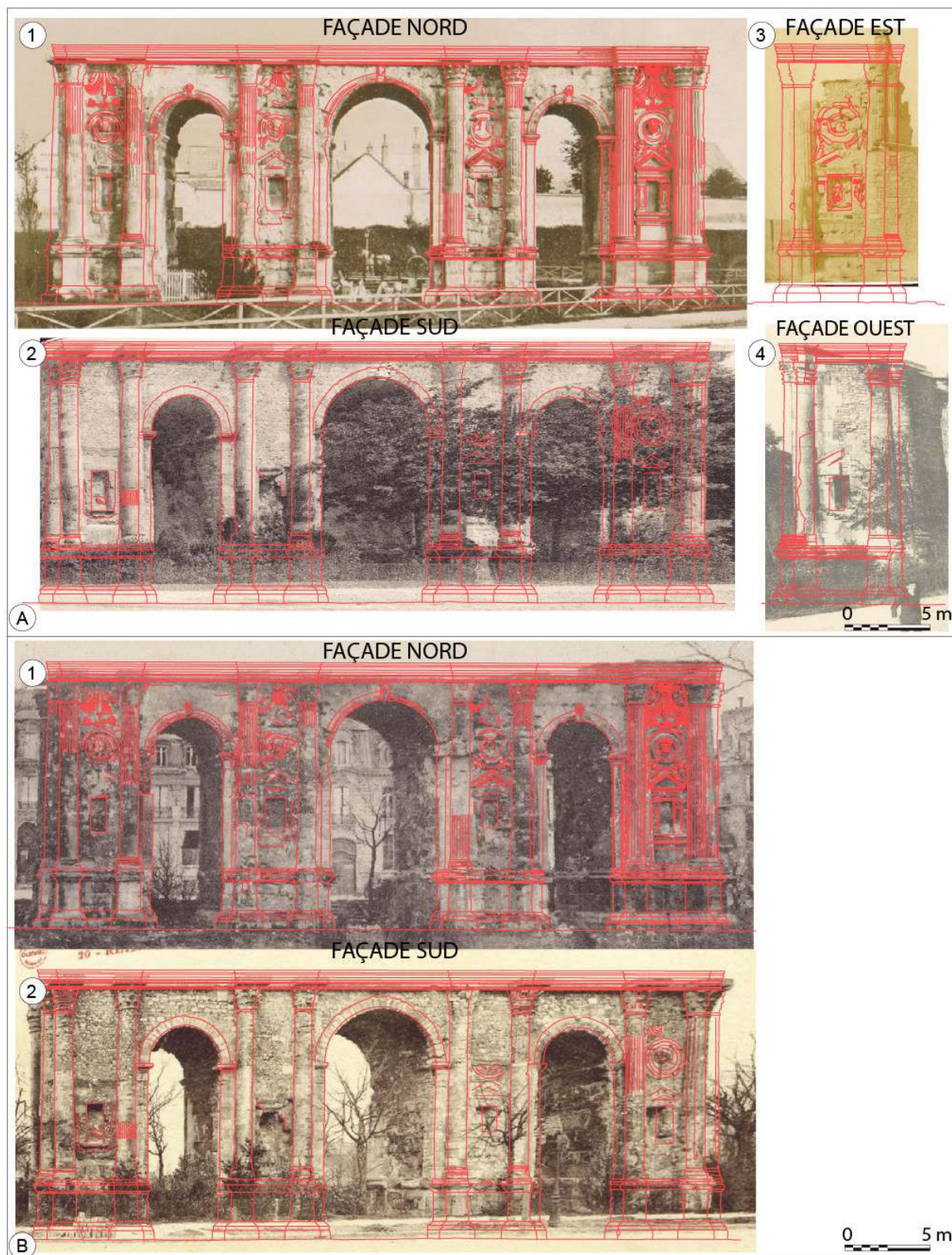


Figure III-19. Photographies anciennes redressées et projetées sur l'enveloppe actuelle du monument A. 1 Façade Nord en 1860 (Varin, 1860, BMR-XXX-I-4-36) 2 — Façade Sud à la fin du XIXe siècle (Collection privée) ; 3. Façade Est (BMR B514546101\_XXX\_I\_3\_14\_BMR22) ; 4 Façade Ouest à la fin du XIXe siècle (Anonyme, collection Thibault) ; B. 1 & 2 : Vues de la Porte de Mars au lendemain de la Première Guerre Mondiale (Anonyme, collection Thibault).

La documentation géométrique des structures historiques fournit des supports qui permettent d'obtenir des produits figuratifs (dessins vectoriels, images...) à différentes échelles. Ces documents aux propriétés métriques, qui se réfèrent à un système orthographique, sont utilisés pour produire des dessins projetés du monument sur des plans verticaux et horizontaux (Georgopoulos, 2016) et permettent de documenter les différentes étapes de restauration.

La solution originale proposée par Bitelli *et al* (2019) consiste à projeter, sur les mêmes coordonnées que les orthophotographies, des vues de la même façade à des dates différentes (Figure III-19 et Annexe 14). Cette opération a un double intérêt puisqu'elle permet de redresser les photographies réalisées avec un axe de prise de vue déporté et de mettre à la même échelle tous les documents intégrés. Les documents sont ensuite organisés sous la forme de couches thématiques, en suivant une organisation typologique et chronologique.

**La documentation des matériaux :** L'enregistrement géométrique à grande échelle (< 1:50<sup>e</sup>) a présenté de nombreuses difficultés en raison du grand nombre d'objets à référencer. La collecte d'informations sur le terrain, initialement facilitée par la présence d'échafaudages<sup>79</sup>, puis par des moyens de levages (nacelles)<sup>80</sup>, a autorisé des relevés précis des matériaux directement au contact des parois. Ces dispositifs ont également facilité les discussions pluridisciplinaires qui ont permis de lever des ambiguïtés d'identifications ou d'attributions. Cependant, certains détails architecturaux, fortement dégradés ou encore recouverts par des restaurations anciennes sont restés difficiles à documenter et à exploiter. De retour au laboratoire, les minutes de terrain quotidiennes portées sur les plans d'architecte (Eugene Architectes du Patrimoine 2018) ont été digitalisées et intégrées au SIG (Figure III-20).

Les différents contours d'éléments ont fait l'objet d'une digitalisation en s'appuyant principalement sur les limites visibles à partir des orthophotographies et sur les minutes de terrain pour la résolution des ambiguïtés (Figure III-20, Annexe 17).

Par ailleurs, le relevé des altérations a été réalisé selon les mêmes modalités en s'appuyant sur le « Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre » de l'ICOMOS (Anson-Cartwright *et al.* 2008). La numérisation détaillée des façades (caractéristiques architecturales, contours) s'est ainsi accompagnée de la digitalisation des altérations des pierres du monument dans l'environnement graphique du SIG.

79 Ces échafaudages, mis en place dans le cours de l'année 2015 en prévision de la refaçon de la couverture de la Porte de Mars ont été déposés au début du mois de Janvier 2018 pour laisser place aux opérations de fouilles archéologiques et aux travaux de réhabilitation des Hautes Promenades. Les relevés utilisés dans ce travail ont été réalisés dans le cours des mois de novembre et décembre 2018.

80 Une seconde mission d'étude en association avec une équipe d'archéologues du bâti s'est déroulée pendant le mois d'avril 2020. L'accessibilité aux parties hautes de l'édifice a été assurée par une nacelle ciseau.

La digitalisation des données spatiales s'est accompagnée de la mise en place d'un processus topologique. Cette étape est apparue essentielle pour que les éléments conservent des relations spatiales cohérentes au sein d'une même couche de données. Cela consiste donc à veiller en permanence que les relations graphiques entre les éléments lapidaires dans les cartes thématiques reflètent effectivement les relations qu'ils entretiennent dans la réalité, comme la contiguïté, la connectivité ou encore les relations de superposition et d'unicité d'éléments partagés entre plusieurs façades (Delegou *et al.* 2013).

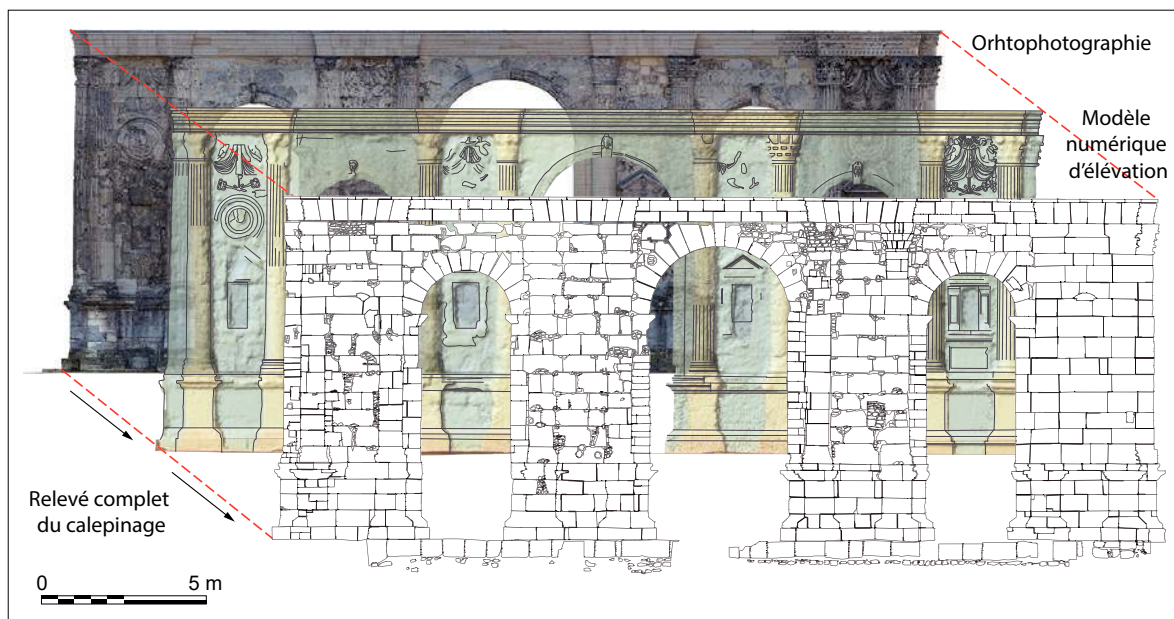


Figure III-20. Aperçu des couches de données intégrées dans le SIG pour la façade nord de la Porte de Mars. L'orthophotographie dérivée du modèle 3D constitue la couche de base avec le modèle numérique d'élevation pour le relevé architectural. Le relevé de calepinage est issu de la digitalisation de l'orthophotographie

#### 2.4.5. Les bases de données spatialisées

En préalable à l'intégration des données dans le SIG, celle-ci a fait l'objet d'un travail de conception logique. Les différents niveaux d'informations sont organisés sous la forme de tables attributaires, de l'objet le plus général au plus spécifique. Ainsi, dès la conception, pour chaque élément, une table a été prévue, comportant des entrées de données descriptives susceptibles de participer à la création de cartes thématiques. Ces tables permettent en outre l'adoption d'un schéma de classement hiérarchique des informations.

La « multitude » de données (qualitatives et quantitatives) associées à chaque élément a été connectée avec les objets digitalisés sur la base de leurs attributs géospatiaux (positions dans l'espace). Puis, les informations relatives aux matériaux ont été intégrées élément par élément afin de retranscrire avec précision les observations réalisées sur le monument (Annexe 11). Ainsi, pour chaque élément de construction, les informations liées aux descriptions faciologiques (chapitre II.2.2) ont été intégrées en association avec des données architecturales et historiographiques. Les découpages architecturaux sont issus de la documentation disponible sur ce monument (Brunet-Gaston *et al.*, 2021) et d'une discussion interdisciplinaire avec les archéologues spécialistes du bâti antique avec qui l'étude a été menée (Figure III-21, Brunet-Gaston *et al.*, 2021). Dans cette organisation, la topologie de l'information est liée directement

à la manière dont cette dernière est intégrée dans les tables attributaires. Ces caractéristiques descriptives reliées à leurs représentations sous forme d'entités spatialisées peuvent alors faire l'objet d'un affichage thématique spécifique. La construction de ces cartes pouvant refléter une information telle qu'elle a été intégrée (donnée brute) ou alors une information qui a fait l'objet d'un processus de traitement logique ou numérique (analyse).

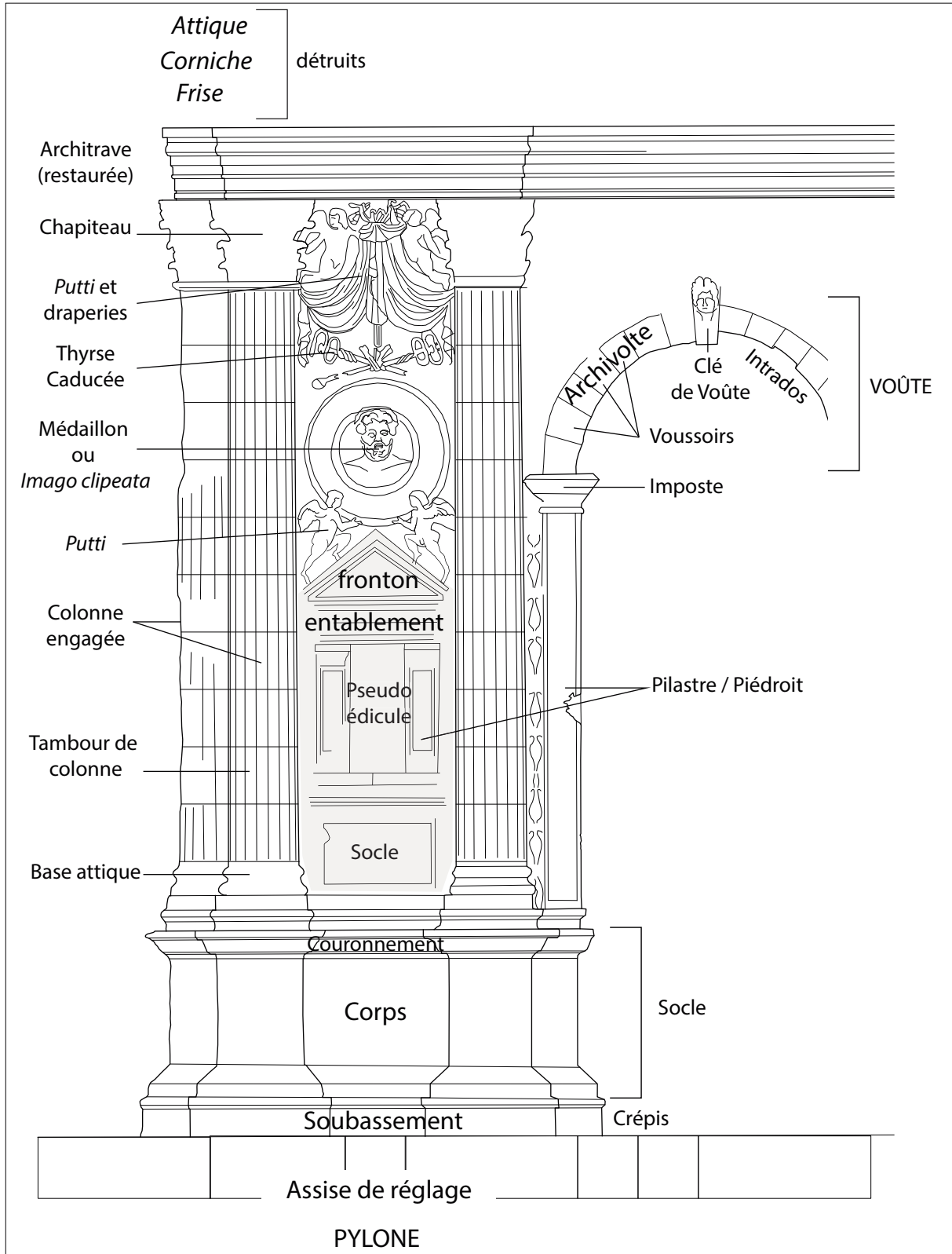


Figure III-21. Références de vocabulaire architectonique utilisé dans la base de données des matériaux (V. Brunet-Gaston)

En synthèse, la figure suivante (Figure III-22) récapitule l'ensemble des différentes étapes du traitement de l'information depuis les acquisitions de terrain jusqu'à la création de supports thématiques exploitables. Cette approche montre également que la compilation de données issues de plusieurs sources et abondées sur le long terme, permet de maintenir un outil complet de collationnement et d'exploitation des connaissances sur les matériaux d'un monument au sein d'un SIG dédié à l'étude du bâti en élévation.

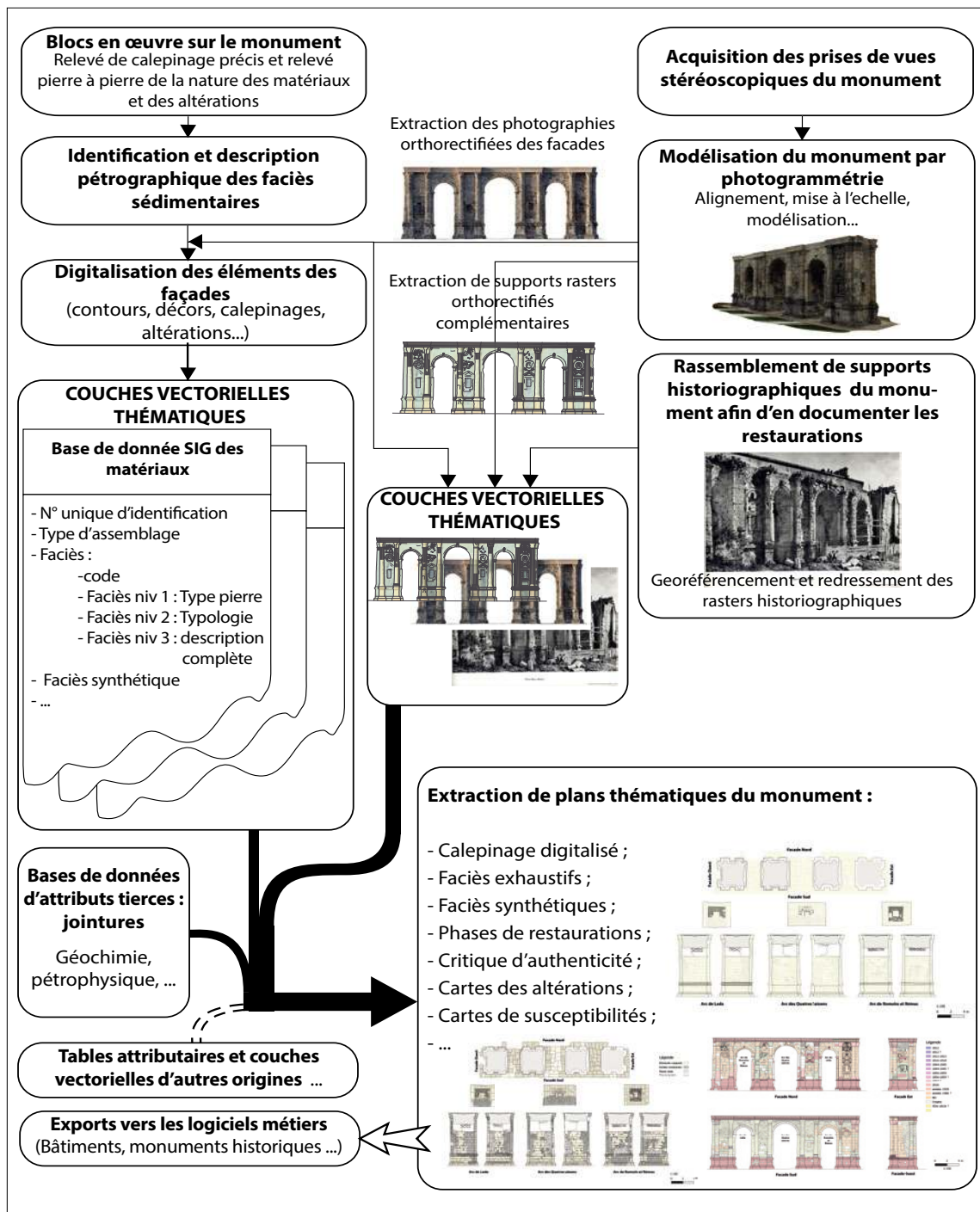


Figure III-22. Synthèse méthodologique de l'étude des matériaux d'un monument à l'aide d'une SIG et de la modélisation photogrammétrique

### 3. Identification et caractérisation des matériaux de la Porte de Mars.

#### 3.1. L'étude antérieure

Ce monument a fait l'objet d'une unique étude de ses matériaux de construction réalisée par A. Blanc (1984 ; Figure III-23). Cette étude a été réalisée à la faveur d'une campagne de restauration visant au nettoyage et à la consolidation des décors de l'édifice, sujets à d'importantes dégradations. Ce travail a ensuite été partiellement publié quelques années plus tard afin d'illustrer l'étude des matériaux en œuvre en Champagne et en particulier à Reims (Blanc 1992).

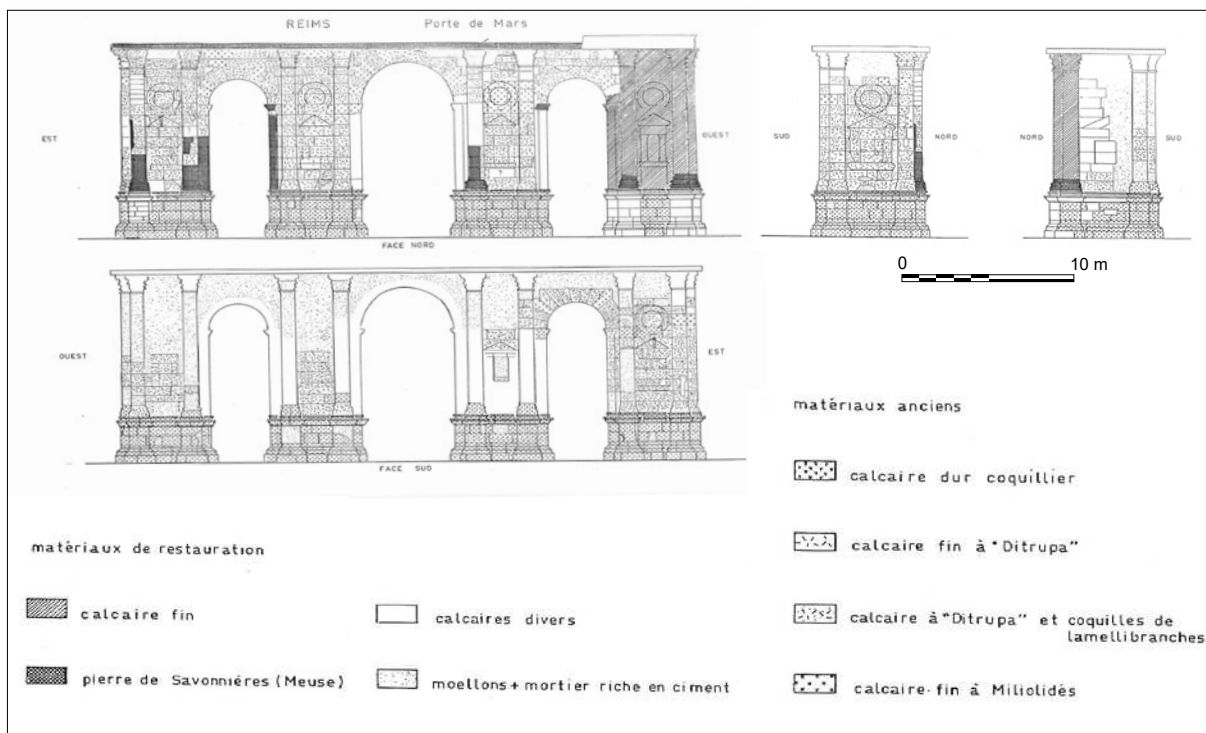


Figure III-23. Synthèse des matériaux de construction de la Porte de Mars selon A. Blanc (1984)

Dans ce travail, l'auteure a identifié grâce à une détermination des faciès macroscopiques similaire à celle mise en place ici, quatre calcaires principaux pour la phase de construction de l'édifice qu'elle distingue comme suit :

- Calcaire dur coquillier
- Calcaire fin à « *Ditrupe* »
- Calcaire à « *Ditrupe* » et Coquilles de lamellibranches
- Calcaire fin à Miliolidés



De la même manière, elle identifie quatre principaux faciès ou assemblages de faciès pour les matériaux de restauration :

- Calcaire fin
- Calcaire dit de Savonnières (Meuse, Oolithe vacuolaire du Jurassique terminal)
- Calcaire divers
- Moellons et mortier riche en ciment

L'auteure ne précise d'ailleurs pas dans cette étude quels sont les critères précis qui ont permis la construction de la critique d'authenticité du bâtiment qu'elle présente (Annexe 13). De plus, ce travail ne prend pas en compte les blocs de moellons ou de calage, notamment de nature autre que calcaire (grès et meulières) pourtant fortement représentés dans les parements de la façade sud et dans les élévations du monument.

A. Blanc concluait ce travail en attribuant l'origine vraisemblable de ces calcaires de construction originaux de l'édifice aux « calcaires grossiers » (Annexe 3) du Lutétien tout en proposant qu'ils soient issus des affleurements présents au nord-ouest de Reims, dans le secteur du Massif Saint Thierry. Les observations réalisées au cours de cette campagne d'étude confirment globalement celles réalisées à l'époque, en affinant toutefois les caractérisations des matériaux et surtout la cartographie de la diversité des pierres dans l'édifice.

### 3.2. Les matériaux du monument

Le relevé des matériaux du monument et leur cartographie sont parmi les travaux les plus évidents de tous ceux qu'il est possible de réaliser dans le cadre de l'étude d'un bâtiment.

C'est à cette occasion que l'exploitation des données historiques s'y référant et en particulier les références aux travaux de restauration s'avère la plus utile puisqu'elle donne une partie des clés de lecture nécessaire à leur caractérisation.

C'est également ce travail d'identification et de relevé du calepinage qui débouchera sur la construction d'une critique d'authenticité<sup>81</sup> à l'échelle du monument, mais aussi de plusieurs autres cartes telle que la cartographie des restaurations.

#### 3.2.1. La méthode de description

La description des géomatériaux observés a été réalisée en appliquant les principes de la sédimentologie de faciès. Celle-ci a pour objectif d'établir une description « standardisée » en s'appuyant d'une part sur la description du lithofaciès de la roche (caractères lithologiques) et d'autre part les biofaciès (caractères paléontologiques). Comme pour les matériaux mis au jour à la faveur de fouilles, les roches ont été décrites sur site, à partir d'un échafaudage ou d'une nacelle grâce à des arguments macroscopiques (Figure III-24). Les observations ont été réalisées de façon macroscopique sur toutes les surfaces accessibles des blocs à l'aide d'une loupe à main X10. Les missions de descriptions se sont déroulées entre Novembre et décembre 2018 pour totaliser 35 jours d'identification et de description des pierres du monument et d'en réaliser un relevé de calepinage précis.

---

81 La critique d'authenticité est un exercice dans lequel l'objectif est de rechercher quelles sont les pierres d'origine d'un bâtiment en opposition avec celles qui ont fait l'objet de restaurations

Les lames minces, supports des observations microscopiques ont été confectionnées selon la norme NF EN 12 407 « Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Examen pétrographique » (AFNOR 2019), par la société Thin Section Lab. Les faciès carbonatés ont été décrits selon les classifications de Folk (1959) et de Dunham ; Figure III-24). Les échantillons ont d'abord été observés au microscope optique en lumière polarisée non analysée (LPNA) ainsi qu'en lumière polarisée analysée (LPA) à l'aide d'un microscope polarisant Olympus BX51.

Une partie des descriptions des pierres ont également bénéficié de la réalisation d'un carottage sur toute la hauteur de la façade ouest de la Porte. Celui-ci a été réalisé pour permettre le passage d'une descente d'eau pluviales à travers ces blocs de la pile



Figure III-24. A. Nouvelle couverture du monument mise en place en 2016 ; B. Description des pierres du sommet de la façade est depuis l'échafaudage ceignant le monument ; C. Vues extérieure de la Porte de Mars échafaudée en 2016 ; D. Description des pierres des façades des baies de l'Arc à l'aide d'une nacelle ciseau.

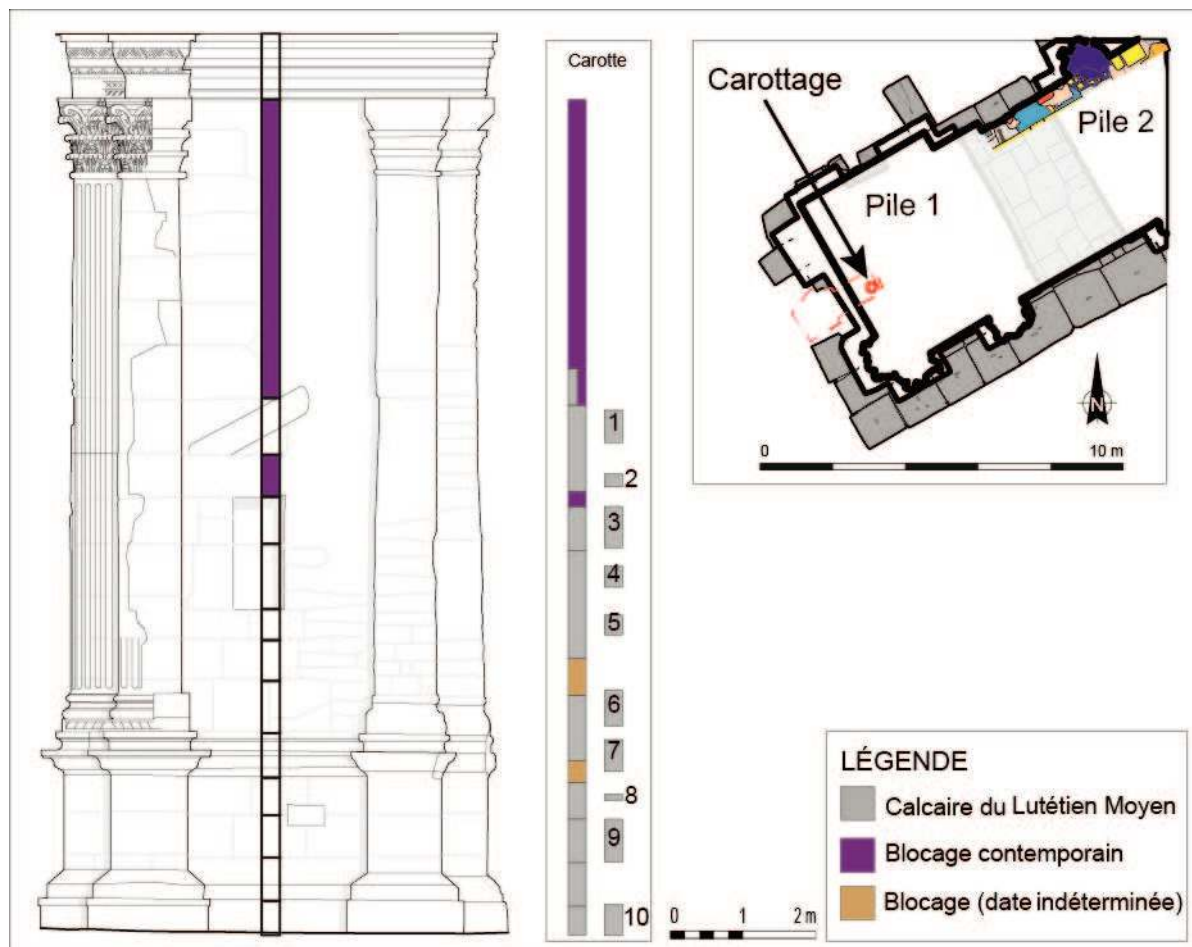


Figure III-25. Parement de la pile ouest et tracé du carottage technique creusé dans la pile ouest (Bontrond *et al.*, 2019)

reconstruite par N. Brunette. Ces carottes après avoir été repositionnées verticalement ont fourni de nombreux échantillons pour la description et la réalisation des caractérisations pétrophysiques. Les pierres du Lutétien ont bénéficié d'une méthodologie descriptive très détaillée en raison de la complexité des dépôts de cet étage, qui présentent de nombreux sous faciès, caractérisés par différents biofaciès. Ces derniers constituent des informations importantes pour l'argumentation des provenances de ces roches ou pour mieux comprendre leur type d'emploi.

Les échantillons de calcaires prélevés sur le bâtiment ou leurs équivalents sont identifiés selon un code stratigraphique intégrant globalement les subdivisions du Lutétien (Lut) et du Bartonien (Bart ; I.2.5, page I-45). Pour ces derniers, un doute existant sur l'attribution des calcaires à limnées à cet étage, mais ils diffèrent d'un point de vue génétique (ce sont des calcaires lacustres) il a néanmoins été choisi de leur accoler cet identifiant permettant de mettre cette spécificité en exergue.

### 3.2.2. Les sites de prélèvements des matériaux

Le statut protégé de la Porte de Mars ne permet que de manière très limitée la réalisation de prélèvement de petite dimension pour l'identification des faciès, mais en revanche pas

ceux, de plus grande taille, destinée à la caractérisation des propriétés pétrophysiques des matériaux. Cependant, afin de pouvoir réaliser ces caractérisations, des matériaux équivalents ont été sélectionnés en particulier en vertu de leur proximité faciologique avec les pierres du monument. Les pierres utilisées dans la construction initiale de la Porte de Mars, mais aussi une grande partie de celles utilisées dans le cadre des restaurations du XIX<sup>e</sup> siècle sont des pierres calcaires issues des dépôts du Lutétien. Formation sédimentaire pour laquelle il a été reconnu par de nombreux auteurs de très importantes variations latérales, à la fois de faciès, mais aussi de stratonomie (Gély 1996 ; 2009 ; Fronteau *et al.* 2010 ; Fronteau *et al.* 2021). Cependant, les travaux de Fronteau (2000) ont permis de proposer une cartographie des faciès des pierres calcaires du Lutétien en fonction des secteurs géographiques où ces derniers affleurent. Cette dernière ayant été modifiée afin de prendre en compte les différents districts carriers présents (Fronteau *et al.* 2014 ; Fronteau *et al.* 2021 ; Figure III-26). Au cours de ce travail, l'auteur a également décrit les microfaciès exprimés au sein de ces calcaires en liant chacun d'eux aux altérations qu'ils sont susceptibles de développer. C'est en grande partie en s'appuyant sur les délimitations proposées dans ce travail qu'ont été sélectionnés les différents calcaires choisis comme équivalents aux calcaires originels de la Porte de Mars.

Afin de dresser un panorama des pierres du monument le plus complet possible, les pierres échantillonnées ont été sélectionnées en fonction de leurs faciès en s'attachant à sélectionner plusieurs équivalents possibles pour chaque groupe. L'ensemble des échantillons représente donc une synthèse assez complète de la colonne stratigraphique lutétienne du secteur du Soissonnais et du Laonnois. Ces prélèvements de matériaux postulés comme équivalents à ceux du monument sont issus de plusieurs localités de ce secteur comme Pargnan, Veslud, Colligis-Crandelain ou encore Vendresse-Beaulne (Figure III-27). Un autre bloc provient d'une opération de fouille réalisée à Bezannes, à proximité de Reims. La localisation des sites d'origine des prélèvements est détaillée ci-après, commune par commune. Quant à eux, les échantillons sont identifiés en fonction de leur position stratigraphique.

**Les pierres de Pargnan (Annexe 23) :** Trois échantillons ont été collectés dans la commune de Pargnan. (**Lut I a**, **Lut I c** et **Bart a**). Le premier des échantillons (**Lut I a**) a été prélevé dans une ancienne carrière de pierres de taille reconvertie en champignonnière (« La carrière ») localisée à l'est du village. Cette carrière ne fait plus l'objet d'une exploitation de pierre depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, mais présente encore des fronts de taille en excellent état. Lorsqu'elle était en activité, les carriers exploitaient préférentiellement les calcaires lutétiens du banc à vérins.

Le second échantillon (**Lut I c**) a été prélevé dans les blocs d'un ciel de carrière partiellement effondré à la sortie est du village de Pargnan dont l'altitude et le faciès correspondent à ceux du toit de la carrière précédente.

Enfin, le dernier prélèvement est un calcaire à Limnées (**Bart b**), qui a été trouvé parmi des blocs erratiques en bord de champ sur les hauteurs du plateau de la commune axonaise de Pargnan.

**Les pierres de Veslud (Annexe 24) :** Ces calcaires ont été prélevés au sein des bancs exploités dans les carrières souterraines qui dominent le village de Veslud. Le réseau de carrière est très étendu dans les calcaires qui arment le sommet des plateaux de ce secteur en limite du Laonnois.

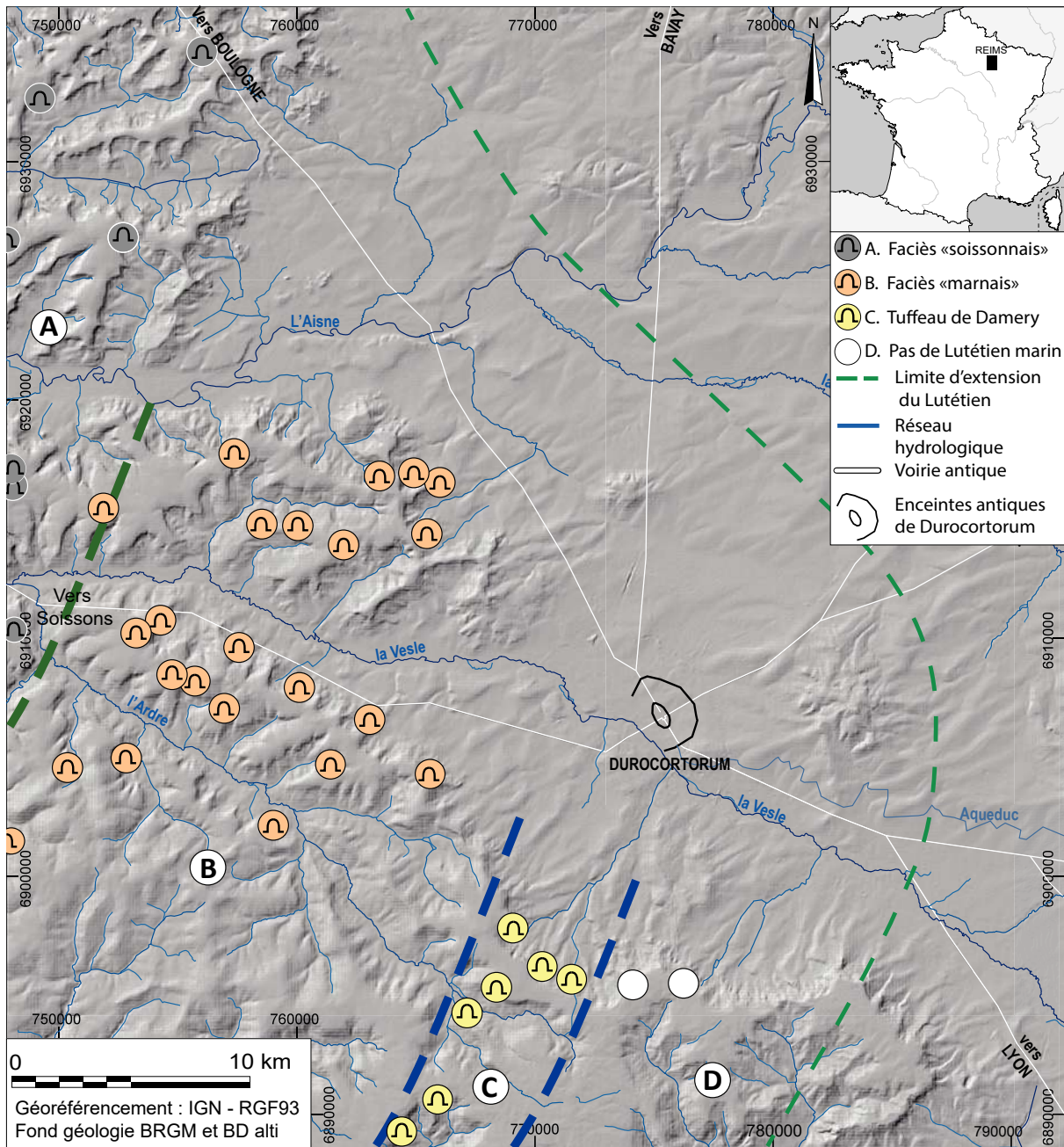


Figure III-26. Zonation des calcaires grossiers du Lutétien et découpage de secteurs de faciès types (Fronteau *et al.* 2021)

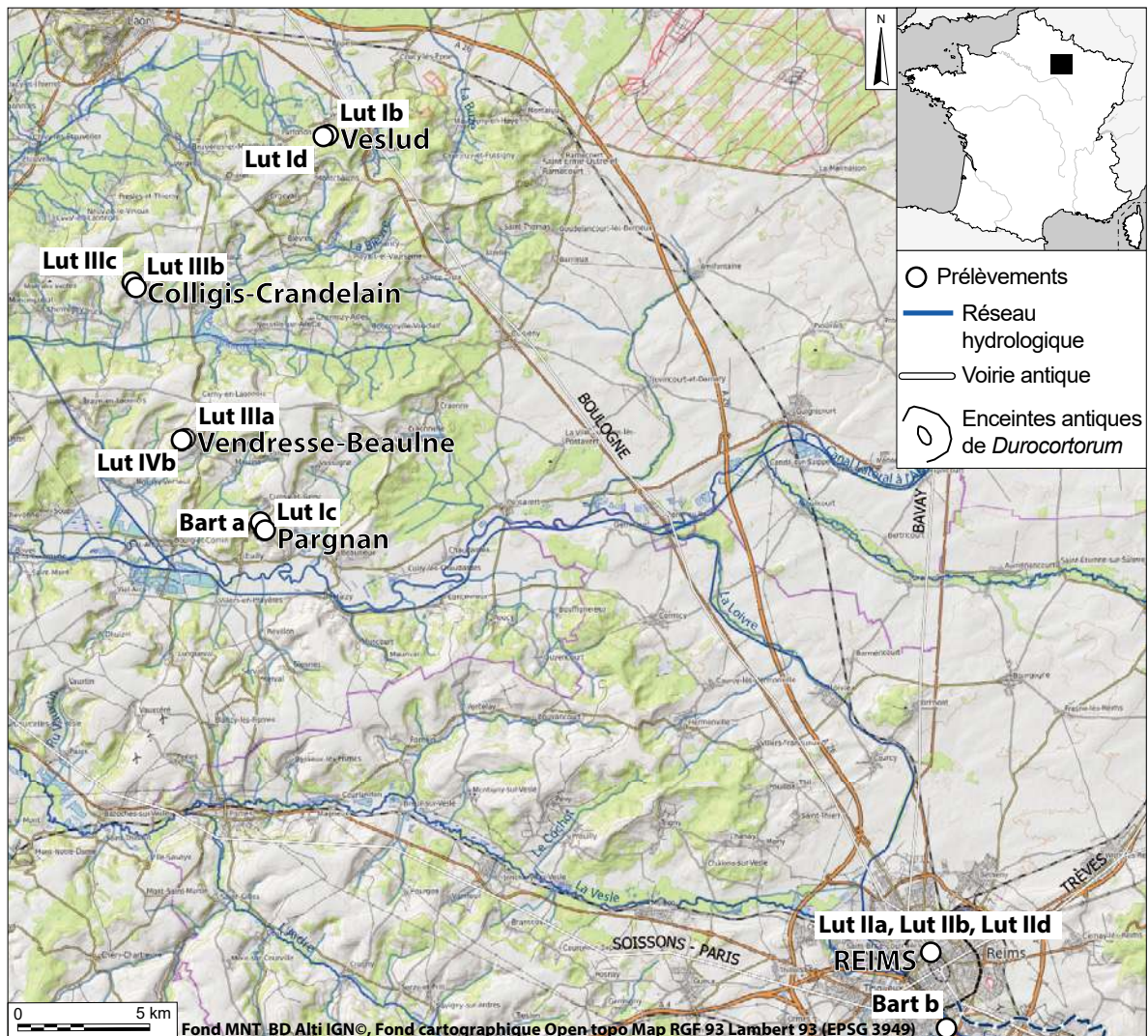


Figure III-27. Localisation des sites de prélèvements d'équivalents aux matériaux de la Porte de Mars

Un premier prélèvement (**Lut I b**) a été réalisé dans un bloc issu de la paroi de la grande carrière souterraine qui domine le village. Ce bloc de calcaire est issu d'un bloc de calcaire juste détaché de la roche (préparé, mais pas déplacé). Le second échantillon (**Lut I d**) a été prélevé à proximité de l'entrée de la carrière dans un niveau de calcaire bioclastique particulièrement riche en *Ditrupe*. Ce prélèvement a été réalisé afin d'évaluer le contraste induit par la surreprésentation de ces fossiles pour les propriétés de ces calcaires.

**Les pierres de Colligis-Crandelain (Annexe 25) :** La localité de Colligis a depuis très longtemps la réputation d'être l'origine des calcaires des blocs de grand appareil utilisés dans la construction antique de Reims (Fronteau *et al.* à paraître). De plus, la présence de faciès similaire est mentionnée dans la documentation de la carte géologique de Craonne (Laurentiaux

*et al.* 1972). Cette localité abrite de nombreuses carrières souterraines, cependant plus aucune n'est en activité. Les échantillons ont donc été prélevés en deux sites distincts (**Lut III b** et **Lut III c**). Ces deux échantillons de calcaires sont issus des carrières à ciel ouvert exploitées en avant des carrières souterraines. Ils ont été réalisés dans deux bancs distincts, mais de faciès proches afin de refléter les variations faciologiques constatées sur le site.

**Les pierres de Vendresse-Beaulne (Annexe 26)** : Deux échantillons ont été collectés dans cette commune. Ils sont tous deux issus de carrières de pierres de taille situées sur le plateau dominant, armé par les calcaires du Lutétien. Cette carrière a été reconnue récemment comme ayant déjà été exploitée au cours de la Protohistoire et de l'Antiquité (Naze *et al.* 2011). Une quantité appréciable de ces dernières ont notamment été retrouvées dans l'agglomération de Reims/Durocortorum. Outre ces macro-outillages lithiques, des éléments architecturaux de grand appareil (base et chapiteaux de colonnes) ont également été confectionnés à partir des pierres issues de cette formation. Les carrières ne sont plus en activité et par conséquent leurs fronts de taille sont très dégradés et colonisés par la végétation. Cependant, en quelques endroits la pierre est encore accessible permettant de prélever des échantillons correspondants aux deux principaux Faciès présents dans ces exploitations et reconnus dans le bâti rémois (**Lut IIIa** et **Lut IVb**).

**La pierre de Bezannes (Figure III-27)** : Il s'agit d'un calcaire à limnées d'origine antique constituant un bloc de grand appareil prélevé à la faveur d'une fouille archéologique réalisée par l'INRAP lors des opérations d'aménagement de la Ligne à Grande Vitesse et de la Zone d'activité de Bezannes. Ce bloc de grand appareil était utilisé comme soubassement (assise de réglage) d'un monument funéraire gallo-romain. Les échantillons étudiés ont été dénommés **Bart b**. Ce même bloc a déjà fait l'objet de prélèvements et de caractérisations dans le cadre du travail de thèse de Turmel (2014).

### 3.1.2. Les matériaux de construction antiques

L'attribution d'une origine antique aux matériaux de construction de ce monument nécessite une brève introduction. En effet, il s'agit de jeter les bases à la réalisation d'un relevé des pierres antiques en vue, entre autres, d'en tirer des supports spatialisés dont une critique d'authenticité de pierres de ce monument, mais aussi des cartes de répartition (faciès, altérations...). L'objectif de la construction de ces cartes est surtout d'accéder à une information quantifiée pour chacun des paramètres envisagés avec toutefois une attention particulière sur les matériaux antiques de l'édifice.

Depuis la réalisation de l'étude de A. Blanc en 1984, de nombreux autres travaux sur les géomatériaux de constructions antiques de Reims ont été réalisés, augmentant considérablement le corpus de sites décrits et de blocs observés. On peut citer notamment l'étude des matériaux de la fouille de la rue Belin (Fronteau et Paicheler 1999 ; 2005), des fouilles de la rue Rockefeller (Blanc et Blanc 2005 ; Blanc in Brunet-Gaston 2008), auxquelles doivent s'ajouter toutes les études entamées aux débuts des années 2000 sur les pierres et géomatériaux de Reims, durant l'Antiquité, mais aussi de façon diachronique (Fronteau *et al.* 2000 ; 2008 ; 2014 ; 2019). À toutes ces études, s'ajoutent les travaux sur la nature des matériaux de construction antiques présentés dans le chapitre précédent. Cet héritage scientifique

constitue donc une base stable de discussion et de comparaison utile à la discrimination des usages de matériaux lapidaires. De plus, sur la Porte de Mars, la discrimination entre matériaux anciens et de restauration peut en partie reposer sur l'étude du calepinage. En effet, la construction antique s'est appuyée sur l'utilisation exclusive du grand appareil à base de blocs calcaires. Les phases de restauration ont été réalisées selon des modalités d'assemblage différentes correspondant à des matériaux plus variés. Les matériaux de construction sont assemblés selon plusieurs modalités, de l'*opus quadratum* utilisée pendant l'antiquité ou pour les restaurations supervisées par N. Brunette aux *opus incertum* et *vittatum* des phases successives de travaux du XIX<sup>e</sup> siècle (Figure III-26).

L'authenticité d'un bloc de construction peut être démontrée en s'appuyant sur un faisceau d'arguments aussi bien lithologiques que morphologiques ou fonctionnels :

- Nature et faciès du bloc : ces derniers sont nécessairement en calcaire et d'un faciès cohérent avec ceux utilisés en grand appareil dans l'Antiquité.
- Mode d'appariement des blocs : les blocs antiques sont assemblés en *opus quadratum* à joints francs.
- Cohérence du module des blocs de grand appareil par rapport à l'ensemble de l'assise : dans une même assise, les blocs sont de hauteur similaire.
- Présence d'aménagements techniques comme des cavités de levage : trou de louves - lorsqu'elles sont visibles ou encore traces de prédation des agrafes de fer.
- Modalités de préparation des surfaces : traces d'utilisations d'outils en lien avec l'époque d'utilisation de ce dernier.
- Enfin, dans une minorité de cas, les arguments stylistiques des éléments.

Au cours du travail d'identification des pierres sur le terrain certains blocs ont fait l'objet de discussions préalables à un consensus quant à leur authenticité. Celles-ci ont permis l'échange d'arguments entre spécialités transversales permettant de définir des compromis sur des blocs dont l'interprétation pouvait apparaître ambiguë.



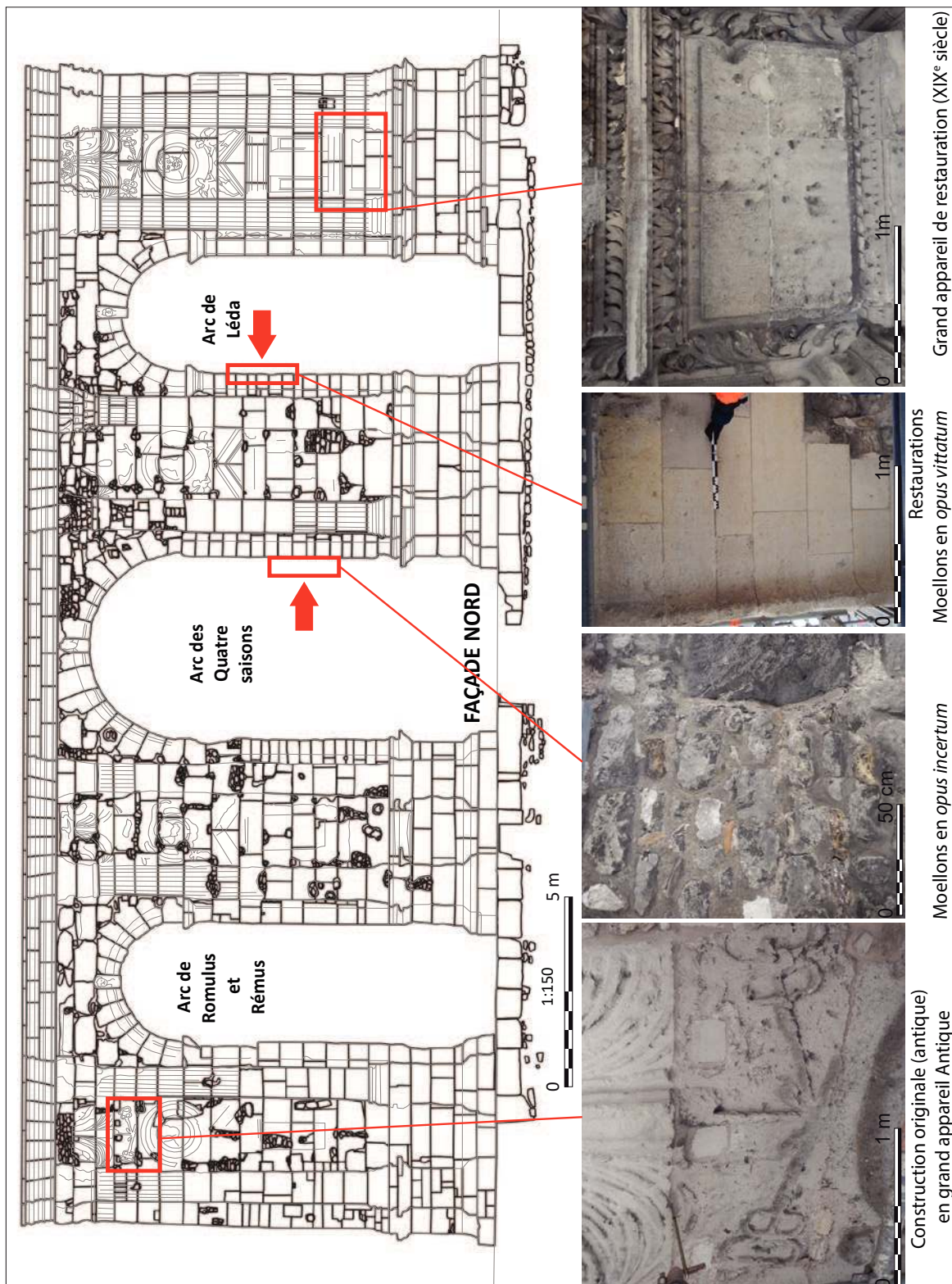


Figure III-28. Différentes modalités d'assemblages des matériaux de construction observés dans le monument.

**Les calcaires tendres à *Ditrupa Strangulata*** : Ces calcaires appartiennent aux calcaires grossiers du Lutétien moyen où ils sont en général associés aux premiers dépôts marins de cet étage visibles dans la région. Ils sont considérés comme équivalents latéraux aux « Bancs de Saint Leu » du centre du Bassin Parisien exploités en carrières souterraines depuis l'Antiquité (Gély et Blary 2013 ; Gély 2016 ; Blary et Gély 2020).

**Description** : ces calcaires sont hétérogènes, beige à beige terne, parfois légèrement verdâtre, comprenant une matrice microgranulaire assez fine et, en quantité très variable, des tubes de *Ditrupa strangulata* (Deshayes ; Figure III-29). Les pierres de ce faciès sont fortement poreuses du fait de la nature de leur matrice, du fait notamment de la lumière des tubes de *Ditrupa* souvent encore ouverte en l'absence de ciment ou de sédiments internes. Ces éléments figurés sont généralement entiers, orientés et juxtaposés formant de véritables amas dans la roche. Cependant, la proportion de tubes de *Ditrupa* peut varier très fortement selon les blocs observés et au sein d'un même bloc. La présence de *Ditrupa* visible à l'œil nu ou à la loupe en quantité rapidement appréciable (au-delà d'une dizaine d'individus) est nécessaire et suffisante pour l'attribution du bloc à ces faciès.

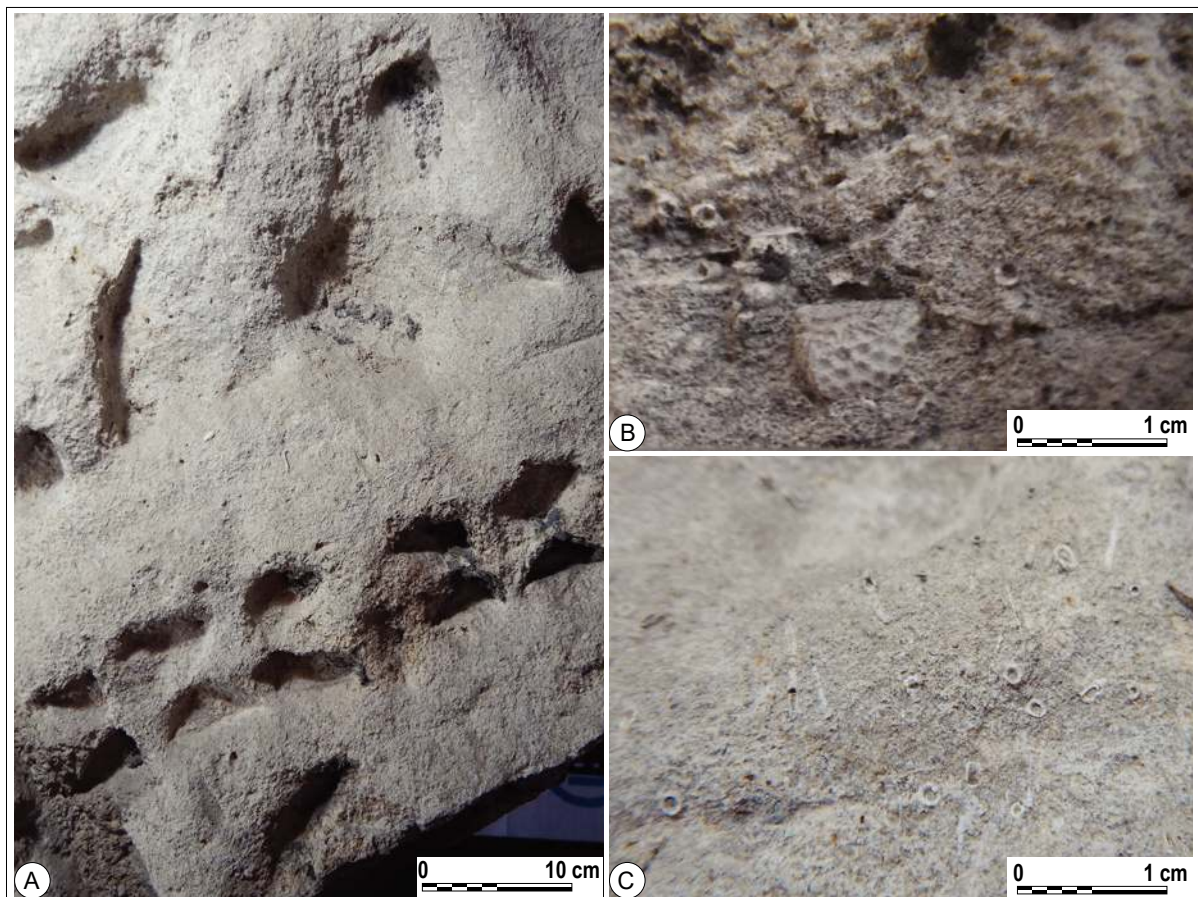


Figure III-29. Exemple de calcaires à *Ditrupa* photographie des calcaires à Miliolites et Orbitolites A Photographie du calcaire en œuvre ; B. et C. Observations macroscopiques

Les tubes de *Ditrupa* sont très fréquemment mis en relief par l'érosion de la matrice qui les emprisonne. Ils sont couramment associés à une grande variété d'autres fossiles comme des *Orbitolites complanatus* (Lamarck), généralement très grands et bien visibles, des bivalves subsistant sous la forme de vides moldiques, des gastéropodes sous forme d'empreintes, mais aussi d'autres familles de foraminifères comme des miliolites, de petites *Nummulites* (peu

fréquentes) ou de rares *Alvéolina*. Très fréquemment, on les trouve en association avec des fragments de tests d'échinodermes (oursins et astéries ; Figure III-29 B) et plus rarement avec des polypiers solitaires *Balanophyllia (Eupsammia) trochiformis (Pallas)*.

**Les variantes de ce faciès :** Calcaire tendre à *Ditrupa*, Calcaire tendre à *Ditrupa* et *Orbitolites* Calcaire tendre macroporeux à *Ditrupa* et *Orbitolites*, Calcaire tendre à *Ditrupa* et rares cérithes.

Il existe de nombreuses variations de ce faciès, mais elles se distinguent toutes par la présence en quantité importante des tubes de *Ditrupa*. La matrice microgranuleuse peut être plus ou moins poreuse, voire friable. Il a occasionnellement été observé une présence de grains de quartz verdis et de quelques grains de glauconite.

Ce dernier faciès semble être très commun dans les élévations de l'édifice. Il est utilisé préférentiellement pour confectionner les vousoirs des baies de l'édifice.

**Description du microfaciès Lut Ia :** Ce prélèvement de calcaire est constitué d'un fond en élément figuré d'origine biodétritique très riche en grains de quartz de faible granulométrie (Figure III-30). L'aspect altéré des ciments atteste d'une dolomitisation de l'ensemble de l'échantillon. Les éléments figurés sont représentés par de très nombreux tubes de *Ditrupa strangulata*, dont les lumières sont très imparfaitement comblées, de très nombreux fragments d'*Ostrea* et de gros fragments d'échinodermes. À ces fossiles très abondants s'ajoutent quelques très rares milioles et des fragments d'*Orbitolites* et de nombreux *pellets*. Outre la présence des nombreux quartz, quelques grains de glauconie ont également été observés confirmant ainsi les observations macroscopiques. Ce calcaire est un **packestone à *Ditrupa*** (Dunham 1962) ou une **biopelsparite** (Folk 1959).

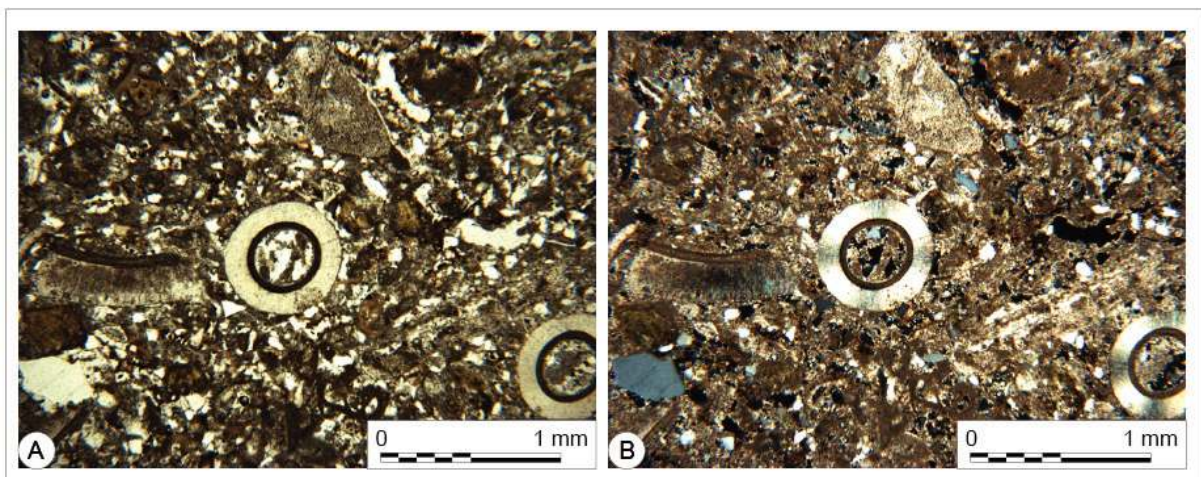


Figure III-30. Microphotographie de Lut Ia. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Description du microfaciès Lut I b :** Ce calcaire est principalement caractérisé par la très grande proportion de tubes de *Ditrupa strangulata* qu'il contient et leur très bon état de préservation. Il est constitué d'un fond d'origine biodétritique très riche en grains de quartz de faible granulométrie (Figure III-29.). Les éléments figurés sont représentés par de très nombreux tubes de *Ditrupa strangulata*, dont les lumières sont imparfaitement cimentées, de très nombreux fragments d'*Ostrea* et d'échinodermes auxquels s'ajoutent de très rares milioles

et des fragments d'*Orbitolites*. Outre la présence de nombreux quartz, des grains de glauconie ont été également observés confirmant les observations macroscopiques. Ce calcaire est un **packstone à foraminifères** (Dunham 1962) ou une **biopelsparite** (Folk 1959).

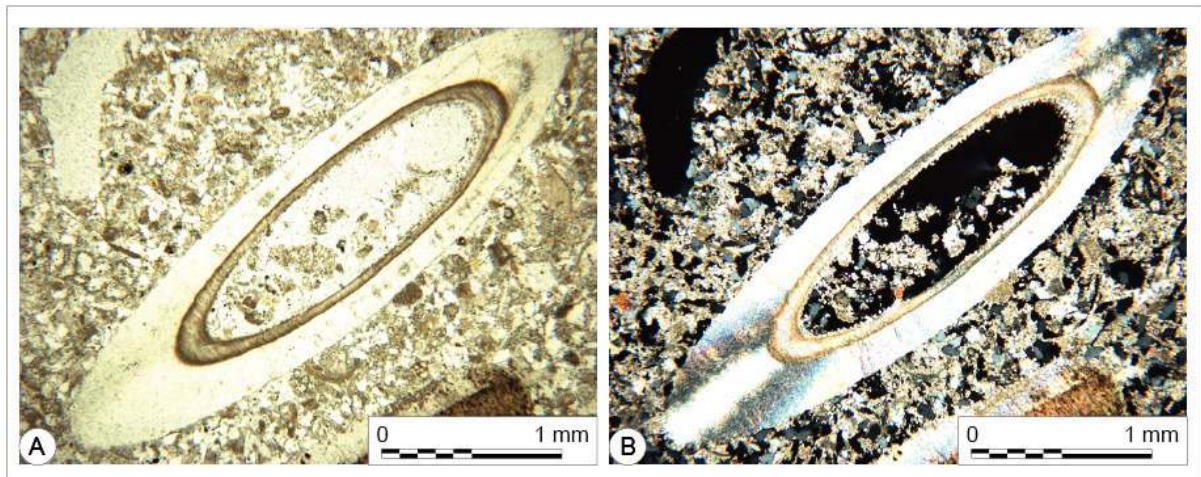


Figure III-31. Microphotographie de Lut I b. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40)..

**Description du microfaciès Lut I d :** Ce calcaire est principalement caractérisé par son très important contenu en tubes de *Ditrupa stragulata* dont une majorité semble entiers et bien préservés. Il est constitué d'un fond d'origine biodétritique très riche en grains de quartz de faible granulométrie (Figure III-32). Les éléments figurés sont représentés par de très nombreux tubes de *Ditrupa stragulata*, dont les lumières sont imparfaitement cimentées, de très nombreux fragments d'*Ostrea* et d'échinodermes auxquels s'ajoutent de très rares miliolites et des fragments d'*Orbitolites*. Outre la présence de nombreux quartz, des grains de glauconie ont été également observés confirmant les observations macroscopiques. Ce calcaire est un **packstone à *Ditrupa*** (Dunham 1962) ou une **biopelsparite** (Folk 1959).

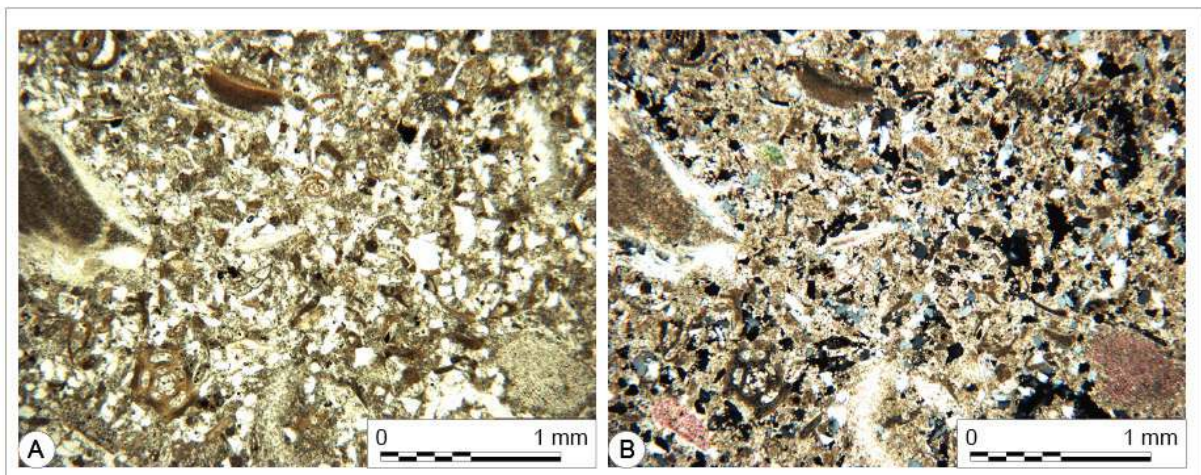


Figure III-32. Microphotographie de Lut I d. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Les calcaires lumachelliques à *Ostrea*** (Figure III-33) : Ces calcaires sont à rapprocher de la partie supérieure des calcaires du Lutétien moyen où ils sont en général associés à la partie supérieure du « Banc à vérins ». Ce banc est considéré comme un excellent banc repère dans les parties du Bassin Parisien où il est présent, rendu d'autant plus reconnaissable par la présence régulière de fossiles du cérithes géant (*Campanilopa giganteum*) caractéristique du Lutétien fréquemment exploité en carrière souterraine.

**Description** : ces calcaires sont assez fins, de couleur verdâtre à grisâtre et d'aspect assez hétérogène. Ils ne semblent pas contenir d'éléments détritiques (grains de quartz et/ou glauconite) en grande quantité. L'observation macroscopique des éléments de ce faciès semble montrer une importante macroporosité en partie imputable aux nombreux fossiles qu'il renferme, mais aussi du fait de sa matrice constellée de vides moldiques. Ces calcaires sont très tendres, voire friables, sur certains blocs.

Ils contiennent de nombreux fossiles soit sous la forme de coquilles préservées soit sous la forme de vides moldiques. Le contenu paléontologique y est aussi varié et les macro et micro fossiles sont nombreux. On y relève la présence de milioles en nombre variable, de tubes de *Ditrupa*, de fragments d'échinodermes (essentiellement des ossicules d'étoiles de mer : astéries), ou encore d'*Orbitolites*. Le fossile le plus répandu dans ce faciès (et celui qui en fait son unité) est représenté par les accumulations plus ou moins importantes de valves de petites huîtres (*Ostrea*). Ces tests peuvent être extrêmement nombreux jusqu'à donner l'aspect de lumachelles. Cet aspect peut être appuyé par la mise en relief des tests de lamellibranches, grâce à l'érosion différentielle qui touche fréquemment les blocs de ce faciès. Plus rarement sont rencontrés des tubes de serpules, parfois coalescentes, et quelques gastéropodes.

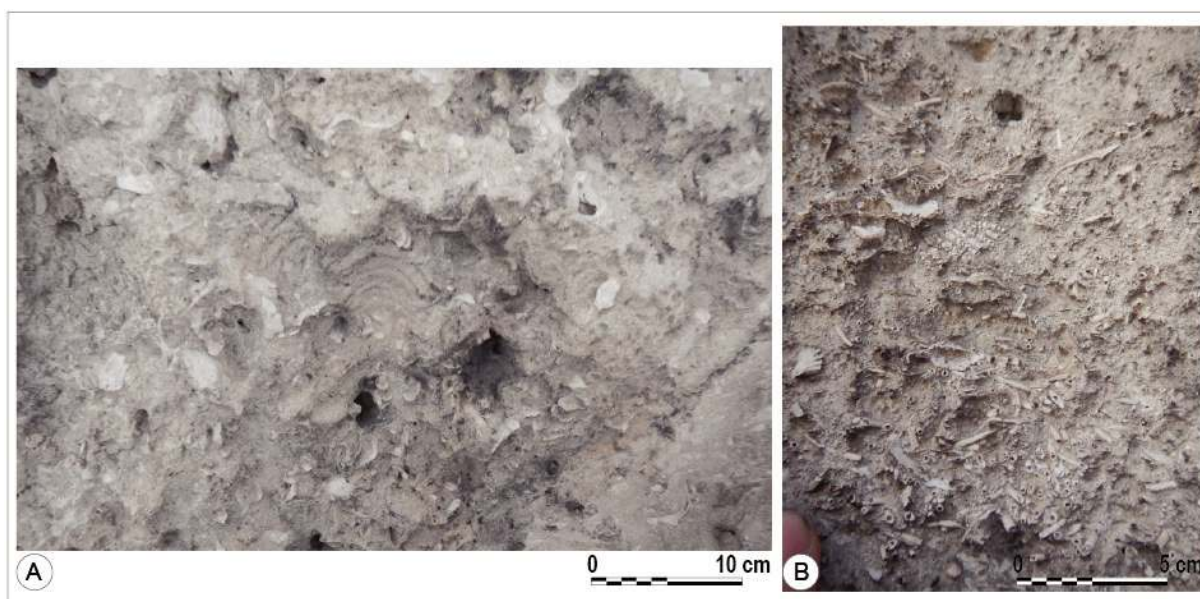


Figure III-33. Calcaires lumachelliques à *Ostrea* A. Faciès coquiller, B. Forte concentration localisée de tubes de *Ditrupa*

**Les variantes de ce faciès** : Calcaires tendres à *Ditrupa* et huîtres, calcaires tendres à *Ditrupa*, huîtres et rares milioles, Calcaires tendres à *Ditrupa*, *Orbitolites* et huîtres, fortement macroporeux ; Calcaires à *Ditrupa* et bivalves, Calcaires à rares milioles et bivalves ; calcaires tendres à milioles *Orbitolites* et huîtres ; Calcaires à *Orbitolites* et huîtres Calcaires à *Ditrupa*, huîtres et rares gastéropodes (cérithes).

Ces variantes sont plutôt des déclinaisons du contenu paléontologique observé. La présence ou l'absence de milioles ou de *Ditrupa* en lien ou pas avec des *Orbitolites*, permet de préciser la position stratigraphique de ces calcaires dans les calcaires du Lutétien moyen de part et d'autre du banc à cérithes géants (*Campanilota giganteum*). Les blocs de ce faciès sont très abondants dans les parties hautes sculptées de la porte.

**Description du microfaciès Lut I c :** Ce prélèvement de calcaire est constitué d'un fond en élément figuré d'origine biodétritique très riche en grains de quartz de faible granulométrie (Figure III-34). Les éléments figurés sont représentés par de très nombreux tubes de *Ditrupa strangulata*, dont les lumières sont comblées, de très nombreux fragments d'*Ostrea* et d'échinodermes auxquels s'ajoutent de très rares milioles et des fragments d'*Orbitolites*. Outre la présence de nombreux quartz, des grains de glauconie ont été également observés confirmant les observations macroscopiques. Ce calcaire à *Ditrupa* est un **packestone à *Ditrupa* et *Ostrea*** (Dunham 1962) ou une **biopelsparite** (Folk 1959).

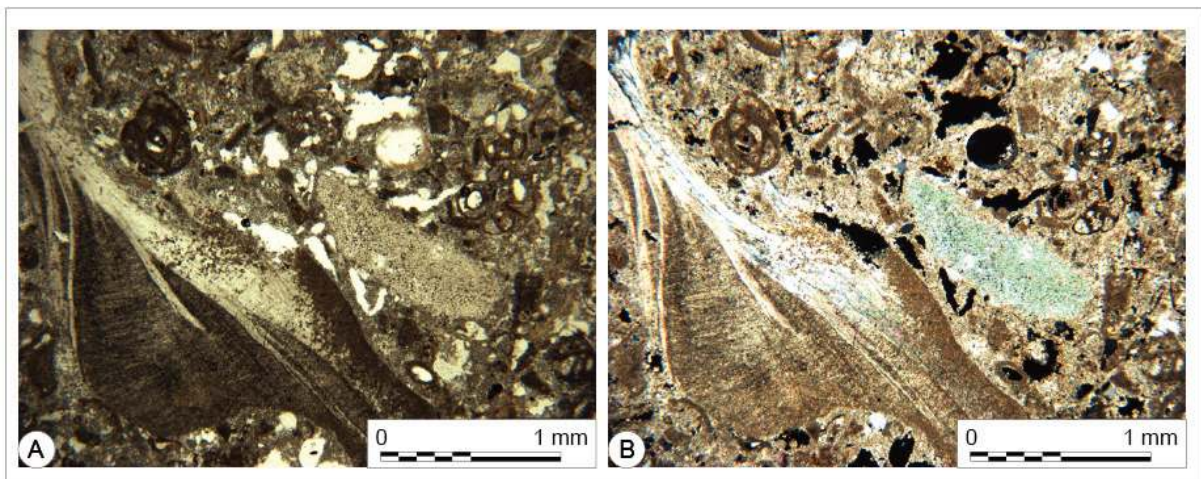


Figure III-34. Microphotographie de Lut I c. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Les calcaires à milioles et *Orbitolites*** (Figure III-35) : Ces calcaires proviennent des dépôts de la moitié supérieure des dépôts du lutétien moyen (Blondeau 1966). Latéralement, ils correspondent aux « Lambourdes et Vergelés » des carrières du centre du Bassin de Paris. Ils sont donc stratigraphiquement situés au-dessus du « banc à vérins ». Dans le Soissonnais, ils ont été exploités sous l'appellation de « banc grignard » et de « banc franc » (Noël 1970 ; Gély 2016). Ils correspondent également au Banc royal « éveillé » et Banc royal/Miliolite. Les faciès au sein de ces formations sont extrêmement variables latéralement.

**Description :** Les pierres de ce faciès sont des calcaires, fins, beiges, contenant de rares fossiles (au premier rang desquels des milioles et des *Orbitolites*). Ces calcaires sont très homogènes, de couleur beige clair à légèrement jaunâtre, les fossiles peuvent être difficiles à repérer et à identifier. Occasionnellement, ces faciès peuvent se présenter comme un ensemble homogène et massif, contenant des fossiles peu identifiables avec cependant des coquilles de lamellibranches ou les vides moldiques. Les milioles, dont les tests sont porcelanés, se repèrent cependant assez aisément. Ces faciès peuvent contenir de petits grains de quartz et quelques grains de glauconie de petit diamètre.

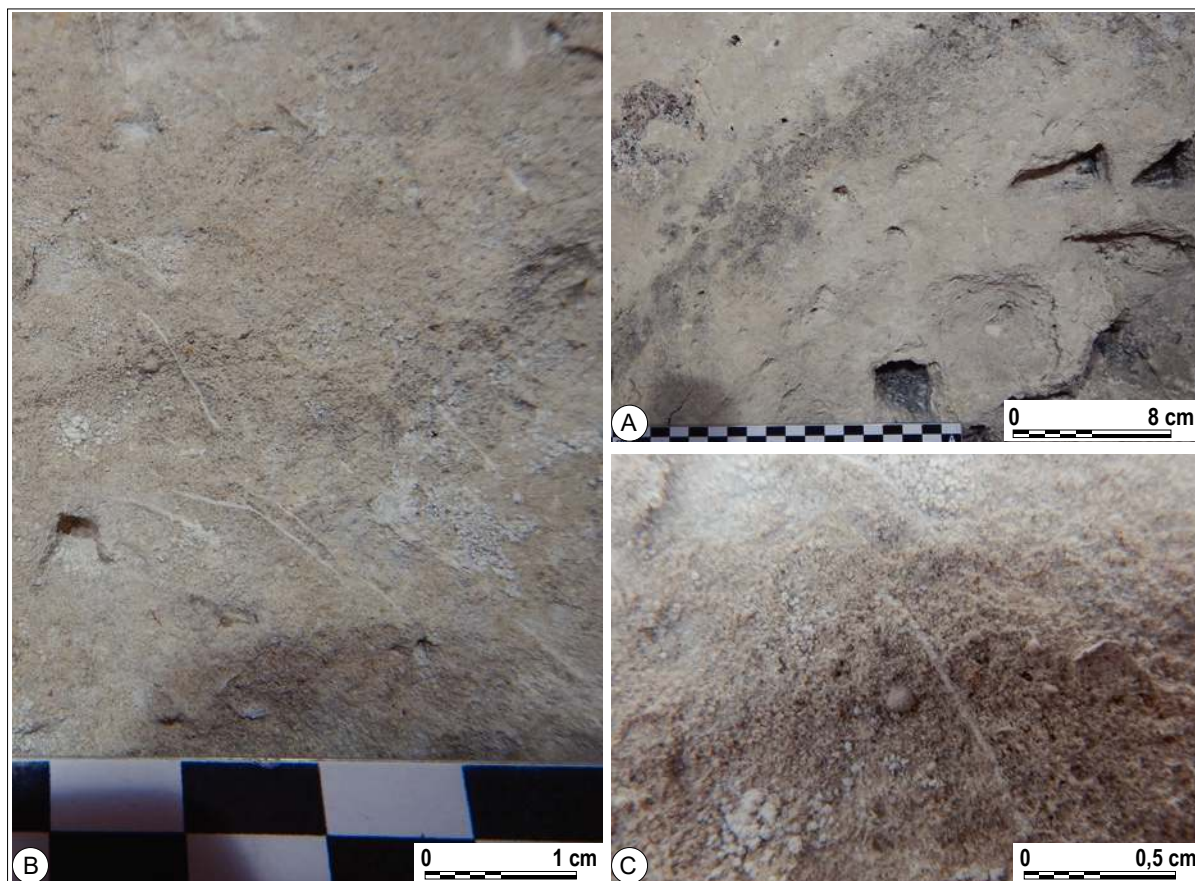


Figure III-35. Faciès des calcaires à milioles et *Orbitolites* A. Photographie du calcaire en œuvre ; B et C. Observation macroscopique

**Les variantes de ce faciès :** Calcaires tendres à milioles ; Calcaires tendres à milioles et *Orbitolites*

**Calcaires tendres à milioles :** Calcaires fins à très fins, contenant de très rares fossiles et bioclastes. Ils sont généralement beige clair et très homogènes, la macroporosité apparente y semble faible, ils ne contiennent que très peu de fossiles identifiables (rares foraminifères par exemple des milioles ou des débris d'*Orbitolites*). Il semble plausible de considérer que les calcaires de texture similaire, mais sans fossiles visibles, sont issus des mêmes bancs de calcaires, mais plus pauvres en faune, et donc moins identifiables.

**Calcaires tendres à milioles et *Orbitolites* :** Calcaires fin ou assez fin, de couleur beige clair, généralement homogène, contenant quelques rares vides moldiques correspondant à des tests de bivalves. Ils contiennent des milioles, des *Orbitolites* et/ou des Alvéolines. Les tests de foraminifères sont assez fréquents dans la roche pour être rapidement localisés et identifiés. La macroporosité apparente semble faible en l'absence de macropores ouverts.

**Les calcaires à cérithes et milioles (Figure III-36) :** Ces calcaires sont issus des dépôts de la partie supérieure des calcaires du Lutétien moyen (Naze *et al.* 2011). Ils sont donc situés stratigraphiquement au-dessus des calcaires lumachelliques à huîtres et du « banc à vérens ». Ils correspondent aux « bancs grignards » et « bancs francs » du Soissonnais (Noël 1970), dont les équivalents latéraux du centre du Bassin de Paris sont les « bancs de lambourdes et de Vergelés » (Blondeau 1966).

**Description** : ces calcaires sont constitués d'une matrice fine de couleur nettement crème à jaunâtre, ils sont assez grossiers, durs et hétérogènes. Leur matrice, grise à jaunâtre, très fine et compacte, est constellée de milioles blanches et de vides moldiques figurant des cérithes régulièrement déposés en lits de 10 à 15 centimètres d'épaisseur. Ces cérithes sont occasionnellement associés à des vides moldiques de petits bivalves et d'autres petits gastéropodes.

Les milioles peuvent être très abondantes et semblent par ailleurs correspondre à une espèce de grande taille, plus grosse que dans les faciès précédents. Les empreintes de cérithes peuvent être assez nombreuses et ressembler à de grands trous quand elles sont en section transversales ou au contraire être quasiment absentes, le faciès étant alors plus homogène et composé d'un fond gris de matrice parsemée de nombreuses milioles blanches.

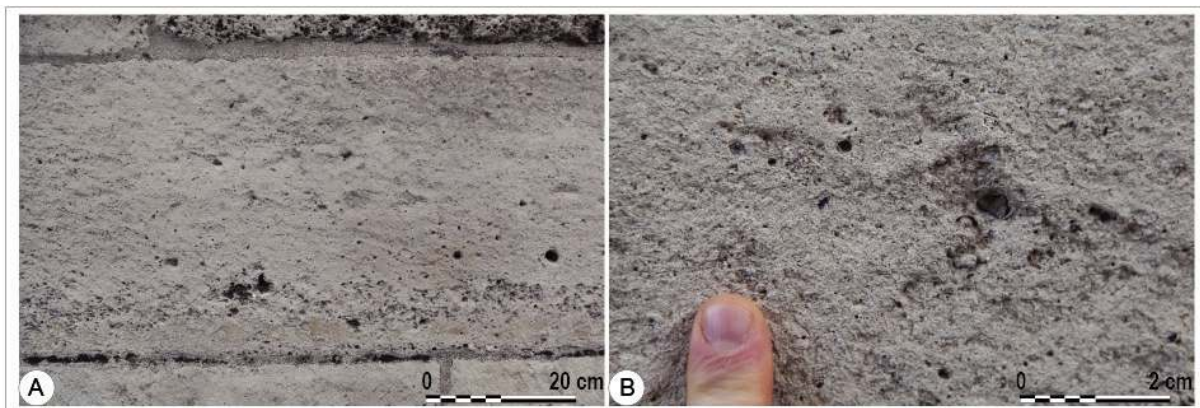


Figure III-36. Photographie des calcaires à cérithes et milioles A. Photo d'ensemble d'un bloc ; B. Observation macroscopique du faciès.

**Les variantes de ce faciès** : Elles consistent essentiellement en des variations importantes de proportions des milioles ou au contraire des cérithes. Il est important de préciser que certains blocs antiques conservés au Musée Saint-Rémi montrent ce faciès avec une variation latérale très rapide vers des faciès de type miliolites dans lesquels les milioles constituent l'essentiel de la roche, cimentées les unes aux autres à la façon d'un *grainstone*. Les éléments figurés y sont alors très fortement limités aux milioles, à des fragments d'algues de type Dasycladales et à de très rares cérithes.

**Description du microfaciès Lut IIIa** : Ce calcaire est constitué d'une part par de très nombreux éléments figurés de nature cependant assez peu diversifiée. Il s'agit principalement de milioles est composé de nombreux pellets et milioles ainsi que de gastéropodes et de fragments d'échinodermes (Figure III-37). La présence de nombreux fragments d'algues (Dasycladales ?) et de nombreux intraclastes a également été relevée. Les éléments figurés sont très fortement recristallisés et micritisés. Les milioles sont très nombreuses et présentent fréquemment des morphologies roulées. Ces éléments sont cimentés par de la sparite. Le Calcaire est un **grainstone** (Dunham 1962) ou **biopelmicrosparite** (Folk 1959).



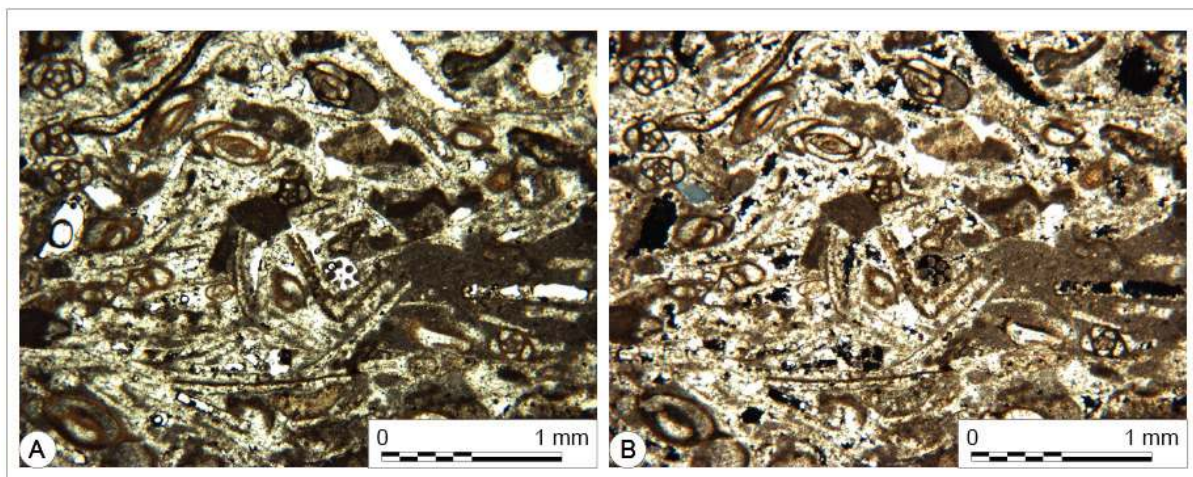


Figure III-37. Microphotographie de l'échantillon Lut IIIa. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Description du microfaciès Lut III b :** Ce calcaire est presque exclusivement constitué de milioles, de pellets et de fragments d'algues. Ils sont tous micritisés à divers degrés (Figure III-38). Les éléments figurés sont roulés et broyés. Ce faciès est caractérisé par une absence de matrice et une cimentation sparitique palissadique qui laisse ouverte une importante macroporosité. Ces calcaires correspondent à une variation latérale des faciès de calcaires à cérithes. Ce calcaire est un **grainstone à milioles** (Dunham 1962) ou une **biosparite** (Folk 1959).

**Description du microfaciès Lut III c :** Ce calcaire est très riche en éléments figurés d'origine biodétritiques. Ils sont représentés par de très nombreuses milioles associées à des fragments d'échinodermes et de lamellibranches roulés. Une grande partie des tests sont altérés et partiellement micritisés. Les quartz sont assez abondants et très arrondis. La matrice n'envahit pas totalement les loges des foraminifères laissant ouverte une porosité moldique et intragranulaire (Figure III-39). La matrice est micritique et une phase diagenétique a laissé un fin ciment sparitique qui tapisse les parois porales. Ce calcaire est un **packstone à milioles** (Dunham 1962) ou une **biomicrite** (Folk 1959).

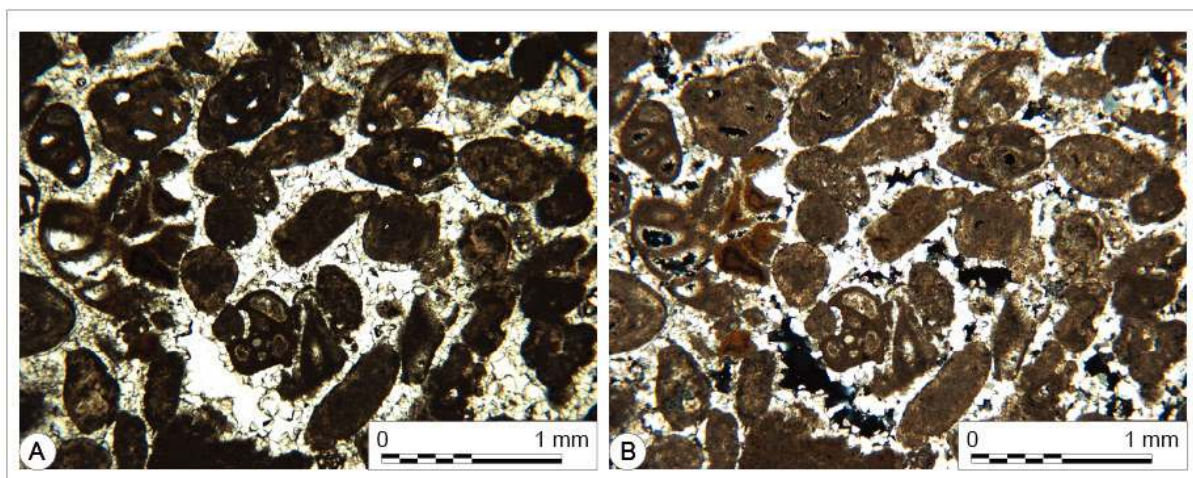


Figure III-38. Microphotographie de l'échantillon Lut IIIb. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

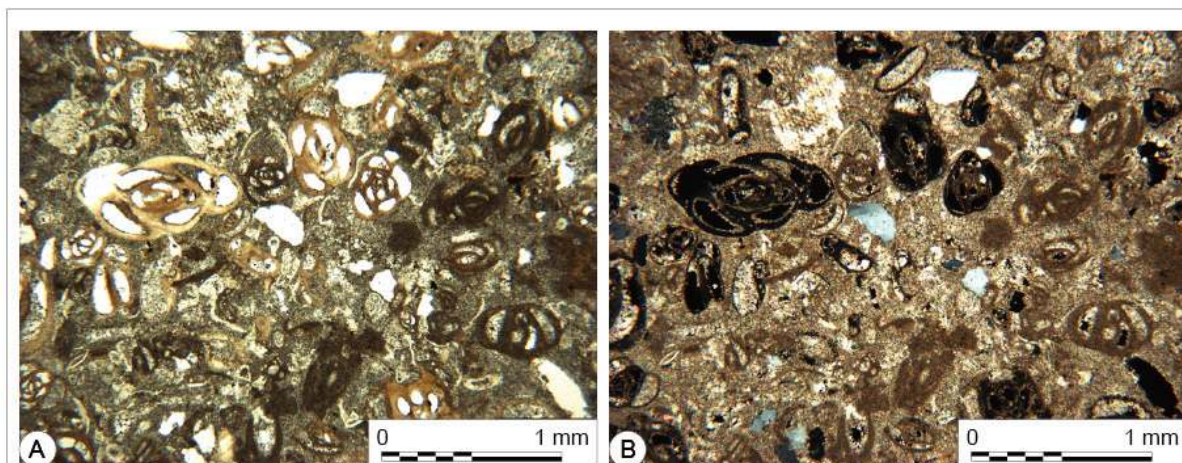


Figure III-39. Microphotographie de Lut IIIc. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Description du microfaciès Lut III d :** Un prélèvement a été réalisé sur un fragment de la crépis du socle de la Porte de Mars sur sa façade orientale. Il s'agit d'un bloc de calcaires identiques à ceux constituant l'ensemble du socle du monument déjà détaché de la maçonnerie de la façade occidentale. Ce bloc a permis la réalisation d'un sucre pour la conception de lame mince, d'une éprouvette de petite dimension destinée à l'analyse par porosimétrie au mercure et d'une éprouvette destinée aux expériences de caractérisations pétrophysiques.

Ce calcaire (Figure III-40) comporte un grand nombre d'éléments figurés dont les plus abondants sont représentés par de grandes milioles, des débris d'algues et des tests de lamellibranches et de gastéropodes fortement fragmentés. Ils sont associés à des débris d'algues, de Bryozoaires et d'échinodermes et de très rares fragments de tubes de *Ditrupe*. Ces derniers, fortement cimentés seraient interprétables comme des intraclastes. Les grains de quartz sont assez nombreux, mais de très petit diamètre apparent (entre 50 et 200  $\mu\text{m}$ ). Une matrice micritique est présente en extrêmement faible quantité, surtout sous la forme d'un sédiment interne aux loges de foraminifères. Les ciments microsparitiques présentent des traces d'altérations avec des évidences de dolomitisation localisées. Ce calcaire est donc un **packstone à foraminifères et mollusques** (Dunham 1962) ou une **biomicrosparite** (Folk 1959).

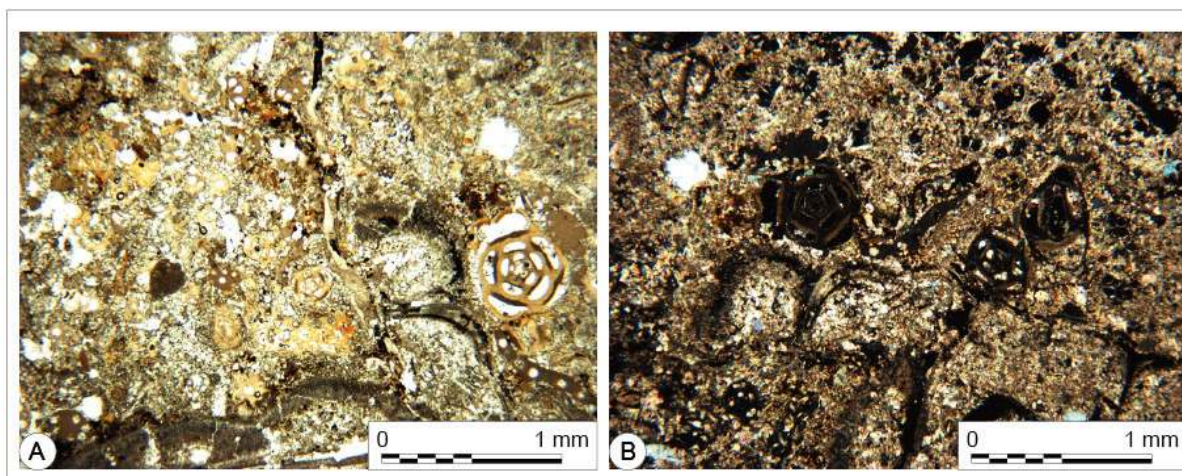


Figure III-40. Microphotographie d'un échantillon de calcaire à milioles et cérithes du socle de l'Arc, Lut III d. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Description du microfaciès Lut IV a :** Ce calcaire est presque exclusivement constitué de milioles, de pellets et de fragments d'algues (Dasycladales ?). Ils sont tous micritisés à divers degrés (Figure III-41). Les éléments figurés sont roulés et broyés. Ce faciès est caractérisé par une absence de matrice et une cimentation sparitique palissadique qui laissent ouverte une importante macroporosité. Ces calcaires correspondent à une variation latérale des faciès de calcaires à cérithes. Ce calcaire est un **grainstone à milioles** (Dunham 1962) ou une **oobiosparite** (Folk 1959).

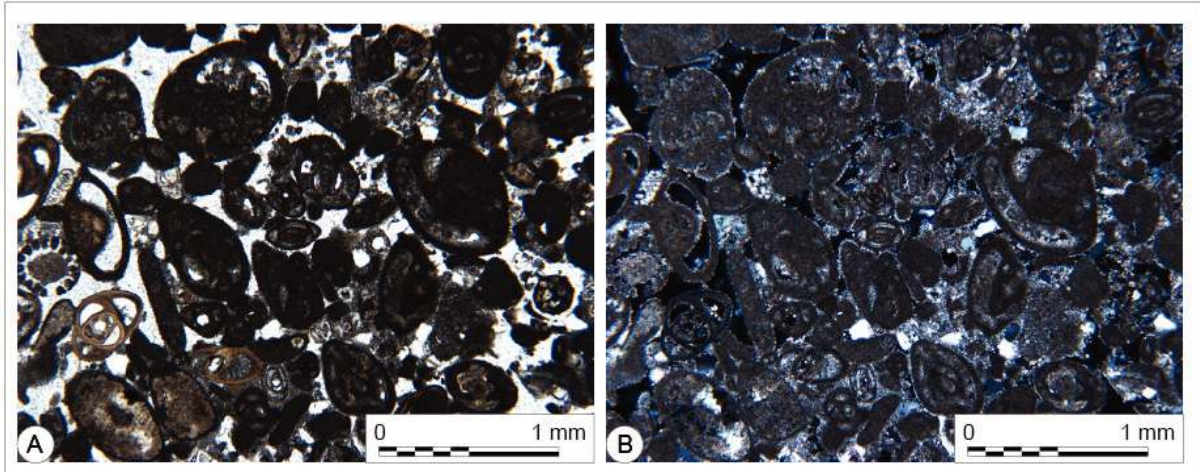


Figure III-41. Microphotographie de Lut IVa. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Description du microfaciès Lut IV b :** Ce calcaire est constitué d'une part par de très nombreux éléments figurés de nature cependant assez peu diversifiée. Il s'agit principalement de milioles est composé de nombreux pellets et milioles ainsi que de gastéropodes et de fragments d'échinodermes (Figure III-42). La présence de nombreux fragments d'algues (Dasycladales ?) et de nombreux intraclastes a également été relevée. Les éléments figurés sont très fortement recristallisés et micritisés. Les milioles sont très nombreuses et fréquemment présentent des morphologies roulées. Ces éléments peuvent être noyés dans une matrice micritique abondante soit être uniquement cimentés par de discrets liserés sparitiques. Ces calcaires sont des **grainstones à packestone** (Dunham 1962) ou **Biosparite** (Folk 1959).

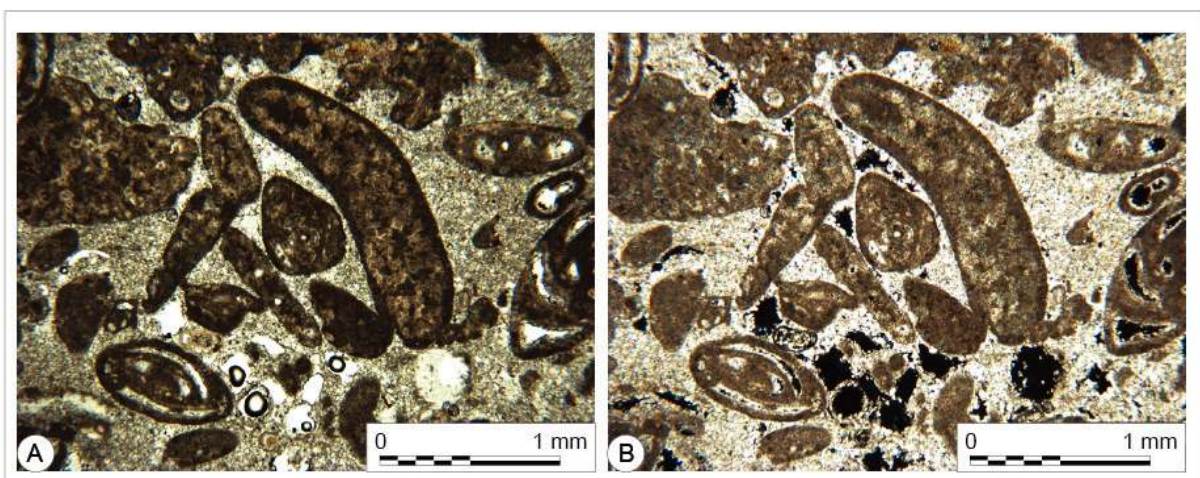


Figure III-42. Microphotographie de l'échantillon Lut IVb. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40)

**Les Calcaires lacustres à Limnées :** Ces calcaires sont issus des formations sédimentaires du Lutétien supérieur et du Bartonien. Ce sont des dépôts lacustres continentaux qui appartiendraient à la formation des « Marnes et caillasses » (Laurain *et al.* 1976 ; 1981 ; Gély 2009). Parmi les éléments de construction de la Porte de Mars, ils sont utilisés aussi bien dans la construction antique qu'en pierre de restauration. Cependant, les faciès utilisés entre ces deux périodes diffèrent sensiblement.

**Description :** Il s'agit de calcaires hétérogènes, de couleur gris verdâtre à franchement verdâtre. Ces calcaires sont fins et micritiques et contiennent de nombreuses coquilles de gastéropodes, dont la coquille blanche est parfois conservée. La matrice de la roche est plutôt vert sombre et peut être veinée de calcite verte.

Les fossiles reconnaissables sont des coquilles de Limnées (*Lymnea sp* ; Figure III-43 A) et de petits gastéropodes (Hydrobies et autres nanogastéropodes ; Figure III-43 B). Ces fossiles sont présents soit par leurs tests soit par les vides moldiques résultant de leur dissolution. Ils sont occasionnellement associés à des gyrogonites de Charophytes de taille millimétrique, qui figurent soit en empreintes, soit à l'état de tests bien conservés.

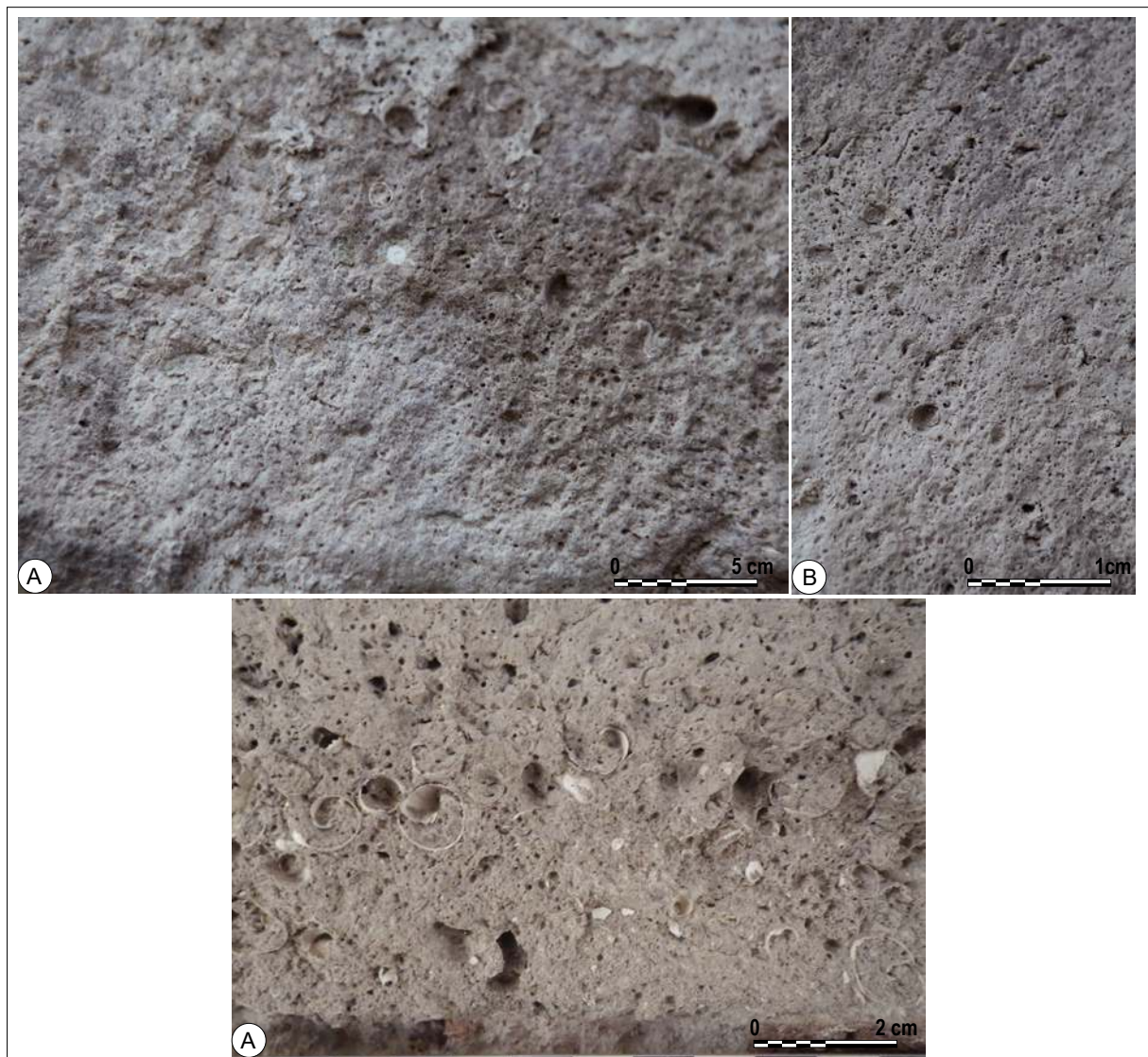


Figure III-43. Photographie des calcaires lacustres à Limnées ; A. Vue d'ensemble ; B. Agrandissement

**Les variantes de ce faciès :** Il n'a été observé pour ce type de pierre, aucun autre calcaire strictement similaire à ceux utilisés durant l'Antiquité. Par ailleurs, tous ceux utilisés durant cette période sont remarquablement semblables. Un autre calcaire lacustre est assez fréquemment rencontré dans les pierres débitées en moellons utilisés en restauration, mais celui-ci ne présente que peu de Limnées (ou de petites tailles lorsqu'elles sont présentes).

**Description du microfaciès Bart a :** Les éléments figurés contenus dans ce calcaire sont constitués de Limnées (1 à 3 cm), de rares Planorbis, d'hydrobies, de gyrogonites et de tiges de Charophytes, de Globigerinidae et des Ostracodes (Figure III-44). Les tests de ces derniers sont pour la plupart dissous n'en subsistent que les vides moldiques associés. La matrice est de nature micritique avec cependant des traces de cimentations microsparitiques discrètes. Ce calcaire à Limnées à matrice micritique est un **wackestone à gastéropodes et plantes** (Dunham 1962), ou **biomicrite** (Folk 1959).

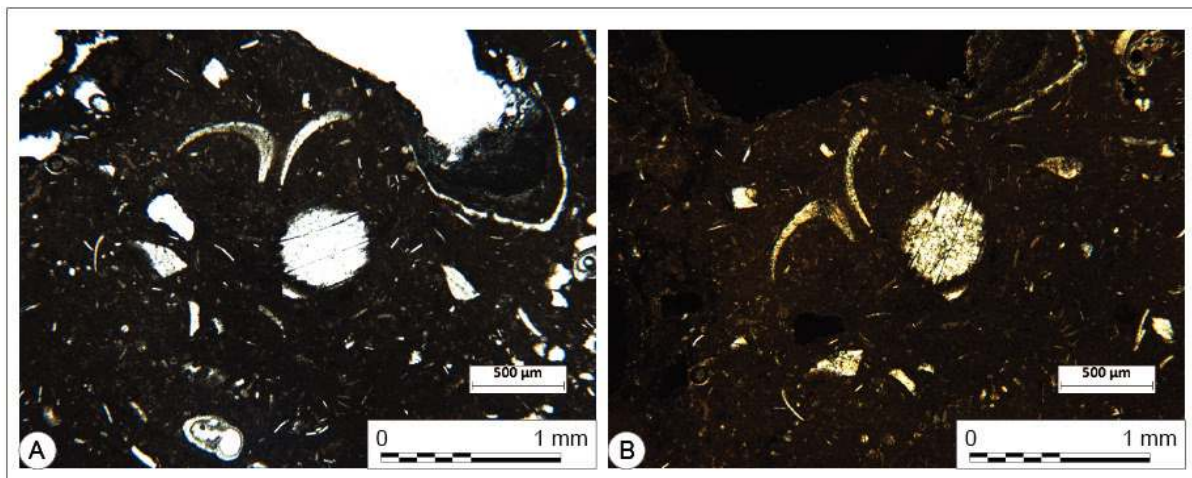


Figure III-44. Microphotographie de Bart a. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40); B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Description du microfaciès Bart b :** Les éléments figurés contenus dans ce calcaire sont constitués de Limnées (1 à 3 cm), d'hydrobies, de gyrogonites et de tiges de *Charophytes*, de *Globigerinidae* et des Ostracodes (Figure III-45). Les tests de ces derniers sont pour la plupart dissous n'en subsistent que les vides moldiques associés. La matrice est de nature micritique avec cependant des traces de cimentations microsparitiques discrètes. Ce calcaire à Limnées est un **wackestone à mollusques** (Dunham 1962) ou **biomicrite** (Folk 1959).

De manière générale, les calcaires lacustres de restauration ne peuvent pas être confondus avec les calcaires à Limnées utilisés pendant l'antiquité. D'une part, ils sont systématiquement utilisés sous la forme de moellons de petit ou de moyen appareil et d'autre part, la pierre semble beaucoup plus friable que pour les pierres antiques. La raison est probablement liée à la stratonomie initiale (taille des bancs) qui ne permet pas le débit de blocs de grandes dimensions.

Ces calcaires lacustres « locaux » sont présents dans les dépôts du Lutétien supérieur à faciès continentaux dans le secteur de Savigny-sur-Ardre/Treslon. Ils sont également présents dans les dépôts du Thanétien du secteur de Merfy (Laurain *et al.* 1976) ou encore dans les dépôts bartoniens de la Montagne de Reims. Dans tous ces cas, la faible épaisseur des bancs en place et leur extension très limitée ne permet pas le débit de blocs de grande taille.

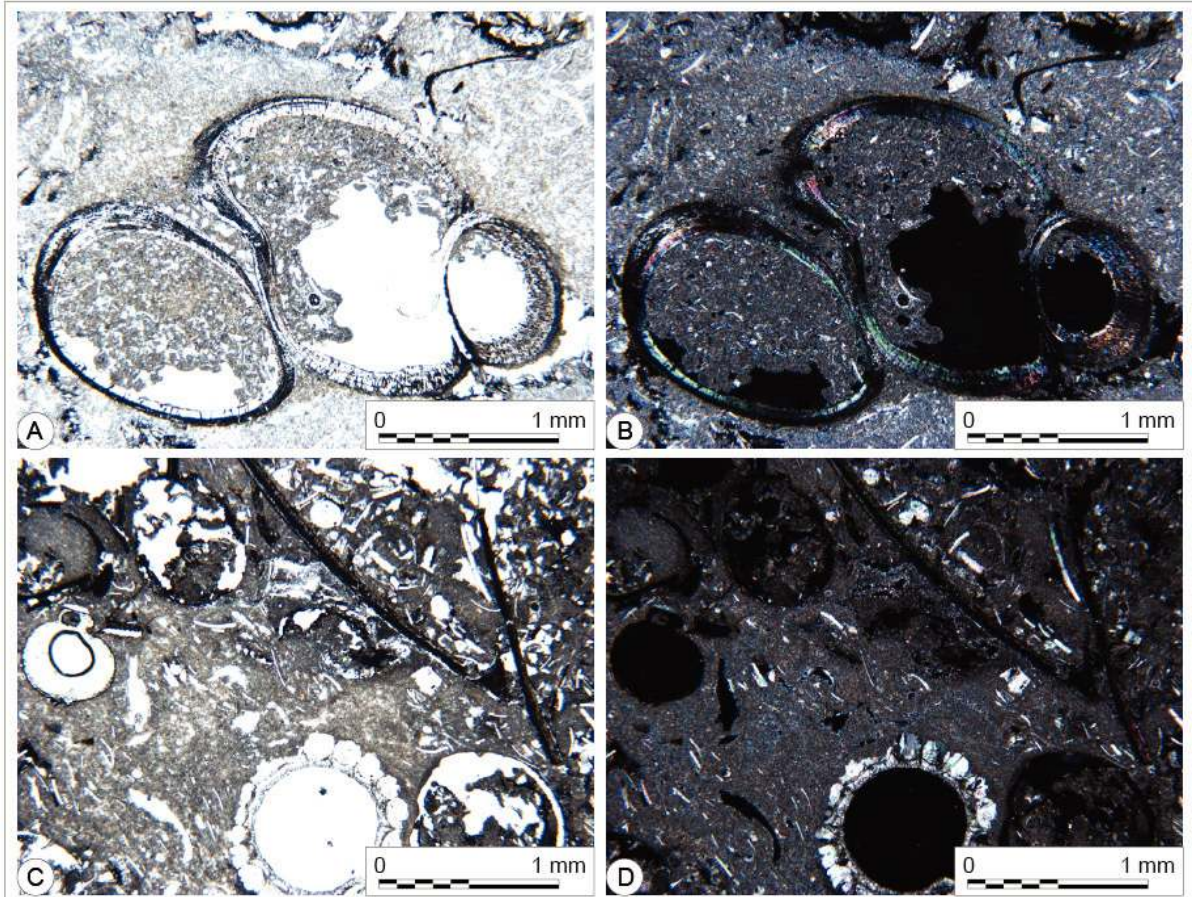


Figure III-45. Microphotographie de Bart b. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

**Les observations complémentaires du couronnement :** Aux observations menées pendant ce travail, doivent être ajoutées celles réalisées par G. Fronteau lors de la dépose de l'ancienne couverture en préalable aux travaux de réfection de la couverture en 2016 (Fronteau in Bontrond 2018). Par ailleurs, Bontrond (2018) souligne que les observations liées à cette opération sont particulièrement limitées en raison des contraintes liées aux caractéristiques du projet de reprise de la couverture antérieure.

Les matériaux observés par l'auteur sont compatibles avec d'une part les faciès des pierres calcaires lutétiennes en usage à Reims à l'époque (Fronteau *et al.* 2008 ; 2011 ; Brunet-Gaston 2008 ; 2011) et d'autre part avec les calcaires observés dans le reste des élévations du monument. Enfin, comme le signale l'auteur, ces faciès correspondent bien aux descriptions réalisées par A. Blanc au cours de son relevé (1984). Ces observations ont été reportées dans la figure suivante L'auteur note la présence en très grande majorité de calcaires à *Ditrupa* (« banc de Saint Leu ») et de calcaires à milioles (du « banc royal »), identiques à ceux observés dans les maçonneries des élévations du bâtiment.

Cependant, outre les moellons de blocage probablement modernes (XIX<sup>e</sup> ou XX<sup>e</sup> siècle), l'auteur signale également la présence de blocs de grès glauconieux (Figure III-46) qu'il attribue à un équivalent latéral des sables de Bracheux des dépôts marins du Thanétien. Il s'agirait de grès de couleur verdâtre, sombre, assez fins et très glauconieux de grand module, mais sans trou de louve visible.

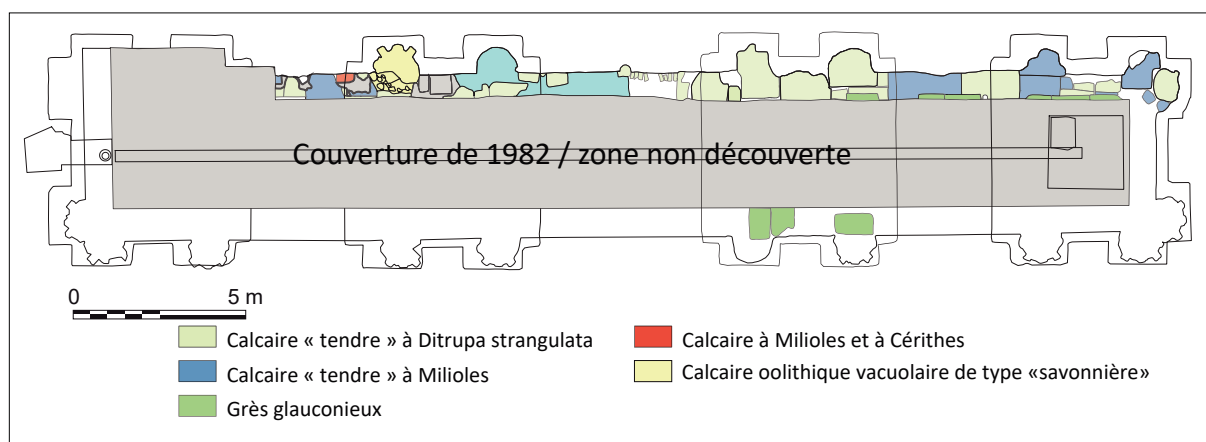


Figure III-46. Cartographie de la nature des blocs du sommet des élévations de la Porte de Mars

Sur les 10 blocs appartenant à ce faciès et observés dans l'assise de couronnement de l'édifice, aucun ne semble pourvu de cavité technique et en revanche une majorité porte des altérations potentiellement en lien avec une exposition au feu. L'authenticité de ces éléments semble très contestable, d'une part en raison de leur faciès totalement absent des corpus antiques comparables et d'autre part, en raison de l'absence de trous de louve indispensables à leur levage à cette hauteur du monument, alors que les blocs voisins en sont pourvus. Enfin, la présence de ces éléments gréseux jusque dans la façade sud, remontée presque intégralement sous la direction de Millet en 1859, semblerait indiquer qu'ils aient été assemblés au cours de cette phase de restauration.

La présence dans ce corpus d'éléments calcaires aux faciès atypiques pour Reims est également soulevée dans cette étude. Pour les mêmes raisons que pour les blocs de grès de Bracheux, l'authenticité de ces éléments est sujette à caution. Par ailleurs, l'emploi de matériaux atypiques dans des fourures de maçonneries ne serait pas une hypothèse à exclure, même pour l'Antiquité, comme le démontre bien l'usage de matériaux tout venant en remploi dans les fourures des maçonneries et les soubassements d'autres bâtiments.

**Synthèse des matériaux originels :** Les caractéristiques des faciès des pierres de grand appareil reconnus pour le monument ainsi que leurs équivalents collectés sur le terrain sont synthétisés dans le Tableau III-8. Il indique pour chaque prélèvement, sa dénomination dans l'étude, sa description synthétique, l'origine et la localité d'origine de chaque prélèvement réalisés ainsi que leur position architecturale et qui seront caractérisés dans la suite de ce travail.

Les natures et dimension des bancs aptes à fournir des blocs des dimensions observées amènent à proposer une origine régionale pour ces calcaires (c'est-à-dire plus de 25 km de distance). Cette provenance découle de l'absence de faciès calcaires de qualité suffisante directement au sud et à l'ouest de l'agglomération et aux différences de faciès exprimés dans ces formations dans la vallée de l'Ardre, autour de Fismes qui fournit un calcaire de couleur gris crème. Ces blocs peuvent être importés depuis les secteurs du Laonnois et du Soissonnais, de part et d'autre du plateau du Chemin-des-Dames jusqu'à son sommet (secteur de la Caverne du Dragon). Les flancs de ces plateaux sont largement exploités au travers de nombreuses carrières de calcaire grossier jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle. La preuve d'une exploitation de certaines d'entre elles depuis l'Antiquité a par ailleurs été apportée à Vendresse-Beaulne (Naze, *et al.* 2011). L'exploitation des calcaires grossiers ne se limite pas à ce secteur, mais s'étend vers le sud-ouest, passant par le Soissonnais, suivant peu ou prou les contours paléoenvironnementaux des mers lutétiennes.

Identification	Description	Origine	Provenance	Microfaciès
Bart b	Calcaire lacustre à Limnées	Antique	Bezannes Veslud	Wackestone à mollusques ou biomicrite
Bart a				Calcaire granulaire à Limnées
Lut IV b	Calcaire granulaire à miliolles	Terrain	Vendresse-Beaulne	Grainstones à packestone à miliolles ou Biosparite
Lut IV a	Calcaire à miliole (type grainstone à Miliolles)	Restauration pile ouest	Porte de Mars	Grainstone à miliolles ou biomicrosparite
Lut III d	Calcaire massif à miliolles et cérithes	Antique	Porte de Mars	Packstone à miliolles ou une biomicrosparite
Lut III c	Calcaire fin et massif à rares miliolles		Colligis-Crandelain	Packstone à miliolles ou une biomicrite
Lut III b	Calcaire massif à miliolles et Cérithes	Terrain	Colligis-Crandelain	Grainstone à miliolles ou une biosparite
Lut III a	Calcaire massif à miliolles et Cérithes		Vendresse-Beaulne	Packstone à miliolles ou une biomicrite
Lut II	Calcaires tendre à miliolles, Orbitolites et <i>Ostrea</i> (Banc à Verrins)	Restauration pile ouest	Porte de Mars	Packstone à miliolles ou biopelsparite
Lut I d	Calcaire lumacheilique à miliolles <i>Orbitolites</i> et huîtres		Veslud	Packestone à <i>Ditrupa</i> ou une Biopelsparite
Lut I c	Calcaire tendre à Huîtres et <i>Ditrupa</i>		Veslud	Packestone à <i>Ditrupa</i> ou une biopelsparite
Lut I b	Calcaire tendre à <i>Ditrupa</i> et <i>Orbitolites</i>	Terrain	Veslud	Packstone à foraminifères ou une biopelsparite
Lut I a	Calcaire tendre à <i>Ditrupa</i> et rares molluques		Pargnan	Packestone à <i>Ditrupa</i> ou une Biopelsparite
SAV	Calcaire à oolithes vacuolaire de type "Pierre de Savonnaière"		Savonnières-en-Perthois	Grainstone ou une oosparite

Tableau III-8. Tableau des caractéristiques générales des échantillons de la Porte de Mars et leurs équivalents supposés, collectés en carrière.



Les positions stratigraphiques correspondant aux pierres d'origine repositionnées sur la coupe de synthèse du Lutétien (secteur du chemin des Dames) montrent qu'ils sont extraits sur l'ensemble de l'épaisseur de cette formation (Figure III-47). Les faciès et sous-faciès correspondent en effet, non pas à ceux des séries locales de Reims (Massif de Saint-Thierry et vallées de l'Ardre ou de la Vesle), mais à ceux observés dans l'Aisne. Les calcaires à *Ditrupa* ou à *Orbitolites* des corpus antiques sont plus tendres et plus poreux, les faciès de calcaires à cérithes du Lutétien supérieur sont plus riches en milioles et présente fréquemment une matrice grise absente des faciès marnais. Ils sont souvent accompagnés d'un calcaire verdâtre à limnées blanches, que nous n'avons jamais observé localement. Certains faciès, plus rarement présents dans les corpus, comme les miliolites ou les calcaires très riches en *Nummulites*, sont eux aussi clairement considérés comme abondants dans le Soissonnais et le Laonnois et absents des couches d'affinité rémoise. En ce qui concerne le second argument, l'épaisseur des bancs disponibles est en effet un élément déterminant pour permettre de produire des blocs importants. Or, comme nous l'avons déjà signalé, les séries locales se présentent sous la forme de petits bancs séparés par des interbancs, alors que dans l'Aisne, les carrières peuvent développer des fronts de taille importants, permettant de tirer des blocs *supra*-métriques (Devos *et al.* 2010 ; Fronteau *et al.* 2010).

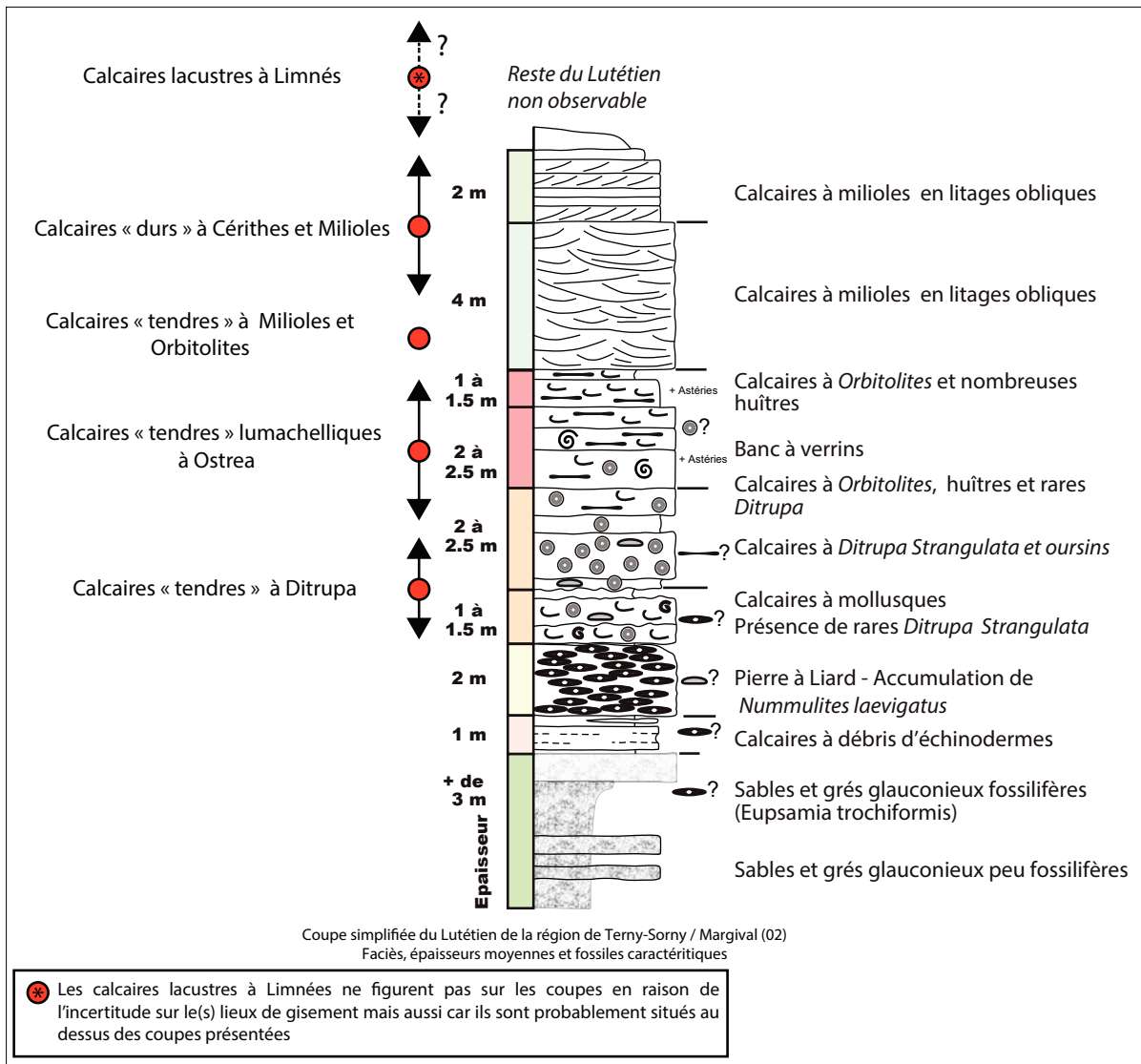


Figure III-47. Position stratigraphique des faciès calcaires attribués à la partie Antiques de la porte de Mars positionnés sur une coupe synthétique des dépôts du Lutétien dans le Soissonnais.

### 3.2.3. Les matériaux de restauration de l'édifice

Les travaux de restauration ont été réalisés avec des matériaux, ou plus précisément des assemblages de matériaux différents. L'association entre les matériaux et leurs modalités de mise en œuvre caractérise un « faciès de restauration ». Chaque assemblage apparaît comme spécifique à cause de l'association d'un ou plusieurs de ces caractères. Les matériaux utilisés peuvent être communs à plusieurs phases de travaux. Ils sont décrits ci-après. Les faciès de restauration sont ensuite décrits succinctement.

**Les calcaires à milioles et lamellibranches :** Il s'agit de calcaires, fins, beiges, avec un abondant contenu paléontologique (au premier rang desquelles des milioles et des valves d'*Ostrea*). Ces calcaires sont très homogènes, de couleur beige à jaunâtre à légèrement jaunâtre. Leur aspect observé sur de petites cassures fraîches indique également la présence de dolomite. Ces faciès se présentent comme un ensemble d'aspects homogène et macroporeux, avec des vides moldiques et des moules internes de grands gastéropodes (*Campanilota giganteum* en particulier ; Figure III-48). Cette présence permet de situer stratigraphiquement

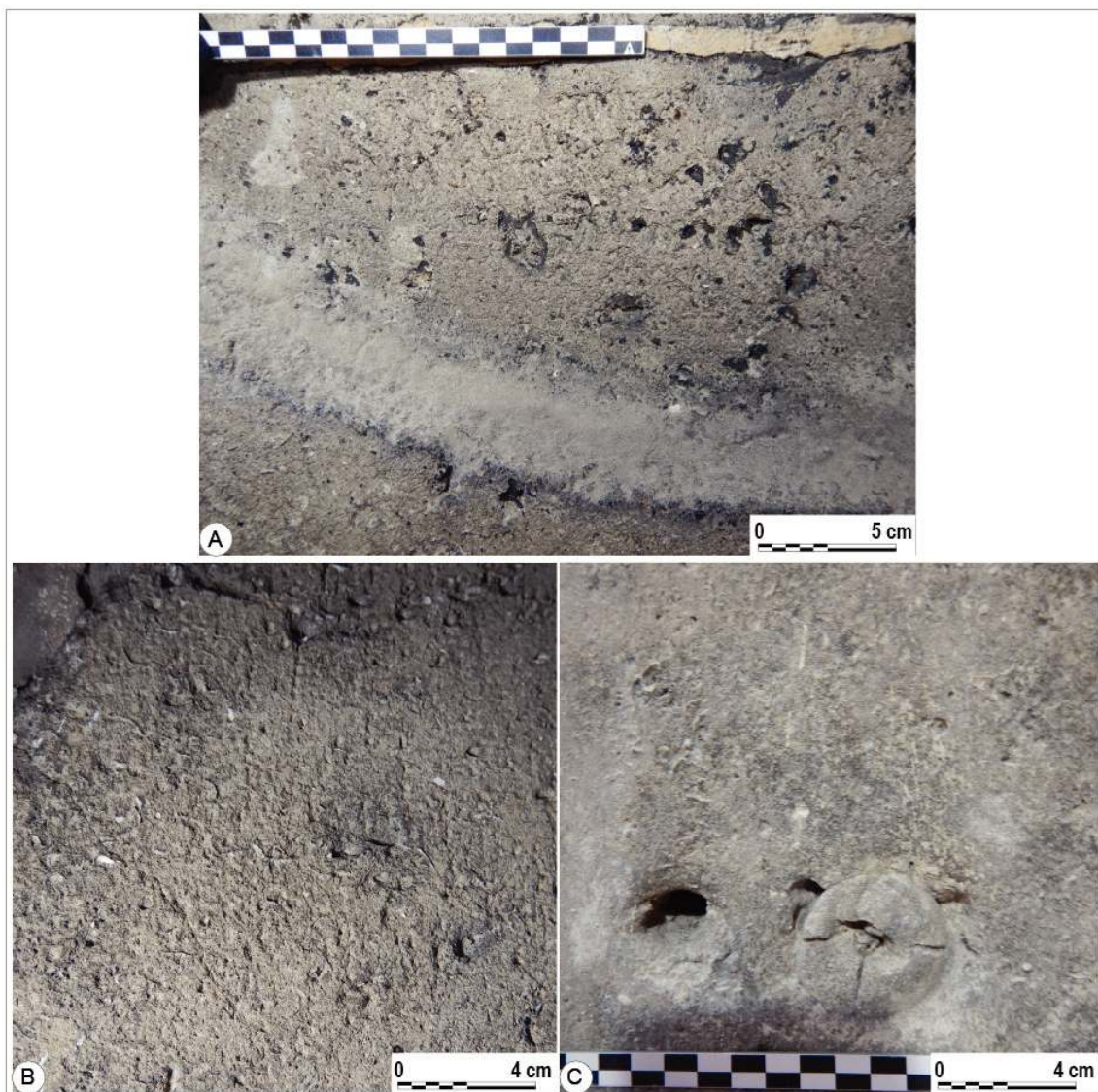


Figure I-58. Photographie des calcaires à milioles et rares coquilles d'*Ostrea* utilisés dans les restaurations de N. Brunette de 1844.

sans ambiguïté ces blocs dans le « banc à vérins ». Les milioles, dont les tests sont porcelanés, sont aisément repérables. Les calcaires de ce faciès laissent apparaître un grand nombre de grains de quartz fins.

**Description du microfaciès Lut II :** Ce calcaire (Figure III-48) est constitué de milioles de grandes tailles (> 500 µm) d'*Orbitolites complanatus* (souvent de très grande taille > 3 cm) associées à de nombreux fragments d'échinodermes, de nombreux pellets, des coquilles de bivalves et quelques *Bryozaires* généralement très fragmentées (en particulier des *Ostrea*), et de rares *Alveolina*. Les grains de quartz sont assez abondants, mais de petites dimensions (50 à 100 µm) et les grains de glauconie rares. Quelques cristaux secondaires de dolomite recristallisent partiellement certains ciments. Les éléments figurés sont contenus dans une matrice micritique avec une cimentation secondaire microsparitique essentiellement dans les pores. Ces calcaires sont des **packstone à milioles, *Ostrea* et *Orbitolites*** (Dunham 1962) ou **biopelsparite**. Ce faciès est assez similaire au faciès des calcaires exploités dans la localité de Courville (équivalents au faciès CouL de Turmel, 2014).

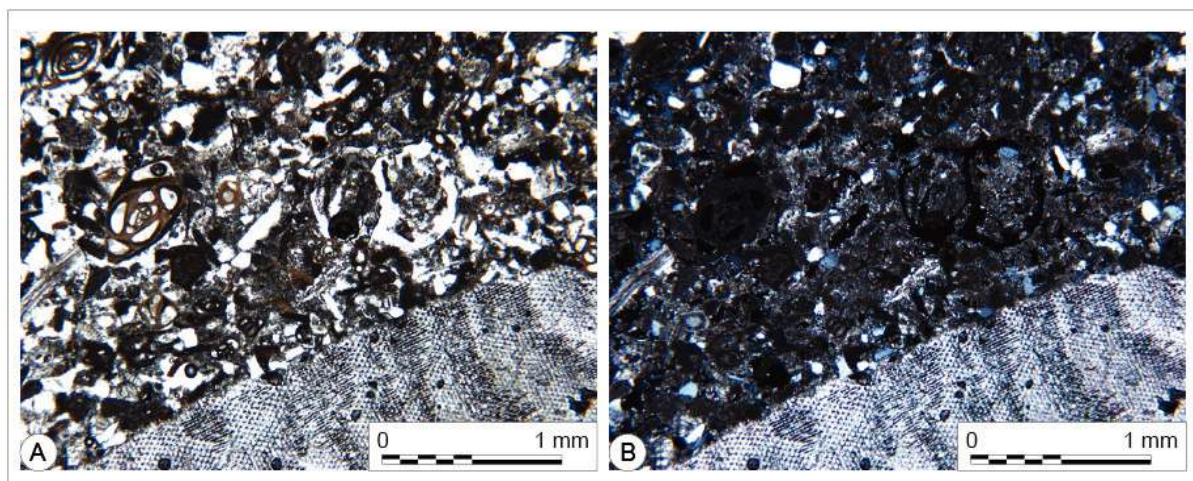


Figure III-48. Microphotographie des calcaires à milioles et lamellibranches à *Orbitolites* Lut II. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

Ces calcaires ont été utilisés exclusivement pour les restaurations réalisées sous la direction de N. Brunette en 1844-45. Ils ont été mis en œuvre pour la reconstruction de la pile ouest (III.1.6 et Figure III-47). Les élévations de cette pile ont été en grande partie reconstruites après que leur absence ait été constatée. Ces calcaires sont réputés provenir de carrières d'Hermonville, dans le Massif de Saint-Thierry. L'orientation de certaines de ces empreintes montre quant à elle que les blocs de restauration contrairement aux blocs antiques ont été posés aussi bien en lit qu'en délit.

Le faciès de ces blocs est très proche des calcaires à milioles et à lamellibranches utilisés lors de la construction de l'édifice. Pour cette pile en particulier, l'architecte a fait le choix de restituer la construction en projetant la vision néoclassique idéalisée. Il a donc pour cela respecté scrupuleusement le plan de calepinage utilisé à l'antiquité pour la partie ouest du monument.

Au cours de la campagne de réfection de la couverture réalisée en 2016-2017, un forage carotté de 20 cm de diamètre a été réalisé sur toute la hauteur du monument afin d'aménager une descente d'eaux pluviales (Figure III-25, page III-234). Les éléments de cette carotte, récupérés par le Service archéologique du grand Reims lors des travaux, ont été exploités

pour l'identification des matériaux de cette partie de la porte reconstruite en 1845-1847. Les calcaires prélevés au sein de ces blocs ont fait l'objet de plusieurs prélèvements destinés à la conception de lames minces puis pour la réalisation des expériences de caractérisation.

L'échantillon de calcaire granulaire **Lut IVa** est issu d'un des blocs déposés à l'occasion des travaux de purge de pierres. Ce calcaire était originellement mis en place dans la partie de l'entablement du monument restaurée par N. Brunette. Ce calcaire granulaire correspond par ailleurs aux faciès des calcaires granulaires bioaccumulés décrits par Fronteau et Paicheler (2005) dans des corpus de blocs antiques.

**Les calcaires de l'« Oolithe vacuolaire » de type pierre de Savonnières :** Les calcaires à oolithes vacuolaires sont issus d'une formation sédimentaire datée du Jurassique terminal (Tithonien inférieur, de Bretizel 1962 ; Fronteau *et al.* 2000). Ces pierres sont exploitées en carrières dans la Meuse dans les environs de Saint-Dizier, dans une zone comprise entre Bar-le-Duc et Joinville (Fronteau *et al.* 2000). Ces exploitations fournissent différents faciès commercialisés sous différentes qualités et appellations. À Reims, ils font leur apparition dans les constructions à partir du XIX<sup>e</sup> siècle avec la mise en fonction des canaux et voies ferrées facilitant leur diffusion.

Ce calcaire est de couleur jaunâtre à grise et acquiert une patine grise (Figure III-49). Il est constitué d'oolithes sphériques d'une taille de 500 µm (de Bretizel 1962 ; Fronteau *et al.* 2000) et de pellets. La structure litée de la pierre est soulignée par des empreintes de coquilles de bivalves. Les éléments sont liés par un ciment sparitique (Fronteau *et al.* 2000 ; Roels *et al.* 2001 ; 2003). D'un point de vue microfaciologique, il s'agit d'un grainstone sparitique.

Cette pierre est toujours utilisée sous une forme taillée, appareillée en moyen et grand appareil pour la construction et également comme pierre décorative (Turmel 2014). Cet usage est grandement facilité par la possibilité qu'offre cette pierre d'être découpée et mise en forme par sciage. Dans l'édifice, ces calcaires sont utilisés aussi bien en grand appareil (pour les bases et les chapiteaux de colonnes en particulier), mais également sous la forme de moellons de petit et moyen appareil. Ils ont été intensivement utilisés afin de restituer les chapiteaux de colonnes absents ou fortement endommagés. Pour cet usage ils sont assemblés afin de restituer les chapiteaux épannelés actuellement visibles.

Ces calcaires sont exclusivement utilisés pour les restaurations de l'édifice. Il a été mis en œuvre aussi bien pour remplacer bases et chapiteaux de colonnes sous différentes formes, mais aussi, plus récemment en placage des éléments de couverture préfabriqués posés à partir de 2016. Les échantillons qui ont été caractérisés ici sont issus d'un bloc provenant des carrières de Savonnières-en-Perthois dans le cadre d'un autre projet du laboratoire.

**Description du microfaciès SAV :** Les calcaires de l'Oolithe vacuolaire sont constitués d'oolithes dont une grande proportion des nucléii est dissous, ceux qui sont préservés sont constitués de pellets. Ils sont associés à des coquilles de lamellibranches brisés et des fragments d'échinodermes. Le microfaciès de ces calcaires apparaît toutefois très monotone (Figure III-50). Les éléments figurés sont cimentés par de grands cristaux de sparite palissadiques qui ménagent une importante porosité intergranulaire. Les nucléii dissous des oolithes constituent par ailleurs une importante proportion de la porosité piégée dont de Brétizel (1962) mentionnait déjà qu'elle piégeait des traces de gaz naturels. Ce calcaire est un **grainstone** à oolithes vacuolaires (Dunham 1962) ou une **oobiosparite** (Folk 1959).



Figure III-49. Photographie du faciès type des calcaires à « oolithe vacuolaire » de type pierre de Savonnière. A ; Base de colonne restaurée au XIXe siècle ; B : Pseudo-attique de couverture construit en 2016 ; C : Moellon de restauration du XIXe siècle ; D : Aperçu macroscopique des calcaires oolithiques.

L'apparition de ces matériaux dans le bâti s'est faite au grés de l'élargissement des aires de diffusion des matériaux ou des destructions/reconstructions des bâtiments appartenant à l'aire urbaine. Ces blocs ne questionnent alors que sur la période de leur emploi.

**Le réemploi de blocs antiques :** À plusieurs reprises au cours de l'étude du monument ont été décrites des pierres en œuvre pour lesquelles la question de l'authenticité ne trouvait pas de réponse univoque. Ces éléments sont appareillés en grand appareil, mais il pouvait également s'agir de fragments de blocs dont la taille pouvait porter à confusion (trop petite ou décalée par rapport au calepinage antique) et présentant des faciès cohérents avec ceux utilisés pendant l'antiquité. Cependant, certains de ces blocs ont pu être retaillés pour être remis en place dans des maçonneries de restauration à une date non précisée. Il peut aussi bien s'agir de blocs originels replacés que de blocs antiques appartenant à d'autres monuments démantelés. Pour les pierres débitées en moellons, il s'agit de tous les faciès antiques sans exception dont les blocs ont visiblement fait l'objet de réemploi au cours du temps depuis l'antiquité ou de périodes plus récentes (Turmel 2014 ; Fronteau *et al.* 2019).

En revanche, certains blocs de grand appareil ont soulevé plus d'interrogations. En effet, certains d'entre eux répondaient clairement à tous les critères d'authenticité requis, mais avaient cependant fait l'objet de manipulations au cours des phases de restaurations de l'édifice (Figure III-51).

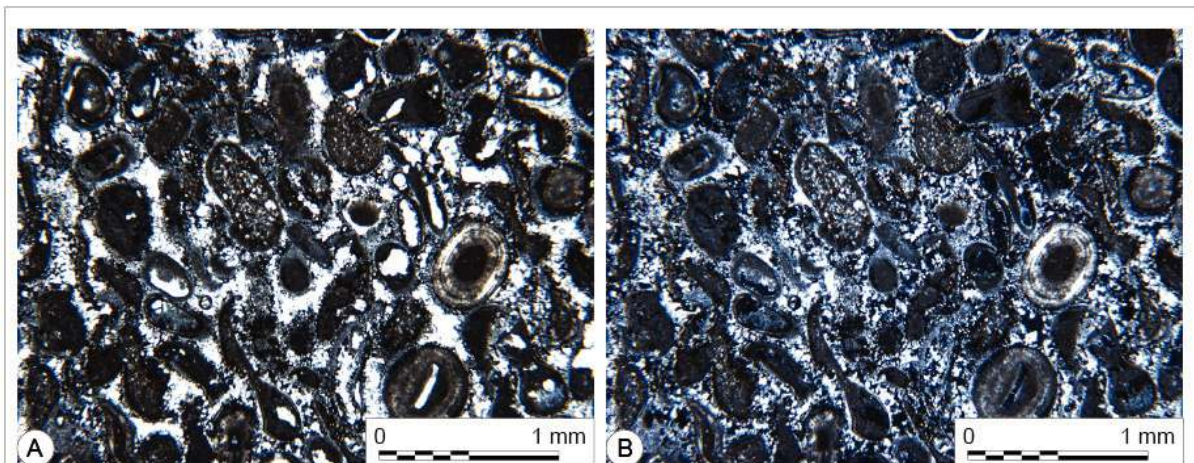


Figure III-50. Microphotographie d'un échantillon d'oolithe vacuolaire de type « Pierre de Savonnières » SAV. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).

Ces blocs de calcaires lutétiens ont été observés en diverses positions sur le monument. Ils présentent des faciès qui semblent dénoter par rapport à ceux des blocs voisins ou qui semblent incongrus dans leur position actuelle. Ils peuvent également avoir été mis en œuvre en montrant un certain laxisme vis-à-vis de la maçonnerie originale, ne faisant pas correspondre précisément les faces des blocs adjacents, mal appareillés ou encore positionnés en délit. Cependant, plusieurs arguments permettent de mettre en doute leur authenticité :

- La position architecturale anormale d'une pierre au regard de son faciès ;
- Le traitement des surfaces exposées par un outil spécifique (cas du bouchardage des blocs ;
- La présence de cavité(s) technique(s) sur une des faces exposées du bloc ;
- Et Le non-respect de la stylistique des décors qui n'est pas respectée (mauvais raccord entre des éléments de décors par exemple) ou en décalage par rapport à un ensemble.

L'un ou plusieurs de ces arguments a par ailleurs permis de discriminer les blocs originels des blocs de restauration de la pile ouest de la porte et de quelques restaurations de la façade sud. Les principaux faciès des pierres utilisés de restauration sont détaillés ci-après.

**Les calcaires tendres à milioles et *Orbitolites*** : Ces calcaires sont tendres, jaune clair à crème, ils sont tendres avec une matrice microgranuleuse d'aspect très poreux. Ils révèlent d'assez nombreuses milioles associées avec des *Orbitolites*. La matrice fine laisse voir de nombreux terriers d'invertébrés (principalement de type *Glossofungites* ; Harper et Benton 1997). Ces pierres à patines jaune clair présentent de fréquentes tâches d'oxydes de fer qui trahissent la présence de glauconite. De plus, l'observation macroscopique a révélé la présence de nombreux grains de quartz inframillimétriques noyés dans la matrice.

Ces calcaires sont essentiellement (mais probablement pas uniquement) mis en œuvre pour la phase de restauration qui a succédé à la Première Guerre Mondiale. Ils sont par ailleurs assez similaires aux calcaires issus des exploitations de pierres du Massif de Saint-Thierry.

**Les grès** : Ils ont été observés dans les pierres de restauration et sont mis en œuvre sous la forme de moellons (soit bien mis en forme, soit très vaguement équarris). Il s'agit de grès qui, stratigraphiquement, proviennent de tous les étages géologiques représentés localement

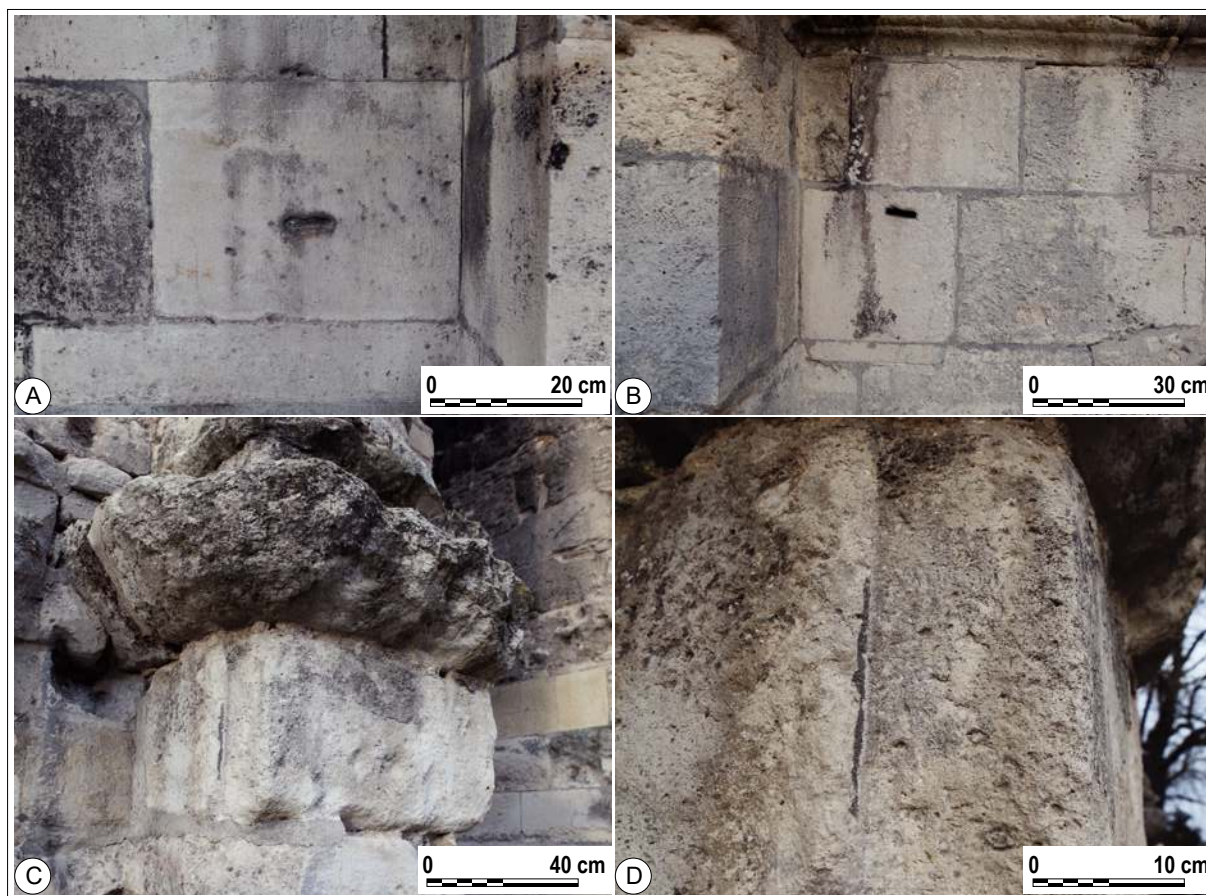


Figure III-51. Exemples de remploi de blocs de grand-appareil antique dans des restaurations du XIXe siècle. A et B : Remploi de bloc de faciès compatible avec leur position architecturale, mais comportant un trou de louve sur une face latérale ; C et D. : Remploi d'un bloc calcaire de faciès et de module incompatible avec sa position architecturale et comportant une feuillure sur une face, manifestement héritée de son emploi antérieur.

et susceptibles de fournir des matériaux de construction.

Des plus anciens aux plus récents, il s'agit :

- Des grès quartzites du Thanétien (grès à ciments siliceux)
- Des grès calcaires caractéristiques de la formation des grès du Mont Chenois dans le Massif de Saint-Thierry ;
- Des grès ferrugineux rouges similaires à ceux du Cuisien de la série locale ;
- Des grès quartzites gris de la base du Lutétien
- Des grès calcaires (ou calcaires gréseux) du Lutétien, caractéristiques des faluns rencontrés dans le secteur de Damery ou de Fleury la Rivière dans la vallée de la Marne

Ces différents grès sont mis en œuvre dans la plupart des restaurations entreprises depuis la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Leur présence est relevée dans les moellons de reconstruction de la façade sud, dans les rebouchages des cavités de prédation et dans les colmatages de cavités béants entre les blocs. Le choix de ces matériaux ne relève pas d'une recherche de rationalité, mais d'une logique opportuniste et pragmatique d'emploi de matériaux disponibles *in situ*.

**Les pierres meulières :** Ce sont des altérites siliceuses d'âge Plioquaternaire provenant de la formation des « Argiles à Meulières » (Figure III-52 ; Laurain *et al.* 1981 ; Laurain 1985 ; Ménillet 1987 ; Guérin 1991 ; Thiry 1999).

Les meulières sont des roches siliceuses non granulaires, issues d'une recristallisation pédologique en climat chaud, durant la fin du Cénozoïque. Elles existent sous différents faciès, plus ou moins caverneux et vacuolaires. Elles se présentent sous la forme d'un matériau compact, massif, mais qui peut également être poreux à vacuolaire et arborer des concrétions de calcédoine. Elles sont différentes couleurs (gris bleuté, brun, blanc et jaune) et sont susceptibles de présenter divers faciès depuis un aspect béchique jusqu'à un aspect silexoïde à cassure conchoïdale. Cependant, les variétés des environs de Reims sont plutôt massives, à la différence de celles de la Brie. Les faciès et sous-faciès de meulières n'ont pas été détaillés ici, car ils sont très hétérogènes et peuvent aisément se côtoyer au sein d'un même gisement.

Dans le secteur de Reims, les meulières sont le plus souvent azoïques, cependant d'autres faciès existent pour lesquels la silicification moins poussée a préservé les fossiles originellement présents dans la roche (Courtehoux 1968). Leurs gisements forment les surfaces structurales des plateaux tertiaires des alentours de Reims (Montagne de Reims, Massif de Saint-Thierry jusqu'au Tardenois), où elles ont été intensivement exploitées jusque dans les années 1930 (Guérin 1991). Leur très grande résistance a été mise à profit dans diverses utilisations depuis la construction à la production de meules. De façon générale, les blocs de meulières sont peu décrits dans la documentation de la Porte de Mars.

**Les calcaires lutétiens de la série locale :** Comme le signalait déjà A. Blanc (1984), une très grande partie des matériaux calcaires utilisés pour les réparations, majoritairement assemblés sous forme de moellons ou de blocs de moyen/grand appareil assez mal équarri (bases des colonnes de la façade sud), sont issus de sites locaux d'extraction de pierres. Ces matériaux sont posés selon des assises tantôt très régulières et tantôt très irrégulières. Ils ont



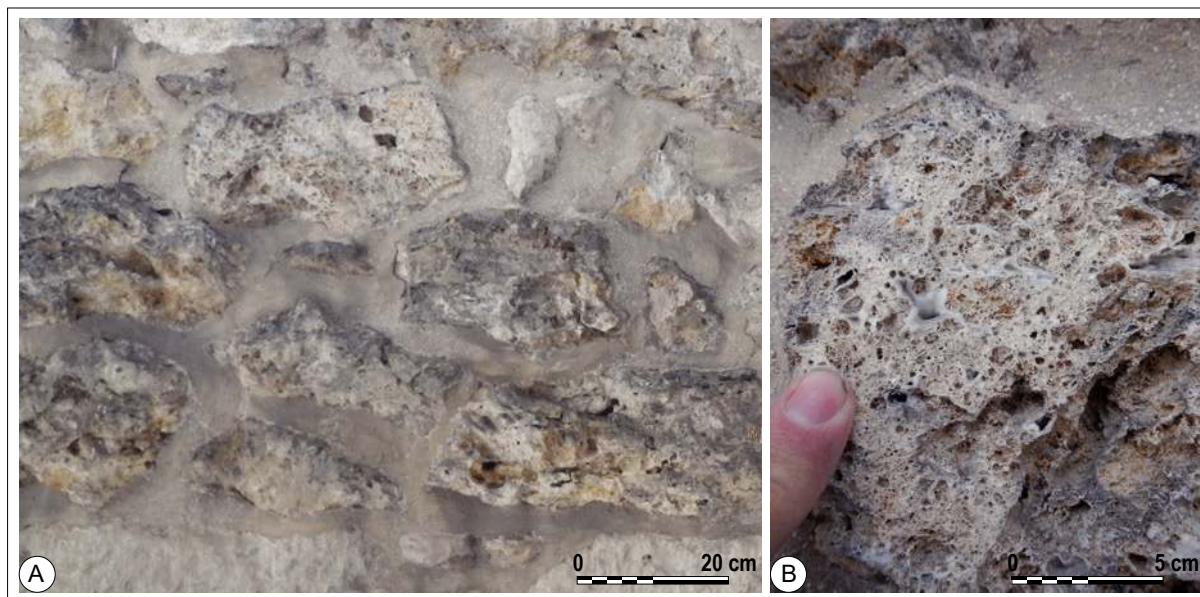


Figure III-52. Exemples de faciès de pierres meulières dans les restaurations des élévations de l'édifice.

été mis en œuvre afin de reconstituer les parties manquantes de la façade sud de la Porte. Stratigraphiquement, ils représentent toutes les variantes possibles de faciès qu'il est possible de trouver dans les séries lutétiennes depuis leurs bases jusqu'au sommet des calcaires marins. D'un point de vue de leurs provenances géographiques, ils représentent toutes les sources d'approvisionnement possibles, depuis les extractions du Massif de Saint-Thierry jusqu'à ceux plus distants de la vallée de l'Ardre (Laurain *et al.* 1976 ; 1981 ; Fronteau *et al.* 2021).

Devant la très grande variabilité des faciès rencontrés et l'évidence que ceux-ci sont issus de restaurations (ils sont exclusivement débités sous forme de moellons plus ou moins grossiers sans gabarit standardisé), ces matériaux ne seront pas spécifiquement détaillés, cependant ils entreront dans la composition d'assemblages qui permettront de caractériser des faciès de restauration.

**Des matériaux de type et d'origine variés :** Une partie des matériaux utilisés au cours des restaurations de l'Arc sont de natures très diverses, certains sont représentés de manière significative (plusieurs dizaines d'éléments), tandis que d'autres sont présents de manière anecdotique. Rentrent dans cette catégorie aussi bien des matériaux d'origine anthropique comme des éléments de terres cuites (briques et fragments de tuiles modernes), de fragments de céramiques (d'origine non identifiable) ou encore des roches extrarégionales. En guise d'exemple dans la crépis (base du socle), se trouve en complément d'une encoche pratiquée dans le calcaire de la construction originale, un pavé (bloc décimétrique de pierre d'origine plutonique, probablement gneissique) remployé comme moellon.

Le choix des matériaux utilisés pour les restaurations de Millet (1867) et celles de l'après-Première Guerre Mondiale (Haubold en 1923 ; Jaton 1982) semble avoir été essentiellement guidé par la disponibilité des matériaux plus que par un souci d'esthétisme ou de justesse architecturale. D'après Lefèvre (1985), l'origine des matériaux mis en œuvre sous la direction de Millet (1865-1869), alors qu'il lui était demandé de réaliser une restauration neutre de l'édifice,

serait à chercher dans les pierres retrouvées au cours du déblaiement de l'Arc. Il faudrait donc y voir d'une part l'origine d'une certaine disparité dans la nature des blocs, et d'autre part la raison du passage de blocs au module bien défini à des moellons de modules quelconques. Les blocs bien équarris sont utilisés en premier lieu tandis que les blocs de géométrie plus aléatoire ne sont utilisés qu'à l'épuisement des premiers ou en certaines positions sensément de moindre importance.

Les restaurations liées aux dégâts de la Première Guerre Mondiale, parfois qualifiées de mineurs par certains auteurs (Lefèvre 1980 ; Lefèvre *et al.* 1985), ont un impact très important sur l'Arc. En effet, c'est à l'occasion de ces restaurations que les importantes quantités de moellons liés à l'aide d'un mortier très riche en ciment sont mises en œuvre (Brunet-Gaston *et al.* 2020). Les réparations qui sont alors réalisées sur l'ensemble des façades de l'édifice portent toutes les traces de l'usage de ce liant en même temps que sont remplacés les blocs arrachés par les impacts d'obus. Ces dégradations sont aisément identifiables sur la façade nord du fait de l'appareil de construction très différent par rapport à la façade sud, et de la différence de nature des éléments de construction de la façade nord (moellons de pierres très diversifiées).

À l'échelle du monument, la surface représentée par toutes les restaurations de l'entre-deux-guerres reste marginale même si visuellement elles semblent très identifiables. Il semble que les façades intérieures des baies portent moins de stigmates liés aux combats du XX<sup>e</sup> siècle. Mais cela est en partie dû aux grandes surfaces occupées par des bouchages de maçonnerie qui ont été mis en place en 1927 et qui peut largement les occulter. Il est également envisageable que ces façades aient pu profiter d'une protection spécifique, mais non documentée. Il faut souligner également que le noircissement important des parois n'accorde pas nécessairement la possibilité d'identifier ces dégradations en particulier. De manière générale, l'ensemble de la surface des façades de l'Arc, et en particulier des façades extérieures, porte encore les stigmates des projectiles qui les ont touchées, que cela soit par la présence de fragments métalliques dans les pierres et les joints ou par les traces d'impacts et leurs réparations encore clairement identifiables.

Un insert d'un bloc décimétrique de marbre blanc peut être observé dans les parties hautes de la pile ouest de l'Arc (reconstruite sous la direction de N. Brunette). La présence de cet élément ne semble pas motivée par la nécessité d'une réparation ou encore dans un but structurel ou fonctionnel. S'il est plausible d'y voir une forme de signature de l'architecte à l'intention de ses successeurs (l'insert n'étant pas visible depuis le pied du bâtiment), il manque cependant un écrit pour savoir précisément ce qui a motivé cet insert.

Les travaux réalisés pendant les phases de restauration sont assez nombreux puisqu'ils ont consisté en 9 grandes interventions différentes depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle jusqu'à aujourd'hui. Les informations réunies à la fois sur les matériaux originels et sur les matériaux de restauration conduisent naturellement à proposer une cartographie des blocs authentiques (Figure III-53 & Annexe 19). Ce support permet de localiser et d'identifier les blocs considérés comme datant de la construction de l'édifice pour lesquels il n'existe pas d'évidences de restaurations.

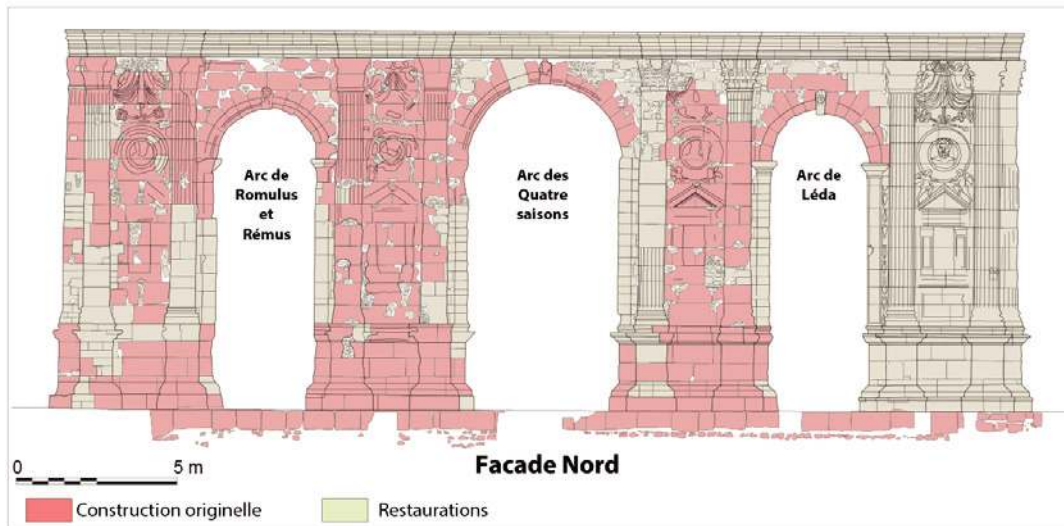


Figure III-53. Carte d'authenticité des matériaux de la façade nord de la Porte de Mars

Parallèlement à la construction de ce premier support cartographique, l'identification des matériaux de restauration ainsi que le croisement avec les supports iconographiques anciens et les recherches historiographiques ont débouché sur la construction de cartes des phases de restaurations (Figure III-54 et Annexe 20). Cette cartographie est complétée par une synthèse décrivant des faciès de restauration.

Ces faciès de restauration peuvent se définir par l'association entre un matériau de construction, une modalité d'assemblage et un liant spécifique. Il est évident que cette approche présente rapidement des limites surtout si les restaurations sont réalisées de manière trop homogène ou trop rapprochées dans le temps ce qui les rend difficiles à isoler dans l'iconographie ancienne (souvent de qualité assez médiocre). Néanmoins, les travaux réalisés sur la Porte de Mars ont été réalisés avec des intervalles de temps suffisants pour qu'ils soient clairement identifiables et d'autre part, ils ont engagé des matériaux et des techniques d'assemblage suffisamment différentes pour être discriminés les uns des autres. Ces faciès de restaurations sont synthétisés dans le tableau suivant Tableau III-9).

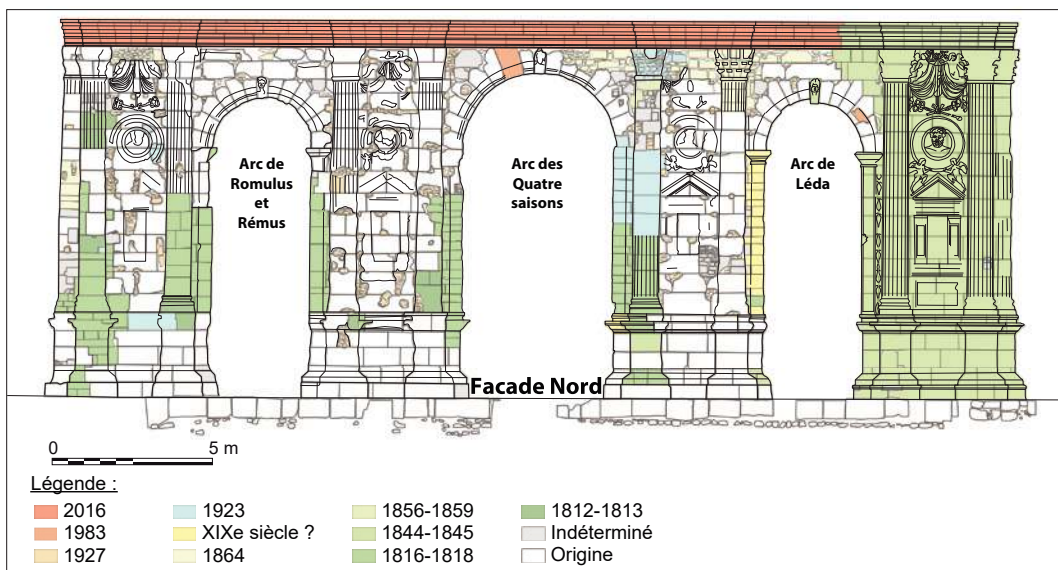


Figure III-54. Cartographie des phases de restauration sur la façade nord de la porte de Mars

## 3.2.4. Quantification des matériaux du monument

À partir de la documentation et des cartographies réalisées sur support numérique, il est possible de réaliser des quantifications sur ces données. À partir de ces quantifications, il apparaît également intéressant de proposer un passage de la donnée en 2 dimensions des diverses façades à une quantification volumétrique. L'utilisation d'un support sur SIG rend accessible la quantification des objets digitalisés directement à partir des outils de géotraitement intégrés dans le logiciel. Le croisement de ces données d'une couche à l'autre est également facilité par le choix de cet outil. La quantification des données préalablement géoréférencées dans un système de projection métrique permet alors leur exploitation et la réalisation de calculs. Cependant, il est nécessaire de rester prudent vis-à-vis de ces calculs qui ne concernent que les pierres visibles de l'édifice. En effet, seules les façades sont visibles et accessibles et il reste impossible de considérer l'entièreté de la construction.

Date	Faciès de restauration (appareil et matériaux)
1804 - 1818	<b>Oolithes vacuolaire</b> en <u>grand appareil</u> pour les bases de colonnes et quelques tambours, repositionnement de pierres antiques. <b>Calcaires lutétiens</b> du massif de saint thierry en <u>moellonages en petit et moyen appareil</u> . Reprise en moellons de <u>moyen et petit appareil</u> des façades de l'arcade orientale en moellons de <b>calcaires à Linnées</b> et de <b>d'Oolithes vacuolaires</b> .
1844 - 1845	Reconstruction de la pile ouest en <b>calcaires lutétiens</b> d'Hermonville assemblés sous la forme de <u>blocs de grand appareil respectant le module antique</u> . Reprise des parties manquantes du socle de la pile ouest en partie avec des <b>blocs antiques</b> .
1859	Reprise ponctuelles du socle à l'aide de <u>moellons de tailles et de nature variées</u> , majoritairement <b>calcaires lutétiens</b> assemblés en <u>moyen appareil</u> . Repositionnement des <b>matériaux antiques</b> sur la façade sud et <u>soutènement des éléments encore en place</u> . Reconstruction de la façade sud et des parties manquantes des autres façades à l'aide de <u>moellons de récupération</u> de nature et forme extrêmement variés sans respect des assises.
1859	Réparation de la façade sud avec reprise des socles, tympanes et colonnes, en <b>remploi de matériaux antiques</b> et en <u>moellons de récupération de nature très diverses</u> .
1864	Reconstitution <u>des chapiteaux antiques manquants</u> en <u>petits moellons d'Oolithe vacuolaire</u> (donne la forme de chapiteaux épannelés encore visible aujourd'hui).
1899 - 1901	Les pierres de la dernière assise de la facade sud et est sont remplacées par des <u>moellons de meulières</u> jointées au ciment.
1923	<u>Comblement des impacts par des moellons de toutes tailles</u> et de <b>nature très divers</b> . Les anfractuosités sont colmatées par de grandes plages de <u>moellons jointées au ciment</u> . Remplacement de quelques tambours de colonnes par des <u>blocs de grand appareil</u> en <b>calcaires lutétiens</b> et des chapiteaux par des <u>assemblages de petits moellons calcaires</u> détruits pendant la Première Guerre Mondiale Rejoitoiements "à la demande" au ciment de portland.
1927	Réfaction des <u>joints au ciment de Portland</u> et réparations mineures (non documentées).
2016	Remplacement de l' <u>ancienne couverture</u> par des éléments en <b>béton parés de calcaires de type savonnaire (Oolithe vacuolaire)</b> .

Tableau III-9. Synthèse des travaux de restauration, des matériaux utilisés et de leurs modalités d'assemblages.

Les références actuelles comme anciennes concernant les travaux réalisés sur la porte, très diserts sur les dimensions de l'Arc monumental le sont en revanche beaucoup moins sur la quantification des surfaces et des volumes de l'édifice. La maquette numérique est alors exploitée pour la réalisation des calculs de volumes et de surfaces mis en œuvre dans la construction du bâtiment. Le découpage ce modèle 3D sous la forme de blocs architecturaux élémentaires (Figure III-55), forme de déconstruction numérique de l'édifice, a été réalisé par segmentations successives directement dans l'outil de modélisation (Agisoft Metashape©). Les quantifications de surface et de volume de chacun des éléments générés ont été calculées grâce à une fonctionnalité dédiée de ce même logiciel (calcul de cubatures). Les surfaces des façades sont extraites immédiatement après que les parties de la maquette ont été découpées, tandis que les volumes sont calculés après comblement des trous laissés dans le modèle par le processus de segmentation (le volume d'un modèle comportant un trou est infini). Le résultat de ces calculs est détaillé au sein du tableau et de la figure suivants Tableau III-10 et Figure III-55).

Ces calculs permettent donc d'estimer un volume total pour l'ensemble du monument de 1047 m<sup>3</sup> pour une surface<sup>82</sup> totale de 1 397 m<sup>2</sup>. Les soubassements occupent entre 58 et 60 m<sup>3</sup>. Leurs surfaces varient de 61 à 70 m<sup>2</sup>, les socles intérieurs à la géométrie plus simple par rapport aux pylônes extérieurs ont les surfaces les moins importantes. Les élévations comportent 698 m<sup>3</sup> de maçonnerie et sont constituées de 4 pylônes d'un volume compris entre 130 et 142 m<sup>3</sup> avec des surfaces comprises entre 138 et 142 m<sup>2</sup>. À de petites variations près, les dimensions de chacune des parties du monument considérées individuellement sont donc comparables.

	Surfaces	Volumes (m3)
Couverture	391 m <sup>2</sup>	113 m <sup>3</sup>
Elévations	744 m <sup>2</sup>	698 m <sup>3</sup>
Pylone 1	162 m <sup>2</sup>	142 m <sup>3</sup>
Voute Baie 1	43 m <sup>2</sup>	52 m <sup>3</sup>
Pylone 2	138 m <sup>2</sup>	130 m <sup>3</sup>
Voute Baie 2	52 m <sup>2</sup>	53 m <sup>3</sup>
Pylone 3	141 m <sup>2</sup>	130 m <sup>3</sup>
Voute Baie 3	44 m <sup>2</sup>	51 m <sup>3</sup>
Pylone 4	164 m <sup>2</sup>	140 m <sup>3</sup>
Socle	262 m <sup>2</sup>	236 m <sup>3</sup>
Socle Pylone 1	68 m <sup>2</sup>	60 m <sup>3</sup>
Socle Pylone 2	61 m <sup>2</sup>	58 m <sup>3</sup>
Socle Pylone 3	63 m <sup>2</sup>	60 m <sup>3</sup>
Socle Pylone 4	70 m <sup>2</sup>	60 m <sup>3</sup>
<b>Intégralité du monument</b>	<b>1397 m<sup>2</sup></b>	<b>1047 m<sup>3</sup></b>

Tableau III-10. Synthèse des données géométriques chiffrées de la Porte de Mars extraites de la maquette numérique.

<sup>82</sup> Cette surface est calculée sur un modèle légèrement lissé afin de laisser de côté les surfaces générées sur les microrugosités des sculptures et décors perceptibles à la résolution native du modèle.

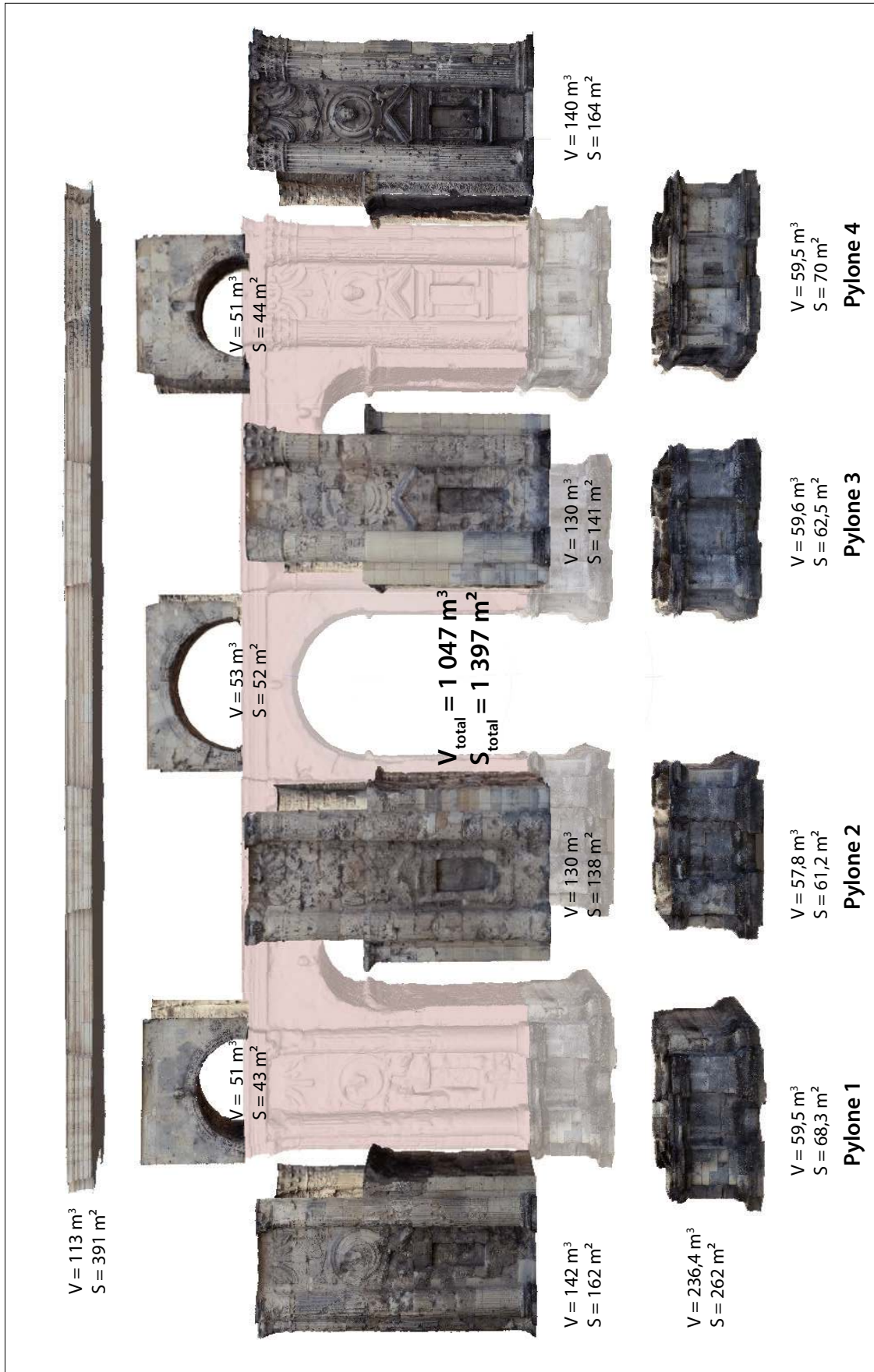


Figure III-55. Éclaté de la structure de la Porte de Mars avec les indications de surfaces et de volumes pour chacun des éléments d'architecture

Comme le montre la Figure III-56, le calepinage de la Porte, initialement régulier et rigoureux est constitué d'un assemblage de blocs de grand appareil quadrangulaire pseudo-isodome s'est progressivement complexifié au grès des différents travaux de restauration (Figure III-57 et Figure III-58). Ces travaux, à l'exception de la reconstruction de la pile Ouest par Brunette n'ont pas respecté les assises originales des pierres du monument (ce qui est particulièrement vrai pour les remplacements de blocs par des moellons).

Cette augmentation de la complexité du calepinage par l'adjonction de nombreux éléments de petits appareils souvent de tailles très variables ne permet donc pas de réaliser un dénombrement des éléments qui permette une comparaison pertinente. Il est donc nécessaire pour quantifier et comparer l'utilisation des différentes pierres du monument de recourir aux calculs des surfaces visibles sur les façades pour chaque élément.

C'est par ce biais que les quantifications de matériaux ont été réalisées à partir des surfaces visibles sur les différentes façades (Figure III-59, Annexe 21 et Annexe 22). Il ne s'agit

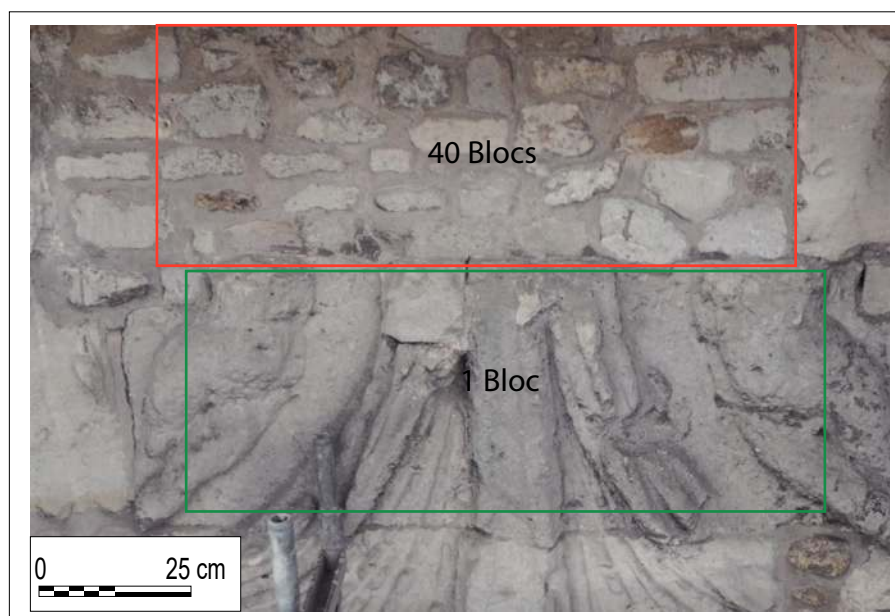


Figure III-56. Variabilité du nombre d'éléments de grand appareil comparé aux moellons de restauration par unité de surface. Les rectangles bleus et rouges sont de même surface, mais pour 1 bloc de grand appareil, on compte 40 moellons de petit appareil.

donc qu'une estimation puisque l'application d'une fonction de transfert vers le volume impliquerait nécessairement de pondérer fortement les chiffres avancés. Cette quantification est réalisée globalement à l'échelle du monument et de manière plus fine en fonction de chaque position architecturale.

**Les soubassements** de l'Arc rassemblent les fondations, l'assise de réglage et le socle de l'édifice (Figure III-21). Les fondations de l'édifice ont été observées à l'occasion de la fouille archéologique du pourtour de l'édifice (Bontrond *et al.* 2015). La partie du radier observée est très peu épaisse et constituée d'un hérisson de petits moellons de pierres siliceuses et de calcaires informes disposés directement sur la craie. L'assise de réglage quant à elle est constituée de blocs de grand appareil. Il n'est pas possible d'exclure qu'une partie des éléments de fondations aient pu faire l'objet d'une récupération à l'image de ceux qui constituaient les

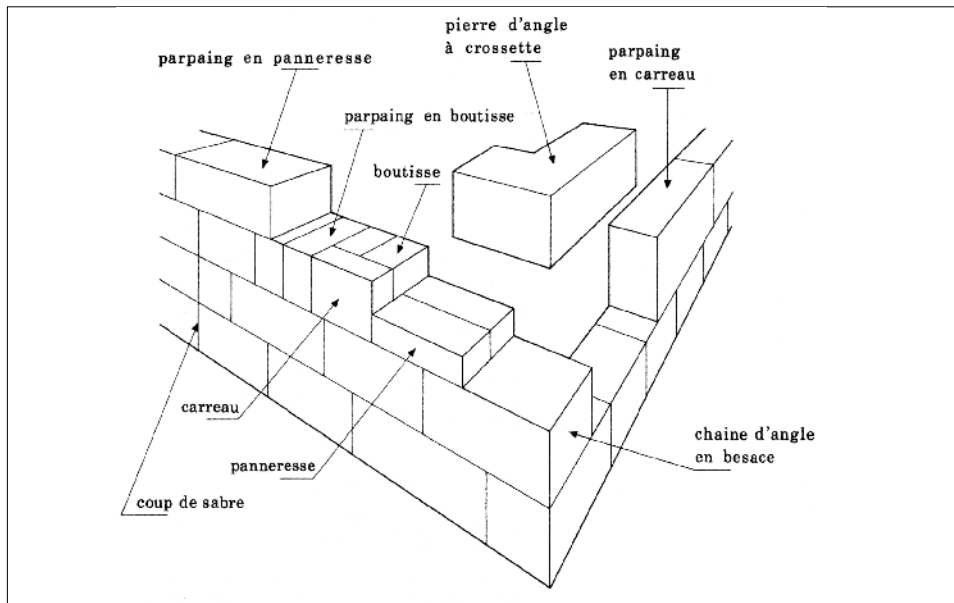


Figure III-57. Différentes positions des pierres dans les murs de grand appareil quadrangulaire antique (d'après Adam 1984)

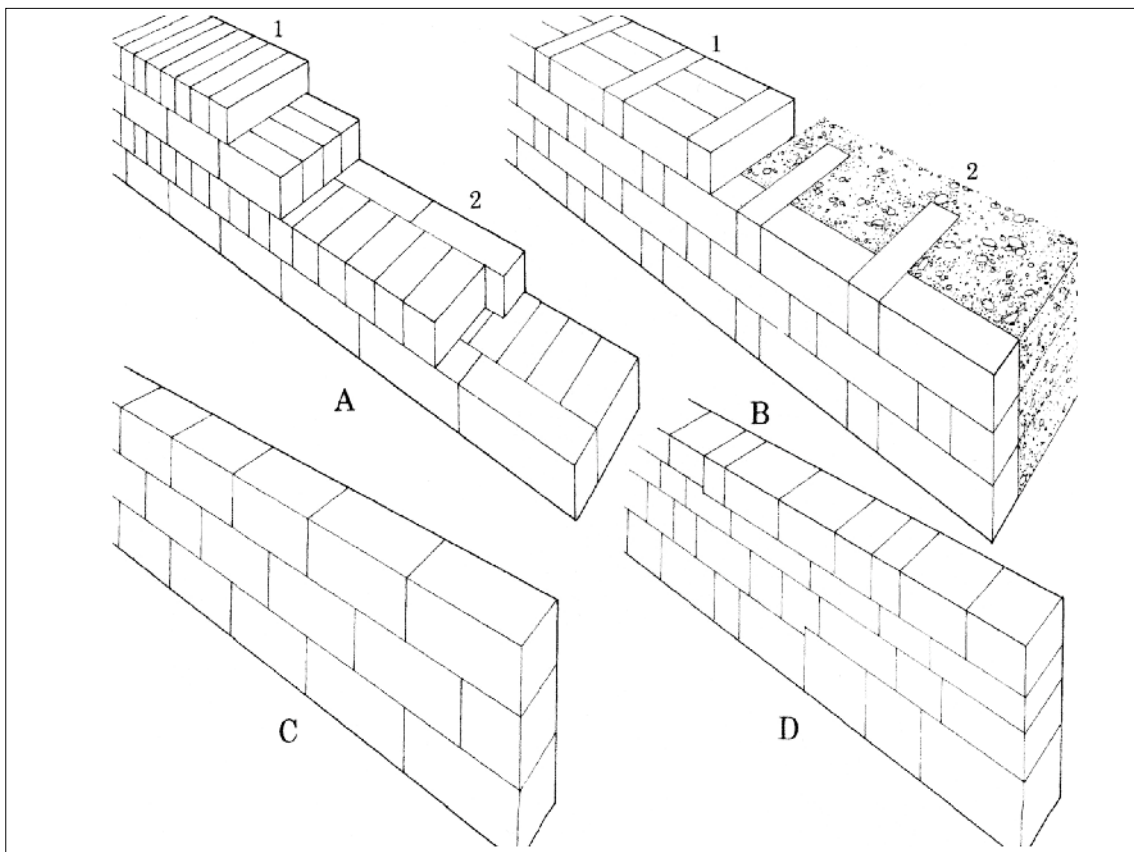


Figure III-58. Schéma des principaux aspects du grand appareil quadrangulaire antique où les dispositions des blocs alternent entre carreau et boutisses que cela soit en alternance en absence ou non de fourrure (A et B), ou encore en assemblage isodome (C) et pseudo-isodome (D) (d'après Adam 1984).



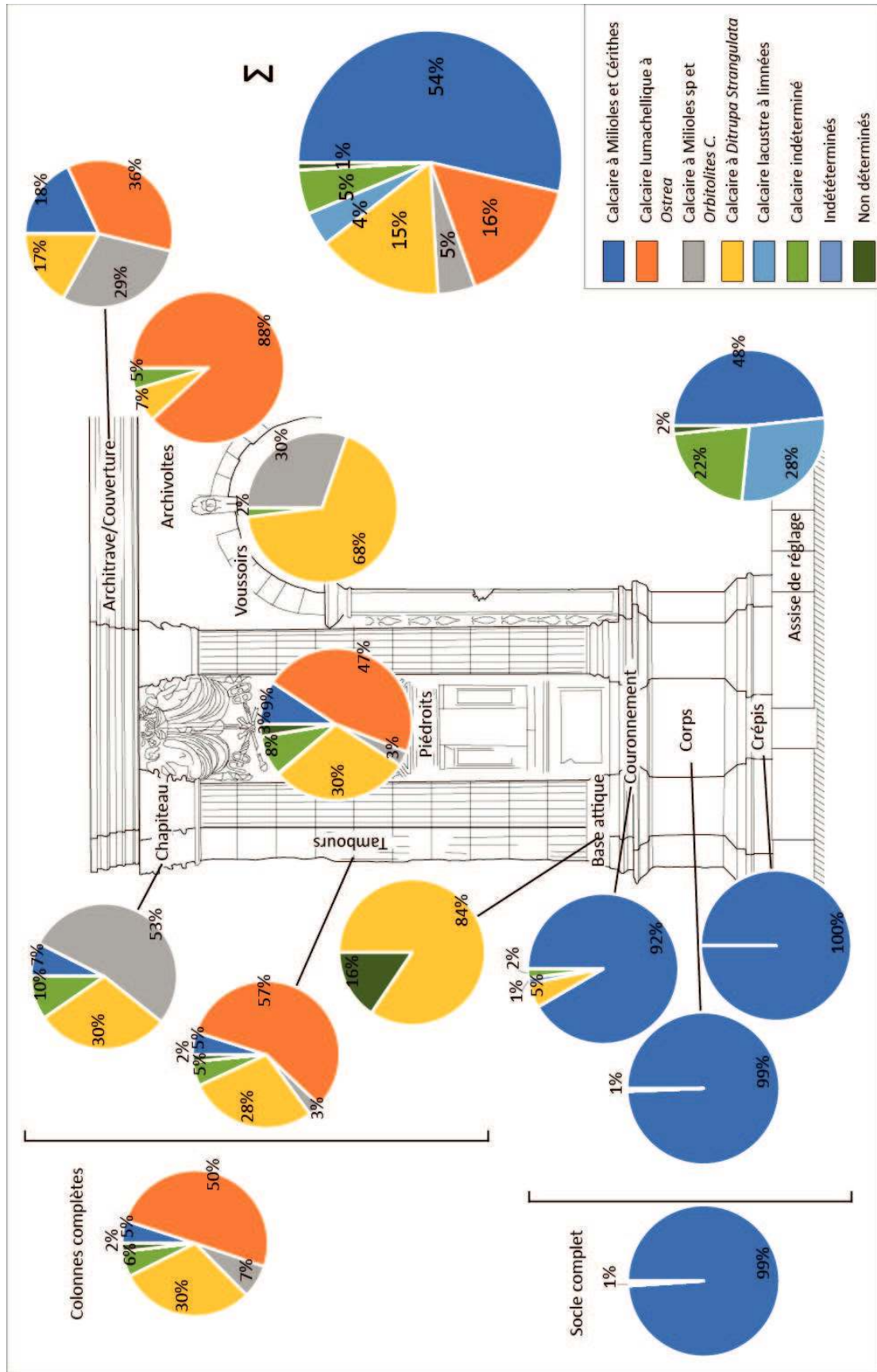


Figure III-59. Répartition architecturale des faciès des blocs antiques exprimé en pourcentage des surfaces afin de s'affranchir de la variabilité de la dimension des blocs de construction

avancées de l'assise de part et d'autre de l'édifice Figure III-60 A et B). Les blocs de cette assise qui ont pu être identifiés sont répartis selon deux faciès principaux. Il s'agit d'une part de calcaires massifs à milioles et cérithes (48 %) et d'autre part de calcaires lacustres à limnées (28 %). Une grande partie des éléments de cette assise n'ont pas été observés en raison de l'usure importante imposée par le roulage des chariots (ornières ;Figure III-60 C)

**Les éléments du socle**, très majoritairement d'origine, apparaissent extrêmement homogènes. Les pierres sélectionnées pour sa construction sont constituées d'un calcaire massif à milioles et cérithes pour la totalité des blocs de grand appareil de la **crépis** et du **socle**. Pour son couronnement la présence de quelques éléments de calcaires à Ditrupa a même été observée (5 % de la surface visible).

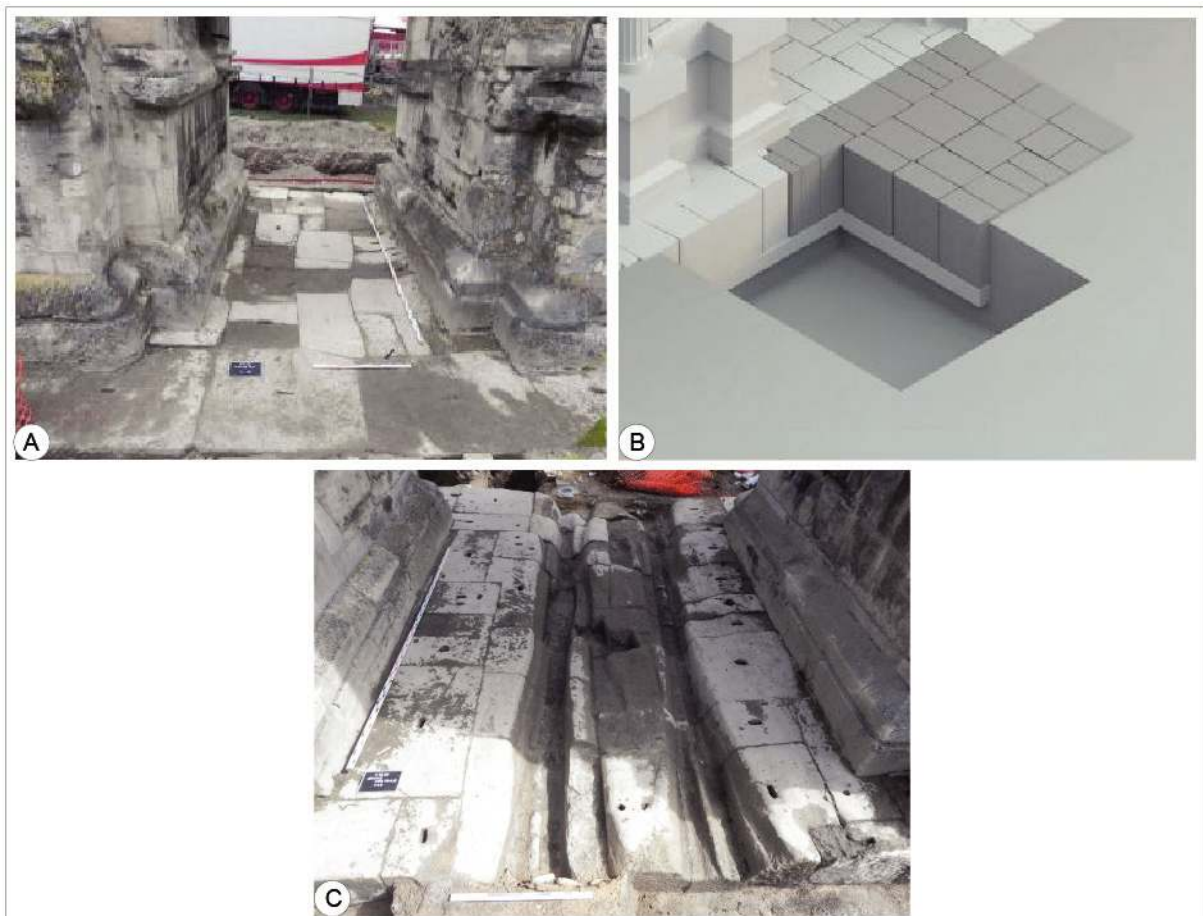


Figure III-60. Aperçu de l'assise de réglage de l'édifice (Bontrond et al. 2015 ; Brunet-Gaston et al. 2020). A. Vue générale du pavage de l'arc de Romulus et Rémus (arche ouest) B. Hypothèse de restitution volumétrique de l'avancée nord de l'assise de réglage ; C. Ornières formées dans l'assise de réglage de l'arche des Quatre Saisons.

**Les élévations** de l'Arc rassemblent aussi bien les façades qu'une grande partie des colonnes. Ce choix principalement aux modalités d'assemblage des matériaux de la porte. Les colonnes sont engagées dans les façades et en sont donc solidaires. Ainsi, un même bloc peut constituer une partie de façade et tout ou partie d'un tambour de colonne. Certains blocs constituent des chaînages entre deux façades orthonormales.

**Les façades et les tambours de colonnes** présentent donc des faciès identiques répartis de manière très similaire en raison de leur particularité architecturale. Ils sont constitués de calcaires lumachelliques à *Ostrea* (28 et 30 %), contenant milioles et *Ditrupa*, de calcaires à milioles et *Orbitolites* (57 et 47 %) et de rares Calcaires granulaires à milioles (sous faciès des calcaires à milioles et cérithes ; 9 % et 5 %).

Pour **les éléments de soutènement**, seuls les bases et les chapiteaux de colonnes sont inclus dans cette catégorie, car ils sont tous formés d'éléments spécifiques et indépendants du reste des élévations. Les blocs originels utilisés dans cette position architecturale à l'échelle de la porte sont extrêmement rares. Les bases de colonnes originelles ont toutes été restaurées, pour la façade nord à l'aide de calcaire à oolithes vacuolaires (type « pierres de Savonnières ») et pour d'autres en calcaires à cérithes. À ce jour une seule **base de colonne** originelle subsiste pour l'ensemble du monument. Elle est représentée par un fragment de relativement petite dimension, recouvert dans une large proportion par des placages de moellons (Brunet-Gaston *et al.* 2020). Ce dernier est constitué d'un calcaire à *Ditrupa* très similaire à celui utilisé pour le reste des façades. En raison de la très faible représentativité de cette unique observation, sa généralisation restera impossible.

**Les chapiteaux originels** sont également très peu nombreux puisqu'ils ne sont représentés que par les quatre chapiteaux orientaux de la façade nord et du chapiteau septentrional de la façade est. Ces éléments sont principalement constitués de calcaires à milioles (53 %) et de calcaires fins à *Ditrupa* (30 %). Ils sont complétés dans une très faible proportion par des calcaires granulaires à milioles (avec quelques cérithes pour 7 %). Ces derniers calcaires interrogent cependant, car les décors qu'ils devraient porter y sont totalement effacés.

**Les archivoltes** dont il aurait été plausible d'attendre une composition similaire à celle des façades sont composées de calcaires lumachelliques à *Ostrea* (36 %) et de calcaires à milioles et *Orbitolites* (29 %). Ces blocs sont associés à des calcaires à *Ditrupa* (18 %) et dans une moindre mesure par des calcaires granulaires à milioles et cérithes.

Enfin, l'ensemble des parties originelles des **voûtes** des trois baies est assemblé à partir de voussoirs présentant deux faciès principaux. Il s'agit d'une part de calcaires à *Ditrupa Strangulata*, dont la particularité est d'être extrêmement riche en tubes d'annélides et d'autre part de calcaires à milioles et *Orbitolites* présentant de très grandes milioles qui le rapproche d'un faciès granulaire. Cette homogénéité entre ces deux faciès permet d'émettre l'hypothèse qu'ils ont été spécifiquement sélectionnés pour l'assemblage des voûtes.

**L'entablement et les corniches** originelles ont totalement disparu du monument. Toutefois, la réfection récente de la couverture moderne a permis d'accéder à certaines parties de la couverture et aux fourures internes de la maçonnerie (Fronteau *in* Bontrond, 2019). Ces derniers sont de nature très hétérogène à l'image de ce qui est observé dans les fourures des maçonneries de soubassement des édifices publics. Cette partie porte les traces de restaurations anciennes dont l'emprise exacte est difficile à estimer. La présence d'éléments brûlés en grand nombre pose également la question de leur authenticité. De plus, les parties inférieures de ce fourure sont demeurées inaccessibles, leurs structures précises demeurant de fait indéterminée.

La cartographie des faciès à l'échelle du bâtiment confirme bien cette vue synthétique tout en permettant d'insister sur la rationalisation de leur usage dans la construction (Figure III-61 et Annexe 18). Les calcaires durs à cérithes sont préférentiellement utilisés pour l'édification des soubassements (assise de réglage et socle) tandis que les faciès macroporeux « plus tendres » sont mis en œuvre pour les élévations du bâtiment. Les chapiteaux de colonnes sont quant à eux réalisés dans des calcaires fins spécifiques.

La comparaison des modules des blocs (assimilé ici à leurs surfaces visibles) illustre bien les choix qui ont été effectués d'une restauration à l'autre pour le remplacement des pierres manquantes ou dégradées (Figure III-61 et Tableau III-11). Les restaurations de la première partie du XIX<sup>e</sup> siècle (dirigées par Serrurier et Brunette) se sont attachées à restaurer et

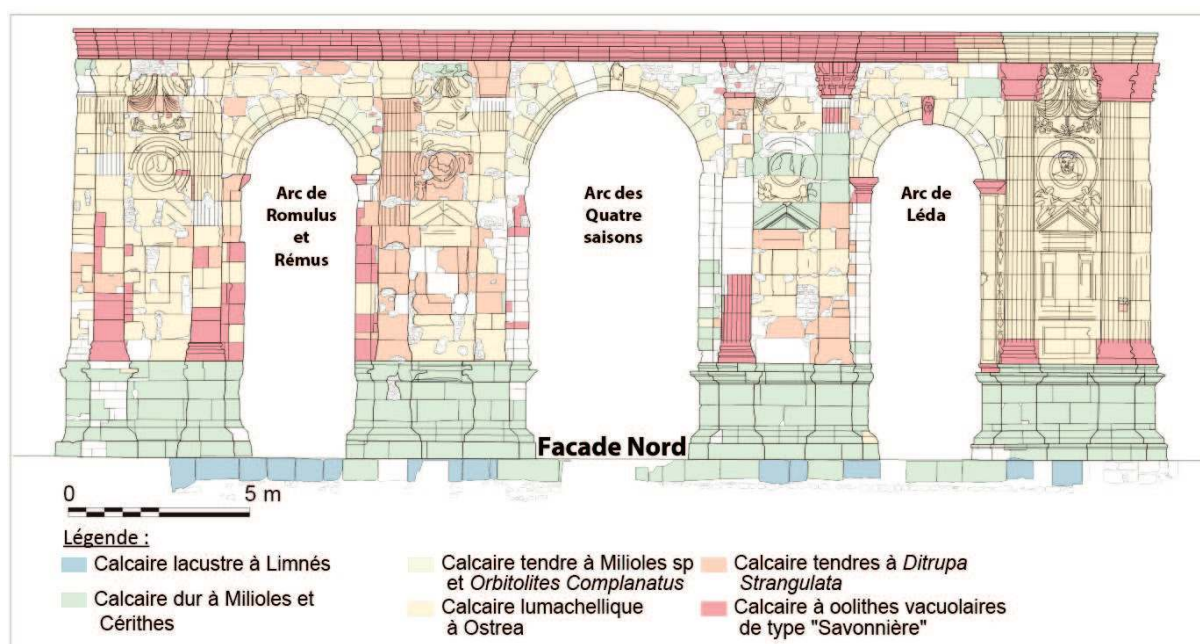


Figure III-61. Cartographie synthétique des faciès des blocs de calcaire de grand appareil de la façade nord du monument.

	Calcaire dur à Miliolites et Cérithes	Calcaire lumachellique à Ostrea	Calcaire tendre à Miliolites sp et Orbitolites Complanatus	Calcaire tendres à Ditrupa Strangulata	Calcaire lacustre à limnées	Calcaire indéterminé	Calcaire tendre indéterminé	Indéterminés	Non observés	N
Architrave	0,76	1,50	1,23	0,71						15
Colonnes engagées	Chapiteau	0,20	1,44	0,80		0,26				19
	Tambours	1,25	14,60	0,72	7,19	1,38			0,39	133
	Base attique				0,73			0,13		6
Colonnes	1,46	14,60	2,16	8,72		1,64			0,52	158
Voûtes	Archivoltes		1,49	0,12		0,08				12
	Voussoirs			8,73	19,48	0,58				206
Piédroits	4,59	23,08	1,54	14,61	0,13	4,21	0,07		1,25	290
Soubassements	Couronnement	10,78		0,62	0,15	0,22				84
	Corps	42,86			0,18	0,03		0,06		253
	Crépis	12,05								76
	Complet	88,96				0,33				483
Assise de réglage	23,26				13,61	10,44				211
Σ	186,2	55,3	15,8	53,6	14,4	18,8	0,1	0,2	3,0	

Tableau III-11. Quantification des surfaces des faciès calcaires « authentiques » relevés sur les façades de la Porte de Mars (exprimées en m<sup>2</sup>).

restituer l'intégrité structurelle des façades est, nord et en partie ouest de l'édifice. Pour cela, ils ont utilisé préférentiellement des blocs de grand appareil afin de remplacer les éléments absents et ont réemployé les éléments de grand appareil retrouvés au pied de celui-ci (Brunet-Gaston *et al.* 2020). Les matériaux utilisés au cours des travaux consécutifs à la Première Guerre Mondiale n'ont pas été intégrés dans la quantification suivante, car ces derniers ont fait appel à des matériaux de nature et de taille très hétérogènes et généralement pour des réparations très superficielles.

La construction originelle et les blocs de reconstruction de la pile ouest (Brunette 1845) sont aisément identifiables dans cette représentation. Les blocs authentiques représentent la totalité des blocs à partir d'une surface visible de 1,35 m<sup>2</sup>, tandis qu'en fonction de leurs altérations ou de leur recouvrement par d'autres maçonneries, leurs surfaces visibles peuvent considérablement diminuer. Les restaurations de Serrurier au début du XIX<sup>e</sup> siècle ont consisté en des remplacements ponctuels et des reconstructions en moellons apparaissent de manière d'autant plus diffuse qu'elles n'ont eu qu'une emprise très limitée. Inversement les travaux

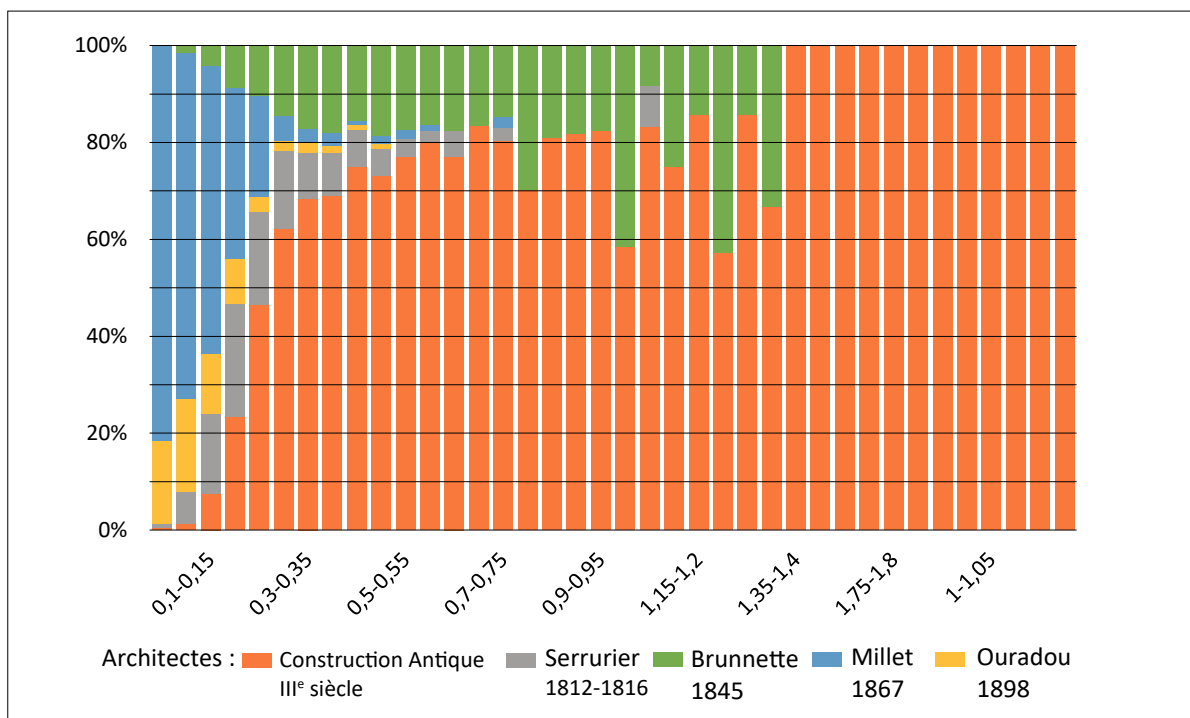


Figure III-62. Distribution des surfaces des éléments de construction en fonction du phasage des travaux réalisés sur le monument

réalisés sous la direction de Millet (façade méridionale) sont très perceptibles en raison de leurs modalités d'assemblages très spécifiques en moellons contrastant fortement avec la nature de l'assemblage original. Et enfin les réalisations dirigées par Ouradou qui ont privilégié l'utilisation de petits moellons et qui ont donc une distribution très proche des matériaux de la restauration précédente. Cependant ils sont aisément identifiables grâce à leur nature. Ouradou n'a en effet utilisé que des moellons d'Oolithe vacuolaire de petite dimension et des éléments de pierres meulières pour restituer la dernière assise de la façade.

### 3.3. Le constat des altérations et répartition spatiale

Les variations d'aspect et de couleur de la pierre en œuvre à la suite de son exposition à l'environnement et à ses contraintes sont qualifiées d'altérations ou encore de dégradations (Lozano 2012). Dès son extraction de la carrière, l'équilibre de la roche avec son milieu est rompu pour devenir métastable (Aires-Barros 2000; Beck 2006). Depuis l'édification du monument, ses composants sont exposés aux éléments et à divers facteurs qui concourent tous à la dégradation des pierres. Elle est soumise à des modifications permanentes des conditions environnementales dont l'amplitude des variations peut les rendre extrêmement agressives (Beck 2006). La nature et l'intensité de ces altérations sont fortement conditionnées par la position architectonique des pierres, les conditions climatiques, le temps d'exposition à l'environnement et par la nature des pierres utilisées (Janvier-Badosa 2012 ; Janvier-Badosa *et al.* 2015).

D'après le Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre de l'ICOMOS (Anson-Cartwright *et al.* 2008), l'altération se définit comme une « modification du matériau n'impliquant pas nécessairement une dégradation de ses caractéristiques du point de vue de sa conservation ». La dégradation est quant à elle définie comme tous processus impliquant une « *modification chimique ou physique des propriétés intrinsèques de la pierre, conduisant à une perte de valeur, de qualité ou à une entrave à son utilisation* ». Les références aux altérations ou aux dégradations des pierres en œuvre, utilisées dans cette étude, se réfèrent toutes à la classification établie par l'ICOMOS et précisée dans le glossaire s'y rapportant (Anson-Cartwright *et al.* 2008) ; Figure III-63). Celle-ci identifie cinq catégories principales de figures d'altérations :

- Les fissures et déformations ;
- Les détachements ;
- Les figures induites par une perte de matière ;
- Les altérations chromatiques et les dépôts ;
- Les colonisations biologiques ;

La sémiologie graphique de cette classification des altérations de la pierre (Figure III-63) a été reprise dans les cartes thématiques afin de faciliter la lecture croisée des deux documents.

Sur les façades de la Porte de Mars, toutes ces catégories de dégradations de la pierre sont visibles. Elles ont fait l'objet d'un relevé et d'une cartographie *in situ*. Cette approche a été réalisée en s'appuyant sur les terminologies des formes de l'altération des pierres en œuvre selon le Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre l'ICOMOS (Anson-Cartwright *et al.* 2008). Ces différentes formes de dégradation de la pierre sont recensées dans le tableau suivant (Figure III-63).






GENERAL TERMS . TERMES GÉNÉRAUX				
ALTERATION . ALTÉRATION DAMAGE . DÉGRADATION DECAY . DÉGRADATION DEGRADATION . DÉGRADATION DETERIORATION . DÉGRADATION WEATHERING . ALTÉRATION MÉTÉORIQUE				
				
<b>CRACK &amp; DEFORMATION FISSURE &amp; DÉFORMATION</b>	<b>DETACHMENT DÉTACHEMENT</b>	<b>FEATURES INDUCED BY MATERIAL LOSS FIGURES INDUITES PAR UNE PERTE DE MATIÈRE</b>	<b>DISCOLORATION &amp; DEPOSIT ALTÉRATION CHROMATIQUE ET DÉPÔT</b>	<b>BIOLOGICAL COLONIZATION COLONISATION BIOLOGIQUE</b>
CRACK . FISSURE Fracture . Fracture Star crack . Fissuration en étoile Hair crack . Microfissure Craquele . Craquellement Splitting . Clivage DEFORMATION . DÉFORMATION	BLISTERING . BOURSOUFLURE BURSTING . ECLATEMENT DELAMINATION . DÉLITAGE Exfoliation . Exfoliation DISINTEGRATION . DÉSAGRÉGATION Crumbling . Emiettement Granular disintegration Désagrégation granulaire Powdering . Chalking . Pulvéulence, Farinage Sanding . Désagrégation sableuse Sugaring . Désagrégation saccharoïde FRAGMENTATION . FRAGMENTATION Splintering . Fragmentation en esquilles Chipping . Epaufrure PEELING . PELAGE SCALING . DESQUAMATION Flaking . Ecaillage Contour scaling . Desquamation en plaque	ALVEOLIZATION . ALVÉOLISATION Coving . Creusement EROSION . ÉROSION Differential erosion . Erosion différentielle Loss . Perte : of components . de constituants of matrix . de matrice Rounding . Erosion en boule Roughening . Augmentation de rugosité MECHANICAL DAMAGE . DÉGÂT MÉCANIQUE Impact damage . Trace d'impact Cut . Incision Scratch . Rayure Abrasion . Abrasion Keying . Bûchage MICROKARST . MICROKARST MISSING PART . PARTIE MANQUANTE Gap . Trou PERFORATION . PERFORATION PITTING . PITTING	CRUST . CROÛTE Black crust . Croûte noire Salt crust . Croûte saline DEPOSIT . DÉPÔT DISCOLOURATION . ALTÉRATION CHROMATIQUE Colouration . Coloration Bleaching . Décoloration Moist area . Assombrissement dû à l'humidité Staining . Tache EFFLORESCENCE . EFFLORESCENCE ENCRUSTATION . ENCROÛTEMENT Concretion . Concrétion FILM . FILM GLOSSY ASPECT . ASPECT LUISANT GRAFFITI . GRAFFITI PATINA . PATINE Iron rich patina . Patine ferrugineuse Oxalate patina . Patine d'oxalates SOILING . ENCRASSEMENT SUBFLORESCENCE . SUBFLORESCENCE	BIOLOGICAL COLONIZATION . COLONISATION BIOLOGIQUE ALGA . ALGUE LICHEN . LICHEN MOSS . MOUSSE MOULD . MOISSURE PLANT . PLANTE

Figure III-63. Classification des formes de l'altération des pierres en œuvre selon Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre (Anson-Cartwright *et al.* 2008)

### 3.3.1. Les fissures et déformations

À ce jour quelques déformations sont visibles sur la Porte de Mars, en particulier sur la pile est où la façade nord semble s'écarter de l'axe de l'édifice (Annexe 27). Il en résulte un aspect fléchi des colonnes de cette façade. Faute de documentation ancienne géométriquement fiable, il n'est cependant pas possible de déterminer si cette déformation est récente ou ancienne, voire issue d'un vice de construction.

De nombreuses fissures et fractures sont visibles sur les façades (Figure III-64). Il s'agit d'après Anson-Cartwright *et al.* (2008) de « de plans de ruptures vus en coupe qui résulte de la séparation de la pierre en deux parties ». Lorsque la fissure devient traversante et individualise deux parties d'un même bloc, il faudra alors la qualifier de fracture.

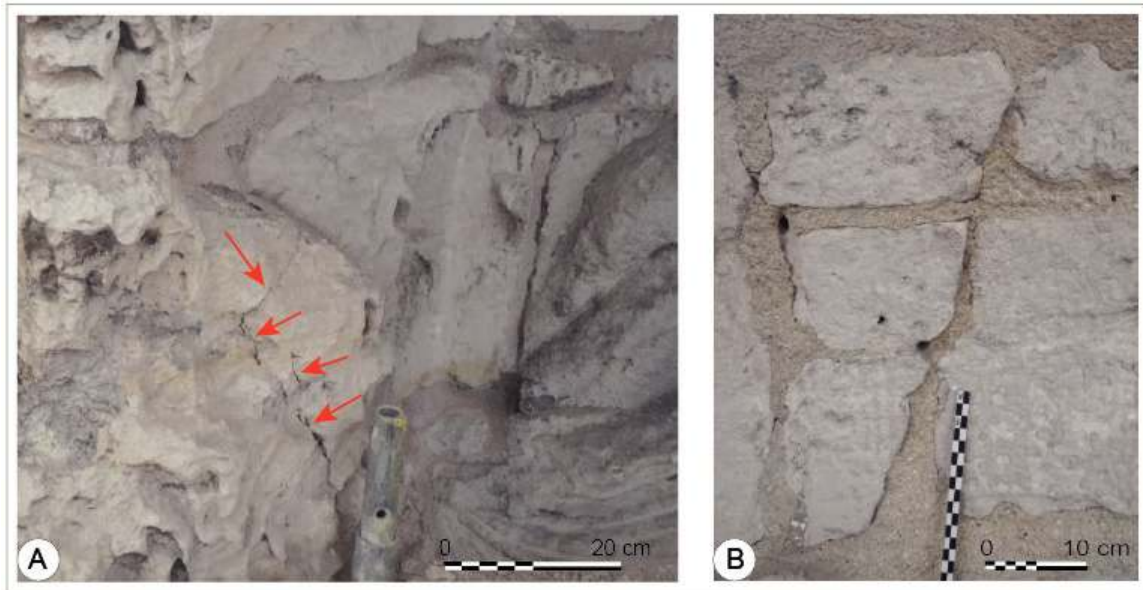


Figure III-64. Exemples de fissures et fractures visibles dans les parties hautes de l'édifice, la fracture a fait l'objet d'un rebouchage récent au mortier

### 3. Les détachements

Les altérations des pierres incluses dans la catégorie des détachements sont assez nombreuses et peuvent prendre différentes formes. Les détachements sous forme particulières (désagrégation) s'expriment par une perte de cohérence des matériaux. Les desquamations consistent en un « détachement d'écailles de pierre individuelles ou en paquets indépendamment de toute structure orientée préexistante » pour lesquelles l'épaisseur mise en jeu peut être variable de quelques millimètres à plusieurs centimètres (Anson-Cartwright *et al.* 2008). Il peut également s'agir de figures liées à l'érosion des matériaux avec des dissolutions pour les calcaires ou des phénomènes d'alvéolisation.

**Les désagrégations :** Il s'agit d'une perte de cohésion de la roche dans le cadre de laquelle ce sont les grains de la roche (ou de petits agrégats) qui se désolidarisent progressivement et se détachent de la surface du bloc. Elle commence par affecter la surface de la pierre et la creuse progressivement (Anson-Cartwright *et al.* 2008). Au sein de cette famille d'altérations, on trouvera aussi bien des désagrégations sableuses que des alvéolisations.

**Les desquamations** (Figure III-65, Figure III-66 et Annexe 28) : Comme le nom de cette catégorie d'altération l'indique, il s'agit d'un détachement de la partie superficielle, épidermique, des pierres. Des écailles se détachent progressivement de la pierre, sans respect pour les litages ou stratifications préexistantes, mais toujours parallèlement aux surfaces des murs (Beck 2006 ; Anson-Cartwright *et al.* 2008). Ces desquamations sont plus ou moins développées selon l'emplacement et la nature faciologiques des pierres qui en sont affectées. Elles ont été attribuées à la cristallisation de sels dans la pierre (subfloreescence) et seraient principalement contrôlées par les mécanismes d'évaporation propres à la roche (Thomachot 2002). Il peut également résulter de l'action d'évènement climatique à l'image de période de gels intense ou d'alternances de cycles d'imbibition/séchages (Thomachot 2002 ; Smith *et al.* 2003).



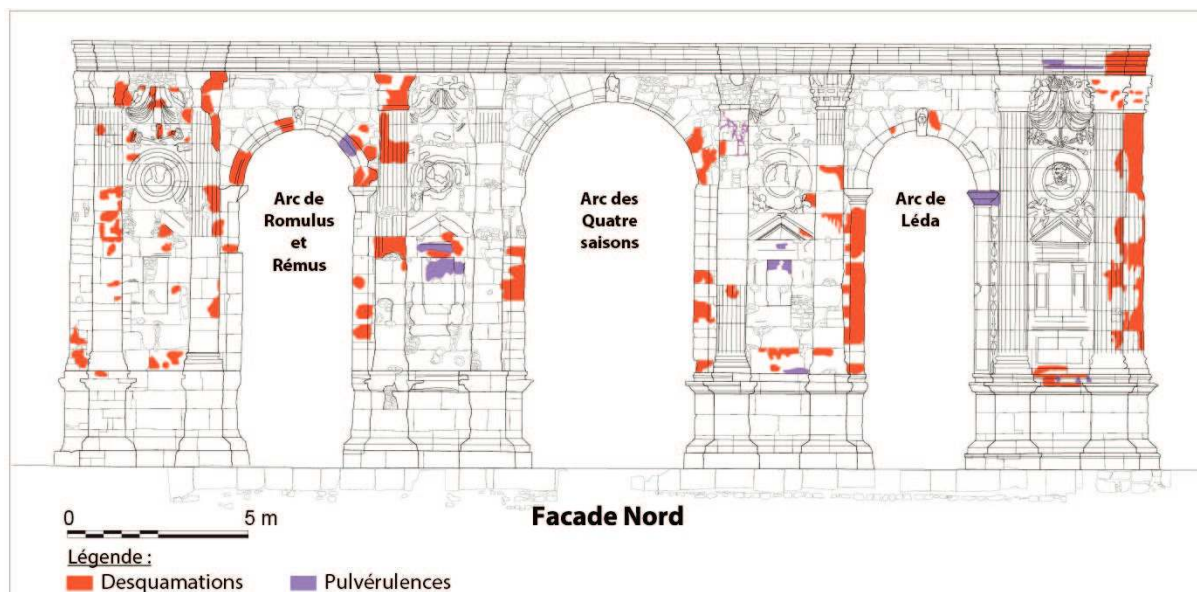


Figure III-65. Cartographie des détachements de matières sur la façade Nord de la Porte de Mars



Figure III-66. Exemples de détachements de matières : A. : Désagrégation granulaire et B. : Desquamation en plaques

**Les dissolutions, alvéolisations et érosions différentielles :** Ces altérations se réfèrent toutes à une perte progressive de matière au niveau des surfaces des pierres. Les dissolutions sont la conséquence de la mise en solution de la calcite de la pierre sous l'action des précipitations météoriques (Anson-Cartwright *et al.* 2008). L'acidification des eaux météoriques constitue un facteur aggravant pour ces altérations. La mise en solution de polluants atmosphériques

Mais l'action des eaux de pluie sur la roche peut également entraîner une action physique. Ainsi, le ruissellement de l'eau à la surface des pierres peut entraîner une érosion progressive des surfaces, à plus forte raison si celles-ci sont fortement poreuses (Eyssautier-Chuine *et al.* 2016).

Le phénomène d'alvéolisation se développe au sein des roches hétérogènes (comme les calcaires ou les grès) à stratifications entrecroisées. Il s'agit d'un phénomène d'érosion différentielle mettant en jeu des parties fortement érodées séparées les unes des autres par des zones peu érodées. Bien souvent, ces alvéoles se forment préférentiellement le long des figures

de sédimentation enregistrées dans la pierre. La perte de matière causée par le dessertissage des grains est contrôlée par l'exposition de la surface de la pierre, mais également par ses paramètres intrinsèques (et en particulier ses propriétés physiques). Suivant le même type de processus, l'**érosion différentielle** de la matrice friable d'une roche va provoquer la disparition de la surface façonnée de la pierre de taille et la mise en saillie des fossiles qu'elle contient. Ces derniers, fréquemment plus résistants et pour les macrofossiles, de nature moins granulaire apparaîtront préservés par rapport aux autres constituant de la pierre dont la surface recule progressivement.

### 3.3.2. Les figures induites par des pertes de matière

**Les pertes de matières** sont d'après Anson-Cartwright *et al.* (2008) comme des formes d'altération superficielles. Celles qui ont été observées sur les façades de la Porte de Mars sont majoritairement d'origine anthropique et mécanique (graffitis, traces martèlement ou creusements de cavités, impacts de projectiles... ; Figure III-68, Figure III-69 et Annexe 30).



Figure III-67. A. Exemple de dissolution des calcaires pour des éléments architecturaux exposés aux intempéries ; B. Exemple d'alvéolisation de calcaires lités; C. Exemple d'érosion de la matrice mettant en relief les éléments figurés du calcaire

Essentiellement dommageable à l'esthétique du monument, le martèlement des bas-reliefs, en particulier à l'intérieur des baies, a pour conséquence supplémentaire à l'ablation des sculptures de créer une forte rugosité à la surface de la pierre qui semble propice à son encrassement et au noircissement des surfaces. Les cavités creusées dans les blocs de grand appareil à fins de récupérer le fer des agrafes et le plomb de leurs scellements ont eu le même effet sur les façades extérieures du monument. Elles sont déjà visibles sur les clichés du XIX<sup>e</sup>

siècle et sont donc supposées anciennes, cependant il est impossible de les dater précisément (Annexe 30 et Annexe 29).

Les graffitis sont incisés assez profondément dans la pierre. Ils peuvent être assez anciens lorsqu'ils sont localisés dans les parties hautes de la porte (juste sous les corniches d'impostes des Arcs), celui de droite difficilement lisible porte la date de 1776. Les accès aux élévations étant devenus rares depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les rares graffiti récents sont concentrés dans les parties basses de l'édifice (Figure III-68 A et B).

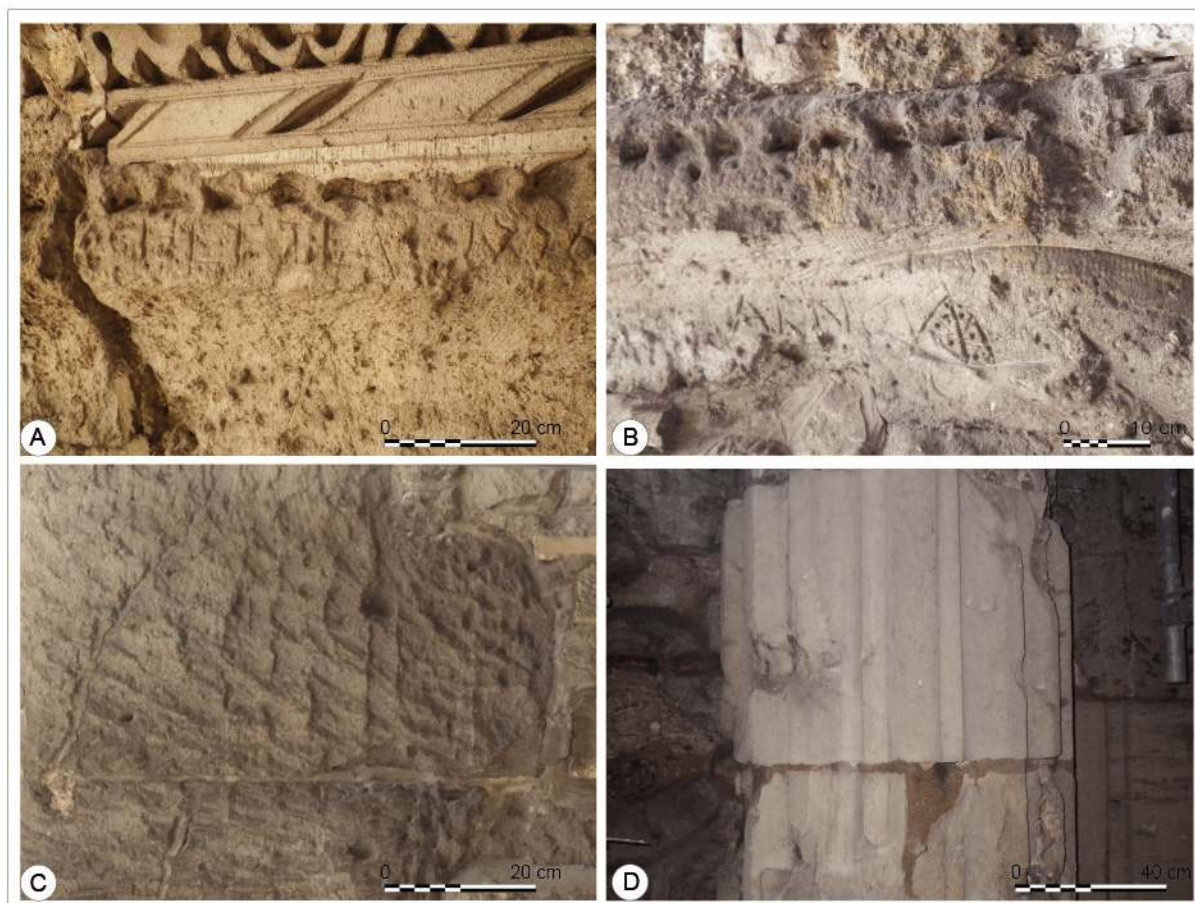


Figure III-68. Exemples de dégradation mécanique d'origine anthropique A. et B exemples de graffitis situés dans les parties hautes de l'Arc ; C. : traces de bûchage des bas-reliefs à l'intérieur des baies ; D. : Traces d'impacts de projectiles sur un tambour de colonne remplacé au XIX<sup>e</sup> siècle.

Ces dégradations de la pierre sont principalement la conséquence d'actions anthropiques et ne sont donc pas directement liées avec une cause environnementale. Cependant l'omniprésence sur les façades de ces dégradations a parfois conduit à des restaurations pour le moins inesthétiques si ce n'est maladroites. Il s'agit là de certaines réparations de l'entre-deux-guerres où, s'il ne faut n'en citer qu'une, la réparation a été réalisée par l'inclusion de pierres meulières liées au ciment au milieu d'un tambour de colonne.

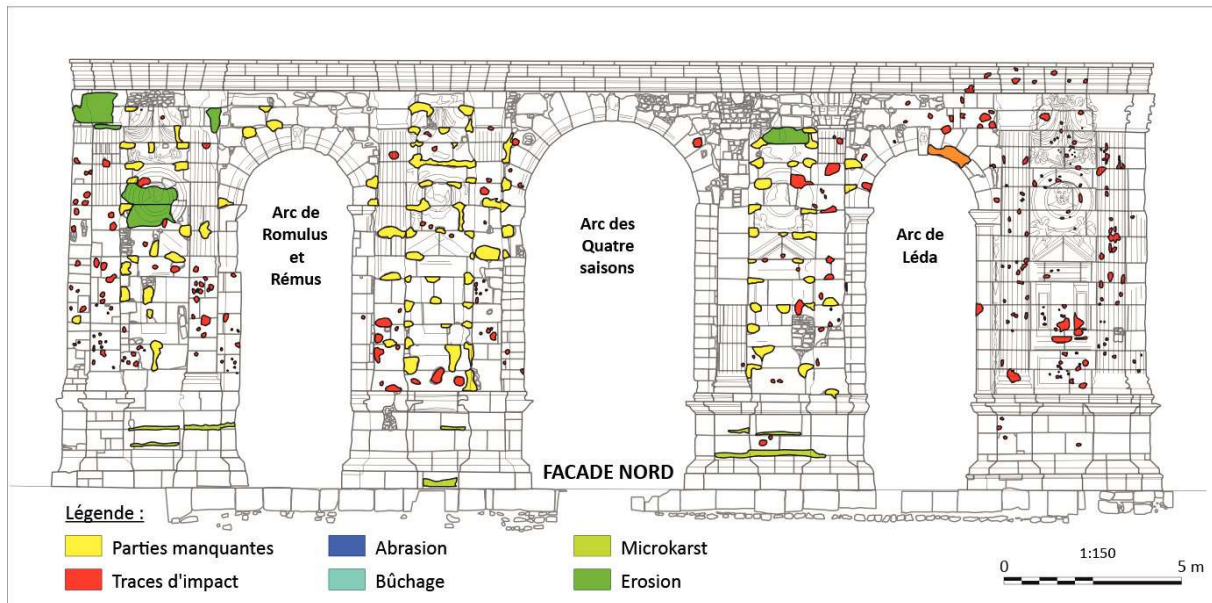


Figure III-69. Cartographie des pertes de matières essentiellement dues à des impacts de munitions et au creusement de cavités de prédations des agrafes métalliques sur la façade Nord de la Porte de Mars

### 3.3.3. Les altérations chromatiques et dépôts

Cette catégorie d'altération est elle aussi très vaste, sur les façades de la Porte de Mars elles sont cependant limitées à quelques catégories comme les traces de rubéfaction, les croûtes noires, les encrassements et dépôts de matières (Figure III-70, Figure III-71, Figure III-73 et Annexe 31).

**Les traces de rubéfaction** se caractérisent par la présence d'une coloration noire et/ou rouge des pierres depuis la surface vers la profondeur. Cette coloration peut s'accompagner lorsque l'exposition est intense par une désagrégation de la roche comme l'illustre la figure suivante (Figure III-70). Ces traces, d'origine anthropique, sont la conséquence de l'exposition des pierres à de fortes températures comme cela peut s'observer dans le cas d'un foyer ou encore lors de l'exposition à de hautes températures, comme cela pourrait être le cas lors d'explosions d'engins pyrotechniques. Bien que très visible, la rubéfaction n'est que l'un des effets de l'exposition des pierres au feu, les dommages sur le matériau peuvent également se manifester par une modification physico-chimique de la matrice, par une perte de ses qualités mécaniques, des fracturations (dites en pelures d'oignon) et à sa désagrégation sur le long terme (Gomez-Heras *et al.* 2009).

Au cours de son histoire, le bâtiment a été exposé à au moins un incendie (destruction par le feu du château des Archevêques), mais aussi aux engins explosifs que se sont adressés les belligérants de deux conflits mondiaux.



Figure III-70. Traces de rubéfiations, rougissements des surfaces et désagréations de la pierre en lien avec une exposition à de hautes températures

**Les Croûtes noires** sont des altérations très communes sur les pierres de façade des monuments et spécifiquement ceux situés en milieu urbain. Elles se développent sur tous les types de pierre dans les parties humides, mais abritées des lessivages. Cette dernière particularité explique également le fait que les façades touchées par les pluies ne sont pas affectées par ce type de formation. Elles se développent grâce à l'accumulation des produits de l'évaporation des solutions circulant à travers les pierres favorisant de fait leur accumulation et la cristallisation des solutés. Les observations menées sur quelques prélèvements réalisés dans ces croûtes ont montré la présence de cristaux de sulfates (dont du gypse) associé à des sphérules siliceuses.

Leur présence est donc repérée sous les corniches et surplombs, dans les zones protégées des sculptures ou encore la figure précédente (Figure III-71) illustre ce développement de croûtes noires sur les façades de la Porte de Mars (et en particulier dans les soubassements). L'observation au microscope électronique à balayage obtenu à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de paillasse Hitachi TM-1000 Table Top d'échantillons issus de ces croûtes ont confirmé le développement de microcristaux de sulfates dont la croissance piège et cimente les suies et poussières atmosphériques (Figure III-72 et Annexe 29 ; Fronteau 2000). Les pierres affectées par leur développement finissent en dernier lieu, après le décollement de la croûte, par se desquamer. La géométrie assez complexe des façades de la Porte de Mars n'autorise cependant pas le développement de ces croûtes noires sur de grandes surfaces. L'aspect noirci est la conséquence de leur développement dans un environnement intra-urbain présentant des signes de pollution notamment avec des poussières et des suies atmosphériques (Beck 2006).

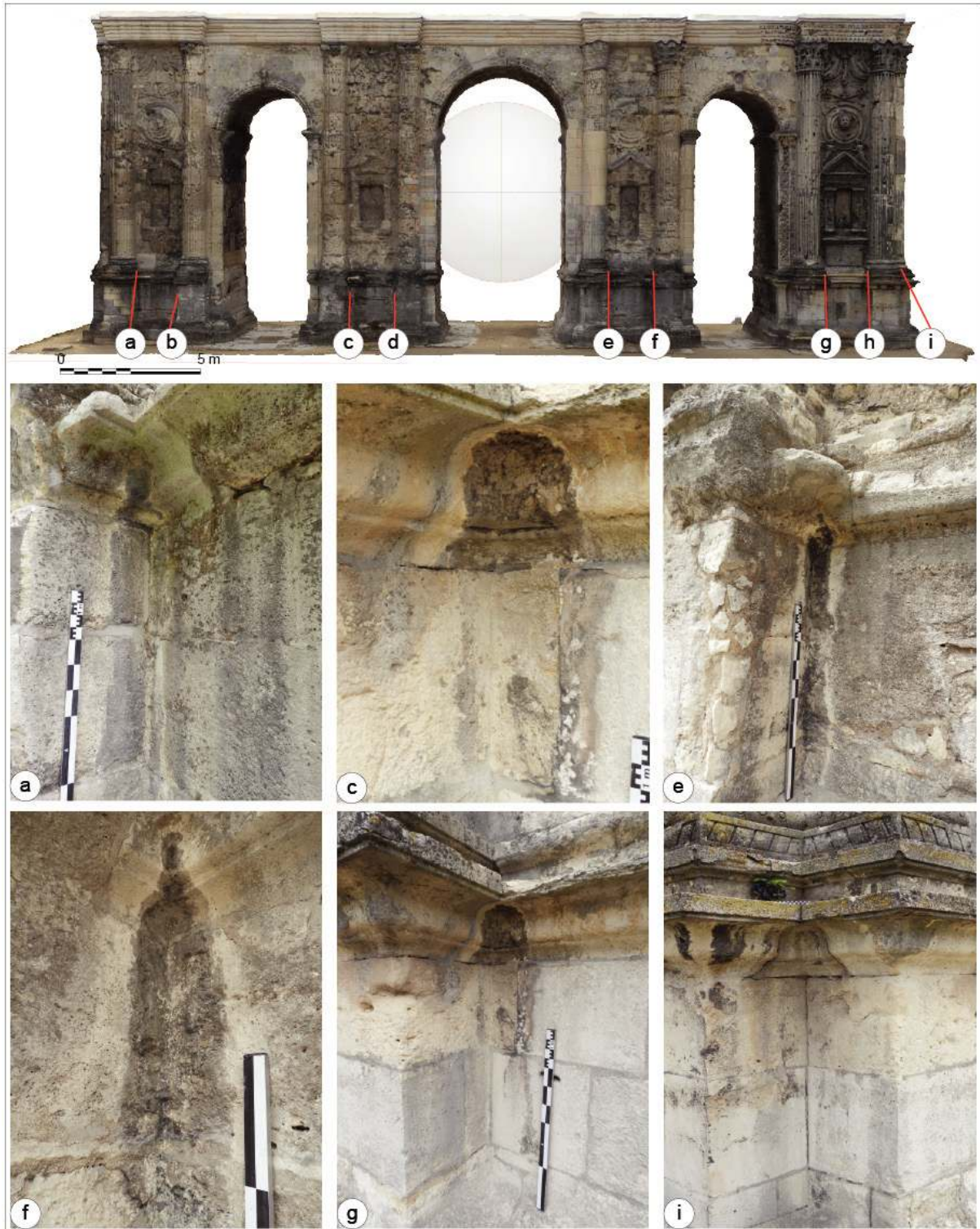


Figure III-71. Aperçu et localisation d'exemples de croûtes noires développées sur les façades de la Porte de Mars

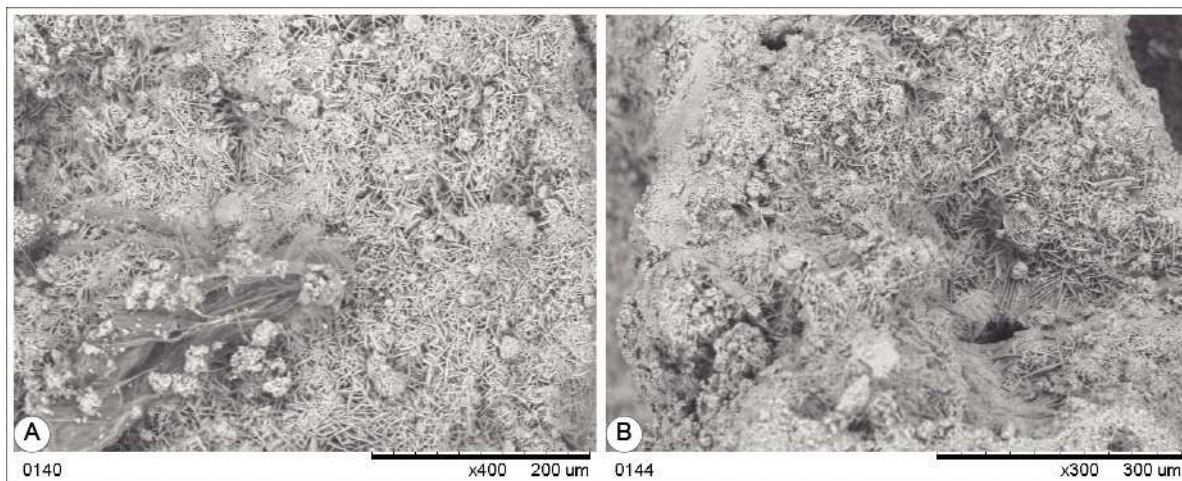


Figure III-72. Observations au Microscope Électronique à Balayage (MEB) de deux prélèvements de croûtes noires affectées de nombreuses cristallisations de sulfates dans leur habitus caractéristique en fer de lance (A et B) et la présence de sphérules de silice (B).

**Les encrassements et les dépôts divers :** Les encrassements sont la conséquence du dépôt de particules et de suies atmosphériques dont l'origine est essentiellement issue de l'activité humaine. En effet, la pollution atmosphérique particulaire constitue fréquemment le moteur à l'origine de ces dépôts. Cette modification de la couleur de surface. Sur les parois du monument, ces accumulations sont étendues, mais surtout localisées dans les parties abritées du monument (façades des baies et voûtes ; Figure III-73). Elles ont également un effet sur le comportement thermique de la roche en modifiant l'albédo et la conductivité thermique des pierres (Warke *et al.* 1996 ; Gómez-Heras *et al.* 2006).

Enfin, en divers lieux du monument, ont été constatées des accumulations de matières cireuses et translucides. Cette matière se concentre principalement sur les parties planes en surplomb par rapport à la façade du monument et préférentiellement sur les façades de la pile ouest du monument. L'identification de cette dernière n'a pu être faite qu'en consultant la documentation fournie par la ville et en particulier celle issue du cabinet d'architecture en charge de la restauration du monument (Eugene Architectes du Patrimoine 2018). Il s'agissait des traces laissées par les répulsifs utilisés pour la dissuasion vis-à-vis des oiseaux. Ces répulsifs semblent globalement assez inefficaces puisque des accumulations de fientes ont également été constatées sur les parties supérieures en saillie des sculptures de cette pile.

**Les inflorescences et efflorescences :** L'apparition et le développement d'encroûtements de sels se manifestent en général lorsque les fondations des bâtiments ne sont pas, ou mal, isolées de l'humidité du sol. L'apparition de ces cristallisations est la conséquence directe de l'évaporation des eaux chargées en sels. Les cristaux se développent à l'endroit où l'évaporation de ces fluides a lieu. En surface de la pierre, elles peuvent adopter plusieurs morphologies en fonction de la nature de la pierre et des sels concernés (efflorescences, pulvérulences, croûtes...). Lorsqu'elles se développent à l'intérieur de la pierre, ce sont des inflorescences ou subflorescences. Dans ce dernier cas, les importantes pressions de cristallisation des sels peuvent provoquer d'importantes altérations avec la fissuration des pierres et des desquamations en écailles ou en plaque (Hammecker 1993). Ces cristallisations sont de nature très diversifiées avec entre autres la présence de sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), de nitrates<sup>82</sup> ( $\text{NO}_3^-$ ) de carbonates ( $\text{CO}_3^-$ ) ou encore de chlorure ( $\text{Cl}^-$  ; Perrier 2004).

82 Comme le salpêtre  $\text{KNO}_3$



Figure III-73. Exemples d'encrassements des parois du bâtiment. A. : dépôts de particules noires sur toutes les surfaces protégées des intempéries ; B. Encrassement des voûtes mis en avant par contraste avec une petite zone ayant fait l'objet d'un test de nettoyage des surfaces.

#### 3.3.4. Les colonisations biologiques

La présence d'organismes autotrophes sur les pierres en œuvre est très commune et cause des désordres de différente nature (Warscheid et Braams 2000). Cependant, elles ne sont pas nécessairement synonymes d'une dégradation pour les pierres, mais elles constituent *a minima* une altération d'ordre esthétique (Ortega-Calvo *et al.* 1991 ; Ortega-Calvo *et al.* 1995). Grâce à l'action de préparation mécanique et chimique par les colonies biologiques du substrat, ce dernier va donc progressivement se dégrader et devenir favorable à l'implantation d'autres organismes (champignons...). La biodétérioration des surfaces apparaît comme un phénomène complexe, d'autant plus intense lorsqu'il est couplé avec les autres mécanismes de dégradation (Griffin *et al.* 1991). Ainsi, l'intrication des différents phénomènes d'altérations rend complexe l'attribution de l'un d'entre eux à une cause unique et particulière. Il est également nécessaire d'ajouter que des propriétés intrinsèques de la pierre (porosités, capacités de rétention en eau ou encore cinétique d'évaporation) peuvent favoriser la croissance des thallophytes<sup>83</sup>. Les pierres concernées seront donc qualifiées de bioréceptives (Guillitte 1995). La typologie des dégradations est donc intimement liée du type d'organisme envisagé. Ces derniers peuvent être des thallophytes (algues, champignons, mousses et lichens) ou encore des végétaux supérieurs (Figure III-74 A).

83 D'après le dictionnaire de géologie (Foucault et Raoult 1995), les thallophytes sont les « végétaux les plus simples » formés d'une ou plusieurs cellules formant un thalle. Elles ne possèdent ni tige, ni racines, ni feuilles, ni fleurs. On y distingue les bactéries, les phytoflagellés, les algues, les champignons les lichens et les charophytes.



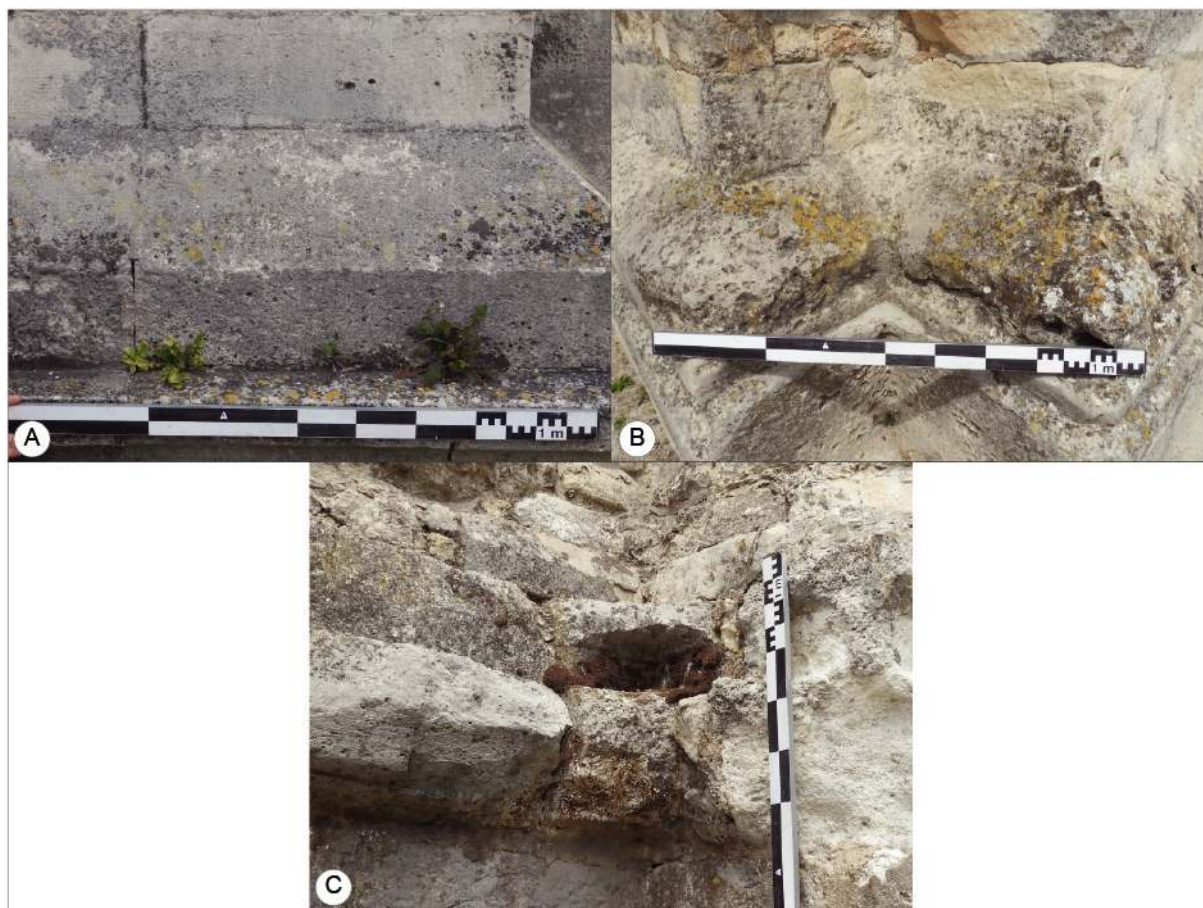


Figure III-74. Colonisations biologiques A : enracinement dans les joints de maçonnerie de végétaux supérieurs ; B et C colonisation des surfaces par des lichens et des mousses sur des plans inclinés ou des surfaces planes

L'installation et le développement de la plupart des thallophytes sur des parois ne nécessitent que la présence de lumière et d'humidité (Figure III-74 B et C). Les algues se retrouvent sur les parois exposées aux intempéries ou le long d'écoulements ne donnant pas lieu à des ravinements des surfaces. Elles causent surtout des désagréments d'ordre esthétique en provoquant la coloration des surfaces sur lesquelles elles croissent.

Les champignons causent une dégradation mécanique et chimique du support, mais nécessitent la présence préalable de matières organiques à la surface des pierres en raison de leur hétérotrophie. En revanche, pour les lichens, symbiose entre algues et cyanobactéries, la dégradation causée à leur substrat est double. D'une part la croissance des hyphes dans la matrice minérale induit une dégradation mécanique et d'autre part ils sécrètent des acides organiques qui attaquent les carbonates sur lesquels ils se développent. La présence de ces organismes entraînera également d'importantes variations d'humidités à la surface des pierres. Pour les bryophytes (mousses), les dégradations seront du même type que pour les lichens (Figure III-74 B et C).

Les bryophytes comme pour les végétaux supérieurs, les actions sur le substrat seront légèrement différentes. Cependant, l'installation de mousses est susceptible de préparer une surface pour l'implantation des végétaux supérieurs. Si ces derniers s'installent et se développent dans des joints, leurs systèmes racinaires peuvent les élargir mécaniquement contribuant ainsi à la déstabilisation des maçonneries. La production d'acides organiques

par les racines des végétaux supérieurs induit également des altérations chimiques qui, pour Griffin *et al.* (1991), sont bien moins importantes que celles causées par les autotrophes moins complexes.

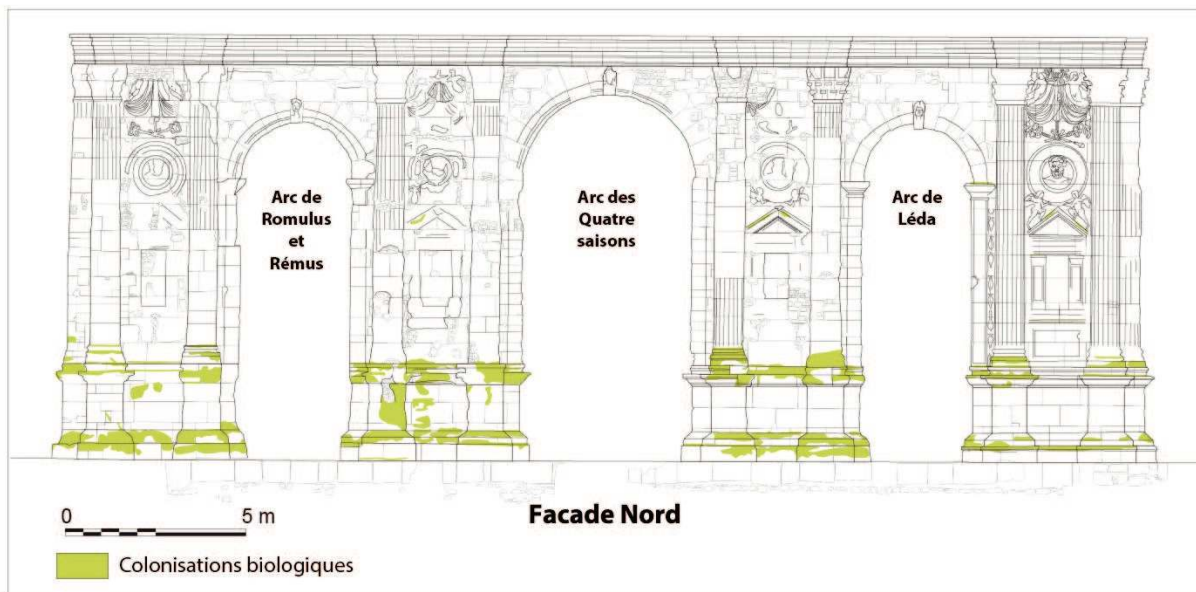


Figure III-75. Cartographie des colonisations biologiques de la façade nord de la Porte de Mars

La cartographie des colonisations végétales sur l'édifice (Figure III-75 et Annexe 33) montre qu'elles sont principalement concentrées sur les parties inférieures (socles) de la façade nord. Elles affectent en particulier les parties planes ou en légère pente. Les façades de la porte sont régulièrement débarrassées des végétaux supérieurs qui s'y implantent. Cependant, les autres colonisations biologiques ne sont pas traitées régulièrement (à l'exception peut-être des bryophytes accessibles directement depuis le niveau du sol. Leur présence contribue également au maintien d'une humidité élevée à la surface des pierres qui peut jouer un rôle de tampon lors des variations de température (Carter et Viles 2003).

### 3.3.5. La distribution spatiale des altérations

Deux grands types d'altérations ont été cartographiées sur les façades du monument. Il s'agit d'une part, de dégradations d'origine anthropique. Les causes de ces altérations sont toutes liées à l'activité humaine. Les traces de bûchage des surfaces ou les traces liées aux impacts de munitions en sont les exemples les plus frappants (et les plus développés en surface). Et d'autre part les dégradations liées à des causes environnementales. Il s'agit par exemple des dépôts de particules et de suies en suspension dans l'atmosphère ou encore de l'action sur la pierre de l'eau (issue des précipitations, des infiltrations depuis la couverture...).

Une grande partie des altérations relevées sur le monument peuvent être reliées à des moteurs d'origines diverses (variations thermiques, présence d'humidité, ruissellements...). Abstraction faite des altérations d'origine anthropiques (bûchage, abrasion, graffitis...), un grand nombre d'entre elles peuvent être reliées à la présence d'eau soit en surface des pierres soit dans le milieu poral des pierres. L'eau peut agir soit directement (agent de la dissolution des carbonates, gel...) soit de manière indirecte en tant qu'agent de transfert de sels en solution. Les effets de l'eau des précipitations seront variables selon l'exposition de la pierre (architecture, inclinaison de la surface, direction des vents). Les altérations des pierres directement imputables à ce facteur sont les colonisations biologiques, les dissolutions (microkarst), mais aussi au cours des pluies battantes (Eyssautier-Chuine *et al.* 2016), les croûtes noires et enfin les desquamations et les pulvérulences. L'exposition aux pluies peut également intervenir dans les altérations par les sels en provoquant des successions de cycles d'imbibition/séchages qui contribuent à alimenter des cycles de dissolution/recristallisation qui contribuent à fragiliser les pierres (Lubelli *et al.* 2018 ; Huby *et al.* 2020 ; Huby 2021).

			Colonisations biologiques	Croûtes noires	Desquamations	Pulvérulence
<b>Entablement</b>				1,4	1,4	1,0
<b>Elevations</b>	<b>Voûtes</b>	<b>Clé de voutes</b>			0,3	
		<b>Voussoirs</b>		3,2	8,9	<b>13,5</b>
	<b>Colonnes et piédroits</b>	<b>Archivolte</b>	0,3	2,6	4,7	0,1
		<b>Piédroits</b>	<b>14,4</b>	4,4	<b>18,9</b>	9,7
		<b>Impostes</b>	0,2	0,1	6,1	
		<b>Chapiteaux</b>	1,9	0,1	9,4	
		<b>Tambours</b>	3,6	1,5	<b>39,6</b>	2,2
		<b>Bases</b>	<b>19,0</b>	0,6	5,3	0,9
		<b>Socle</b>	<b>Couronnement</b>	2,5	2,4	0,2
<b>Corps</b>	<b>80,5</b>		<b>51,8</b>	<b>2,1</b>	1,0	
<b>Crépis</b>	<b>21,1</b>		<b>13,5</b>	0,4	0,1	

Tableau III-12. Synthèse des surfaces affectées par des dégradations non anthropiques (en m<sup>2</sup>)

La présence et le développement de ces dégradations sur les façades de l'Arc antique montrent que, de manière générale, la pierre est d'autant plus dégradée qu'elle appartient aux parties anciennes du monument et aux parties exposées aux intempéries ainsi qu'à l'humidité (Tableau III-12, Figure III-76 et Figure III-77). La localisation de ces altérations est bien illustrée par la répartition des colonisations biologiques qui connaissent un développement particulièrement important sur les parties en saillie et sur les replats surtout au niveau du socle avec une nette prédilection pour les façades exposées au nord et à l'est. La distribution spatiale est donc influencée nettement par leur position architecturale et par l'orientation des façades qui détermine l'exposition aux facteurs de dégradation. La typologie des pierres concernées apparaît également comme un facteur favorisant le développement d'altérations, en particulier celles qui possèdent les porosités apparentes les plus développées. Cette dernière constatation est surtout liée au développement d'érosions différentielles qui ont entraîné

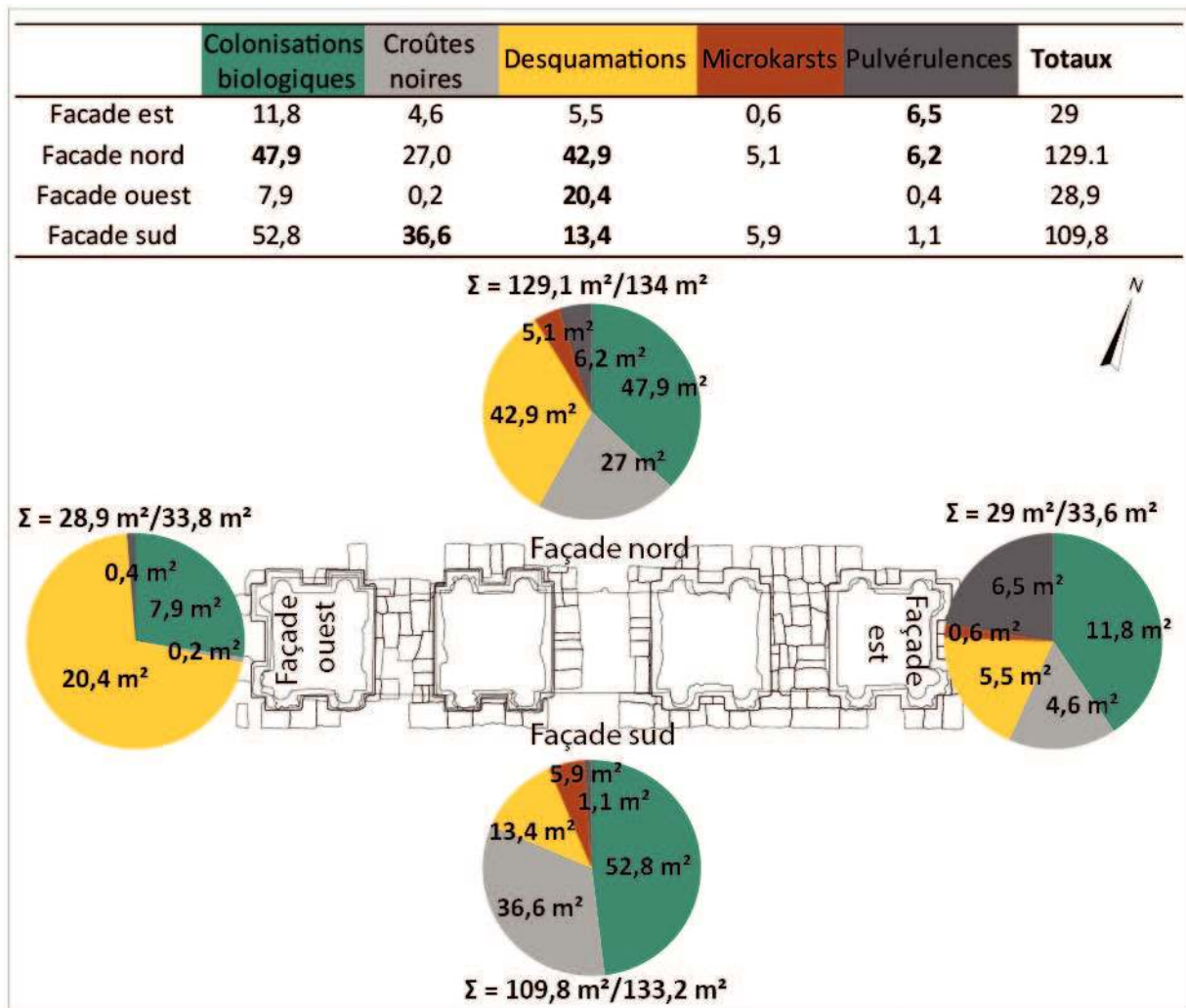


Figure III-76. Évaluation des surfaces altérées catégorisées par types d'altérations et par façades

des pertes de matrices qui sont spécifiques à certains faciès, mais aussi au développement de desquamations en particulier sur les façades de la pile ouest. Pour les matériaux de la pile ouest, l'exposition de la façade aux pluies battantes apparaît comme un argument fort pour expliquer la présence d'importantes surfaces desquamées et pulvérulentes bien que les matériaux ne soient en place que depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

Nombre d'éléments utilisés au cours des restaurations du monument sont issus de stocks de récupération trouvés *in situ* (Millet et Brunette) ou encore de commandes spécifiques passées directement auprès de carriers (Brunette, Ouradou et Serrurier). Pour les éléments de récupération, il faut souligner qu'il s'agit de l'exploitation de plusieurs stocks différents : des blocs antiques exhumés au pied du monument et remontés, des moellons de récupération bien mis en forme et des pierres de récupération informes. Ces parties restituées en moellons de récupération (restaurations dirigées par Millet et celles de l'Entre-deux-guerres) ont été réalisées avec des moellons de récupération, de mauvaise qualité, donc déjà dégradés avant même leur mise en œuvre.

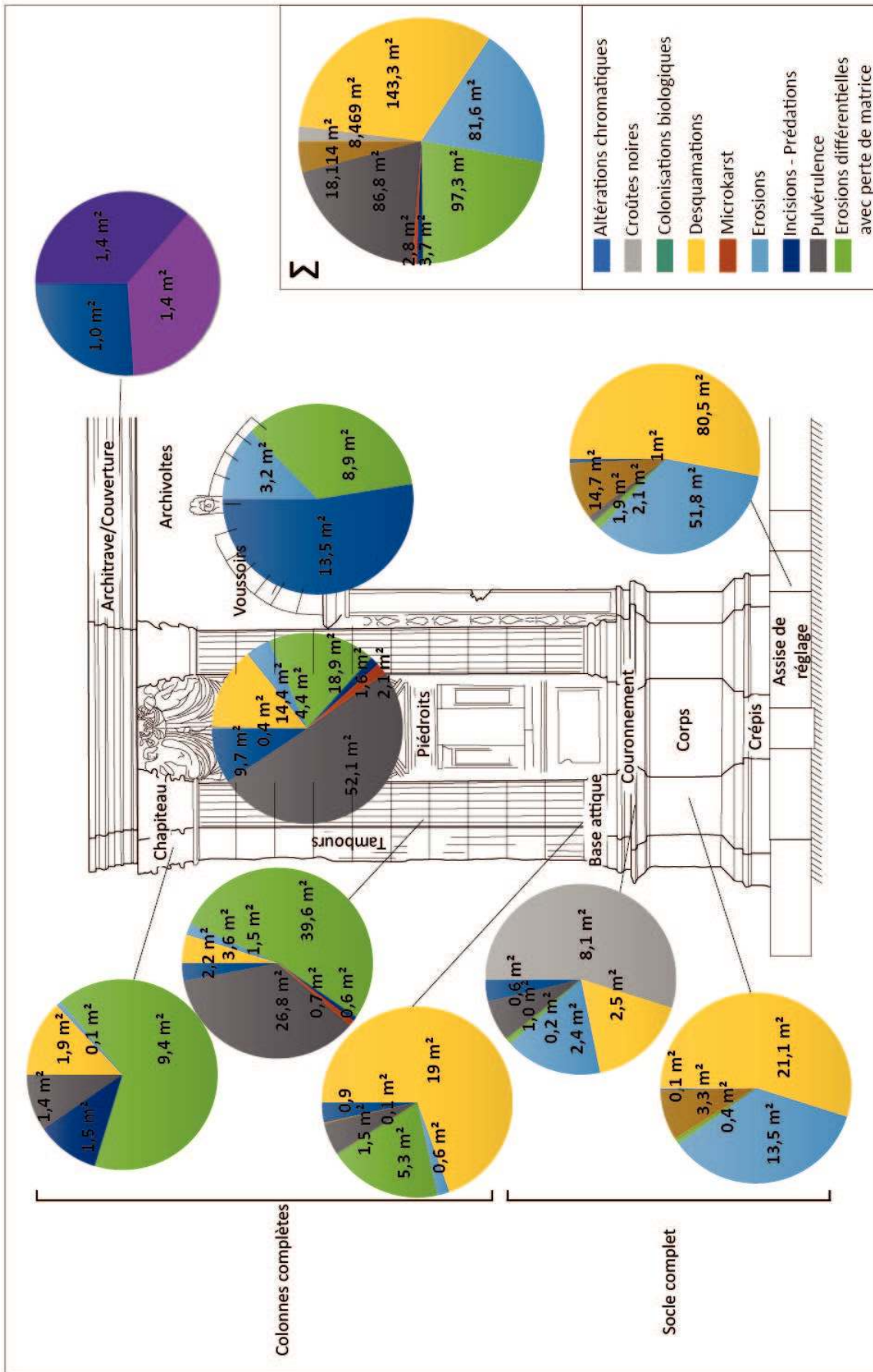


Figure III-77. Quantification des surfaces de maçonneries altérées en fonction des positions architecturales des altérations du monument

### 3.4. La caractérisation pétrophysique des matériaux

L'identification des matériaux mis en œuvre dans le monument et le constat des altérations qui les affectent conduisent maintenant à s'interroger sur les paramètres qui les relient. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser la caractérisation pétrophysique de ces roches. Il s'agit donc de s'intéresser plus particulièrement à leur réseau poreux et aux transferts hydriques dans ces pierres. Ces propriétés permettront de comprendre les altérations sur le monument. Ces caractérisations ont été réalisées dans l'objectif de comprendre le comportement en œuvre de ces matériaux et d'en déduire des indices de durabilité face aux facteurs externes et internes d'altération (Török et Přikryl 2010 ; Turmel 2014).

#### 3.4.1. Présentation de l'échantillonnage

Sont présentés ici les résultats obtenus sur les échantillons prélevés sur la Porte de Mars, en carrière (Tableau III-8, page III-255) et des échantillons provenant de l'étude de Turmel sur les matériaux du Pays Rémois ont été complétés par celles réalisées par Turmel (2014 ; Tableau III-13) au cours de son travail de thèse. Ces dernières ont été ajoutées afin d'aborder un panorama plus étendu des matériaux utilisés dans la construction rémoise tout en adjoignant des matériaux issus de l'aire d'approvisionnement locale (Chapitre II.1.1.2). Ils seront utilisés ici afin de préciser des tendances générales d'utilisation et pour, s'il y a lieu, mener des comparaisons entre les calcaires d'origine locale et ceux d'origine régionale.

Les matériaux caractérisés dans ce travail et par Turmel ont été recontextualisés en fonction de leurs positions architecturales soit en fonction de leur provenance (prélèvements sur les monuments), de leur similarité avec les pierres de monuments (équivalents) et, pour leurs tendances d'aptitudes d'emploi (pour ceux caractérisés par Turmel ; Annexe 38). Cette évaluation s'appuie la projection des données de porosité totale et de saturation dans un diagramme détaillant les possibilités d'emploi des pierres dans l'architecture (Mamillan 1994 ; Annexe 15). L'identification de chacun des échantillons avec cette information additionnelle permettra d'identifier d'éventuels critères pétrophysiques de rationalisation des matériaux.

Les résultats des caractérisations seront présentés pour chaque échantillon. Cependant, les quantités de roches disponibles étant très limitées il n'a pas été possible de procéder à des répliques. Les résultats n'ont donc pas la valeur d'un comportement moyen, mais ils sont utilisés à titre de comparaison. Comme dit précédemment, les échantillons de cette étude sont notés stratigraphiquement en fonction de l'étage géologique correspondant. Ceux de l'étude de Turmel sont identifiés par les initiales des communes d'échantillonnage (Pro pour Prouilly ; Her pour Hermonville... ; Tableau III-13). Les échantillons d'Oolithes vacuolaires, utilisés comme pierre de restauration au XIX<sup>e</sup> siècle, sont notés SAV (pour Savonnières) pour l'ensemble des travaux.

Identification	Description	Origine	Provenance	Microfaciès
Pro	Calcaire à <i>Ditrupe</i> et <i>Nummulites</i>		Prouilly	Packstone à <i>Ditrupe</i>
Her1	Calcaire massif à <i>Ditrupe</i> et molluques		Hermonville	Packstone à <i>Ditrupe</i>
Her2	Calcaire à <i>Ditrupe</i> et <i>Nummulites</i>			Packstone à <i>Ditrupe</i>
Bra1	Calcaire massif à <i>Ditrupe</i> et molluques	Terrain	Branscourt	Packstone à <i>Ditrupe</i>
Bra2	Calcaire massif à <i>Ditrupe</i> et molluques			Packstone à <i>Ditrupe</i>
Cou	Calcaire massif glauconieux à <i>Ditrupe</i>		Courville	Packstone à <i>Ditrupe</i>
Auy			Aubilly	Packstone à <i>Ditrupe</i>
CouL			Courville	Packstone à <i>miliolites</i> et <i>Orbitolites</i>
BraL	Calcaires tendre à <i>miliolites</i> et <i>Orbitolites</i>		Branscourt	Packstone à <i>miliolites</i> et <i>Orbitolites</i>
HerL			Hermonville	Packstone à <i>miliolites</i> et <i>Orbitolites</i>
Gra	Calcaire granulaire à <i>miliolites</i>	Antique	Reims	Grainstone à <i>miliolites</i> et pellets
Poi			Poilly	Packstone à <i>Limnées</i>
Ver	Calcaire lacustre à <i>Limnées</i>	Terrain	Verneuil	Packstone à <i>Limnées</i>
Par			Pargnan	Wackstone à <i>Limnées</i>
Bez		Antique	Bezannes	Packstone à <i>Limnées</i>
				Calcaire granulaire bioaccumulé à <i>Cérithes</i>

Tableau III-13. Identification, description succincte des calcaires caractérisés par Turmel (2014)

Position architecturale	Echantillons
Bandeaux, corniches et entablements	Lut IVb, BraL, CouL, HerL
Elévations	Lut Ia, Lut Ib, Lut Ic, Lut Id, Lut II, Lut IVa, SAV, Auy, Her1, Cou, Bra1, Bra2, Ver, Gra
Soubassements	Lut IIIa, Lut IIIb, Lut IIIc, Lut IIId, Bart a, Bart b, Pro, Her2, Par, Poi, Bez

Tableau III-15. Positions architecturales attribuées ou avérées des échantillons comparés

### 3.4.2. Résumé des prélèvements et des analyses réalisées

Afin de s'adapter aux différents essais et analyses auxquels ils ont été soumis, les tailles des échantillons ont été adaptées aux techniques utilisées (Tableau III-13). Des éprouvettes de forme prismatique ont également été confectionnées. Ces éprouvettes ont permis les mesures des porosités totales, de porosités à 48 h, des cinétiques d'imbibition et d'évaporation. La mesure de la porosité au mercure a été réalisée sur des éprouvettes d'environ 2 cm<sup>3</sup> dont la taille est limitée par les dimensions des cloches des pénétromètres de l'appareil. Le faible nombre d'échantillons disponibles n'a pas permis la réalisation systématique de réplicas des expériences, les mesures présentées ne permettent donc pas d'établir un comportement moyen, mais elles sont néanmoins utilisées afin de comparer les échantillons entre eux.

	BART b	BART a	Lut IV b	Lut IV a	Lut III d	Lut III c	Lut III b	Lut III a	Lut II	Lut I d	Lut I c	Lut I b	Lut I a	SAV
porosités totale à l'eau	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2	• 2
porosités à 48h	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1
Cinétique d'imbibition et d'évaporation	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1
porosités au mercure	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1	• 1

Tableau III-14. Nombre d'échantillons caractérisés par méthodes et par matériaux



### 3.4.3. Les mesures de porosité

Le milieu poreux correspond aux espaces vides qui subsistent dans une roche entre les grains et les autres éléments minéraux (ciments, matrice... ; Beck 2006). Pour les pierres sédimentaires, cet espace poral apparaît comme un espace complexe, aux géométries et connectivités irrégulières. La porosité, est le pourcentage de vides obtenu par le rapport du volumes des vides sur le volume total d'une roche.

La géométrie du réseau poreux d'une roche peut être caractérisée selon différentes méthodes dont la résolution dépend du mode d'observation. Elle peut être déterminée de manière optique à l'aide d'un microscope pétrographique, via l'utilisation d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB) ou encore par porosimétrie au mercure (Mercury Intrusion Porosimetry : MIP). Les limites des différentes classes de porosité seront définies selon le mode d'étude par les différents auteurs (Tableau III-16).

Pour la plupart des auteurs, les classes sont définies en fonction de leurs tailles et de la méthodologie mise en œuvre au cours de leurs travaux pour leur identification, d'autres en revanche ont établi un découpage fonctionnel. Il s'agit là en général d'une mise en rapport entre la taille des pores et les approvisionnements hydriques des plantes. Au cours de ce travail, Le découpage retenu est celui proposé par Fronteau (2000), car celui-ci fait directement référence aux mêmes matériaux que ceux rencontrés dans ce travail. À savoir, la limite des diamètres

Référence	Méthode	Rayon de pore (µm)															
		0,002	0,004	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,5	1	5	7,5	10	15	25	37,5	62
Brewer [1964]	théorie	cryptoporosité					ultra-microporosité			microporosité		mesoporosité		macroporosité			
Alonso [1965]	porosimétrie mercure	microporosité						macroporosité									
Combarous et Marle [1965]	porosimétrie mercure	microporosité			macroporosité												
Goni <i>et al.</i> [1968]	porosimétrie mercure	infraporosité				microporosité					macroporosité						
Choquette et Pray [1970]	lames minces	microporosité														macroporosité	
Pittman [1971]	MEB	microporosité						macroporosité									
Haynes [1978]	théorie	microporosité		mésoporosité		macroporosité											
Bousquié [1979]	porosimétrie mercure	infraporosité			microporosité					macroporosité							
	lames minces	microporosité							macroporosité								
Zinszner [1980]	lames minces	microporosité										macroporosité					
Chrétien [1986]	lames minces	microporosité						mésoporosité			macroporosité						
Verrecchia [1992]	loupe binoculaire	infraporosité						microporosité				macroporosité					
Rémy [1993]	porosimétrie mercure	microporosité							macroporosité								
Mertz [1993]	porosimétrie mercure	microporosité									macroporosité						
Ballif <i>et al.</i> [1995]	?	nanoporosité					microporosité					macroporosité					
Sizun [1995]	porosimétrie mercure	microporosité										macroporosité					
Dessandier [1995]	porosimétrie mercure	infraporosité		microporosité						macroporosité							
Loisy [1997]	porosimétrie mercure	infraporosité					ultra-microporosité	microporosité				macroporosité					
Fronteau [2000]	lames minces	microporosité													macroporosité		
	porosimétrie mercure	infraporosité						microporosité		macroporosité							

Tableau III-16. Limites des différentes classes de porosité (Linoir 2014)

des pores fixée par cet auteur pour les classifications de porosité au mercure sont établies à 7,5  $\mu\text{m}$  entre les macropores et les micropores, et à 1  $\mu\text{m}$  pour la limite entre infraporosité et microporosité.

### **Méthodologie : mesure de la porosité totale à l'eau**

La porosité totale s'obtient grâce à l'équation suivante et s'exprime en pourcentage (Équation 1) :

$$N_{\text{totale}} = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} \times 100 \quad (\text{Équation 1})$$

Avec :  $N_{\text{totale}}$  : valeur de la porosité totale (%);  $V_{\text{vides}}$  : volumes des vides ou volume poreux de la roche ;  $V_{\text{total}}$  : volume total de l'échantillon.

Cette expérience permet d'évaluer le volume de la porosité accessible à l'eau en condition de vide (assimilée à la porosité totale de l'échantillon). Le protocole complet de cette mesure est décrit par la norme NF EN 1936 (AFNOR 2007). Selon cette méthode, la porosité totale de l'échantillon ( $N_{\text{totale}}$ ) est déterminée par la méthode de la triple pesée.

Préalablement à la mesure, les échantillons sont séchés jusqu'à poids constant dans une étuve à 70 °C avant leur retour à la température ambiante. Leur masse sèche ( $M_{\text{sec}}$ ) est ensuite pesée avant de placer les échantillons durant deux heures dans un dessiccateur dans lequel sera fait le vide (jusqu'à 15 mm Hg ; Figure III-78). Ce récipient est relié à un autre dessiccateur dans lequel on aura préalablement fait dégazer de l'eau déminéralisée pendant 12 h. Le dispositif de liaison, équipé d'un système de robinetterie sera alors actionné et le débit d'eau réglé de manière à permettre un remplissage lent et continu de l'enceinte contenant les échantillons toujours sous vide d'air. La vitesse de remplissage doit, selon la norme être ajustée à la vitesse de migration de la frange capillaire des roches testées. Une fois le vide relâché, les éprouvettes sont maintenues en immersion et à pression atmosphérique pendant 24 h. Deux pesées sont alors réalisées. La première consiste à mesurer la masse hydrostatique ( $M_{\text{hydrostatique}}$ ) par une pesée en immersion dans de l'eau de l'échantillon. Et la seconde, après essuyage rapide des surfaces de l'éprouvette, où l'échantillon saturé en eau est pesé à l'air libre pour déterminer sa masse saturée ( $M_{\text{imbibée}}$ ).

La porosité totale à l'eau est calculée grâce à l'équation suivante (Équation 4) :

$$\rho_a = \frac{M_{\text{sec}}}{\rho_{\text{eau}} \times (M_{\text{sec}} - M_{\text{hydrostatique}})} \quad (\text{Équation 2})$$

$$\rho_s = \frac{M_{\text{sec}}}{\rho_{\text{eau}} \times (M_{\text{imbibée}} - M_{\text{hydrostatique}})} \quad (\text{Équation 3})$$

$$N_{\text{totale}} = \left( \frac{M_{\text{imbibée}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{imbibée}} - M_{\text{hydrostatique}}} \right) \quad (\text{Équation 4})$$

Avec :  $\rho_{\text{eau}}$  : densité de l'eau ;  $\rho_a$  : densité apparente à sec de l'échantillon ;  $\rho_s$  : densité du squelette solide de la pierre ;  $N_{\text{totale}}$  : valeur de la porosité totale (%);  $M_{\text{sec}}$  : Masse sèche de l'échantillon en début d'expérience ;  $M_{\text{imbibée}}$  : Masse de l'échantillon saturé en eau ;  $M_{\text{hydrostatique}}$  : Masse hydrostatique de l'échantillon pesée sous l'eau.

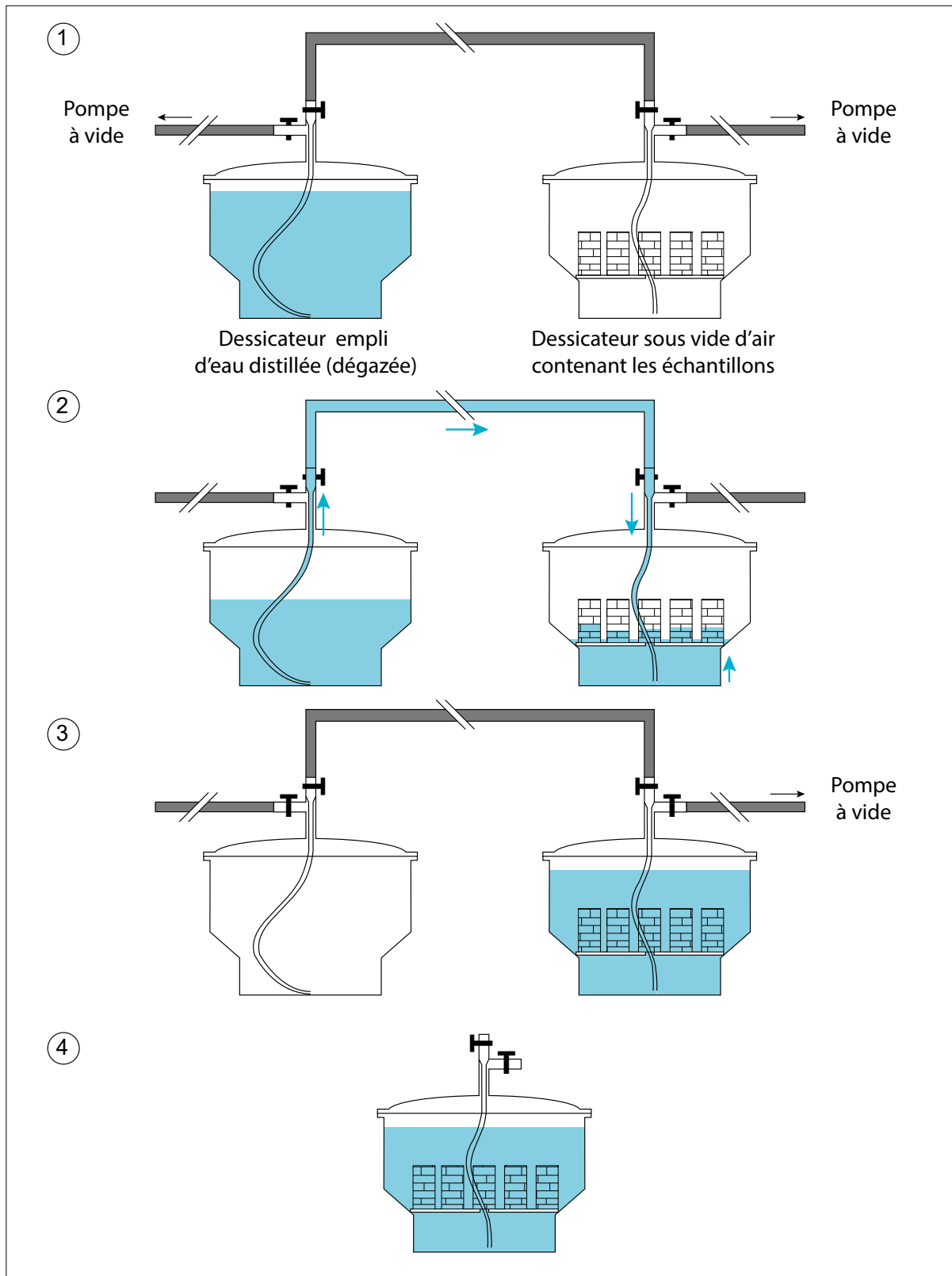


Figure III-78. Étapes de l'expérience menant à la détermination de la porosité totale à l'eau en laboratoire ; 1. Dégazage de l'eau et des échantillons ; 2. Imbibition sous vide ; 3. Maintien en immersion pendant 24h ; 4. Pesées de la masse hydrostatique et de la masse saturée de l'échantillon.

**Méthodologie : mesure de la porosité à 48 h**

Cette mesure permet de caractériser la porosité librement accessible dans des conditions d’imbibition considérées comme représentatives de la saturation maximale d’une pierre dans des conditions naturelles (Mertz 1991 ; Dessandier 1995 ; Remy 1993 ; Thomachot 2002). Cet état de saturation est obtenu par immersion graduelle de l’échantillon poreux dans l’eau pendant 48 h à pression atmosphérique.

Cet essai (Figure III-79) est réalisé sur un échantillon de roche préalablement séché jusqu’à poids constant en étuve à 70 °C. Avant le début de l’essai, une fois l’échantillon revenu à température ambiante, sa masse sèche (Msec) est pesée. Il est alors placé dans un récipient en immergeant un quart de sa hauteur dans de l’eau déminéralisée (1/4h). Puis, une heure après, de l’eau est ajoutée progressivement jusqu’à la moitié de la hauteur des éprouvettes (½ h). 24 h après le début de l’essai, l’échantillon est immergé sur toute sa hauteur jusqu’à le recouvrir totalement. Enfin, au bout de 48 h, les échantillons subissent une triple pesés après avoir été rapidement essuyés de l’eau excédentaire et leur masse (M48) consignée pour être intégrée dans l’équation 5.

$$N_{48} = \frac{M_{48} - M_{sec}}{M_1 - M_2} \tag{Équation.5}$$

Quant à la porosité piégée ( $N_p$ ), elle peut être obtenue assez intuitivement grâce à la différence entre  $N_{totale}$  et  $N_{48}$ . Enfin, le rapport de  $N_{48}$  sur  $N_{totale}$  représente le coefficient de Hirschwald ou coefficient de saturation  $S_{48}$  (Hirschwald 1911)

$$S_{48} = \frac{N_{48}}{N_{totale}} \tag{Équation 6}$$

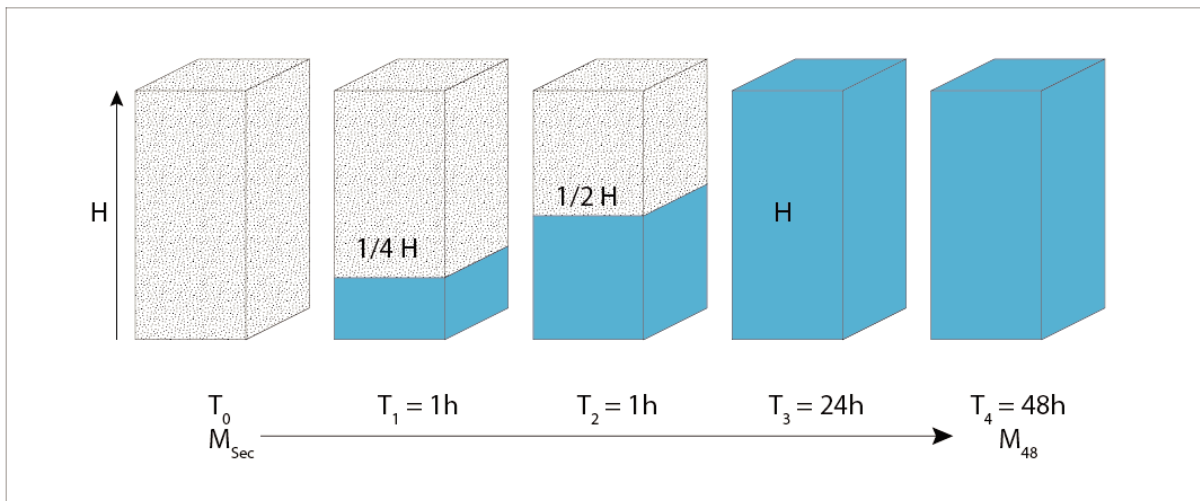


Figure III-79. Déroulement de l’essai de détermination de la porosité à 48h

**Résultats :**

Les résultats des mesures de porosités totales à l'eau ( $N_t$ ) et à 48 h ( $N_{48}$ ) sont présentés dans le Tableau III-17 et la Figure III-80. Les classes de porosités utilisées par la suite pour catégoriser les échantillons ont été définies arbitrairement par rapport aux limites observées dans cette sélection de pierres. Les résultats complets de cette mesure se trouvent en Annexe 39. Elles sont reprises sur les cartographies de la Porte de Mars en Annexe 41 et Annexe 42.

Les différents calcaires possèdent des porosités très variables d'un faciès à l'autre comprises entre 8,8 et 35,1 %. Cependant, deux ensembles s'individualisent avec, en premier lieu des pierres possédant une porosité totale inférieure à 20 % et en second lieu des pierres avec des valeurs de porosités supérieures à 20 %. La limite entre ces deux ensembles s'établit à 20 % de porosité totale.

Cette distribution des porosités ne semble pas corrélée à une position ou à une provenance des pierres. Néanmoins, il apparaît que les faibles porosités ( $N_t \leq 20 \%$ ) sont associées à des pierres mises en œuvre dans les soubassements des bâtiments ou des équivalents à celles-ci. Cette répartition se constate parmi tous les échantillons comparés. Pour ces calcaires, toutes les aires d'approvisionnement sont concernées. Cependant, les pierres les moins poreuses sont principalement des pierres collectées dans le Soissonnais.

Échantillons	Porosité à l'eau			
	$N_t$	$\sigma$	$N_{48} (\%)$	$S_{48} (\%)$
BART b	26,3 ± 8,1		13,72	64,0
BART a	10,4 ± 1,3		6,85	64,0
Lut IV b	26,7 ± 0,6		11,46	41,9
Lut IV a	25,7 ± 1,1		18,03	69,1
Lut III d	23,5 ± 2,8		18,68	84,4
Lut III c	10,2 ± 3,0		6,92	58,5
Lut III b	8,8 ± 2,7		5,26	64,3
Lut III a	11,5 ± 7,6		2,77	44,6
Lut II	26,7 ± 1,1		16,95	36,8
Lut I d	27,8 ± 3,9		17,21	65,0
Lut I c	35,1 ± 9,6		16,43	60,3
Lut I b	27,5 ± 1,6		19,86	68,4
Lut I a	33,5 ± 4,5		26,11	75,8
SAV	26,6 ± 2,5		13,67	42,0

Tableau III-17. Synthèse des paramètres de porosité totale à l'eau ( $N_t$  %,  $N_{48}$  %,  $S_{48}$  % et  $N_p$  %) mesurés pour tous les calcaires testés (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches).

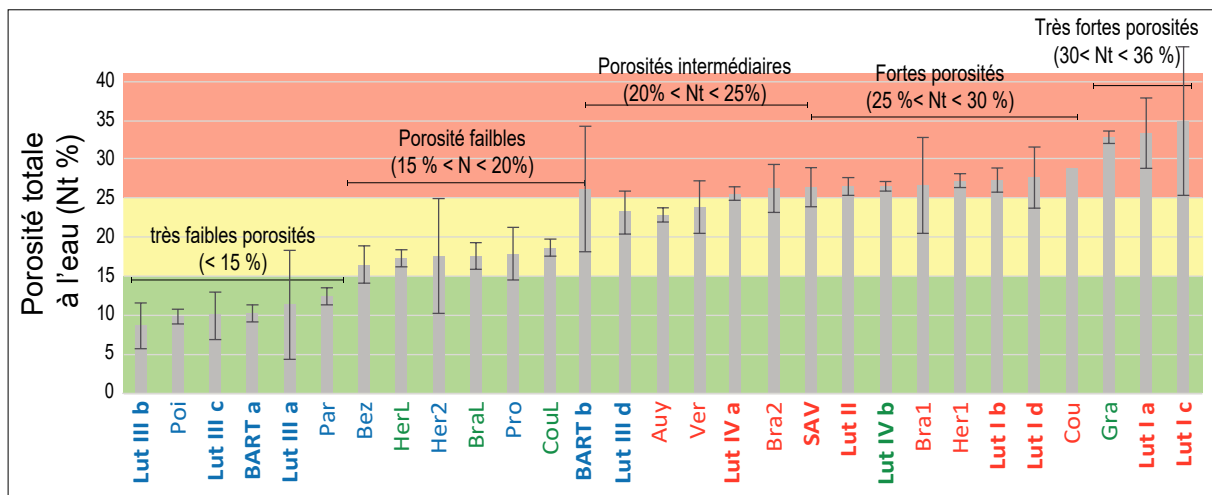


Figure III-80. Porosité totale à l'eau (Nt en %) des différentes pierres (Les échantillons en bleu correspondent aux pierres des soubassements, ceux en rouge aux élévations et ceux en vert aux corniches et rejaillissement. Les échantillons qui ne sont pas en gras sont ceux de Turmel, 2014.

Le second groupe de pierre, de porosité totale moyenne à très forte ( $Nt \geq 20\%$ ) rassemble quant à lui tous les échantillons appartenant ou représentant les pierres mises en œuvre dans les élévations. Comme pour le groupe précédent, celui-ci regroupe aussi bien des calcaires locaux que régionaux.

Cependant, deux échantillons dérogent à cette catégorisation. Il s'agit des calcaires **Lut III d** et **Bart b**. Ces deux échantillons présentent des porosités parmi les plus importantes de leur groupe. Ils ont été tous deux prélevés sur des blocs antiques et peuvent donc présenter des propriétés pétrophysiques dégradées par rapport à l'origine. Il est également possible que des variations de faciès des pierres aient pour conséquences d'importantes hétérogénéités de porosités au sein des blocs. Le fait que les échantillons **Bart b** et **Bez** soient issus du même bloc et montrent des valeurs de porosité avec d'importants écarts ( $26,3 \pm 8,1\%$  et  $16,6\%$ ) semble confirmer cette hypothèse.

Le coefficient d'Hirschwald (S48) qui exprime la proportion de porosité librement accessible par rapport à la porosité totale ne semble pas indiquer de tendance spécifique, contrairement aux deux groupes précédemment établis.

La représentation graphique de la porosité à 48H (N48), en fonction de la porosité totale (Nt ; Figure III-81), permet d'individualiser trois grands ensembles de matériaux :

- Les pierres correspondant aux pierres des soubassements caractérisés par des porosités totales inférieures à 20 % et à la porosité accessible inférieure à 12 % ;
- Le second groupe de pierres, mise en œuvre dans les élévations caractérisées par des porosités supérieures aux calcaires utilisés dans les soubassements ;

Les échantillons calcaires à milioles BraL, CouL et HerL se placent dans une position intermédiaire avec les pierres des soubassements. Cette position médiane entre ces deux groupes indique une aptitude spécifique à une utilisation dans les corniches et les entablements confirmée par la projection de ses caractéristiques dans le diagramme d'aptitude de Mamillan (1994 ; Annexe 15). Turmel soulignait déjà dans son travail la spécificité de ces échantillons par rapport aux autres.

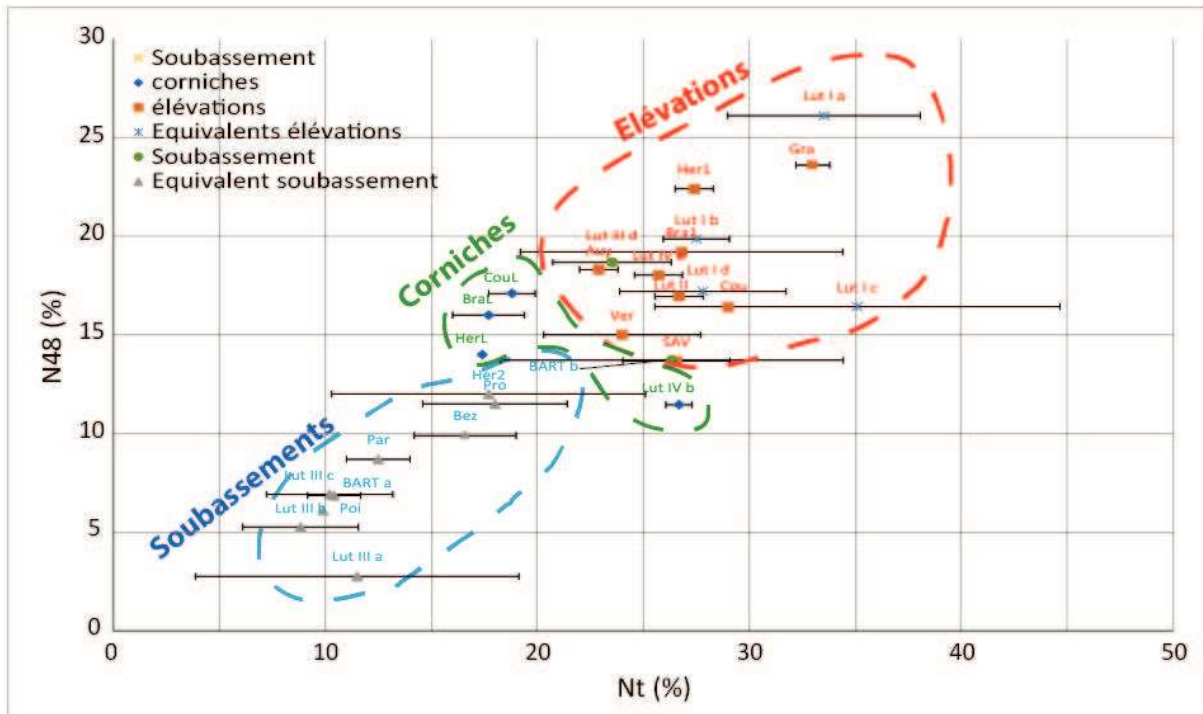


Figure III-81. Porosité totale  $N_t$  % en fonction de la porosité à 48 h  $N_{48}$  % (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches).

### 3.4.4. Porosimétrie par intrusion de mercure

#### Méthodologie :

La mesure de la porosité par intrusion de mercure est aujourd’hui l’une des méthodes les plus utilisées pour la caractérisation des milieux poreux (Haul *et al.* 1982 ; Ilavsky *et al.* 1997 ; Dollimore 1980 ; Linoir 2014). À l’image de la mesure de la porosité à l’eau, cette approche permet la mesure de la porosité totale ( $N_{Hg}$ ), mais elle permet également de connaître la distribution des rayons d’accès aux pores. Elle repose sur les propriétés non mouillantes de ce métal. En effet, il est liquide à température ambiante et possède un très grand angle de contact ( $136^\circ$  sur le verre). Cette propriété a pour conséquence immédiate qu’à pression atmosphérique normale, pour des rayons inférieurs à  $7.5 \mu\text{m}$ , ce liquide ne pénètre pas spontanément dans la porosité naturelle de la roche. Pour réaliser cette mesure, l’échantillon sec préalablement disposé dans un pénétromètre spécifique est placé sous vide d’air avant d’être mis en contact avec du mercure. L’appareil applique ensuite une augmentation de pression induisant la pénétration du métal dans l’échantillon. À mesure de l’augmentation de pression, les quantités de mercure injectées sont mesurées par capacitance. Les différentes tailles apparentes d’accès aux pores sont calculées grâce à la loi de Laplace (Équation 7) :

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{R} \quad \text{Équation 7}$$

La mesure de porosimétrie est réalisée sur un porosimètre Micromeritics Autopore IV 9500, dont le spectre d’investigation est capable de considérer des pores de rayon apparent de  $180 \text{ nm}$  ( $0,004 \text{ MPa}$ ) à  $0,003 \text{ mm}$  ( $274 \text{ MPa}$ ).

Avec  $\sigma$  : tension superficielle du mercure ;  $\theta$  : Angle de raccordement du mercure à la surface de contact ;  $R$  : rayon de pore ;  $P$  : Pression d’injection appliquée.

Les données rendues par le porosimètre à la fin de la mesure sont multiples : porosité totale ( $N_{Hg}$ ), Volume de Hg injecté par incrément de pression, cumul du volume de Hg injecté par incrément de pression... Ces données sont classiquement présentées sous forme graphique afin d'en faciliter la lecture (Figure III-82). Certains paramètres descriptifs du réseau poreux seront déterminés graphiquement à partir des courbes incrémentales ou cumulatives (Figure III-82).

Les rayons moyens ( $R_m$ ) correspondent aux valeurs des abscisses des pics de volumes de porosités envahies des courbes incrémentales d'injection de mercure. Cette valeur de rayon apparent d'accès au pore est celle pour laquelle le volume intrusif est maximal (Remy 1993).

Le rayon d'accès ( $R_a$ ) ou rayon de seuil (Beck 2006) rend compte de l'existence d'un seuil d'accès au réseau poreux (Sizun 1995). Il représente donc la plus grande taille de pore donnant accès à la plus importante part du volume poreux (Dullien et Dhawan 1974). Il est déterminé par la méthode des tangentes sur courbe cumulées.

Enfin, le coefficient de dispersion ( $C_d$ ) permet de quantifier l'étalement des courbes de porosité (Wardlaw et McKellar, Yu 1988; Remy 1993). Ce dernier se calcule d'après l'équation 8 :

$$C_d = \frac{(P_{80} - P_{20})}{P_{50}} \quad \text{Équation 8}$$

Avec :  $C_d$  : Coefficient de dispersion (grandeur sans dimension) ;  $P_{20}$ ,  $P_{50}$  et  $P_{80}$  : sont les pressions d'injections correspondant à l'envahissement de, respectivement, 20, 50 et 80 % du réseau poreux.

Si  $C_d < 1$  alors la courbe a une répartition monomodale dont les rayons d'accès aux pores sont resserrés autour d'une valeur (Remy 1993)

Si  $C_d > 1$ , alors les valeurs des rayons d'accès aux pores sont étalées, ce qui regroupe, d'après Rémy (1993), les catégories suivantes :

- La distribution des valeurs est monomodale, mais les valeurs sont fortement étalées.
- La distribution des rayons d'accès aux pores est multimodale

Pour l'exploitation des résultats, il conviendra de garder à l'esprit que ce sont les rayons d'accès aux pores qui sont mesurés et non directement les rayons des pores. Ceci conduira donc à considérer comme équivalents des macropores connectés à des micropores. L'une des limitations de cette méthode sera donc la surestimation de la microporosité au détriment de la macroporosité (Thomachot 2002).

Ces mesures comprennent bien évidemment des limites dont la principale est la taille de l'échantillon testé (éprouvette de 1,90 cm<sup>3</sup>) qui pose donc des problèmes de représentativité (Thomachot 2002). D'autres limites existent et on renverra aux nombreux travaux traitant de la méthode de manière plus approfondie (Remy 1993; Thomachot 2002).



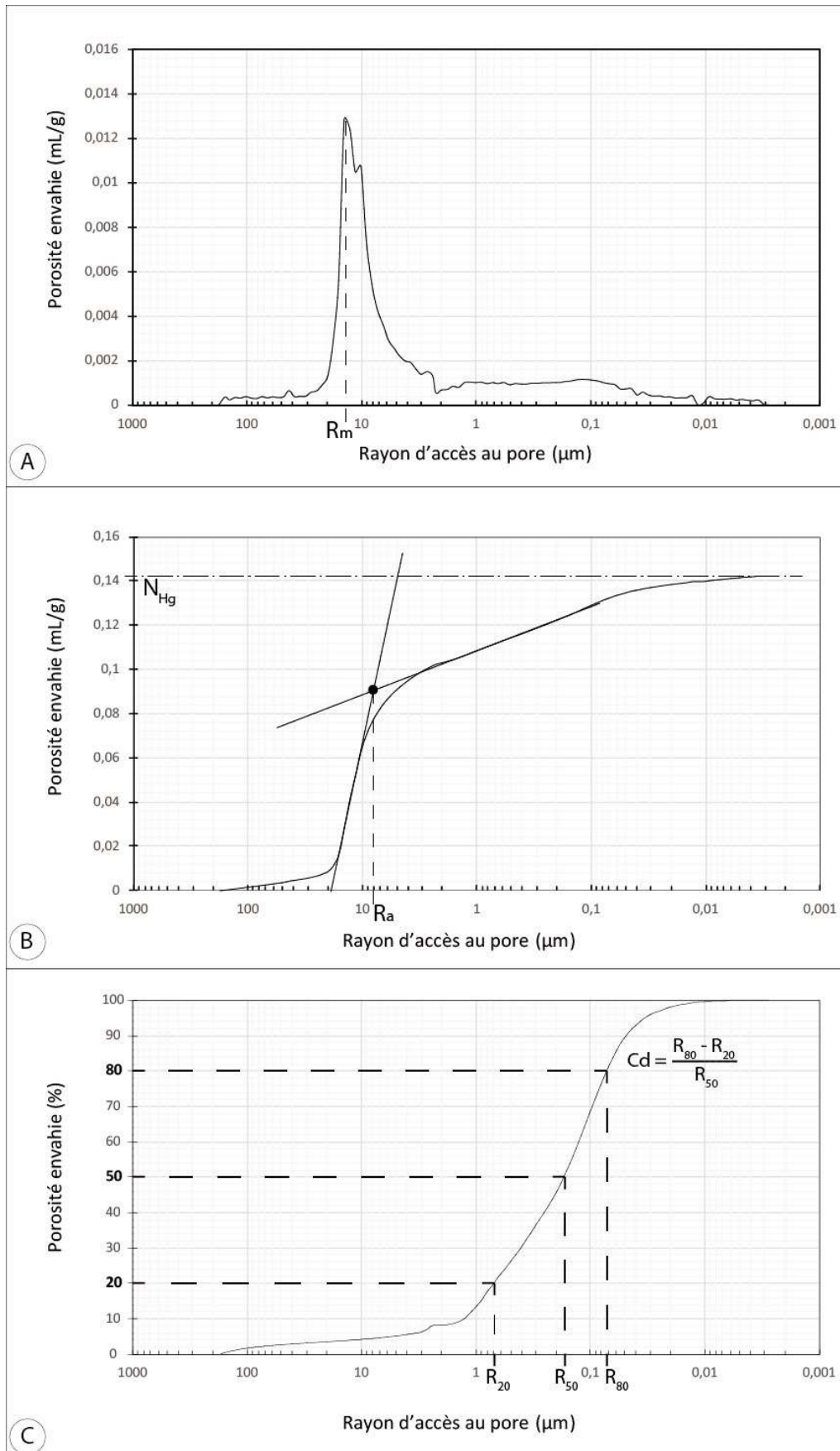


Figure III-82. Détermination graphique des paramètres descriptifs d'une analyse de porosimétrie au mercure ; A. Courbe incrémentale ; B. Courbe cumulée avec  $N_{\text{Hg}}$  ; C. Courbe exprimée en % de porosité envahie permettant d'identifier les rayons envahis respectivement à 20, 50 et 80 % nécessaires au calcul du Coefficient de dispersion  $C_d$

**Résultats :**

Les mesures de porosités totales au mercure ( $N_{Hg}$ ) réalisées sur des éprouvettes spécifiquement confectionnées pour chaque matériau sont contenues dans le tableau suivant (Tableau III-18). Elles diffèrent légèrement des porosités totales à l'eau principalement en raison de la dimension beaucoup plus réduite des éprouvettes destinées à la mesure de porosité au mercure (d'un facteur compris entre 30 et 50). Il existe également une limite inhérente à la méthode pour la mesure qui ne permet pas d'investiguer les rayons d'accès aux pores supérieurs à 250  $\mu\text{m}$  et inférieurs à  $3.10^{-2} \mu\text{m}$ . Plusieurs échantillons présentent des porosités supérieures aux porosités à l'eau indiquant une trop petite taille pour qu'ils soient représentatifs de l'ensemble de l'échantillon (Lut Ic, Lut Id, Lut IVb et Bart b). Les classes de porosités utilisées par la suite pour catégoriser les échantillons sont définies arbitrairement par rapport aux limites observées dans cette sélection de pierres.

Les mesures complètes de porosimétrie au mercure ainsi que les courbes d'intrusion incrémentales et cumulées ainsi que les histogrammes de répartition des différentes gammes de tailles de pores, pour tous les échantillons de cette étude, sont rassemblées en Annexe 43, Annexe 44 et Annexe 45. La projection de ces données sur le plan de l'Arc est annexé en Annexe 40. Pour les soubassements ce sont les courbes de Lut III d et de Bart b qui ont été choisies, Lut Ia et Lut Ib pour les élévations, et Lut IVb pour les corniches et entablements.

Comme précédemment pour les porosités totales à l'eau, les mesures de porosimétrie au mercure font ressortir deux grands groupes. D'une part, des calcaires de porosité très faible à faible (< 20 %) et d'autre part des calcaires de porosités intermédiaires à très forte (> 20 %). Ces groupes correspondent à des pierres utilisées dans les soubassements, pour les calcaires aux porosités les plus faibles et, pour les pierres utilisées dans les élévations dans le cas des calcaires possédant les porosités les plus fortes.

Échantillons	Porosimétrie Mercure (MIP)					
	%	Rm	Cd	Infraporosité	Mésoporosité	Macroporosité
BART b	18,57	0,02	4,19	87,9%	8,7%	3,4%
BART a	10,47	0,01	2,36	84,9%	4,2%	10,9%
Lut IV b	16,99	4,50	34,64	30,7%	21,9%	47,3%
Lut IV a	24,39	26,00	2,14	30%	20%	50%
Lut III d	18,57	0,23	1,69	97,0%	1,7%	1,3%
Lut III c	11,00	0,12	1,95	87,6%	9,3%	3,1%
Lut III b	18,00	2,10	16,09	51,3%	37,7%	11,0%
Lut III a	5,15	0,01	1,62	88,6%	4,2%	7,2%
Lut II	25,26	15,00	17,08	24,0%	22,4%	53,6%
Lut I d	17,91	2,80	8,24	44,0%	41,3%	14,7%
Lut I c	25,84	2,50	11,54	82,9%	12,9%	4,1%
Lut I b	29,99	4,00	21,88	32,3%	48,0%	19,7%
Lut I a	42,12	9,00	9,76	29,1%	43,7%	27,2%
SAV	32,73	7,00	17,60	39,2%	29,1%	31,7%

Tableau III-18. Synthèse des paramètres de porosité par intrusion de mercure (NHg%, Rm % et Cd avec les proportions de chaque classe de porosités) mesuré pour tous les calcaires testés (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches).

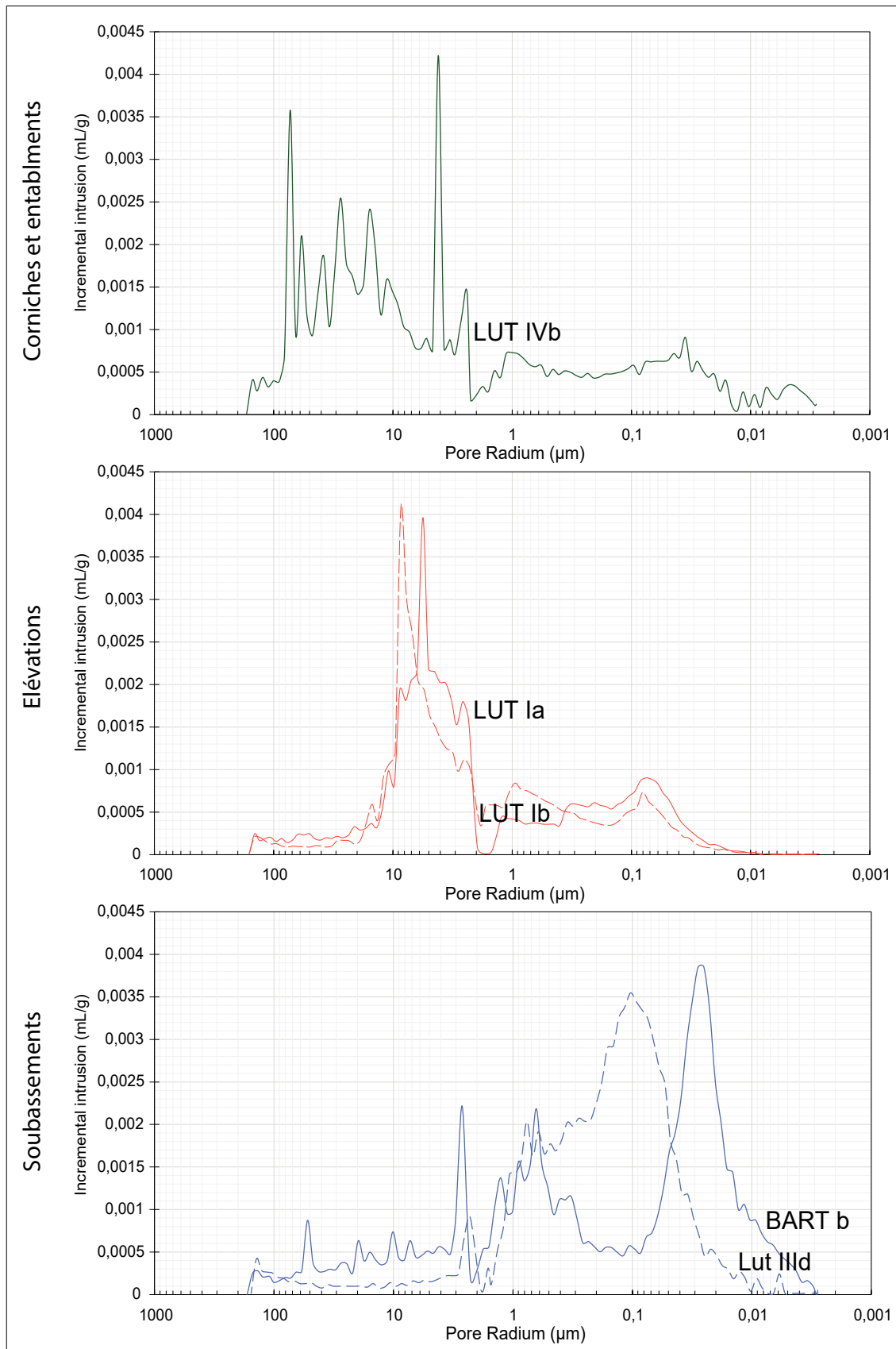


Figure III-83. Courbes incrémentales de références porosimétrie au mercure (NHg en %) pour chaque positionnement architectural envisagé (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches et entablments )

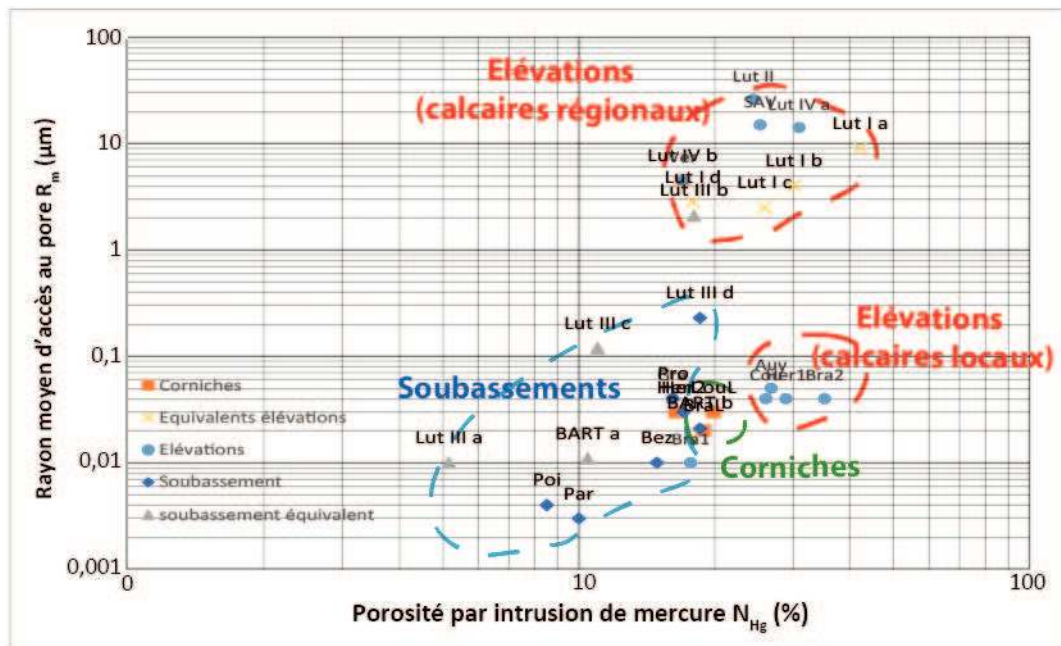


Figure III-84. Graphique Rayons d'accès aux pores ( $R_m$ ) en fonction des porosités totales au mercure ( $N_{Hg}$  ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches)

Classes de porosités		Étalement des courbes
BART b BART a	Infraporeux	Courbes polymodales moyennement étalées
Lut IV b Lut IV a	Macroporeux (mais infraporosité et mésoporosité fortement développées)	Courbes polymodales fortement étalées Courbes monomodales fortement étalées
Lut III d Lut III c	Infraporeux	Courbes monomodales moyennement étalées
Lut III b Lut III a	Infraporeux et Mésoporeux Infraporeux	Courbes polymodales fortement étalées Courbes monomodales moyennement étalées
Lut II Lut I d Lut I c Lut I b Lut I a	Infraporeux et Mésoporeux	Courbes polymodales fortement étalées Courbes monomodales fortement étalées
SAV	Micro et macroporeux	Courbes monomodales fortement étalées

Tableau III-19. Description des réseaux poreux des échantillons caractérisés pour la Porte de Mars (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches).

L'examen de la projection des rayons d'accès aux pores ( $R_m$ ) en fonction de la porosité au mercure ( $N_{Hg}$  ; Figure III-84) laisse apparaître, comme précédemment 3 grands ensembles dont l'un peut se subdiviser en deux sous-ensembles. Ces groupes sont constitués des calcaires de soubassements, de ceux des corniches et entablements, et de deux groupes distincts utilisés dans les élévations. Pour ces deux derniers groupes, il s'agit de calcaires d'origine locale et de ceux d'origine régionale.

Les calcaires des soubassements associent une porosité inférieure à 20 % avec des rayons d'accès aux pores inférieurs à 0,3  $\mu\text{m}$ . Les calcaires des corniches et entablements présentent des porosités légèrement inférieures à 20 %, mais des rayons moyens d'accès aux pores compris entre 0,02 et 0,06  $\mu\text{m}$ . Enfin, les calcaires des élévations sont caractérisés par des porosités supérieures à 18 %. Mais, dans le cas de calcaires locaux, Rm inférieurs à 0,1 % tandis que les calcaires de faciès régionaux ont des Rm bien plus grands, compris entre 2 et 26  $\mu\text{m}$ . Seul un calcaire considéré comme un équivalent aux soubassements échappe à cette catégorisation. Il s'agit de l'échantillon Lut IIIb, qui présente un Rm légèrement supérieur à 2 qui permettrait de le rapprocher des calcaires utilisés dans les élévations.

Les caractérisations de réseaux poreux (Tableau III-19) présentent-elles aussi des tendances d'organisation spécifique en fonction des utilisations ou des aptitudes d'emploi des matériaux. Les calcaires des **soubassements** sont majoritairement **infraporeux** ( $\varnothing < 1 \mu\text{m}$ ) avec des courbes principalement polymodales pour les calcaires à limnées (Bart a et Bart b ; utilisés dans les assises de réglages) et plutôt monomodales pour les calcaires massifs à miliolites (Lut IIIa, b et d). Le calcaire Lut IIIc est le seul qui semble déroger à cette organisation. Les échantillons de calcaires des élévations sont majoritairement **infraporeux et mésoporeux** ( $\varnothing < 10 \mu\text{m}$ ) avec des courbes **monomodales** fortement étalées. Cette organisation des réseaux poreux assez homogène est toutefois fortement influencée par la sédimentologie des pierres puisque pour Lut IV a, qui est un grainstone légèrement dolomitisé est quant à lui plutôt macroporeux. Il ne s'agit cependant pas d'un calcaire utilisé dans l'antiquité, mais d'un calcaire utilisé lors des restaurations du XIX<sup>e</sup> siècle. Le cas de l'Oolithe vacuolaire (SAV) est intéressant, car ce dernier est plutôt **infraporeux et macroporeux** (soit  $\varnothing < 1 \mu\text{m}$  ou  $\varnothing > 10 \mu\text{m}$ ) avec une courbe globalement **uniomodale, mais très étalée**. Pour ces échantillons, les Cd sont très élevés entre 8 et 21 mais les courbes incrémentales ne montrent qu'un pic bien exprimé. Cette dernière est exclusivement utilisée comme pierre de restauration dans les élévations dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle.

Enfin les calcaires des **corniches** (Lut IVb) sont également plutôt **macroporeux** avec une **distribution polymodale très étalée** (Cd = 34,6). Les échantillons de calcaires caractérisés par Turmel (2014) ont quant à eux une distribution monomodale et sont **infraporeux et mésoporeux**.

#### 3.4.5. Les propriétés de transferts hydriques des matériaux

##### **Méthodologie : Mesures des propriétés d'imbibition (capillarité)**

Cette propriété est directement liée à la forme et à la taille des pores de la roche ainsi qu'à leurs interconnexions (Beck 2006). D'un point de vue physique, cette expérience repose sur le déplacement progressif dans le réseau poreux d'un fluide non mouillant (l'air) par un fluide mouillant (l'eau). Ce déplacement d'eau se produit sans variations de pression extérieure.

L'absorption d'eau capillaire a été mesurée en suivant la prise de masse d'échantillons suspendus sous une balance et dont seule la base est immergée dans quelques millimètres d'eau, utilisant le dispositif expérimental mis en place par Junique *et al.* (2021 ; Figure III-85). L'imbibition progressive de l'échantillon est réalisée dans un environnement contrôlé, évitant les variations de température et d'humidité relative. Le suivi de la prise de poids a été

réalisé en suspendant chaque échantillon grâce à un filet sous une balance (précise à 0,01 g) reliée à un ordinateur. L'évolution du poids de l'échantillon ( $dW$ ) est alors automatiquement enregistrée avec un pas de temps de 30 secondes. Le coefficient capillaire ( $C$ ) a été calculé sur la base de la norme NF EN 15 801 (AFNOR 2010 ; Figure III-86). Selon l'équation de Washburn, décrite pour un modèle théorique d'ascension capillaire dans un tube cylindrique, l'évolution de la masse au cours de l'expérience est directement proportionnelle à la racine carrée du temps (Équation 9).

$$dW/S = A\sqrt{t} + W_0 \tag{Équation 9}$$

avec :  $dW/S$  : la prise de masse en eau (g) rapportée à la surface de la base immergée de l'éprouvette A : Coefficient représentatif de la prise de poids en eau ( $\text{g.cm}^{-2}.\text{t}^{-1/2}$ ), S : la surface de contact ( $\text{m}^2$ ) ; t : le temps en secondes. Il est possible de rapprocher la valeur de la porosité à 48 h ( $N_{48}$ ) de la porosité librement accessible à l'eau ( $N_{\text{cap}}$ ).

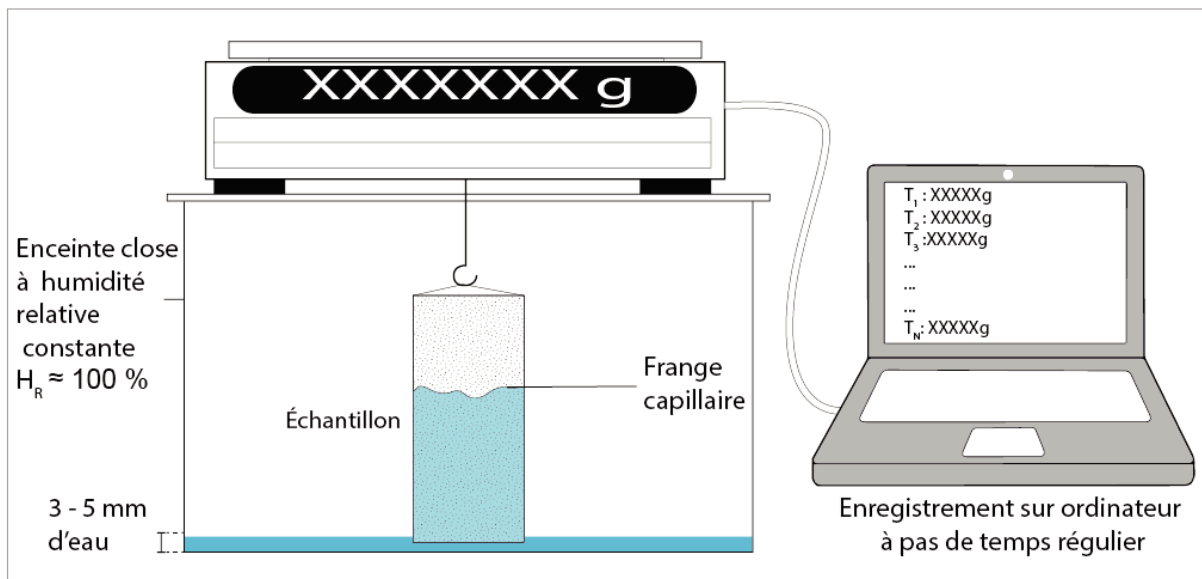


Figure III-85. Détermination des paramètres de capillarité de la roche

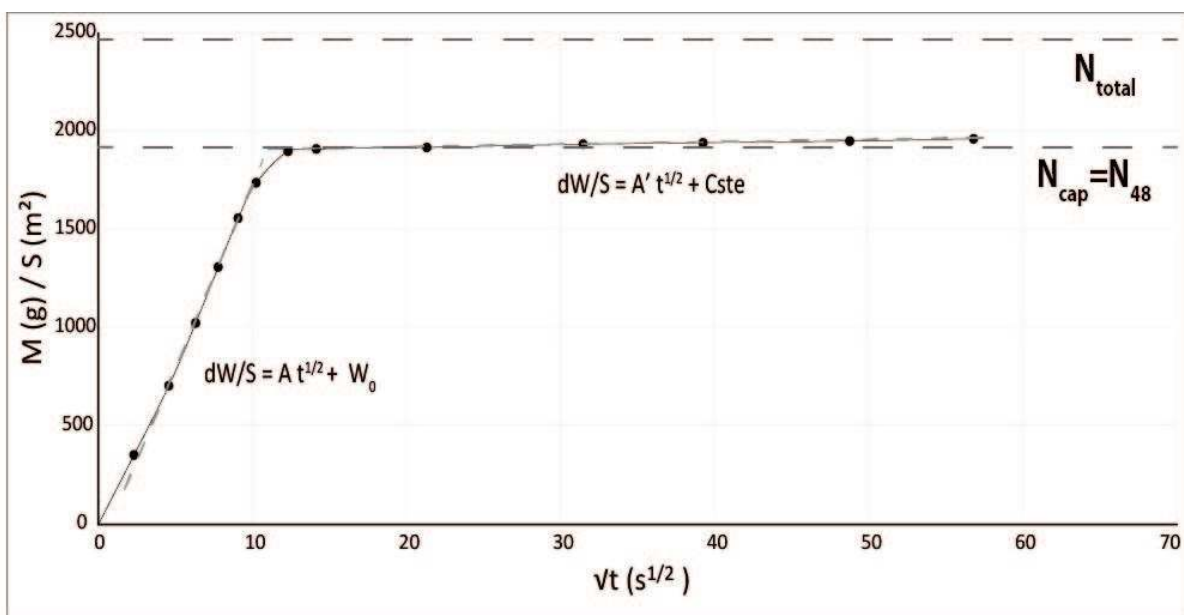


Figure III-86. Exemple de cinétique d'imbibition capillaire d'une roche calcaire A. Courbe d'évolution en fonction de la racine carrée du temps ; B. Interprétation des phases de la courbe

**Résultats :**

**Cinétique d’imbibition capillaire :** Les résultats de ces mesures sont indiqués dans le Tableau III-20. Il s’agit d’identifier, pour ce paramètre, les pierres qui possèdent des cinétiques élevées de prises en masse d’eau depuis leur surface basale. Les courbes d’imbibition capillaires et les propriétés de tous les échantillons sont rassemblées en Annexe 40 et Annexe 47. Les divisions entre les différentes classes de cinétique ont été attribuées arbitrairement. La projection de ces données sur le plan de l’Arc se trouve en Annexe 47.

Échantillons	Capillarité (g.cm <sup>2</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	
	C1	Ncap
BART b	14	13,7
BART a	7	6,8
Lut IV b	202	11,5
Lut IV a	252	18
Lut III d	38	18,7
Lut III c	15,5	6,9
Lut III b	6,3	5,3
Lut III a	3,8	2,8
Lut II	266	17
Lut I d	70	17,2
Lut I c	238	16,4
Lut I b	66	19,9
Lut I a	236	26,1
SAV	59,6	13,7

Tableau III-20. Paramètres des flux d’imbibition capillaire pour les calcaires testés (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches).

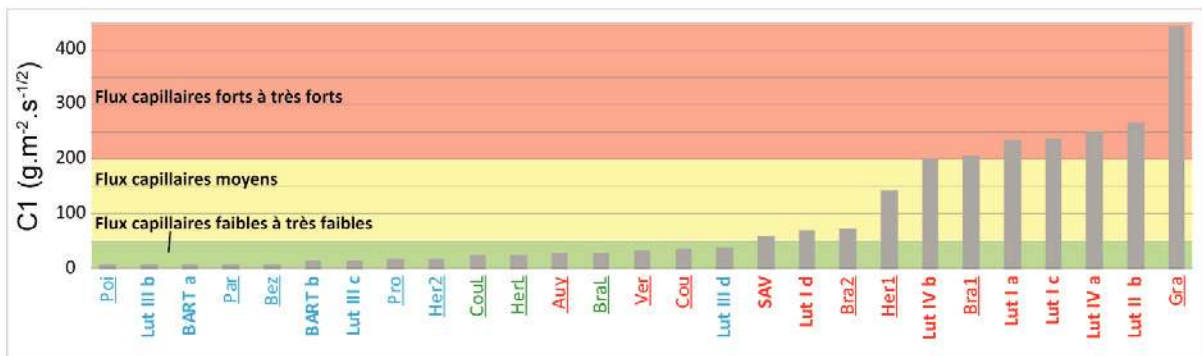


Figure III-87. Imbibition capillaire des échantillons (C1 en g.m<sup>2</sup>.s<sup>-1/2</sup>) des différentes pierres (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches ; en gris les échantillons de ce travail).

Comme précédemment pour les mesures de porosité mettent en avant deux grands groupes (Figure III-87). D’une part, des calcaires à la cinétique d’imbibitions capillaire plutôt lente, inférieure à 100 g.m<sup>2</sup>.s<sup>-1/2</sup> et d’autre part, les calcaires à la cinétique moyenne à rapide dont les cinétiques sont supérieures à 100 g.m<sup>2</sup>.s<sup>-1/2</sup>.

Ces deux groupes correspondent une nouvelle fois à des pierres principalement utilisées dans les soubassements pour les valeurs les plus faibles. À celles-ci s'ajoutent quelques pierres aux cinétiques légèrement plus élevées correspondant à des pierres des élévations.

On constate, comme c'était le cas pour les porosités, que les calcaires des corniches et entablements possèdent des cinétiques faibles cohérentes avec un positionnement architectural qui les expose à des projections d'eau occasionnelles à régulières. Pour les calcaires des soubassements, les cinétiques très faibles sont aussi cohérentes avec la nécessité d'isoler les élévations de l'humidité du sol. Les calcaires utilisés pour les élévations montrent des cinétiques plus variées, mais toutes dans la gamme des valeurs moyennes à élever.

### **Méthodologie : Mesure de l'évaporation**

Au cours du processus de séchage d'une pierre, son contenu disponible en eau (en dehors des eaux de constitution) s'évacue progressivement par évaporation jusqu'à atteindre l'équilibre avec son environnement. L'évaporation est liée au processus de diffusion qui assure le transfert de l'eau sous forme vapeur (Beck 2006). Elle est influencée par les paramètres de l'environnement comme la température, l'agitation de l'air ou l'humidité relative, mais également des propriétés internes de la pierre. Les principaux facteurs de contrôle de l'évaporation dans les roches sont les caractéristiques de son réseau poreux (distribution, connectivité...) qui détermineront les modalités et donc la cinétique de la circulation des fluides. La dynamique d'évaporation des fluides dans la roche suit, en l'inversant, la même succession d'étapes que l'imbibition d'un fluide dans une roche par capillarité (Rose 1963a ; 1963 b ; 1968 ; Rousset-Tournier 2001)

Pour réaliser cet essai, les échantillons, dont les dimensions ont été mesurées et préalablement saturées en eau jusqu'à atteindre un poids constant grâce à une mesure préalable de porosité totale à l'eau (III.3.4.3, page III-296), sont conditionnés dans un manchon en matière plastique afin de ne laisser que la surface supérieure du bloc exposé. Le montage est ensuite rendu étanche par un scellement au ruban de téflon dont l'ajustement permet une plus grande précision que le manchon seul. Cet assemblage laisse donc une seule face de la pierre dégagée afin de permettre l'évaporation des fluides et l'établissement d'un flux unidirectionnel (Mertz 1991 ; Thomachot 2002 ; Beck 2006).

L'échantillon, pesé avant et après avoir été emballé, est placé dans une enceinte étanche afin de s'affranchir de l'agitation de l'atmosphère dont l'influence dégraderait la qualité des mesures (Rousset-Tournier 2001 ; Thomachot 2002). Un taux d'humidité de 33 % est maintenu grâce à la présence de saumures (Chlorure de Magnésium hydraté,  $MgCl_2 \cdot 10H_2O$ ) dans la partie inférieure de l'enceinte (Figure III-88). La perte de masse des échantillons est enregistrée quotidiennement, jusqu'à atteindre des poids constants, afin de retracer la dynamique d'évaporation de l'eau.

La cinétique d'évaporation se présente en trois phases successives dont la première phase est caractérisée par une perte de poids rapide et linéaire. Cette partie du processus correspond à une désaturation de l'échantillon à flux constant  $F$ . Ce flux est défini par la valeur de la pente de ce segment de la droite (Figure III-89). Au cours de cette phase, la surface de l'échantillon reste humide, sans cesse alimentée par les apports capillaires. Il y a donc continuité hydraulique entre la surface où se produit l'évaporation et l'intérieur de la pierre (Beck 2006). Les facteurs de contrôle de cette phase sont principalement externes,



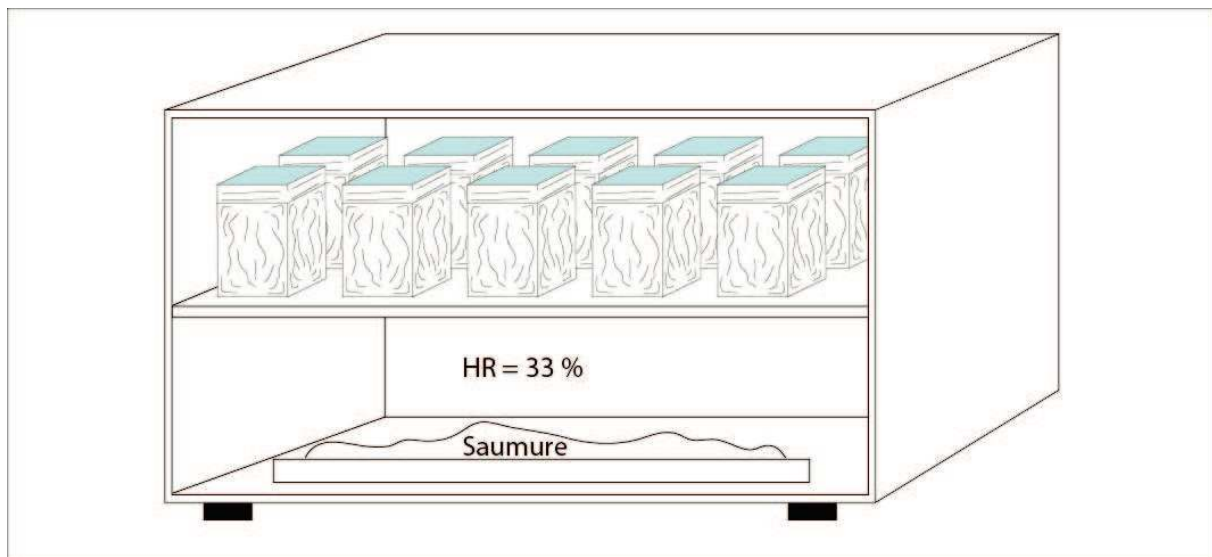


Figure III-88. Expérience séchage d'échantillons de pierres poreuses

mais des facteurs géométriques comme la rugosité de la surface ou la géométrie du réseau poral peuvent également influencer la valeur du flux (Rousset-Tournier 2001). Cette phase se poursuit tant que les apports capillaires sont suffisants pour alimenter la surface d'évaporation de l'échantillon.

La seconde phase (Figure III-89) commence par un début de ralentissement significatif du flux d'évaporation cette inflexion de la droite commence à partir d'un degré de saturation spécifique appelé degré de saturation critique ( $S_c$ ). Ce point caractérise d'une part le pourcentage d'eau encore contenu dans l'échantillon et d'autre part un changement de régime dans les mécanismes de séchage de la roche. La valeur de  $S_c$  est influencée par le degré d'humidité relative de l'environnement, mais est en revanche indépendante du degré de saturation initial de l'échantillon puisqu'elle est dépendante des caractéristiques intrinsèques de celui-ci (Hammecker et Jeannette 1994 ; Rousset-Tournier 2001). Au cours de cette phase, correspondant à un régime transitoire entre deux phases linéaires, il y a une rupture de la continuité hydraulique et une interruption des transferts capillaires. La surface d'évaporation n'est plus alimentée et s'assèche progressivement tandis que le processus de diffusion de la vapeur d'eau participe de plus en plus au processus de transfert de fluides.

La dernière phase est marquée par la poursuite d'une perte de masse, de nouveau linéaire, mais beaucoup moins rapide (Figure III-89). La surface de l'échantillon est désormais sèche et les mécanismes de diffusion par évaporation des fluides au sein du réseau poreux sont largement dominants. Si l'eau liquide existe encore au sein des pores de la roche, elle ne se déplace plus par capillarité. Cette dernière phase est contrôlée par la structure porale de la roche (Rousset-Tournier 2001 ; Beck 2006). Cette phase prend fin avec le retour à l'équilibre de la roche avec son environnement.

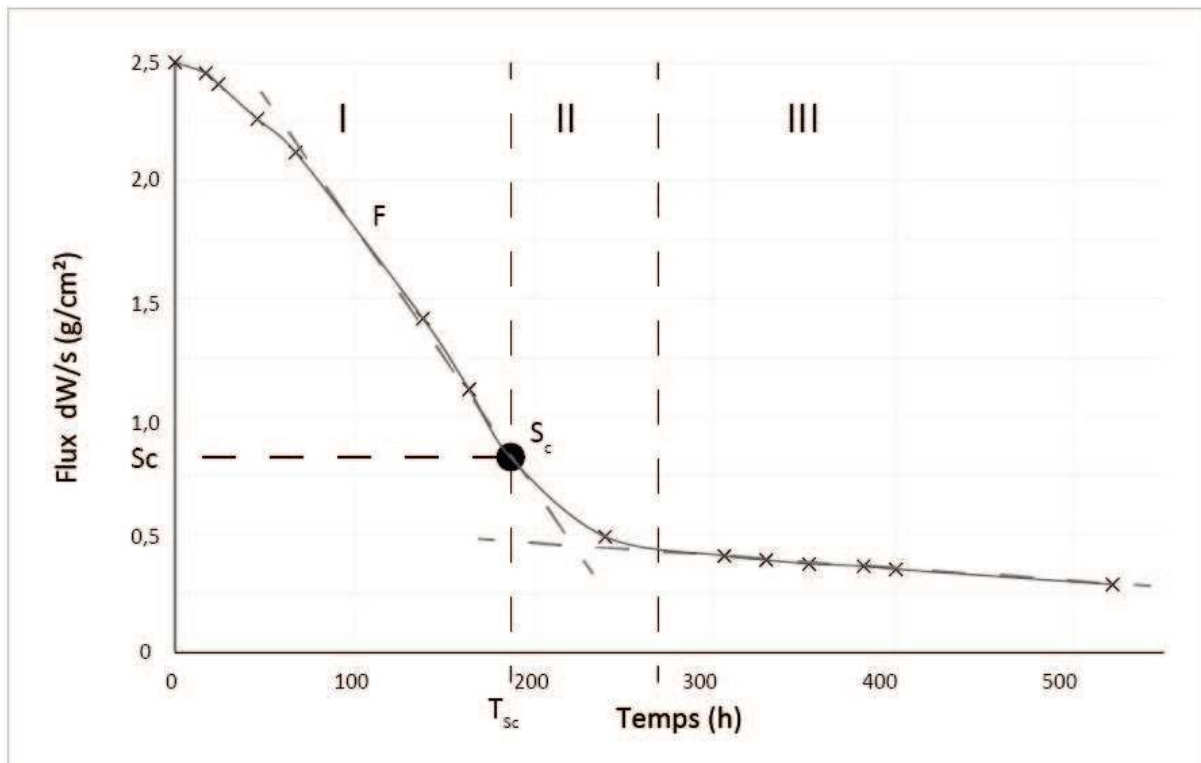


Figure III-89. Cinétique de séchage d'un calcaire poreux : identification des trois phases d'évaporation des fluides F : Flux ; Sc : Saturation critique ; Tsc : temps d'atteinte de la saturation critique (Rousset-Tournier 2001; Thomachot 2002)

### Résultats :

**Cinétique d'évaporation :** Les résultats de ces mesures sont indiqués dans le Tableau III-20. Les valeurs des paramètres de cinétique d'évaporation et les courbes pour chaque échantillon sont rassemblées en Annexe 49 et Annexe 50. La projection de ces données sur le plan de l'Arc se trouve en Annexe 48.

Les paramètres d'évaporations (Tableau III-21) semblent montrer une répartition selon deux grands ensembles. Un premier groupe avec des flux d'évaporation faibles, inférieurs à  $-0,02 \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , qui rassemble aussi bien des pierres de soubassements que des pierres des élévations (dont les pierres de corniches). Puis, un second groupe de pierres caractérisé par des flux d'évaporation importants à l'échelle de cet échantillonnage, soit supérieurs à  $-0,055 \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Les cinétiques de séchage (Figure III-90) sont très variées au sein des échantillons comparés. L'examen du flux, indépendamment d'autres paramètres, montre néanmoins une répartition selon deux grands ensembles Figure III-90. Ces groupes sont classés selon un découpage arbitraire en, d'une part, un ensemble de pierres aux flux d'évaporation de phase 1 (F1) faible, inférieure à  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , et d'autre part, un ensemble de pierres aux flux F1 fort, supérieurs à  $5 \cdot 10^{-2} \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Si les valeurs de F1 élevées correspondent intégralement au groupe composé d'échantillons appartenant aux élévations (colorés en rouge), il n'en va pas de même pour le groupe composé des valeurs faibles. Ce dernier regroupe en effet des échantillons issus indifféremment de tous les groupes d'utilisation des matériaux. Ce paramètre n'est donc pas le seul à prendre en compte pour discerner une logique d'emploi.

La représentation graphique du flux F1 en fonction de la saturation critique (Sc ; Figure III-91) permet de regrouper plusieurs ensembles d'échantillons. Comme précédemment, deux grands ensembles sont bien individualisés en fonction du flux F1 avec des valeurs faibles d'un côté et des valeurs élevées de l'autre. Mais au sein des valeurs de F1 faibles, il est également possible de construire des regroupements qui correspondent à l'usage architectural de ces différentes pierres. Pour cet ensemble, trois groupes ressortent avec des pierres utilisées dans les soubassements (30 et 90 %), dans les corniches (60 et 75 %) et dans les élévations 12 et 35 %.

Échantillons	Évaporation (HR = 33%)		
	F1 (g.cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	SC (%)	TSc (h)
BART b	-7,4 .10 <sup>-3</sup>	54,4	187,5
BART a	-4,1 .10 <sup>-3</sup>	81,1	24,1
Lut IV b	-6,3 .10 <sup>-2</sup>	51,8	164,0
Lut IV a	-7,3 .10 <sup>-2</sup>	33,5	187,5
Lut III d	-8,1 .10 <sup>-3</sup>	55,5	187,5
Lut III c	-5,6 .10 <sup>-3</sup>	68,3	45,7
Lut III b	-4,4 .10 <sup>-3</sup>	67,1	67,1
Lut III a	-9,3 .10 <sup>-3</sup>	52,2	164,0
Lut II	-6,7 .10 <sup>-2</sup>	32,7	187,5
Lut I d	-7,3 .10 <sup>-2</sup>	36,2	240,0
Lut I c	-6,7 .10 <sup>-2</sup>	50,6	187,5
Lut I b	-5,6 .10 <sup>-2</sup>	44,4	187,5
Lut I a	-6,2 .10 <sup>-2</sup>	40,3	240,0
SAV	-6,7 .10 <sup>-2</sup>	44,8	187,5

Tableau III-21. Synthèse des paramètres de capillarité mesurés pour tous les calcaires testés F1, SC et TSc (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches)

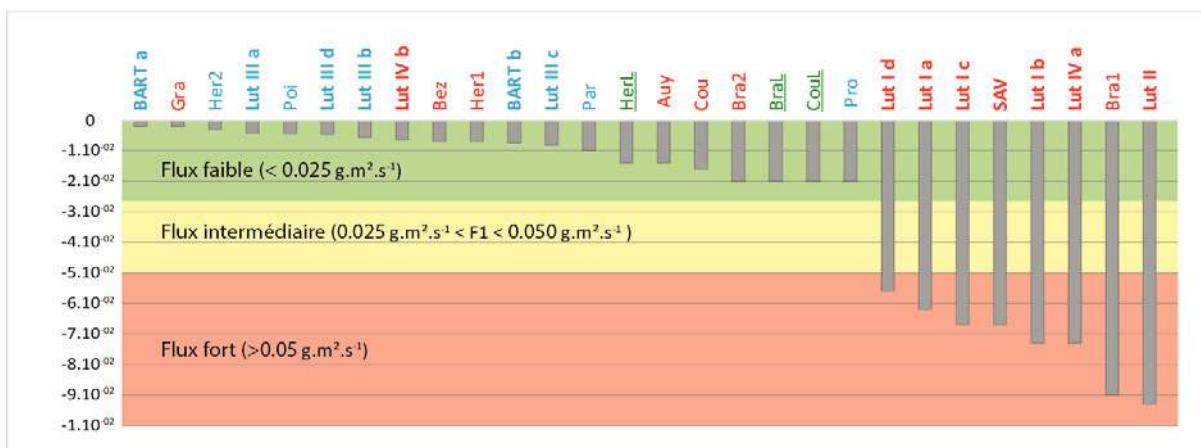


Figure III-90. Flux d'évaporation en phase 1 F1 des échantillons (F1 en g.m<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>) des différentes pierres (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches ; en gras les échantillons de ce travail.

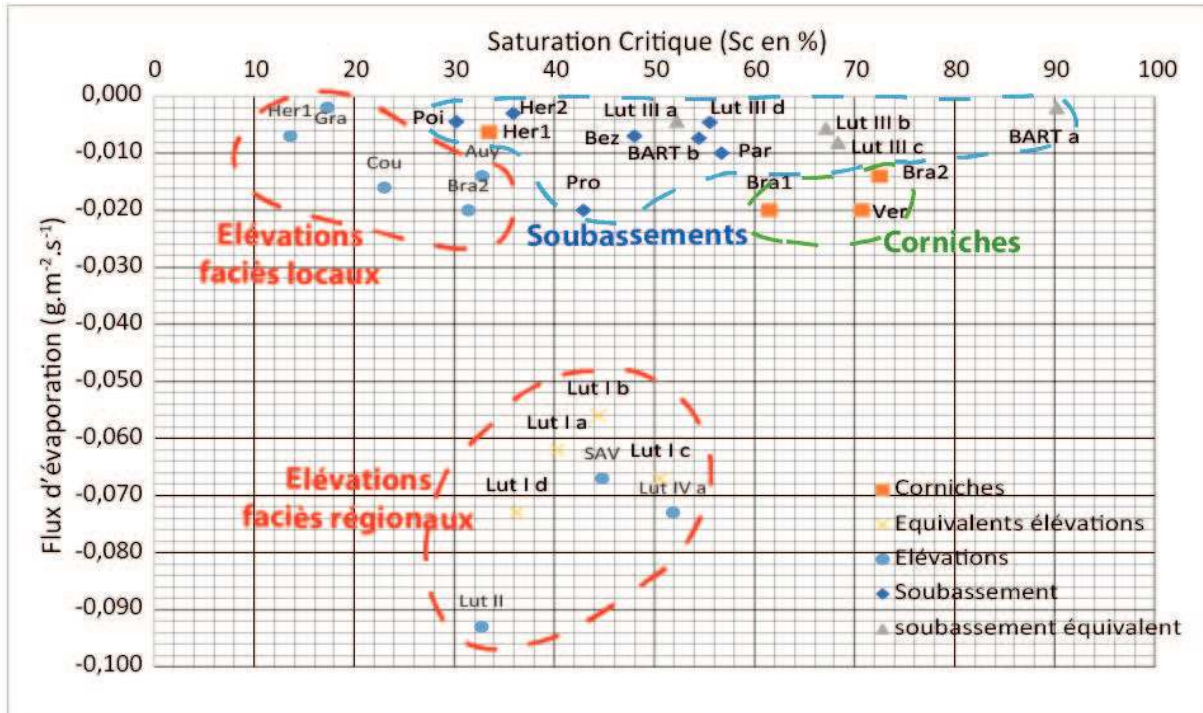


Figure III-91. Flux d'évaporations de la phase 1 F1 ( $\text{g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) en fonction de la saturation critique (en % ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches)

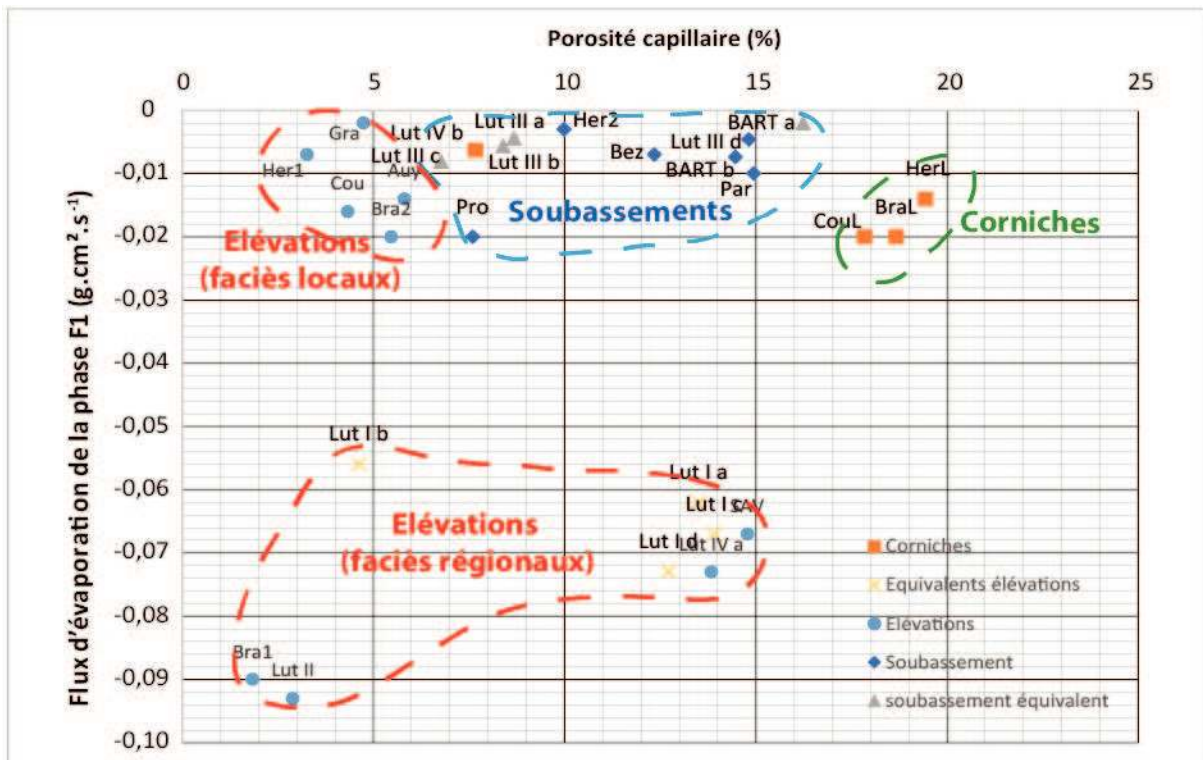


Figure III-92. Représentation du flux d'évaporations de la phase 1 F1 ( $\text{g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) exprimé en fonction de la porosité capillaire (en % ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches)

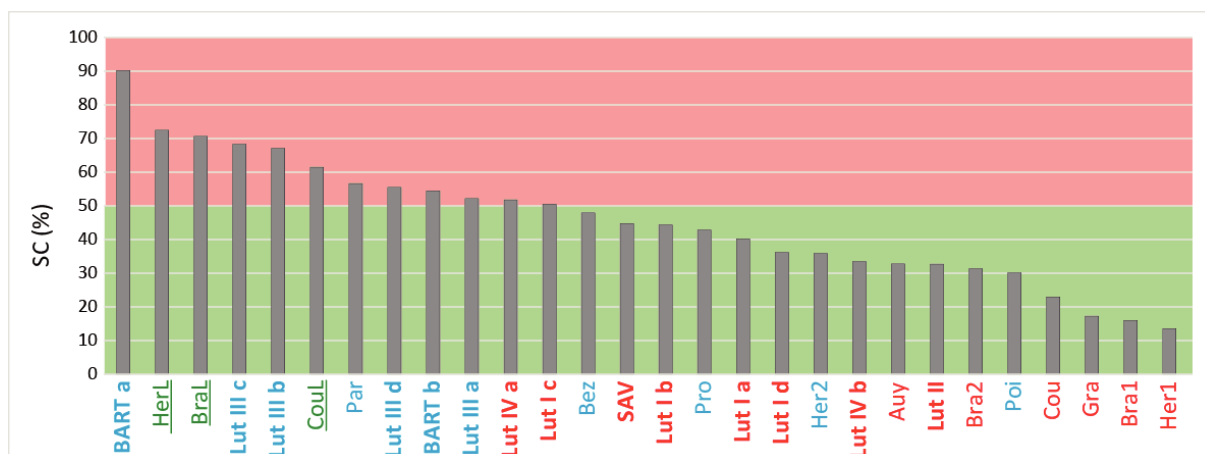


Figure III-93. Saturation Critique SC (en %) des différentes pierres (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches ; en gras les échantillons de ce travail, 2014).

L'examen de la saturation critique SC, montre également une répartition selon deux grands ensembles Figure III-93. Ces groupes sont classés selon un découpage arbitraire en, d'une part, un ensemble de pierres à la saturation élevée (> 50 %), et d'autre part, un ensemble de pierres à la saturation faible (< 50 %). Le premier groupe correspond à des échantillons appartenant aux élévations (colorés en rouge) auxquels s'ajoutent quelques échantillons de pierres de soubassement d'origine locale. Inversement, le second groupe correspond principalement aux échantillons de pierres de soubassements et leurs équivalents de carrières. Il faut souligner à nouveau dans ce groupe la présence des échantillons de calcaires à milioles utilisés dans les corniches et les entablements. Cependant la valeur de Sc, indicative de la rupture de continuité hydraulique ne reflète qu'imparfaitement l'importance du phénomène si elle n'est pas rapportée à la dimension du réseau poral. Cette caractéristique est la porosité capillaire et est obtenue en ramenant la saturation critique au volume poral ( $SC \% \times Nt \%$ ). C'est ce paramètre qui a été représenté en fonction du flux F1 dans le graphique suivant (Figure III-92).

À nouveau, cette représentation permet d'individualiser plusieurs groupes de pierres qui correspondent tous à des groupes de positions architecturales. Ces groupes sont cohérents entre eux et définis d'une part grâce par les calcaires avec de faibles flux d'évaporation F1, intégrant toutes les positions architecturales et d'autre part ceux avec les flux d'évaporation F1 importants correspondant tous aux échantillons des élévations d'origine régionale. Pour les premiers calcaires, la porosité capillaire apparaît également comme un paramètre prépondérant. Se distinguent alors parfaitement dans cet ensemble trois sous-groupes. Le premier associe faible flux à faible porosité capillaire (<6 %) et correspond à des échantillons de calcaires locaux utilisables dans les élévations. Le second groupe, associe faible flux à des porosités capillaires faibles à moyennes (à l'échelle de l'échantillonnage soit < à 15,5 %). Et enfin un troisième groupe, légèrement dissocié des deux précédents, qui associe faible flux F1 à des porosités capillaires moyennes. En dernier lieu, les calcaires correspondant aux calcaires des élévations (rassemblant ceux issus du monument et leurs équivalents) possèdent des porosités capillaires assez étalées depuis de faibles valeurs jusqu'à des valeurs moyennes (< 15 %). Cette représentation permet de bien décrire une partie des liens entre les usages architecturaux des pierres, leurs porosités et les transferts hydriques.

Enfin, la mise en relation des flux d'évaporation en fonction des cinétiques d'imbibition capillaire permet d'apprécier les relations entre les paramètres de transferts hydriques à l'intérieur des pierres (Figure III-94). La projection de ces deux paramètres montre toujours une répartition des échantillons en fonction de leur utilisation architecturale. Les calcaires régionaux, issus en partie des élévations de la Porte de Mars sont bien individualisées associant fortes vitesses d'imbibition capillaire et importants flux d'évaporation F1. Comme pour les paramètres précédents, les calcaires de soubassements, des corniches et les pierres des élévations à faciès locaux sont regroupés vers les faibles valeurs du flux d'évaporation F1.

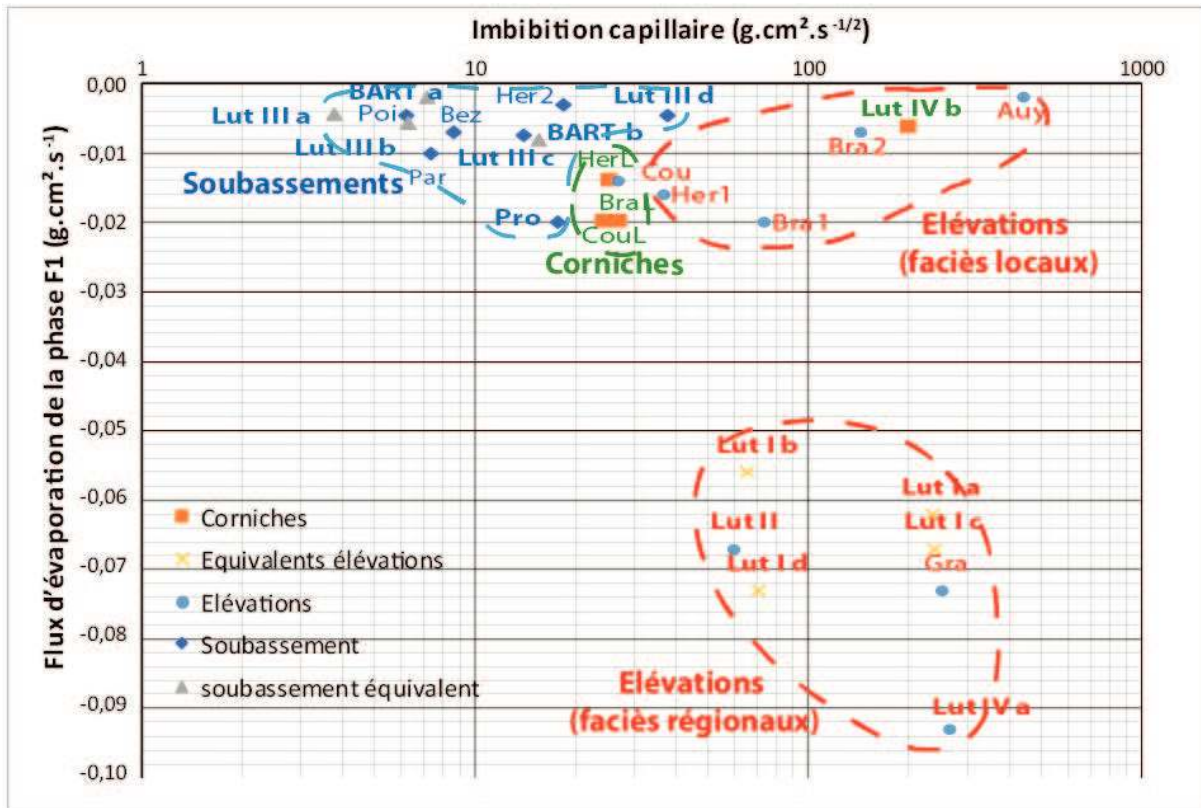


Figure III-94. Représentation du flux d'évaporations de la phase 1 F1 ( $\text{g.cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) exprimé en fonction de la cinétique d'imbibition capillaire (en  $\text{g.cm}^2.\text{s}^{-1/2}$  ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches)

Pour ces trois groupes de calcaires, les cinétiques d'imbibition capillaires sont très étalées. Elles se répartissent depuis les très faibles valeurs jusqu'à celles beaucoup plus importantes déjà observées pour les élévations. Ainsi, les pierres de soubassements sont caractérisées par l'association entre faible cinétique d'imbibition et faibles flux d'évaporation. Les pierres locales des élévations sont caractérisées par de faibles valeurs du flux d'évaporation F1 et des cinétiques d'imbibitions moyennes à élevées, et enfin les calcaires des corniches présentent des valeurs qui peuvent être considérées comme intermédiaires entre les deux précédents groupes. Le cas de l'échantillon Lut IVb est intéressant dans cette projection, car il est projeté dans un espace qui ne correspond pas à son utilisation architecturale. Ce dernier ayant été longuement exposé à l'altération en plus d'être issu d'un faciès à fortes variations latérales devrait probablement être l'objet de mesures en répliques afin de vérifier sa représentativité.

### 3.5. Synthèse des caractérisations pétrophysiques

Synthèse des propriétés pétrophysiques pour les échantillons de cette étude et comparaison avec les matériaux du pays rémois étudié par Turmel (2014).

Les caractérisations pétrophysiques ont mis en évidence des spécificités propres à chaque groupe en fonction de leurs positionnements architectural. Ces caractéristiques sont synthétisées dans le tableau suivant (Tableau III-22).

Pétrographie	Porosité totale		Distribution des rayons d'accès aux pores		Transferts hydriques			
	$N_t$	$N_{48}$	$N_p$	$N_{HG}$	Classes de porosité	Capillarité (C1)	Evaporation (F1)	Saturation critique (%)
<b>Corniches et entablements</b> Grainstones à packstones	< 20%	$10 < N_{48} < 20\%$	$1 < N_p < 5\%$	< 20%	Macroporeux	$> 50 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$	$> 0.025 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	> 50%
<b>Elévations</b> Packstone grainstones pour les restaurations	> 20%	> 20%	> 22%	> 20%	Infra-et Mésoporeux	$< 50 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$	$< 0.05 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	< 50%
<b>Soubassements</b> Socle : Packstones à grainstones Assise de réglage : Wackestones	< 20%	< 15%	< 22%	< 20%	Principalement infraporeux	$> 50 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$	$> 0.025 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	> 50%

Tableau III-22. Synthèse des propriétés pétrophysiques des calcaires engagés dans les différentes positions architecturales de la Porte de Mars

## 4. Conclusions partielles

Après avoir fait l'état de l'art autour des solutions techniques de documentation et d'intégration des informations autour des études de monuments, il s'est progressivement imposé l'idée qu'une solution commerciale intégrée serait inadaptée. Il a donc été choisi de mettre en œuvre un ensemble de procédés et d'outils afin de **construire une approche propre de documentation de l'édifice**. Cet ensemble de procédés et de techniques associés au sein d'une chaîne opératoire complète, depuis l'acquisition jusqu'à l'obtention de résultats fiables. Cette chaîne opératoire est basée en premier lieu sur la construction d'une maquette numérique géométriquement fiable et à l'échelle à partir des méthodes **de modélisation 3D par photogrammétrie**. Les données dérivées de cette modélisation ont été amenées à supporter une grande partie de la documentation pluridisciplinaire des façades de l'édifice. Cette approche **repose également sur l'exploitation de ces données grâce à des SIG** dont l'architecture générale associée à la présence de différents outils est apte au stockage et à la manipulation de données de nature et d'origine très variés. Ces fonctionnalités permettent de supporter les informations et à la fois d'enrichir et de porter les informations autour du bâtiment de manière hiérarchisée et fiable selon des arborescences logiques. La finalité de ces choix étant à la fois d'offrir une solution peu onéreuse et offrant des possibilités avancées de quantifications.

L'étude des **matériaux de construction originels** de la Porte de Mars a permis d'identifier l'utilisation de cinq grands types de calcaires lutétiens :

- Les calcaires tendres à *Ditrupa Strangulata* ;
- Les calcaires lumachelliques à *Ostrea* ;
- Les calcaires à milioles et *Orbitolites* ;
- Les calcaires à cérithes et milioles ;
- Les calcaires lacustres à Limnées.

Et pour **les parties restaurées** du monument, **deux types de calcaires disposés en grand appareil** :

- Des blocs d'Oolithes vacuolaires (calcaires de type pierre de Savonnières) ;
- Des calcaires à milioles et lamellibranches légèrement dolomitiques.

À ces matériaux, il convient d'ajouter tous ceux utilisés sous la forme de moellons ou de blocs de moyen appareil. Chacune de ces phases de restauration a été identifiée et caractérisée par une combinaison entre **la nature des pierres et leurs modalités d'assemblage** décrivant ainsi des « **faciès de restauration** ».

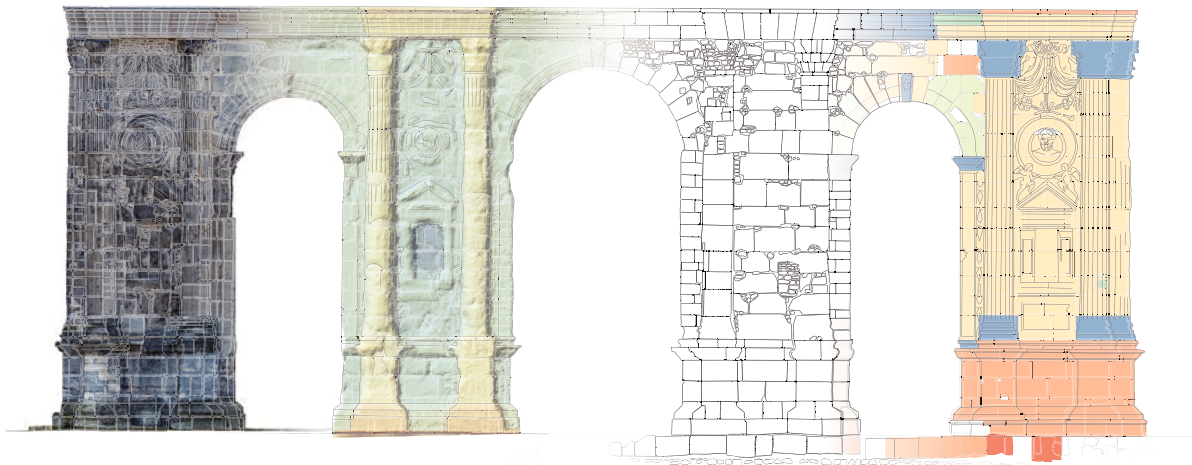
Les matériaux originels du monument proviennent tous de sites d'extractions localisés sur les **plateaux de calcaires lutétiens du Soissonnais et du Laonnois**. Cependant, ce secteur carrier a fait l'objet d'une intense exploitation de ces calcaires qui rend peu probable la possibilité de retrouver des pierres identiques à celles de l'édifice. L'organisation rationnelle des matériaux de la Porte de Mars respecte en tous points l'organisation décrite dans le chapitre précédent.



Le diagnostic et la cartographie des altérations des pierres de façades de la Porte de Mars ont montré une dégradation extensive de ses façades. Les dégradations des **soubassements** étaient dominées par les **croûtes noires et les colonisations biologiques**. Les élévations quant à elles présentent de nombreuses **traces d'érosion, des pertes de matières et des inflorescences** sur les pierres les plus anciennes auxquelles s'ajoutent des desquamations pour les parties datant du XIX<sup>e</sup> siècle. Les **façades Nord et Ouest** sont les plus impactées.

Les arguments précis de rationalisation des matériaux entre les différentes parties du monument ne sont perceptibles qu'après en avoir caractérisé les propriétés pétrophysiques. Les capacités de transfert hydriques dans les réseaux poraux ont mis en avant une sélection très homogène **des pierres de soubassement** qui ne s'explique que par **une faible porosité et une faible capillarité**. Pour **les élévations** en revanche, le choix des calcaires est beaucoup plus large. Toutes les pierres ont néanmoins en commun **de fortes porosités et capillarités**. Ces caractéristiques combinées à une **saturation critique faible** et à des faciès parfois granulaires conduit à une **sensibilité de ces pierres vis-à-vis des facteurs de dégradation environnementaux**. La rationalisation de l'usage des pierres pour leur mise en place dans les différentes parties de l'architecture de l'arc passe donc par une **bonne connaissance de leurs propriétés capillaires notamment**.

## CHAPITRE IV : DISCUSSION GÉNÉRALE



De l'orthophotographie au relevé des matériaux, intégration séquentielle de l'information

« La joie de voir s'élever une construction console  
l'architecte d'ignorer le sort qu'on lui réserve »

*Eugène Cloutier  
Croisières (1963)*



## 1. Choix et utilisations des matériaux de construction pendant l'Antiquité

Le choix des matériaux est un des points clés dans la construction. En effet, c'est en premier lieu ce choix et la mise en œuvre des matériaux choisis, qui conditionnent la solidité et la durabilité du bâtiment (Dessales 2011). Le choix des matériaux de construction relève de plusieurs contingences d'ordre technique ou technologique, mais aussi de nombreux facteurs d'ordre sociohistorique (Dreesen et Dusar 2004 ; Gomez-Heras *et al.* 2010), mais aussi économique (Pasquini 2020 ; 2017). De fait, l'apparition de la *tegula* concomitante de la conquête de la Gaule (Buchenschutz 2004) constitue un marqueur fiable de l'acculturation antique dans le bâti. Cependant, ces facteurs culturels ne sont pas nécessairement prédominants dans les choix d'utilisation de matériaux. D'autres contraintes pragmatiques, intrinsèques aux matériaux et à l'environnement peuvent être prédominantes dans les choix réalisés par les constructeurs (par exemple près des bassins ardoisiers, l'utilisation d'ardoise pour la couverture à l'époque romaine (Cartron 2019). En effet, la possibilité de se fournir abondamment et à un coût raisonnable en matériau de qualité esthétique et technique peut constituer l'impératif principal dans les circuits d'approvisionnement des lapidaires. Il a par ailleurs été mis en évidence un lien direct entre coûts d'extraction et/ou de transport avec les propriétés intrinsèques des matériaux (Martínez-Torres 2007), qui conduit à préférer globalement les matériaux issus d'exploitations proches s'ils répondent aux critères d'utilisation préalablement définis par les constructeurs.

### 1.1. Une rationalisation dans l'emploi des matériaux en œuvre

Pour Dessales (2017), il existe deux paramètres principaux dans le choix des matériaux de construction. En premier lieu, ce sont des critères économiques qui guideraient ces choix avec l'objectif de ne pas alourdir le coût global du chantier par des frais logistiques trop importants. En effet, pour certains chantiers bien documentés, la partie liée à la production et à l'acheminement des matériaux peut s'élever jusqu'au tiers de l'enveloppe de financement du projet (DeLaine 1997). En second lieu, de l'emploi rationalisé des matériaux dépendrait le développement de la compréhension et du degré de maîtrise des « lois statiques » par les architectes et les constructeurs (Lancaster 2005). Cependant pour Vitruve « *Le choix des matériaux qu'il convient d'utiliser n'appartient pas à l'architecte, pour la raison qu'on ne trouve pas en tous lieux toute espèce de matériaux, ainsi que cela a été exposé dans le premier livre ; c'est en outre au propriétaire qu'il appartient de décider s'il veut construire en brique crue, en moellons ou en pierre de taille* »<sup>84</sup>. Certains choix de matériaux sont donc du ressort du propriétaire (ou financeur), d'autres du maître d'ouvrage (l'architecte), d'autres d'un maître d'œuvre et des ouvriers (les constructeurs). Dans une construction, il y a donc, au plus, trois niveaux de choix des matériaux qui s'intègrent successivement jusqu'à la construction finale.

La rationalisation de l'usage des matériaux dans les techniques de construction de l'agglomération passe par l'emploi de la terre cuite (cf. chapitre 1.5). Pour ces terres cuites architecturales, il est également fait mention d'une rationalisation de l'emploi des briques et pierres dans les élévations des voûtes en fonction de leur densité (Lancaster 2005 ; Dessales 2011), celle-ci diminuant progressivement en fonction de l'altitude croissante des assises. L'usage de matériaux spécifiques (roches volcaniques) pour les soubassements et de calcaires

<sup>84</sup> « *Quid autem copiarum oporteat uti, non est architecti potestas, ideo quod non in omnibus locis omnia genera copiarum mascuntur, uti in primo volumine est expositum ; praetera in domini est protestate utrum laterici an caementicio an saxo quadrato uelit adificem* » (traduction CUF)

pour les élévations de certains édifices de Pompéi confirme également l'emploi rationalisé des matériaux dans la construction italique. Dans le cas de Reims, une tendance similaire n'a pas été mise en évidence pour les voûtes en terre cuite tant elles sont rares. Cependant, l'utilisation très spécifique de deux calcaires très poreux (et donc de densité apparente faible) dans les voûtes de la Porte de Mars semble indiquer que cela pourrait être également le cas ici. Les matériaux de construction employés à *Durocortorum* présentent des usages également très optimisés, dans tous les compartiments de l'architecture, qu'elle soit privée ou publique. Cela s'exprime aussi bien par une maîtrise des approvisionnements en pierres, mais surtout par une connaissance très fine des caractéristiques intrinsèques de chaque type de pierre afin de les qualifier dans un emploi et en particulier de leurs capillarités.

Les connaissances empiriques concernant la rationalisation des usages des matériaux lithiques en fonction de leurs qualités, acquises par les constructeurs de l'agglomération entre la fin de la Protohistoire et l'Antiquité, sont probablement issues d'une expérience déjà préexistante malgré des modalités de construction totalement différentes. En effet, la présence d'extraction de pierres préexistait à la généralisation de son usage dans la construction, ces dernières étant par la suite reconverties ou élargies pour répondre à cet usage. Il est donc envisageable que ces connaissances soient issues d'un transfert des savoir-faire gaulois qui, confrontés à l'évolution des usages de la construction, ont transposé leurs méthodes à celle-ci. Il s'agirait, à l'opposé d'autres régions, d'une adaptation des méthodes pour bénéficier des évolutions des techniques de construction introduites par les Romains et non pas d'un changement radical lié à la Conquête. Au cours de l'Antiquité et à travers l'ensemble de l'Empire, la période a été marquée par des évolutions conséquentes des techniques constructives encouragées par une compréhension de plus en plus fine des matériaux (Dessales 2014). Cependant, ces évolutions sont difficilement appréciables à l'échelle de l'agglomération de *Durocortorum* en raison d'une part de l'évolution urbaine au cours de la période et d'autre part de la très faible représentation des monuments préservés. Il reste difficile de lire des évolutions entre le Haut Empire et la période tardo-antique en raison de la réutilisation permanente des matériaux de construction jusque dans les édifices détruits (la très grande rareté des roches décoratives dans les fouilles en est un parfait exemple).

L'exemple fourni par l'étude de la Porte de Mars est une excellente illustration de la rationalisation de l'usage des matériaux qui tranche par ailleurs avec l'organisation des matériaux observés pour les grands bâtiments publics. L'organisation générale s'écarte principalement en termes de modalité de mise en œuvre des bâtiments. La Porte de Mars probablement comme ses trois homologues dans la ville, était intégralement parée en grand appareil tandis que pour les autres grands bâtiments, l'observation des soubassements a montré la récurrence des assemblages en petit appareil. Les différences de vocation de ces bâtiments expliquent totalement la divergence des modalités d'assemblage. La vocation ostentatoire explique l'usage du grand appareil sur l'ensemble du bâtiment. Les soubassements de la Porte sont bâtis à l'aide d'un calcaire présentant une capillarité faible lui conférant d'excellentes propriétés de barrière capillaire bloquant les transferts hydriques depuis le sol. Les pierres utilisées pour

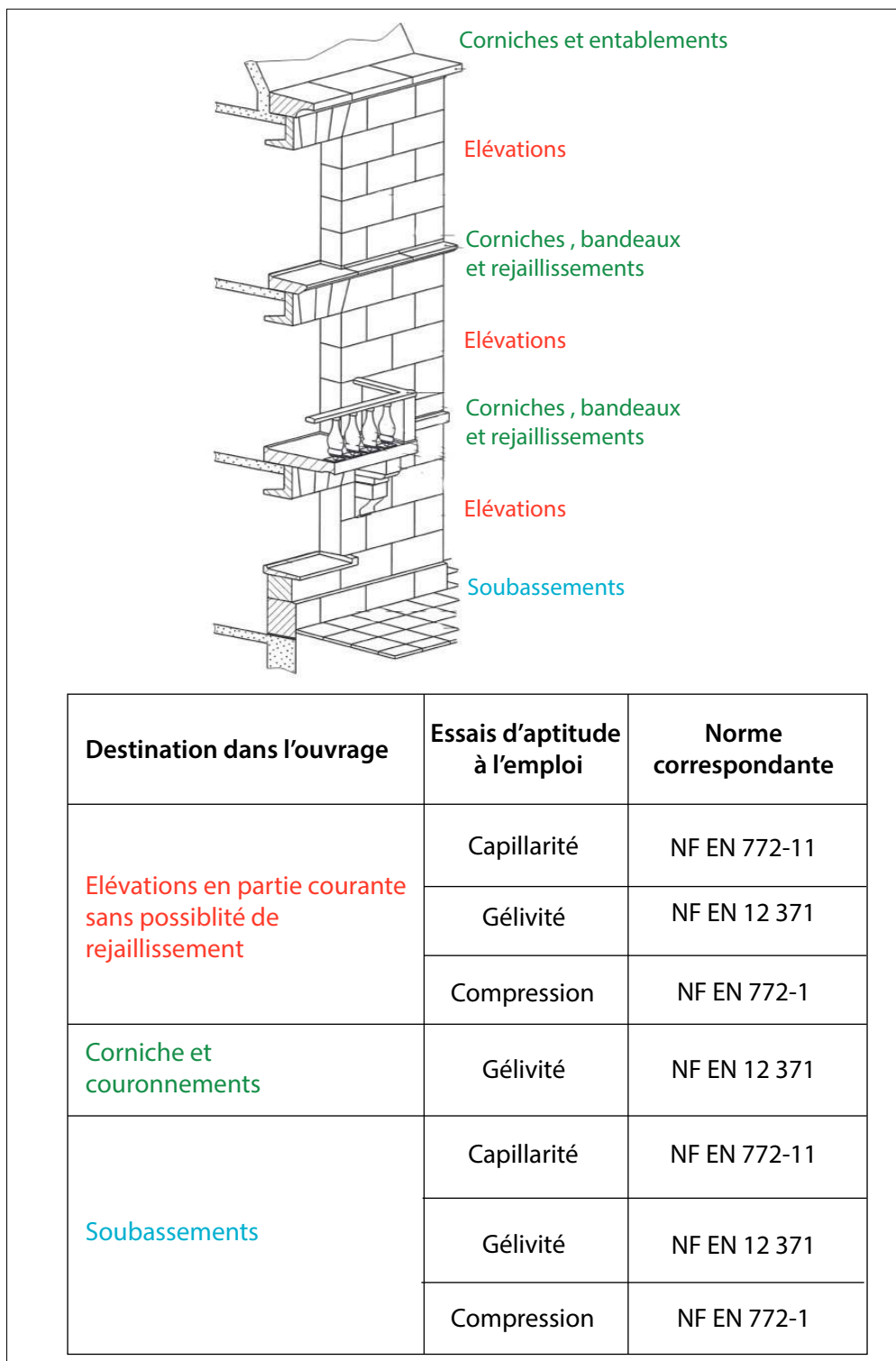


Figure IV-1. Extrait de la norme NF B10-601 pour les préconisations dans les emplois de pierres de construction de grand module

les élévations sont beaucoup plus poreuses et capillaires, avec des densités apparentes plus faibles également. Il est également possible que ces pierres présentent des duretés apparentes plus faibles ce qui les rendrait plus aptes à prendre la taille des décors. Les normes actuelles de choix des pierres dans les diverses parties des bâtiments (Figure IV-1) préconisent encore une organisation similaire des pierres en fonction des propriétés spécifiques à remplir selon des tests spécifiques (capillarité, gélivité, résistance mécanique...). Néanmoins, l'exploitation des caractérisations pétrophysiques de matériaux locaux (Turmel 2014) a permis de comprendre que le choix de la pierre relevait d'une optimisation des approvisionnements, mais que celle-ci n'était pas faite au détriment des qualités intrinsèques des matériaux. En effet, les calcaires locaux utilisés dans ces substructures présentent des propriétés de transferts hydriques proches des matériaux de soubassement en grand appareil de la Porte de Mars. Il y a donc un effort d'optimisation très poussé des matériaux, non seulement en fonction de leur aspect et de leurs propriétés intrinsèques, mais aussi économiques puisque, lorsque cela est possible ce sont des matériaux locaux aux propriétés équivalentes qui sont privilégiés. Cependant, pour confirmer cet aspect de l'optimisation des sources d'approvisionnements, le recours à la caractérisation d'un échantillonnage plus étendu de ces matériaux est nécessaire pour valider pleinement cet aspect.

## 1.2. Les critères de choix des matériaux de construction

La base de ces contraintes dépend de critères de choix inhérents aux matériaux eux-mêmes (comme leur disponibilité, leur facilité de taille ou encore la capacité d'emploi des matériaux). C'est pourquoi les résultats des comparaisons entre aptitudes d'emplois théoriques et emplois réels ainsi que la distribution spatiale des utilisations de matériaux au sein du Pays rémois, apportent des informations sur la cohésion territoriale actuelle, qui découle de choix dans l'utilisation des matériaux.

Sur les quatre critères de choix des géomatériaux décrits par Fronteau *et al.* (2011 ; 2014), nous en retiendrons 3 principaux qui seront évalués pour les différents matériaux utilisés dans l'Antiquité à Reims (Tableau IV-1). Les critères pris en compte dans cette étude sont :

La disponibilité : c'est la possibilité pour un matériau d'être collecté, exploité ou diffusé (ce critère est fortement associé aux capacités d'extraction et de transport et à leur évolution temporelle) ;

Les qualités techniques (qui regroupent l'efficacité et la durabilité *stricto sensu* Fronteau *et al.* 2014) : capacités d'un matériau à répondre pleinement à l'objectif ou à l'effet escompté tout en offrant de bonnes conditions de réalisation du travail désiré (par exemple de rentabilité et de coût, répondre à un cahier des charges) ;

L'ouvrabilité : reflète la capacité d'un matériau à être mis en forme ou mis en œuvre ;

Les roches décoratives qui n'ont été que très succinctement évoquées au cours de ce travail sont donc considérées comme ne relevant que du domaine ostentatoire et non d'un caractère pratique ou technique en dehors de celles utilisées dans les éléments de soutènement. Il convient d'évoquer à titre d'exemple les colonnes en granite de Troad aujourd'hui visibles dans la façade de la Basilique Saint-Rémi (Figure IV-2).

CRITÈRES TECHNIQUES	SCORES	1	2	3	4	5
<b>DISPONIBILITÉ</b>		Matériaux présents sur place	Matériaux présents localement (moins de 5 km)	Matériaux du périmètre local (entre 5 km et 25 km)	Matériaux régionaux (de 25 km à 90 km)	Matériaux d'origine extrarégionale (au delà de 90 km)
<b>QUALITÉ TECHNIQUE</b>		Matériau totalement adapté		Matériau adapté		Matériau inadapté
<b>OUVRABILITÉ</b>		Pas de façonnage nécessaire	Mise en forme réduite	Nécessité de mise en œuvre	Difficile à mettre en forme	Inadapté à la taille

Tableau IV-1. Critères techniques et leurs critères de pondérations pour les pierres de construction

Matériaux de construction	Disponibilité	Qualité technique	Ouvrabilité
Craie – graveluches	1	3	5
Craie - crayons	1-2	3	5
Craie - massive	1-2	3	2
Sables	2 à 3	1	5
Argiles	2 à 3	2 à 3	5
Terres à foulons	2	2 à 3	5
Grès	2 à 3	1-2	3
Calcaires lutétiens (faciès locaux)	3	3	1 à 3
Calcaires lutétiens (faciès régionaux)	4	3	1
Pierres meulières	2 à 3	1	2 à 3
Pierres ornementales	5	1	4

Tableau IV-2. Classification des matériaux de construction utilisés pendant l'Antiquité selon des critères techniques pour l'agglomération de Reims

Le panel de matériaux utilisés classiquement dans les constructions de l'Antiquité a donc été intégré selon ces critères techniques (Tableau IV-2). . Ce tableau est une synthèse des pierres disponibles dans les aires d'approvisionnements de l'agglomération lesquelles sont mises en regard de leurs utilisations préférentielles. Dans le détail, certains faciès comme les calcaires granulaires à miliolites où les calcaires à massifs à cérithes présentent des qualités techniques qui les rendent adaptés à certaines utilisations très spécifiques. En effet, ces deux pierres sont utilisées majoritairement dans la confection des équipements hydrauliques et pour les entablements des bâtiments. À ce titre, les qualités techniques des calcaires lutétiens régionaux du Soissonnais et du Laonnois sont très dépendantes du faciès envisagé. Dans les faits, les calcaires de la partie inférieure du Lutétien moyen (depuis les calcaires à Ditrupa



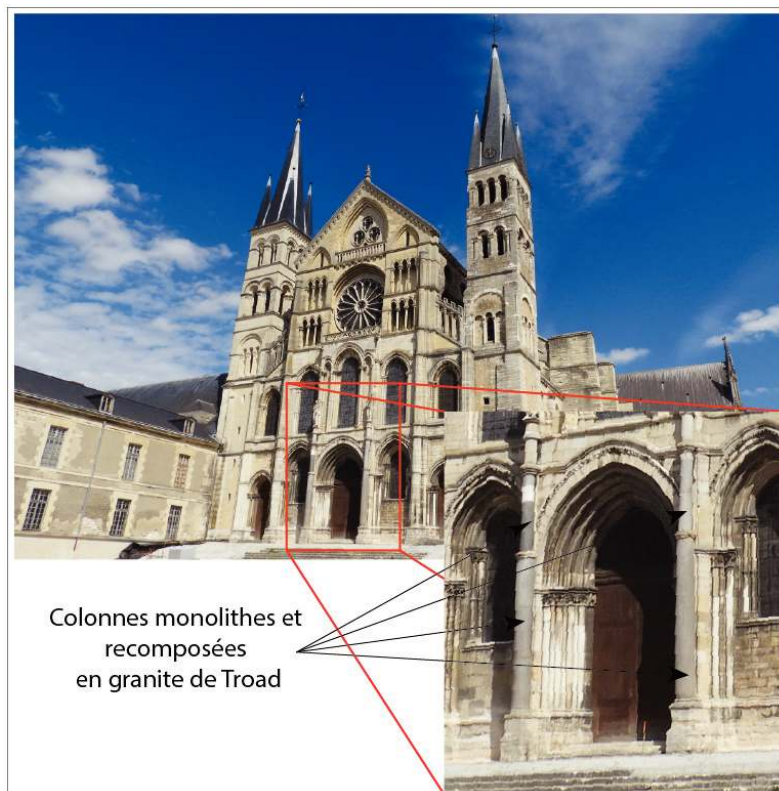


Figure IV-2. Façade principale de la Basilique Saint Rémi dont le porche est orné de part et d'autre de colonnes antiques remployées en granite de Troad

jusqu'au sommet du banc à Vérins) sont très adaptés à une utilisation dans les élévations des bâtiments et pour les éléments architectoniques non spécifiques. Les calcaires de la partie supérieure du Lutétien moyen contenant de nombreuses milioles, aux caractéristiques de conductivité hydrique très différentes, sont utilisés préférentiellement dans les aménagements hydrauliques (aqueducs et fontaines), mais aussi pour la conception d'éléments finement décorés comme les chapiteaux de colonnes ou encore les corniches (entablements et couronnements des bâtiments). Enfin, les calcaires à milioles et cérithes auxquels sont associés les calcaires à Limnées du Lutétien supérieur et du Bartonien sont préférentiellement utilisés dans les soubassements (assises de réglage, socles et dés) des bâtiments et monuments. Les propriétés intrinsèques de ces matériaux d'origine régionale utilisés dans les soubassements sont très proches des calcaires locaux qui composent les soubassements des grands bâtiments publics et des constructions privées à vocation d'apparat, mais disponibles uniquement sous la forme de moellons de petits appareils

L'utilisation de la craie comme matériaux de construction peut questionner tant son usage paraît limité. Cette présence limitée dans l'enregistrement archéologique pourrait en partie au moins s'expliquer par sa grande fragilité vis-à-vis de l'altération dès qu'elle est exposée aux intempéries. Les preuves de l'utilisation de la craie dans la construction sont avérées, principalement comme moellons dans les parements des murs des caves. Ils ont donc fait l'objet d'une extraction dans des sites aptes à fournir des blocs de dimensions suffisantes pour cet usage. Leur conservation dans ces circonstances tient donc beaucoup à leur utilisation souterraine. Les moellons de craie sont en effet très sensibles à la gélifraction dès lors qu'ils sont exposés à l'humidité. Il y a alors peu de possibilités pour que des maçonneries de craie détruites ou abandonnées aient été susceptibles de subsister sur de longues périodes. Leur mise en œuvre dans les élévations de maçonneries par la suite détruites n'aurait été susceptible

de ne laisser que peu de traces compte tenu également de l'efficacité de la récupération des matériaux dans la ville de l'époque. Les matériaux étant intensivement réemployés dans l'agglomération dès qu'ils représentent une capacité à être recyclés. L'usage de la craie dans d'autres utilisations architecturales restera donc purement hypothétique, voire spéculatif, même si celles-ci restent malgré tout plausibles. Cependant l'observation de reliefs de ce matériau en œuvre présente également des obstacles importants puisque la craie par sa nature est un matériel difficilement lisible lorsqu'il est remanié.

Dans le cas de l'architecture funéraire privée, il faut également considérer l'influence difficilement quantifiable du religieux et du coutumier sur les choix des matériaux engagés dans ces constructions. Les habitudes architecturales romaines en la matière tendent à favoriser l'usage de dimensions importantes de blocs afin d'assurer une meilleure durabilité du monument et de lui conférer une dimension ostentatoire. La diversité des pratiques funéraires et de leurs évolutions au cours de l'Antiquité rend par ailleurs complexe l'établissement de règles générales. Cette complexité est d'ailleurs augmentée par la multiplicité des mouvements de population et donc de la multiplicité des pratiques culturelles qui en découlent. L'étude d'isotopes stables réalisée sur des corps de défunts inhumés dans les tranchées de récupération a d'ailleurs démontré qu'ils étaient originaires de nombreuses régions de l'Empire démontrant un caractère fortement multiculturel de la société de l'époque (Cavé *et al.*, à paraître).

L'exploitation préférentielle des ressources proches de l'agglomération se vérifie également dans le cas des extractions de sable à partir des terrasses alluviales et les lambeaux de terrains résiduels proches, préférée à l'exploitation des formations en place sur les reliefs. Il faudrait néanmoins considérer l'exception probable des dépôts de sables localisés sur les flancs des buttes-témoins, dont la proximité apparaît équivalente à celle des terrasses alluviales.

### 1.3. Le remploi des pierres de construction antiques

Au-delà des très rares exemples de conservation dans un état acceptable de constructions antiques dans Reims, l'immense majorité des maçonneries de l'époque a disparu. Loin de refléter une qualité exceptionnelle de leurs constructions, la survivance de ces exemples relèverait plutôt d'un heureux hasard de l'Histoire. S'il est aisément concevable qu'une structure légère, édifiée à l'aide de matériaux périssables, puisse être vue comme éphémère, il faut également reconnaître que c'est aussi le cas de nombreuses constructions à vocation ostentatoire (privée ou publique) sensément plus robustes. La « fin de vie » des bâtiments tout comme de ses constituants peut prendre diverses formes. Ainsi, la superficie importante du site de *Durocortorum* devrait, en l'absence de réemploi, receler de très grandes quantités de matériaux de construction antiques. Le remploi des matériaux de construction revêt de nombreuses formes (Figure IV-3), au cours de l'Antiquité et ultérieurement (ex. : puits de la rue Belin, Rollet 2006a ; Bart *et al.* 2017 ; rempart de l'Antiquité Tardive, Balmelle et Sindonino 2004).

Le passage de la ville dans sa grande enceinte à la ville enclose derrière un rempart monumental à la transition entre le Haut et le Bas-Empire a laissé de nombreux monuments et constructions dans l'espace situé au-delà de la muraille. Ces bâtiments ont été progressivement démantelés pour être réemployés sous diverses formes. Mais cela est également attesté dans le cas de l'espace central du forum pour le Cénotaphe des Dieux Mânes (cf chapitre I ; Van Andringa 2017). La prédation des éléments de construction alors observée se fera selon deux cinétiques différentes. La première est un démantèlement rapide des constructions, soit

déjà ruinées, soit détruites à cette occasion, afin d’approvisionner en pierres le chantier de construction du rempart (Neiss et Sindonino 2004 ; Brunet-Gaston 2008 ; 2012). La seconde est une spoliation organisée, au long court, d’édifices déjà ruinés ou détruits pendant le III<sup>e</sup> siècle, comme le complexe cultuel de la rue Belin (Rollet 2006 b). Les éléments de construction de ce sanctuaire sont alors exploités selon deux filières différentes :

- Le remploi des blocs en l’état, ou après les avoir retaillés/retouchés
- Une exploitation destructive avec pour objectif la production de chaux

Ces modalités de remploi observées au sein de nombreuses constructions antiques de l’agglomération de Reims sont très similaires à ce qui a été observé pour le remploi des macro-outillages lapidaires telles que les meules ou les mortiers (Picavet 2019 ; Buchsenschutz *et al.* 2020 ; Fronteau *et al.* 2022).

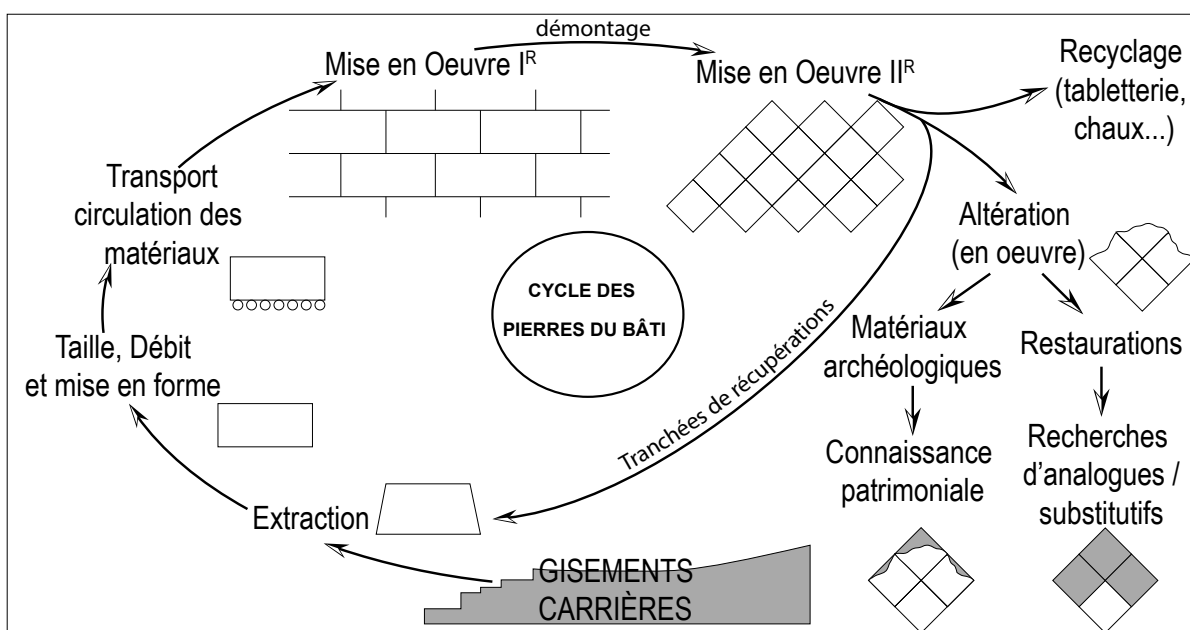


Figure IV-3. Le cycle de vie des pierres du bâti (modifié d’après Fronteau *et al.* 2019)

L’expression ultime du recours intensif au remploi se manifeste à Reims par le nombre important des tranchées de récupération. Ces tranchées enregistrent l’ablation complète des constructions contenant de la pierre jusqu’aux fondations en apportant une réponse pragmatique à des difficultés d’approvisionnement en pierres à l’échelle régionale et locale. Il est d’ailleurs probable que ces difficultés n’expriment pas un empêchement d’accéder à la source, mais une volonté d’accéder à des ressources à moindre coût. Des arguments récents tendent également à remettre en perspective le recours au remploi pour la construction pendant l’Antiquité Tardive (Cavé *et al.* à paraître).

L’étude des matériaux du bâti consiste *in fine* en l’étude des différents usages qui peuvent être fait d’une même pierre. L’analyse critique de ces utilisations définit alors un « cycle » des matériaux déjà évoqué par Fronteau *et al.* (2019). Dans ce cycle, les matériaux suivent une succession de grandes étapes depuis son extraction (ou collecte) jusqu’à leurs emplois dans les maçonneries (plusieurs emplois et remplois envisageables). Il est d’ailleurs possible

de définir des cycles similaires pour chacun des matériaux envisagés tant leurs capacités respectives peuvent favoriser ou au contraire restreindre la durabilité des constructions et les possibilités de emploi. La construction du rempart tardo-antique montre à ce titre l'ampleur de la récupération des matériaux dans la partie de la ville qui lui est extérieure. Le nombre considérablement restreint d'observations des élévations de ce rempart laisse ouverte l'hypothèse qu'il ait pu être intégralement érigé en pierres de récupération ou que seuls ses soubassements aient été constitués de ces matériaux. À ce jour, les arguments concernant les élévations de cette construction sont fragmentaires puisque représentés par une observation unique réalisée à l'occasion des fouilles de la Porte Bazée et du Collège Université (Neiss 1973). Cependant les informations rapportées sont très fragmentaires et éclairent principalement sur les modalités d'assemblage des matériaux sans indication précise sur leur nature (*opus vitatum*; Neiss 1973). Quoi qu'il en soit, il aura néanmoins fallu qu'à la charnière entre la période augustéenne et l'Antiquité Tardive soit approvisionné le chantier d'une fortification de plus de 3 000 m de périmètre, régulièrement flanquée de tours et de portes (Neiss et Sindonino 2004).

Comme conclue Brunet-Gaston (2012), « Même si la durée de vie d'un monument reste limitée par les aléas de l'Histoire et les injures du temps, les pierres qui le composent sont une source d'approvisionnement renouvelable à l'envi, jusqu'à la phase ultime de leur transformation en chaux, où elles concourent une dernière fois à la construction de nouveaux édifices ».

**Le emploi « tel quel » :** Cette modalité de emploi se constate depuis l'Antiquité jusqu'aux périodes modernes. Cette solution qui semble être la plus rapide et la plus pragmatique, permettant aux constructeurs de se procurer rapidement et à un coût très concurrentiel des matériaux de construction, se traduit par le réemploi massif de blocs de construction dans les aménagements défensifs du Bas-Empire au IV<sup>e</sup> siècle (pour le rempart : fouille de la médiathèque et fouille de la section de rempart concomitante à la Porte Bazée (Neiss 1973 ; Balmelle et Sindonino 2004 ; Neiss et Sindonino 2004). Cette modalité de emploi ne semble impliquer qu'un minimum de travaux de mise en forme comme une retouche de module ou un bûchage pour lisser les surfaces (et désacraliser les pierres).

Sur le site de la rue Belin (Rollet 2006b), des stèles funéraires et des blocs architectoniques sont réutilisés en parement du cuvelage de deux puits monumentaux (16 m de profondeur). Certains éléments sont retaillés sur place comme l'atteste la présence de couches de déchets de taille dans la stratigraphie. La prédation semble être dans ce cas associée à la ruine d'un édifice exploité en carrière sans pour autant que le secteur ne soit totalement déserté. Cette occupation est attestée par la construction postérieure des puits, afin de pourvoir d'importants besoins en eau, probablement à destination de troupes à cheval (Chapitre I.3.7.6). Les pierres de emploi utilisées en parement de ces puits ne sont pas réparties aléatoirement selon les profondeurs des assises (Fronteau et Paicheler 2005). Les blocs semblent avoir été sélectionnés en fonction de leurs propriétés intrinsèques en fonction de la hauteur de l'assise par rapport au fond du puits (et au niveau de la nappe phréatique). Les blocs sont positionnés sur des assises plus ou moins basses (et donc susceptibles d'être immergées) selon leurs porosités apparentes (Fronteau et Paicheler 2005). Cela suppose donc, en plus d'une rationalisation de l'organisation du chantier, une excellente connaissance des caractéristiques des pierres en fonction de leur utilisation et des contraintes que cela suggère. Bart *et al.* (2017) s'interrogent également sur l'importance du nombre de stèles funéraires dans ces maçonneries. Ce choix

pourrait s'expliquer par la recherche d'un module spécifique correspondant déjà à celui de ces pierres ou encore par leur disponibilité en abondance sur ou à proximité de ce site à vocation culturelle.

Il faut également citer les diverses preuves de remploi des matériaux de l'aqueduc qui desservait l'agglomération. Dans la synthèse qui lui a été consacrée (Rabasté et Arduin 2010), la récupération des matériaux de cet ouvrage d'art ainsi que son caractère systématique sont largement illustrés. Cette prédation des matériaux s'est exercée rationnellement depuis les dalles calcaires de la base du canal (systématiquement récupérées), sur les meulières des voûtes et des piédroits, et avec une grande efficacité sur les briques de terre cuite des différents passages en tunnel de l'infrastructure<sup>85</sup>. Les maçonneries ont alors fait l'objet d'une véritable exploitation optimisée à la manière d'une extraction en carrière, qui a contribué à faire disparaître l'édifice sur la plus grande part de son tracé. Il est cependant plausible de supposer que l'exploitation de ces matériaux ait eu lieu après la fin de fonctionnement de l'ouvrage (entre la fin du IV<sup>e</sup> début et le début du V<sup>e</sup> siècle ap. J.-C.), c'est-à-dire entre la fin de l'Antiquité et la période altomédiévale (Rabasté et Arduin 2010).

Les preuves du remploi de blocs antiques dans les restaurations du XIX<sup>e</sup> siècle sont nombreuses dans le cas de la Porte de Mars en particulier (cf. chapitre III). Ces usages sont documentés aussi bien grâce aux écrits des restaurateurs de l'époque (en particulier Brunette et Millet), mais également grâce aux représentations contemporaines de ces restaurations (surtout photographiques). Les sources plus récentes sur le monument (Lefèvre 1980 ; Lefèvre *et al.* 1985), relèvent également que la façade méridionale du monument a fait l'objet d'un remontage de certains blocs antiques retrouvés épars au pied de l'édifice et remis en place sans grands soucis de cohérence. Cependant, les auteurs ne précisent pas spécifiquement à quels éléments il est fait référence dans ces sources, ni s'il s'agit d'une méthode de reconstruction récurrente pour les éléments antiques de cette façade.

Les stèles funéraires remployées dès l'Antiquité Tardive sont utilisées dans ces nouvelles constructions après leur désacralisation par martelage (Brunet-Gaston 2012). Le réemploi des blocs peut par ailleurs être polyphasé au cours de l'antiquité, comme le signale Brunet-Gaston (2012) et très étalé dans le temps (Turmel *et al.* 2014). Par ailleurs, l'adéquation entre le matériel choisi et son utilisation est encore recherchée pour l'emploi secondaire de ces pierres. Cela démontre la continuité des savoir-faire détenus par les artisans lapidaires. Cette objectivation des logiques de remploi a par ailleurs été démontrée par Fronteau et Paicheler (2005). En effet, ces auteurs ont prouvé que les faciès calcaires utilisés en remploi dans des puits avaient été choisis en fonction de leurs faibles capillarités pour les parties inférieures avec l'utilisation d'ensembles de matériaux spécifiquement sélectionnés.

#### 1.4. Approvisionnements en matériaux de construction depuis l'antiquité

La disponibilité des matériaux de construction utilisés dans la ville de Reims est influencée fortement par les conditions géologiques de leurs gisements. Mais leurs utilisations relèvent d'un compromis entre leurs qualités intrinsèques qui définit leur positionnement architectural, mais également la distance entre leur site d'utilisation et celui de leur extraction. Cette distance détermine au moins partiellement le coût de la pierre ce qui la réserve donc à une utilisation d'apparat privé ou public.

<sup>85</sup> Les briques issues de cette récupération ont notamment été remployées dans les maçonneries des églises d'Aubérive et étaient encore visibles à la veille de la Grande Guerre. L'église fut détruite pendant le conflit.

**Les stratégies d'approvisionnement** : La romanisation de la Gaule Belgique s'est matérialisée par un changement majeur des pratiques architecturales qui a conduit d'une part à l'utilisation de matériaux jusqu'alors inusités dans la construction et d'autre part à étendre considérablement l'extension des aires d'approvisionnements pour les pierres de construction. Depuis la période protohistorique, les matériaux de construction sont exclusivement d'origine locale, essentiellement périssables, mais bien adaptées aux usages architecturaux de l'époque. Pour l'Antiquité puis pour le Moyen Âge en revanche, des stratégies d'approvisionnement spécifiques et rationalisées ont été mises en œuvre. Ces dernières ont visé à pallier les besoins en matériaux, tout en surmontant les lacunes laissées par les ressources disponibles localement et pouvant requérir l'usage d'importations lointaines. Ces distances peuvent se justifier d'autant plus aisément qu'elles impliquent des matériaux indisponibles *in situ* ou auxquels est attribuée une certaine valeur intrinsèque (culturelle, symbolique ou ostentatoire). Pendant l'Antiquité, les sites d'extraction en pierres de taille ou de pierre à moellons ont connu un développement inédit jusqu'alors. Les quantifications de matériaux nécessaires à l'ensemble des constructions de *Durocortorum*, même très partielles, montrent qu'il a été nécessaire de procéder à l'ouverture de grandes carrières de pierres et de matériaux meubles (sables, granulats, terres à foulon), afin de satisfaire les besoins en matériaux de construction de l'agglomération. Si les preuves archéologiques manquent encore pour l'attribution des sites carriers exploités pour les pierres de tailles locales au cours de l'Antiquité, elles ont cependant été apportées pour l'extraction de matériaux meubles (sables et granulats ; Bundgen et Richez, à paraître).

En revanche, la faible représentation dans le bâti des pierres de taille issues de l'aire locale dans l'enregistrement archéologique antique pourrait trouver plusieurs hypothèses :

- Les pierres provenant de ces exploitations poseraient le problème d'une mauvaise qualité qui leur conférerait des altérations trop rapides en regard de leur usage (à l'image des calcarénites à *Microcodium*). Elles seraient donc mécaniquement peu ou pas utilisées en dehors du périmètre proche de leurs gisements.
- La stratonomie (l'épaisseur maximale des bancs) étant limitée pour ces pierres (généralement inférieure à 0,5 m) ne permettrait pas de réaliser l'extraction de pierres du module nécessaire tout en possédant des propriétés adéquates.

Pour les pierres de taille utilisées pour le grand appareil quadrangulaire et de manière générale pour les matériaux d'apparat, les sites carriers se sont développés dans les secteurs de l'ouest et du nord-ouest de l'agglomération. Cependant la quantité de ces matériaux se montre très difficile à estimer à l'échelle de la ville, du fait de l'intensité de la récupération de ces matériaux consécutive à la destruction des édifices et aux lacunes qui persistent encore autant sur leur nombre que sur leurs dimensions. L'intensité même de ce remploi interroge. Pour être menée à bien, cette récupération a nécessité la présence de travailleurs de force d'origine périméditerranéennes rattachés à la récupération des matériaux destinés à la construction de l'enceinte de l'Antiquité Tardive (Cavé et al. à paraître). Cet épisode constitue une transition majeure entre des pratiques d'approvisionnement en matériaux issus de carrières vers des pratiques principalement orientées vers la récupération de matériaux issus de la déconstruction des bâtiments et des structures en pierres préexistants. La récupération des matériaux de construction des édifices publics aussi bien que privés (monuments funéraires compris), localisés entre l'enceinte augustéenne et l'enceinte tardo-antique, ont fourni une part non négligeable des matériaux de construction utilisés par la suite. Ces changements de modalités

d'approvisionnement sont symptomatiques de cette période de bouleversements politiques et socio-économiques de la fin du Haut-Empire qui a débouché sur le repli des agglomérations sur elles-mêmes. La récupération des matériaux se fait néanmoins dans un contexte où nombres d'édifices sont déjà ruinés et détruits par des incendies dont les traces sont apparues dans la plus grande partie des constructions de l'époque. La datation radiocarbone des ossements des travailleurs<sup>86</sup> attachés à la déconstruction et à la récupération de matériaux montre également que ce processus était légèrement antérieur au début de l'Antiquité Tardive. Ce décalage temporel serait un argument en faveur d'une rupture des approvisionnements distants en pierre de la ville à la charnière entre ces deux périodes. Cette rupture serait représentative d'une crise profonde de la croissance urbaine.

L'agglomération de *Durocortorum* porte l'empreinte d'un très fort déterminisme géologique dans ses approvisionnements en pierre. Déterminisme qui a fortement influencé les choix de matériaux dont les qualités ont été dictées par les contraintes architecturales, doublées de contraintes techniques auxquelles ils devaient répondre. Pour toutes les parties invisibles (fondations, soubassements et blocages), les matériaux d'origine locale sont privilégiés. Cela implique nécessairement une logique pragmatique de limitation des coûts de construction en réduisant les coûts de transport. Cependant, les caractérisations pétrophysiques réalisées par Turmel (2014 ; Annexe 38) et exploitées dans le présent travail ont permis de mettre en avant qu'une grande partie des calcaires locaux présentaient également de très bonnes aptitudes d'emploi dans ces positions architecturales en particulier. Les qualités intrinsèques de ces matériaux locaux sont au moins aussi adaptées aux usages dans les substructures et les soubassements des bâtiments que les calcaires utilisés dans le grand appareil quadrangulaire de la Porte de Mars. Néanmoins, à qualité équivalente, il est fortement probable que les calcaires locaux devaient être infiniment moins onéreux et assujettis à une logistique également bien plus souple. Ces choix de matériaux ont néanmoins été réalisés en conciliant des propriétés pétrophysiques intéressantes, avec des choix techniques judicieux (tels que la double paroi des soubassements du Cryptoportique) tout en satisfaisant à des besoins esthétiques pour les parties visibles (opus soigné et régulier, ostentation de la construction de grand appareil). Pour les élévations c'est en revanche la volonté d'apparat, de signifier une pérennité et l'esthétisme qui prime, d'où l'utilisation des calcaires lutétiens de l'Aisne.

Pour la muraille de l'Antiquité tardive, la logique est différente, les soubassements devant répondre à une double contrainte, à la fois d'ordre stratégique – afin d'assurer la défense du périmètre intérieur de la ville face à des assaillants (nécessité de prévenir de la sape des murailles) –, mais aussi ostentatoire. Cette double contrainte impose également un impératif de vitesse d'édification qui implique en parallèle le recyclage des constructions établies à l'extérieur de cette nouvelle enceinte. Il n'existe à ce jour qu'une seule occurrence d'exhumation des parements de l'élévation de la muraille. Celle-ci a été documentée à la faveur de la fouille de la Porte Bazée par Neiss (1973), où elle est décrite succinctement comme un parement constitué de moellons calcaires assemblés en *opus vittatum*. Cependant, cette description ne contient pas de détails quant à la nature des calcaires engagés dans cette maçonnerie. L'importante quantité de matériel que cela représente rend plausible l'hypothèse qu'au moins une partie de ces moellons aient été issus d'une extraction en carrière, ceci afin de compléter le rempli des nombreux blocs de grand appareil provenant du démantèlement des bâtiments de la frange extérieure de la ville à la charnière entre le Haut Empire et la période tardo-antique. Il est possible de dresser des parallèles avec les murailles contemporaines

<sup>86</sup> Identifiés comme tels par Cavé *et al.* sur des critères anthropométriques, paléogénétiques, paléogénomiques et isotopiques et inhumés dans les tranchées de récupération des bâtiments.

situées dans d'autres grandes villes à l'image du Mans (Deshoulières 1932), ou encore de Beauvais (Adam 1984), où les soubassements sont en pierres de grand appareil de remploi tandis que les élévations sont constituées d'assises de matériaux assemblés en petit et moyens appareils, parfois en briques de terre cuite dans le cas du Mans.

L'emploi préférentiel des pierres de la vallée de l'Aisne à celles de la vallée de l'Ardre n'est cependant pas encore bien compris. Plus proches et montrant des aptitudes d'emploi similaires dans le bâtiment, les pierres de la vallée de l'Ardre ne sont pour autant pas couramment utilisées dans la construction avant la période médiévale (Figure IV-4 ; Turmel *et al* 2014). L'accessibilité aux gisements et les capacités techniques nécessaires à leur exploitation ne sont probablement pas seules en cause. La capacité de ces gisements à fournir des blocs adaptés aux exigences de dimensionnement du grand appareil quadrangulaire des monuments antiques serait un élément à interroger par le biais d'une mise en lien de la stratonomie et des caractéristiques pétrophysiques des bancs. La préexistence des carrières des plateaux du Laonnois et les rapprochements sociopolitiques et économiques des Rèmes et des Suessions ont probablement favorisé les échanges avec ce secteur en particulier.

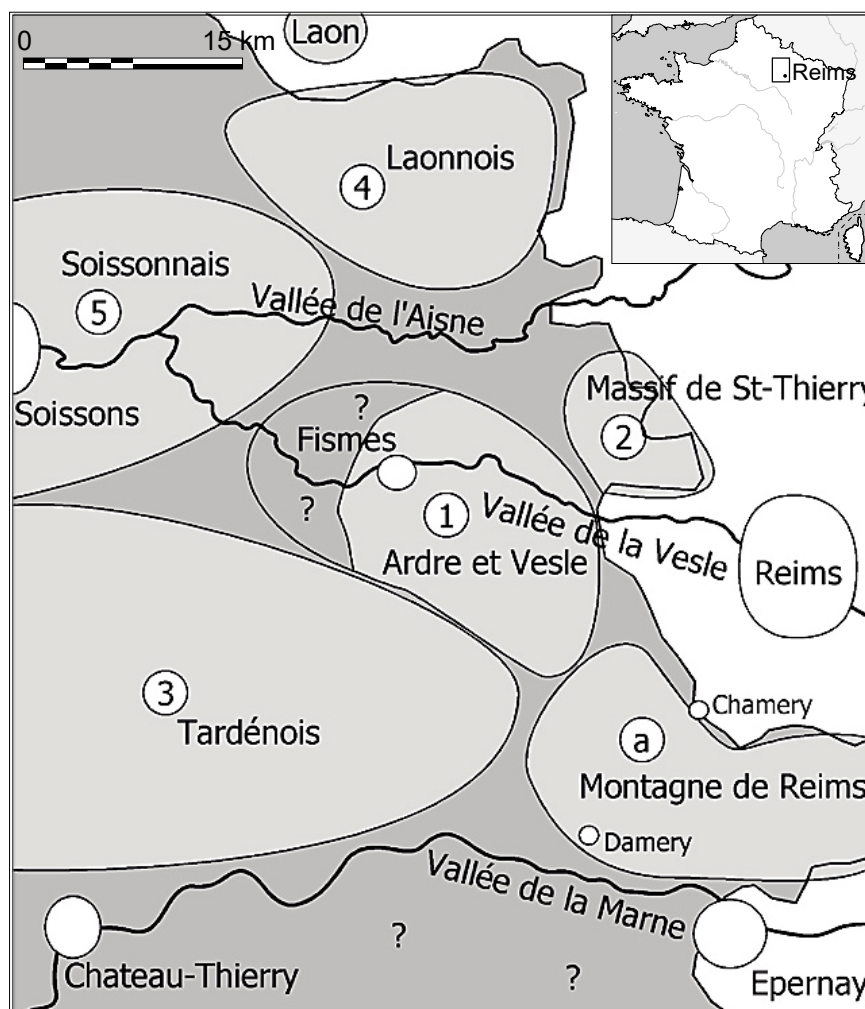


Figure IV-4. Carte des zones régionales des calcaires grossiers (Fronteau 2000)



Pour la période médiévale, outre le remploi continu des matériaux (en particulier des pierres ornementales et de la statuaire, Figure IV-5), les secteurs d’approvisionnement des pierres calcaires se sont déplacés légèrement vers le sud et s’installent dans les vallées de l’Ardre et de la Vesle (Fronteau *et al.* 2014 ; Turmel *et al.* 2014). Avec l’évolution des modalités de construction dès la fin de l’Antiquité pour privilégier la construction en petit et moyen appareil, les besoins d’approvisionnements ont également évolué. Le district carrier localisé autour de Fismes (et de la vallée de l’Ardre de manière plus générale), peu apte à fournir des pierres destinées au grand appareil, devient alors compétitif pour la fourniture de modules plus petits. Cette hypothèse est appuyée par la continuité de l’exploitation des carrières du Soissonnais jusqu’à la période préindustrielle. Il ne s’agit donc pas d’un épuisement de la ressource qui aurait contraint à un changement d’approvisionnement. Cette évolution des modalités de construction aurait donc induit une modification des pierres utilisées, mais à qualités pétrographiques équivalentes (Turmel *et al.* 2014 ; Turmel 2014).



Figure IV-5. A. Statue en buste d’un jeune homme (gaulois ?) en marbre blanc découverte à Reims (photo T. Ollivier/ Musée du Louvre) ; B. Tombeau de Jovin, milieu du III<sup>e</sup> siècle en marbre de Marmara (musée Saint-Remi, Reims)

Au cours des périodes préindustrielle et industrielle, les logiques d’approvisionnements évoluent encore, la prédation des ruines antiques reste très largement d’actualité, en s’attaquant aux vestiges dégagés par les percements de réseaux ou encore les modifications des rues. L’exemple de la destruction des vestiges de la Porte Bazée causée par la modification du tracé de la rue du Barbâtre et le percement de canalisation en est un exemple très évocateur (Neiss 1973 ; Neiss et Deniaux 1992 ; Neiss et Sindonino 2004). Les constructions de nouvelles églises ou encore l’élargissement de la ville terminant l’arasement des vestiges de l’amphithéâtre antique ont permis le dégagement de tout ou partie d’édifices encore inaccessibles. Les évocations des matériaux mis au jour à l’occasion de ces travaux (en particulier par N. Brunette 1846 ; 1861 ; 1885) sont par ailleurs nombreuses bien que fragmentaires. Dans la carte archéologique de Reims (Chossenot *et al.* 2010), il est notamment fait mention, pour les sites voisins des arènes, de dégagements de nombreux éléments calcaires appartenant aux superstructures de ces dernières au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Les éléments sont d’ailleurs décrits comme des blocs de calcaires lutétiens de faciès similaires à ceux trouvés à proximité du secteur culturel de la rue Belin.

Comme le souligne Picavet (2019), la distribution des produits pondéreux est dans une large mesure dépendante de la réalité topographique. Pour cet auteur, le transport de meules à bras (d'un module nettement inférieur à celui des blocs de grand appareil), au-delà de 5 à 6 jours de trajet, n'est plus économiquement rentable. Il est donc possible que pour des éléments de plus grande taille, cette limite de rentabilité soit située bien en amont. Dans le cas des matériaux pondéreux, ce temps d'acheminement pourrait au mieux, correspondre à une distance allant jusqu'à près de 120 km. Cette dernière paraît justifiée pour des produits manufacturés, mais il semble difficile de l'envisager pour les matériaux de construction si l'on considère la pression économique qu'exerceraient les bassins carriers voisins. Il conviendrait également d'ajouter le déterminisme géologique et la disponibilité des géomatériaux dans les aires considérées. Les pressions socio-économiques exercées par les centres carriers producteurs peuvent également influencer largement les approvisionnements en matériaux. Il en va de même des influences sociopolitiques dans le cadre desquelles les alliances politiques, commerciales entre provinces ou peuples peuvent être tissées ou rompues influençant de fait des liens commerciaux privilégiés ou des accès à des ressources spécifiques. À distance ou effort de transport équivalent, ces accords favoriseraient probablement les pôles économiques « alliés » par rapport à d'autres ne bénéficiant pas de ce statut. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, à Reims, aucune trace d'approvisionnement antique en pierres de taille issues d'autres secteurs que les plateaux cénozoïques de l'Aisne n'ont été observée. Il faut également souligner l'absence notable de calcaires d'âge Jurassique issus de l'exploitation des crêtes Pré-Ardenaises ou des côtes de Lorraine et du Barrois, alors même qu'il est démontré qu'elles étaient actives et que leurs produits étaient exportés au loin au cours de l'Antiquité (Coquelet 2013).

À titre d'exemple la distance séparant Reims de Savonnières-en-Perthois n'est que de 127 km par les voies actuelles. L'agglomération chalonnaise n'est distante de ces sites d'extraction que de seulement 83 km, mais une grande partie de ce trajet peut être réalisée en empruntant la vallée de la Marne dont le cours ne passe qu'à quelques kilomètres du centre carrier. La présence et l'utilisation de pierres issues de l'Oolithe vacuolaire (= pierres de type Savonnières) pendant l'Antiquité dans la ville de Châlons-en-Champagne et ses environs sont par ailleurs attestées, et font l'objet d'une diffusion jusqu'à la source de la Vesle (Fronteau et al. 2021 et prospections M. Chossenot). Or, l'agglomération chalonnaise n'est distante que de 45 km au sud-est de l'agglomération rémoise. Néanmoins, le cénotaphe mis au jour à Compertrix (Achard-Corompt et al. 2016) à proximité de Châlons-en-Champagne, possède des soubassements en calcaires à milioles et cérithes très similaires à ceux utilisés dans les soubassements de Reims et probablement de même origine. L'agglomération chalonnaise et sa région constitueraient donc une zone de transition pour les diffusions des matériaux lapidaires où se confrontent les approvisionnements de deux secteurs carriers différents et géographiquement opposés.

**Les modalités de diffusion des matériaux depuis les sites d'extraction :** Comme le souligne Fronteau *et al* (2014) non seulement il faut que la pierre de construction soit disponible, c'est-à-dire présente et extractible, mais il faut également que celle-ci soit acheminée jusqu'à son lieu d'utilisation (l'agglomération de *Durocortorum*). Ainsi que Picavet le souligne dans sa thèse (2019), les témoins matériels des moyens de transport de l'époque restent très rares et d'interprétation difficile. En revanche, les témoignages iconographiques et écrits sont riches de représentations sur les moyens de transport utilisés pendant l'Antiquité et à la période médiévale, moyens qui ont eu recours à des techniques proches (Picavet 2019 ; Blary et Gély 2020). Adam dans son dictionnaire de la construction romaine (1984), a recensé divers modes de transports terrestres pour l'acheminement des éléments de construction depuis

leurs zones de production (carrières) jusqu'au chantier de construction. Parmi ceux-ci, trois modalités d'approvisionnement en matériaux sont identifiées :

- La voie terrestre « préindustrielle », c'est-à-dire excluant tous les moyens de transport motorisés (le chemin de fer, les camions, etc.) pour privilégier la traction animale
- Le transport par les voies navigables
- La comodalité où les deux précédents modes de transports sont utilisés dans des proportions variables.

Ces transports possèdent deux aspects distincts. D'une part les matériaux pondéreux divisibles, constitués par des matériaux meubles ou encore des matériaux dont le module est tel qu'il peut d'être subdivisé en autant d'éléments aisément manipulables (moellons ou briques par exemple). D'autre part des matériaux pondéreux non divisibles, dont les caractéristiques sont telles qu'il est impossible de subdiviser le module sans perdre sa fonction (Picavet 2015 ; 2019 ; Picavet *et al.* 2018). Les moyens matériels mobilisables pour le transport des matériaux pondéreux, qu'ils soient divisibles ou non, ne manquent donc pas pendant la période antique et il s'agit autant de modes de transport terrestre que fluvial.

**Le transport terrestre :** La présence d'une très forte concentration de voies de circulation terrestres convergentes sur le site de l'agglomération (Figure IV-6 et chapitre I.3.6.2) et probablement héritée de la période précédant la fondation de l'*Oppidum*, constitue un avantage certain pour les importations de matériaux et de produits finis (Pasquini 2017). Les transports par voie terrestre permettent une grande souplesse dans les choix d'itinéraires (Polinski 2012), seules les contraintes topographiques influent sur les paramètres du trajet (Bedon 1984 ; Ferdière 1988 ; Russell 2013). Sur ce réseau routier, les dénivelés sont assez faibles (de l'ordre de quelques dizaines de mètres), car ils contournent la plupart des reliefs. Ils ne sont donc pas de nature à poser des problèmes d'ascension. De plus, la position en bord de plateau des affleurements ayant pu accueillir des carrières ou des sites d'extraction, permet aux transports de ne prendre en charge les matériaux en haut des pentes sans avoir nécessairement besoin de les franchir une nouvelle fois. L'agglomération rémoise se trouve donc topographiquement toujours plus bas que les divers approvisionnements en géomatériaux envisagés.

Les moyens de transport terrestre à traction animale (privilégiant le bœuf comme moyen de traction) sont à même d'acheminer les plus lourdes charges envisagées comme le soulignent Adam (1984) et Raepsaet (1984 ; 2002), ainsi que Picavet dans ses travaux de thèse pour les objets lithiques manufacturés (Picavet 2019). Ce même auteur évalue la charge qu'un seul chariot peut alors emporter pendant l'Antiquité entre 650 kg et 1 T. Il reprend l'exemple des transports de matériaux à l'époque carolingienne avec des dispositifs comparables emportant entre 1 et 1,6 T. L'efficacité de la traction au regard de la charge dépendra donc du nombre d'animaux de traits attelés simultanément. La charge possible n'est cependant pas infinie puisqu'il faut tenir compte d'une part de la résistance mécanique du matériel d'attelage et d'autre part d'une perte d'efficacité de la traction au fur et à mesure que le nombre d'animaux augmente (Raepsaet 1984). Dans ce cas, la charge limite serait, en multipliant le nombre de bêtes de somme attelées, évaluée à 10 T. Il est donc tout à fait possible d'envisager le déplacement sur de longues distances de matériaux pondéreux, alors même que tout ou partie du trajet ne peut emprunter une voie fluviale navigable. Enfin, pour ces transports et selon les auteurs, les distances journalières évoluent du simple au triple depuis 11 à 12 km (Scheidel 2015 ; Scheidel et Meeks 2020), 20 à 25 km (Fronteau *et al.* 2014 ; Bessac et Sablayrolles 2002)

et jusqu'à 30 km, distance équivalente à ce qui est admis pour un piéton non chargé pour Corsiez (2016 ; 2019). Salac (2013) considère qu'un attelage de bovins peut travailler pendant 6 à 8 h en maintenant une vitesse moyenne de 2 à 3 km/h, ce qui correspondrait, pour la période considérée, à une distance journalière de près de 20 km en moyenne.

**La possibilité d'un transport fluvial :** Les matériaux pondéreux, dont les sites d'extraction, se situent sur les plateaux surplombant la vallée de l'Aisne, posent un problème tout particulier au sein du corpus de matériaux étudié. En effet, certains auteurs proposent que dans ce cas précis (Scheidel 2015 ; Pasquini 2020), les habitudes romaines privilégient systématiquement l'utilisation des voies navigables à la route pour ces transports. Toutefois, le prérequis pour l'acheminement par voie d'eau est la présence d'une voie navigable pérenne ou, *a minima*, saisonnière. En effet ces matériaux, pour être acheminés par voie fluviale, doivent au préalable être transportés jusqu'à un site d'embarquement situé en berge d'un cours d'eau et susceptible de constituer une liaison rapide et facile avec leur lieu d'utilisation. Il est donc nécessaire de disposer d'infrastructures de chargement, mais aussi de terrains ou d'aménagements dédiés à un changement de mode de transport. C'est ce que Gély et Blary (2020) qualifient de « rupture de charge ».

Or, dans l'hypothèse où un transport fluvial aurait été employé pour alimenter Reims, il serait logique que cela le soit depuis la vallée de l'Aisne puisque l'intérêt de relier la Vesle par un autre moyen, pour réaliser les quelques kilomètres restants, semble assez limité, voire contestable. S'il est question de rejoindre Reims en ne suivant que des voies fluviales, cela supposerait de rallier en aval Condé-sur-Aisne depuis le secteur carrier des plateaux du Soissonnais (soit 21 km) pour remonter le cours de la Vesle jusque Reims (soit 50 km, Figure IV-6). Un transport de batelier aurait donc une distance de 70 km à parcourir, dont les deux tiers, en remontant la rivière. Cette dernière portion de trajet se réalisant donc avec l'assistance d'un système de halage (Homme ou bêtes de trait). Si l'on se réfère aux estimations de distances journalières pour le transport fluvial de marchandises à l'époque romaine (Kunow 1983 ; Salac 2013), il faut envisager une distance journalière moyenne de 50-60 km dans le sens du courant, mais de seulement 15-17 km pour la remontée et sous condition de la présence d'un chemin de halage. Or, à ce jour, aucun aménagement de berge ou secteur portuaire n'a été étudié ou identifié en tant que tel dans ce secteur de la vallée de l'Aisne. Une autre solution afin d'acheminer les matériaux en direction de Reims serait de remonter le cours de l'Aisne sur une portion d'une dizaine de kilomètres, avant d'emprunter la Suipe, qui même si elle a un régime hydraulique plus stable que la Vesle n'en reste pas moins assez peu praticable à la circulation d'embarcations dédiées aux transports de ce type. De plus, dans un commerce où le temps d'acheminement participe pour une large part au coût de la matière, il faut également compter avec les temps de manutention dédiés au chargement et au déchargement des blocs.

La dimension des embarcations s'avère également être une source potentielle de questions. Quels tirants d'eau devaient posséder les embarcations pour embarquer une charge utile très pondéreuse ? D'ailleurs, quelles embarcations fluviales envisager alors qu'il s'agit d'un bloc unique de pierre dont les masses et les modules peuvent considérablement varier alors qu'aucune preuve archéologique ne vient documenter ce point. Et enfin, quelles seraient les dimensions d'un tel navire alors que ses dimensions édictées par la géométrie et les régimes de la rivière et de ses passages marécageux qui limitent *de facto* une assistance par halage depuis les berges ? Ces questions restent en suspens tant que d'éventuels restes d'un tel bateau n'auront pas été exhumés. La possibilité d'un transport par radeau (alliant donc au transport

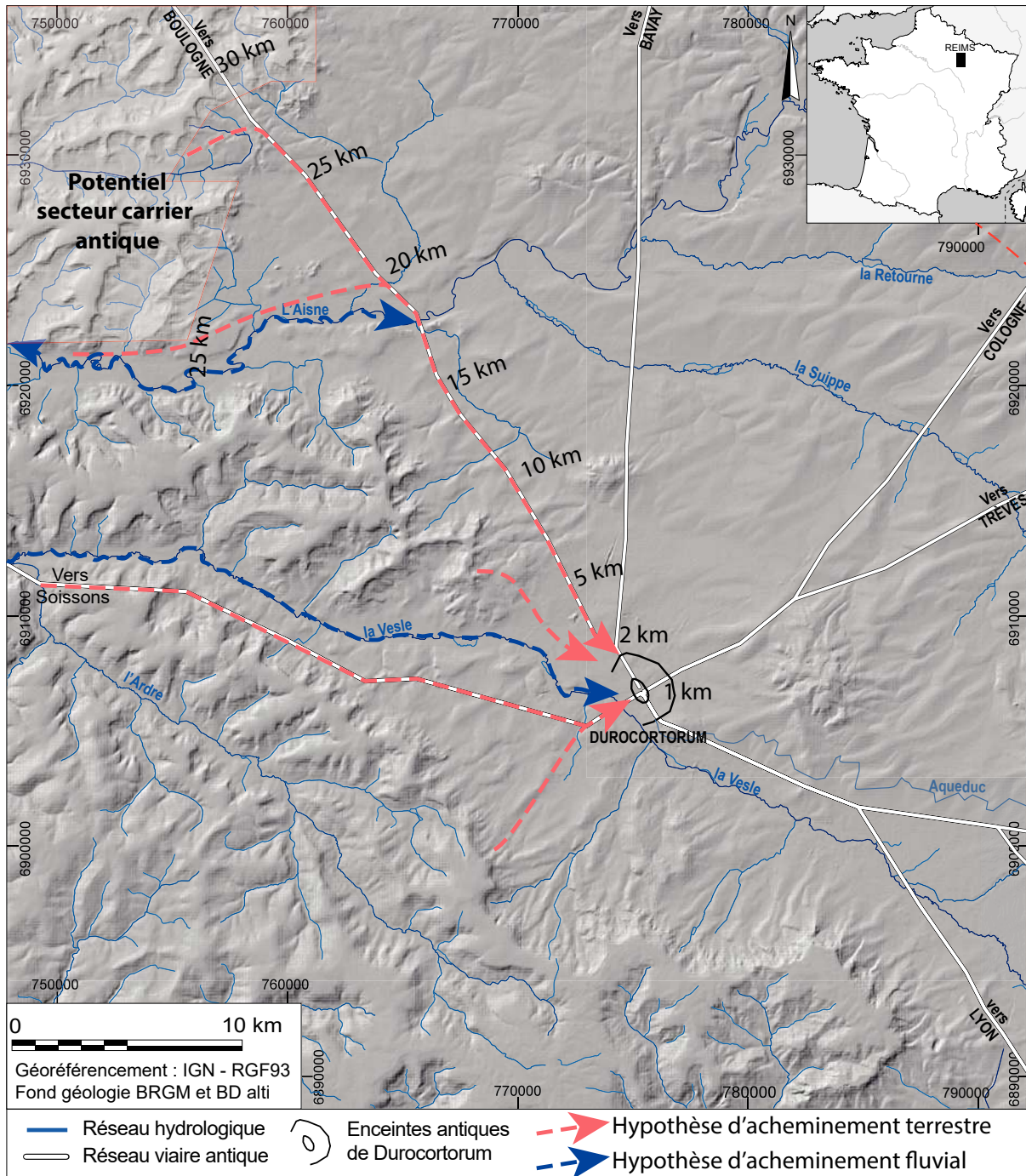


Figure IV-6. Carte des réseaux routiers antiques et du réseau fluvial portant indication des possibles flux de transport pour les calcaires utilisés pour le grand appareil quadrangulaire

de la pierre une cargaison de bois) n'est, elle non plus, pas exempte de contrainte. En effet, l'emploi d'un tel mode de transport empruntant des cours d'eau navigables, ne serait d'après Polinski (2012, reprenant les travaux de Bedon (1984) réalisable que pour leur descente vers l'aval. Enfin, si la question de la navigabilité de la rivière a été récemment relancée par la mise au jour d'aménagements « portuaires » sur les berges de la Vesle (Rollet 2016 ; Gucker 2020), les arguments en sa faveur restent controversés. D'une part, Pichard (2014) a démontré que la toponymie du site, dit le « Vieux Port », est en usage seulement depuis le XIX<sup>e</sup> siècle et ne reposerait pas sur des arguments archéologiques. D'autre part, Fronteau et

al. (2014) a également examiné cette question en concluant sur l'impossibilité de considérer la Vesle comme un cours d'eau navigable pour des matériaux pondéreux. Ainsi, ils estiment que la ville ne serait pas en contact avec les bassins carrier environnants par voie fluviale, mais préférentiellement par voie terrestre, même, et surtout, pour les plus gros modules de pierres.

**La possibilité d'une comodalité :** La comodalité des transports de matières pondéreuses peut apparaître comme une alternative avantageuse à l'emploi d'un unique mode de transport. Ces avantages pourraient être multiples, en imaginant un gain notable de vitesse de transport lors des étapes fluviales, en plus d'un gain d'efficacité en augmentant considérablement les volumes qu'une seule embarcation serait à même de prendre en charge. Cependant, quel que soit le scénario envisagé, les distances à couvrir sont très faibles : de l'ordre de quelques kilomètres quand on considère une remontée de l'Aisne vers l'est, ou de descendre son cours vers l'ouest, avant de rejoindre une voie desservant l'agglomération. Dans les deux cas, cela suppose l'existence d'aménagements des rives de la rivière permettant le transbordement de charges en plus d'un stockage éventuel. C'est ce que Blary et Gély (2020) qualifient de rupture de charge tout indiquant que c'est une des caractéristiques principales des transports à l'échelle régionale. Il s'agit pour ces mêmes auteurs de transport impliquant des professionnels du transport de matériaux pondéreux.

De fait, la comodalité des moyens de transport reviendrait dans le cas de *Durocortorum* à cumuler les inconvénients des autres modes de déplacement de matériaux pondéreux sans nécessairement tirer parti de leurs avantages respectifs, du fait de l'organisation des réseaux viaires et fluviaux. En effet, au nord de Reims, on constate que les voies de transport terrestre sont orthogonales aux voies fluviales. Ainsi, il faudrait envisager plusieurs ruptures de charges de la carrière jusqu'au site de mise en œuvre dans le cas de la comodalité, tandis qu'un transport monomodal les limiterait nécessairement.

## 2. Les biais et les limites de l'étude

### 2.1. Les biais inhérents aux études de matériaux

**Biais de conservation :** La préservation dans le sol des matériaux archéologiques est une question importante, si ce n'est primordiale dans certaines disciplines, afin de comprendre leurs évolutions depuis le moment de leur enfouissement jusqu'à leur exhumation (en paléanthropologie par exemple). Ces aspects relèvent de la taphonomie des vestiges. Or, il faut considérer dans les études de matériaux archéologiques qu'une partie variable de cet enregistrement a subi une altération dès la destruction des structures ou plus tardivement après leur inhumation.

La conservation des vestiges dont la récupération des matériaux a oblitéré de manière très conséquente les restes pose aujourd'hui plusieurs problèmes. Pour les monuments en élévation, comme la Porte de Mars, la prédation des pierres comme celles des agrafes métalliques et des plombs de scellement aboutissent de nos jours à l'apparition de problèmes structuraux évidents qui ont, par le passé, déjà mis en péril la pérennité du bâtiment (Brunet-Gaston *et al.* 2020). L'évidente lacune de l'implantation de l'agglomération sur un site dépourvu en pierres de construction de qualité a conduit ses constructeurs à envisager des stratégies d'approvisionnement largement optimisées aboutissant au remploi préférentiel (et extensif)

des matériaux issus des édifices antérieurs. Dans ces cas, la présence de matériaux de qualité d'origine éloignée a légitimé le emploi extensif de ces derniers, en l'état pour certains (cf. les colonnes remployées de la Basilique Saint Remi en granite de Troad) ou sous forme de moellons retaillés (exemples de pierres en emplois dans la cathédrale ou le palais du Tau, mais également d'éléments remployés dans les murs contemporains attenants à la Porte Bazée). Même si les exemples cités sont des cas de emploi au Moyen Âge, tout porte à croire que cette modalité d'approvisionnement a existé dès avant même la fin de la Haute Antiquité.

**Biais de collecte, biais d'échantillonnage :** Lorsque les études de matériaux ne sont pas réalisées directement sur site, au cours de l'opération de fouille, les opérateurs archéologiques sont confrontés à la gestion de la quantité de matériaux à prendre en charge et à étudier. Les prélèvements concernent donc préférentiellement des objets à forte valeur informative, suscitant des interrogations ou encore portant des traces d'ornements ou d'éléments support à des datations (matériaux, objets, ou encore arguments stylistiques...). À la manière d'un gisement fossilifère exploré par un paléontologue, les prélèvements suivront une logique non plus systématique, mais orientée par la problématique de recherche. Ainsi, dans le cas de l'étude d'une *Domus* ou d'un site riche en mobilier et éléments décoratifs, les problématiques qui émergeront avant, pendant, et après la fouille se portent préférentiellement vers l'étude et l'expression de ces éléments. Il s'instaurera donc une surreprésentation de fait des éléments avec une signature stylistique ou « datante » forte. Le choix des éléments qui seront collectés ou non instaurera donc un biais directement intégré par l'archéologue dans sa démarche puisqu'un élément jugé tout à fait commun ne sera probablement pas collecté.

La nécessité de prendre en compte la contrainte d'un stockage des éléments auquel il faut ajouter le temps de démontage et d'inventaire de pierres ne sont pas jugées pertinentes, car extrêmement coûteuse de manière générale. La contrainte du coût de la collecte et du stockage des éléments lapidaires qui peuvent sembler quelconques est donc dissuasive pour l'archéologue tout comme pour le géologue qui souhaiterait réaliser des prélèvements exhaustifs. L'idéal étant de pouvoir réaliser une étude géologique directement en cours de chantier en travaillant sur les différentes parties de maçonnerie encore en élévation. Cependant, il apparaît que cette approche par trop exhaustive présenterait rapidement l'inconvénient d'une durée excessive. Cette problématique de la représentativité des études de matériaux de construction a été soulevée par Fronteau dans le cas de l'étude des matériaux de l'aqueduc (Fronteau *in* Rabasté et Ardhuin 2010). L'étude exhaustive d'une portion de 100 m linéaires de ces maçonneries aurait nécessité plus de quatre mois de travaux (pour 50 000 blocs identifiés). À cette occasion, l'auteur avait conclu à l'impossibilité de ce type d'approche pour privilégier des échantillonnages judicieux et représentatifs de la réalité.

**Biais de représentativité :** L'architecture romaine antique est représentée par l'architecture publique d'une part et par l'architecture privée d'autre part. Dans les études de corpus de géomatériaux archéologiques soumis à fouilles prescrites par l'État, il apparaît possible que les acteurs du processus qui mène à l'opération de fouille soient potentiellement plus favorables à la prescription d'un ensemble « riche » et fortement informatif que d'un ensemble plus modeste. Cependant, le grand nombre d'opérations mené à Reims depuis les débuts des recherches archéologiques ne semble pas plaider pour l'installation de ce type de distorsion.

De fait, le principal lieu où ce biais de représentativité s'exprime est le musée. En effet, en contexte muséal, seront principalement exposés ou mis en réserve des pièces spécifiques, emblématiques ou rares portant sculptures et décorations. Inversement les aspects les plus communs de l'architecture et de la construction ne seront illustrés que par quelques exemples moins ostentatoires. Ainsi s'instaurera un biais de représentativité, lié aux choix réalisés de très longue date par les conservateurs pour répondre aux attentes du public. Cela pourra donc distordre artificiellement les décomptes réalisés en favorisant l'architecture publique monumentale et l'architecture funéraire privée au détriment des contextes plus modestes.

Dans la construction de manière générale, il est difficile d'avoir une vision précise de la fonction des éléments architecturaux ou des maçonneries dont ils proviennent tant les aperçus qui en sont donnés sont parfois lacunaires. La récupération des matériaux est un facteur qui ne fait qu'aggraver les difficultés de lecture et d'attribution de fonctions aux éléments observés. Ainsi, une partie des fonctions du bâti échappent encore à la lecture de la rationalisation de l'usage des matériaux.

**Biais de représentation des données :** L'outil de documentation du monument en lui-même est susceptible d'ajouter des distorsions même minimales, mais pour autant difficilement quantifiables, au corpus de données. Dans le cas spécifique discuté ici, il s'agit de s'intéresser à la méthodologie de documentation d'un monument et des matériaux en œuvre. Cette approche a permis de documenter un monument entier, qui bien que de géométrie globalement assez simple et n'ouvrant pas sur des volumes intérieurs ou encore comportant des murs courbes, est cependant aménagé de niches, de colonnes engagées, de piédroits, etc. Si ces parois en saillie ou en creux ont été modélisées au cours du processus de création de la maquette numérique, elles n'ont néanmoins pas fait l'objet d'un export orthorectifié systématique sur l'ensemble de leurs surfaces. Il ne s'agit pas ici d'une négligence, mais d'un parti pris dès la conception de l'outil de documentation afin d'en alléger la lecture.

Dans un monument construit en grand appareil quadrangulaire, les éléments architecturaux de dimensions restreintes ne sont finalement représentés que par un nombre très limité de blocs. Ainsi leur forte représentation sur toutes les faces n'aurait probablement conduit qu'à multiplier le nombre de vues du même ensemble à plusieurs reprises. Cette impression aurait donc abouti à une surestimation des éléments considérés dans la maçonnerie même si dans les décomptes cela n'avait eu qu'une très faible influence. En revanche, l'impact est plus conséquent pour les matériaux de restauration, de plus petites dimensions, et qui subissent une légère sous-estimation à l'échelle de l'entièreté de l'édifice.

**Biais lié au fractionnement des stocks :** Lors de l'assemblage des éléments, ces derniers sont sélectionnés afin que leurs qualités intrinsèques correspondent au mieux à leur utilisation. Leur utilisation est donc rationalisée en fonction des contraintes de leur positionnement architectural. Cette rationalisation s'exprime de la même manière dans le cas d'un remploi, seule la clé de lecture de la contrainte peut cependant différer. Il peut s'agir de répondre au besoin d'approvisionnement en pierres d'un module donné, ou de s'adapter à une contrainte hydrique ou encore mécanique. La question de ce fractionnement a déjà été soulevée par Bart *et al.* (2017) qui s'interrogeait quant à l'homogénéité des modules des stèles funéraires remployées dans des parements de puits. Dans ce cas, les maçons auraient été susceptibles de choisir, dans un premier temps, les blocs en fonction de leurs dimensions, puis



dans un second temps, en fonction de leur faciès pour en adapter au mieux la position avec les contraintes. L'image des blocs donnés par la lecture des faciès de ce seul site peut apparaître tronquée par rapport à ce qu'elle était dans un stock de départ beaucoup plus diversifié. Il sera par conséquent difficile dans le cas d'un emploi secondaire des matériaux de reconstituer fidèlement la répartition des faciès dans leur stock originel.

## 2.2. Les limites de la méthodologie de représentation des données

Bien que l'approche choisie pour la documentation et le traitement des données du bâtiment a montré son adaptation et son efficacité pour un monument comme la Porte de Mars, elle ne s'est pour autant pas montrée exempte de défauts et de limites.

### **Adaptation de la méthodologie à l'objet d'étude :**

La gestion multicouche et thématique de la documentation de la Porte de Mars (Chapitre III) s'est avérée un outil fiable et robuste. Cette approche bénéficie du recul acquis sur la gestion des données spatialisée en 2D ou en pseudo-3D à l'aide des SIG qui permet une approche descriptive très fine des surfaces et de ses attributs. Cependant, le déroulement de la chaîne opératoire telle qu'elle a été appliquée nécessite une importante phase préparatoire. Comme pour l'acquisition d'un objet par lasergrammétrie qui oblige à multiplier les stations pour la numérisation d'un objet complexe ou de grande taille, la photogrammétrie nécessite également une planification rigoureuse. Cette méthode offre cependant la souplesse de pouvoir être complétée par des prises de vues additionnelles en fonction des besoins. Le processus de modélisation photogrammétrique est en effet capable de générer des modèles dont la résolution n'est pas en tous points identique. L'acquisition des données peut donc être réalisée au cours de plusieurs sessions. Cependant, l'augmentation du nombre de clichés tend à accroître considérablement les temps de calcul nécessaires à la construction de la maquette numérique. La présence de défauts ou d'aberrations géométriques ou colorimétriques ne sera en outre découverte qu'à l'issue du traitement ou d'un prétraitement rapide permettant l'évaluation de la qualité générale du processus de prises de vues. L'augmentation de la résolution géométrique de l'ensemble du modèle se soldera de la même manière par une augmentation pléthorique du nombre de photographies à réaliser et à traiter. Cela pour insister sur le fait que l'architecture à la géométrie relativement simple de la Porte de Mars se prête très bien à la méthode, car elle ne comporte que de grandes façades avec de grandes baies couvertes par des voûtes. La transposition de la méthode à un bâtiment plus complexe, aux murs courbes ou encore comportant de nombreux alcôves et renforcements, aurait probablement causé de nombreux problèmes de projection des données au sein d'un SIG tout en conservant représentativité et connexions entre éléments.

**Limites de représentation :** L'utilisation d'une documentation du bâti par l'intermédiaire d'une plateforme SIG telle qu'elle a été mise en œuvre au cours de l'étude de la Porte de Mars (cf. chapitre III), même si elle s'est avérée fiable et performante, n'est cependant pas exempte de défauts. Le principal d'entre eux réside dans la difficulté de son usage pour des bâtiments plus grands et à la géométrie plus complexe.

En effet, la projection des murs dans un même plan écrase les volumes saillants et projette les surfaces rentrantes au niveau d'un plan moyen grâce à l'extraction d'orthophotographies

conduit à une perte d'information. Cela aboutit donc à une simplification supplémentaire amenant à considérer des surfaces rugueuses comme des plans lisses. Néanmoins, cette approche a fourni un outil fiable de représentation, certes simplifié, d'une réalité architecturale à la géométrie globalement relativement basique, ne comportant ni pièce intérieure ni grandes façades perpendiculaires au plan de projection. Le cas de la seule base de colonne authentique de l'Arc est représentatif de cette limite. De fait, son emplacement, dissimulé par des placages de moellons à l'angle formé entre la colonne et la façade, ne permet pas de la représenter avec fiabilité. Les représentations exhaustives de toutes les façades, des colonnes et des d'és les supportant, auraient nécessité la réalisation de projections développées systématiques et donc une augmentation sensible de la complexité de l'ensemble de la représentation. À ce titre, l'exemple du Cryptoportique est édifiant puisqu'une tentative de modélisation menée afin de tester la faisabilité d'une étude similaire a nécessité l'acquisition de 2 250 clichés dont un grand nombre avec des sources lumineuses portables additionnelles (Figure IV-7).



Figure IV-7. Vues extraites de la modélisation photogrammétrique du Cryptoportique

L'exploitation de ce support n'a pas été poussée au-delà de l'évaluation de faisabilité et de l'organisation d'un document destiné à l'étude du monument.

**Limites liées à la quantification des volumes :** La représentation et la gestion de la documentation des matériaux de construction à l'échelle d'un bâtiment en prenant en compte leur profondeur ne sont à ce jour pas intégrées dans la méthodologie qui a été utilisée. En effet, l'impossibilité d'intégrer, de décrire et de caractériser précisément les caractéristiques des matériaux situés derrière le parement en blocs de grand appareil est problématique pour la méthode utilisée ici. Il serait possible d'utiliser des systèmes de couches superposées dont le rang refléterait la profondeur dans la maçonnerie, mais cette idée, même si elle apparaît comme très intéressante, serait lourde à mettre en œuvre). Si elle était connue ou accessible, l'épaisseur des blocs de parement aurait également été une donnée à intégrer numériquement dans la base de données attributaire des matériaux de construction. Cette donnée aurait permis la quantification immédiate des matériaux sans recourir à des comparaisons via les surfaces des blocs.

**Limites liées à la diffusion des données :** Enfin, la technique choisie pour la documentation des données du bâtiment ne permet à ce jour pas de réaliser une diffusion simple des données. Cette dernière nécessiterait la mise en place d'une étape supplémentaire permettant la consultation simplifiée des informations. Celle-ci pourrait être réalisée soit par l'intermédiaire d'un environnement de type SIG simplifié (WebGIS, ou autre interface) soit grâce au retour vers une interface de représentation des données en 3D native. Cette dernière pouvant par ailleurs prendre l'aspect d'une interface de réalité augmentée à l'image de ce que propose la plateforme Aioli du Maps<sup>87</sup>. Dans le cas de ces deux méthodes de diffusion, le stockage pérenne de données indispensable à une consultation en ligne pourrait représenter un besoin très conséquent en termes de volume disponible. Malgré la demande initiale et un effort porté sur la lisibilité du contenu, le maintien des données issues de la documentation d'un bâtiment nécessite des compétences techniques non négligeables. Cependant, cette limite doit être pondérée tant elle est commune avec la plupart des autres approches existant aujourd'hui. L'utilisation de cet outil à l'occasion de l'étude pluridisciplinaire de la Porte de Mars a également montré que la gestion des modifications par plusieurs acteurs pouvait induire l'émergence de versions différentes d'un même document. À ce jour, l'utilisation collaborative de cet outil est donc encore sujette à de nombreuses précautions.

### 3. Vers une utilisation prospective de l'outil

#### 3.1. Une méthode adaptée à la Porte de Mars comme à d'autres bâtiments

**Pour la Porte de Mars :** La méthodologie d'enregistrement des caractéristiques, aussi bien géométriques qu'attributaires de la Porte de Mars sous la forme d'un enregistrement sémantique s'est avérée bien adaptée à un bâtiment comme la Porte de Mars. Cette adaptation présente néanmoins une limite évidente, puisque la représentation passe par une cartographie en 2D d'un objet 3D et ne peut donc servir de recueil uniquement des éléments visibles sur les façades de l'édifice. Cependant, contrairement à d'autres solutions, le choix d'un outil préalablement adapté au traitement de données spatialisées a facilité la réalisation de croisements de données et de calculs au sein d'une même couche de données. De plus,

<sup>87</sup> <http://www.map.cnrs.fr/>

les choix qui ont conduit à coupler la documentation géométrique par photogrammétrie et l'enregistrement des données du bâtiment sur un SIG ont également montré que des méthodes « légères » et relativement peu coûteuses étaient aptes à répondre efficacement aux problématiques posées à l'échelle des matériaux d'un monument.

Le stockage centralisé et l'utilisation de données hétérogènes issues de l'étude des matériaux du monument et des données historiographiques (dessins, photographie...) ont également été facilités par la structure même de l'outil et de ses capacités à manipuler une grande diversité d'informations. L'accessibilité de l'information aux différents acteurs du patrimoine s'est révélée être un des axes de perfectionnement envisagé. En effet, même si le choix logiciel s'est objectivement porté sur des solutions nécessitant un moindre besoin de formation, celui-ci ne s'est pour autant pas révélé utilisable sans une familiarisation minimum à l'outil. De plus il est nécessaire d'acquérir une certaine aisance sur les fonctionnalités des outils logiciels afin d'en tirer le meilleur parti pour documenter l'ensemble du projet.

À ce jour, la consultation des données n'est possible qu'avec la diffusion de l'intégralité des données contenues dans le projet sans discernement sur leurs contenus, en fonction des acteurs ciblés. Il y a donc possibilité d'une altération involontaire d'informations liée à leur accessibilité permanente. Mais, l'un des principaux problèmes soulevés concerne la difficulté inhérente à la structuration adoptée de réaliser des opérations simultanées ou concomitantes sur la même table de données. Cette opération conduit à multiplier les versions des données qui afin de prévenir les conflits doivent subir des arbitrages au cas par cas. Il en découle que ce mode de fonctionnement peut s'avérer long et fastidieux.

Dans la région, l'absence des carrières de pierres qui permettrait de fournir des matériaux identiques à ceux utilisés pendant la construction du monument pose la question de l'emploi de matériaux d'origine distante. Cependant les choix de ces matériaux ne sont pas anodins et peuvent entraîner l'apparition d'altérations ou même en accélérer le développement (Beck 2006 ; Lozano 2012). Actuellement, dans le cadre de restauration entraînant des changements de pierres, de nombreux auteurs préconisent l'emploi de pierres de substitution possédant des caractéristiques similaires à celles des pièces remplacées (Rozenbaum *et al.* 2008). Il y a donc un intérêt réel à posséder un outil susceptible de tester des scénarii différents de restauration où les propriétés connues des pierres seraient testées dans le modèle du bâtiment. L'emploi d'un SIG pour cet usage consisterait un réel atout, car il est possible de s'appuyer sur des outils de géotraitement et de modélisation déjà existante. La Porte de Mars est là encore un terrain particulièrement adapté grâce à sa relative simplicité géométrique et à la connaissance acquise aujourd'hui sur ce monument.

**Possibilités d'application à un bâtiment plus complexe :** La méthodologie de documentation du bâtiment a présenté des lacunes en particulier pour la description des parties les plus complexes des façades de l'édifice. Les flancs des colonnes ou encore certaines façades du socle, ne représentant néanmoins que des surfaces cumulées minimales, ne sont qu'imparfaitement restitués dans le SIG. Les informations s'y rattachent s'en trouvent donc biaisées. La documentation géométrique est bien adaptée à la modélisation d'objets complexes à quelques conditions près (accessibilité, rigueur d'acquisition notamment). Ce n'est donc pas cet aspect qui limiterait la pertinence de la chaîne opératoire. En revanche, s'il est facilement envisageable d'accroître le nombre de façades représentées simultanément dans un SIG, accompagnant l'accroissement de complexité géométrique de l'objet, cela provoque inévitablement l'augmentation proportionnelle des relations entre blocs communs

à plusieurs façades. Cette complexification de la représentation accompagnant la complexité architecturale tendrait donc, en l'état à une perte de lisibilité de l'information contenue dans la base de données. Cette dégradation de la qualité de représentation rend donc caduc l'objectif initial de simplicité de documentation et de représentation des données.

### 3.2. Outils pour la réalisation des cartes de susceptibilité

La notion de durabilité est associée à la durée nécessaire pour qu'un le matériel évolue depuis un état initial vers un état altéré puis dégradé (Lozano 2012). Il s'agit alors d'identifier les caractéristiques de la pierre qui influenceront le plus la durabilité vis-à-vis des facteurs de l'altération. Il est alors possible de chercher à appliquer cette méthode aux altérations dues au sel (Beck et Al-Mukhtar 2010), aux cycles de variations de température (Huby *et al.* 2020 ; Huby 2021), ou encore vis-à-vis d'autres facteurs comme les pollutions atmosphériques (Gibeaux 2017 ; Cooke *et al.* 1995). Il faut également considérer l'interaction entre les différents facteurs d'altération des roches, qui peut conduire à une accélération sensible de leur dégradation en particulier dans le cas de l'emploi de matériaux de construction de récupération déjà fortement dégradés (Fronteau 2000). Néanmoins, certaines propriétés intrinsèques des pierres (porosité, capacité de rétention d'eau, cinétique d'évaporation,) favorisent l'apparition et le développement d'altérations ou créent des conditions favorables à leur apparition (Dessandier *et al.* 2000).

Il s'agira donc d'identifier le ou les facteurs jugés prépondérants dans les processus d'altération de l'œuvre, dans le cadre de l'étude de matériaux en œuvre. Il serait également nécessaire d'intégrer la notion de compatibilité entre deux pierres qui apparaît comme un paramètre supplémentaire à considérer afin d'évaluer une différence de durabilité (Dessandier 2000 ; Dessandier, *et al.* 2000).

#### **Arguments de susceptibilité vis-à-vis du climat**

Les paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité sont prépondérants dans l'altération et la dégradation des pierres en œuvre. Les variations de ces deux paramètres se répercutent dans les matériaux des maçonneries et influent sur leurs altérations, conduisant inexorablement à leur dégradation progressive (Weiss *et al.* 2004).

Une étude antérieure de suivi climatique mis en place sur les deux tours de la basilique Saint Rémi de Reimspendant 2 ans a permis d'établir les caractéristiques microclimatiques existant sur les façades en fonction de leur orientation (Huby *et al.* 2020 ; Huby 2021). Un traitement statistique a permis de décrire les variations de température et d'humidité relative, corrélées aux relevés climatiques locaux. Il permet de décrire les variations typiques répétitives qui se produisent au cours des journées désignées comme « jours typiques » : jour ensoleillé, jour pluvieux frais, jour pluvieux chaud et jour de gel (Figure IV-8 et Figure IV-9). Ces jours sont utilisés pour décrire le nombre, l'amplitude et l'organisation des variations environnementales à l'échelle d'une année.

À l'échelle de la façade, et donc des matériaux qui la constituent, ces variations imposent des contraintes thermohydriques. Les contraintes à l'échelle de l'édifice sont donc à appréhender en fonction des orientations des façades pour lesquelles s'exprime un microclimat aux caractéristiques spécifiques. Par conséquent les altérations des pierres ne se développent pas de la même manière à l'échelle du monument, en fonction des orientations





	<b>Jour ensoleillé</b> Hausse de température $T_{\max} - T_{\min} \geq 10^{\circ}\text{C}$		Humidité relative basse $HR_{\text{moyenne}} < 90\%$
	<b>Jour pluvieux frais</b> Faible variation de température $T_{\max} - T_{\min} < 10^{\circ}\text{C}$		Humidité relative élevée $HR_{\text{moyenne}} \geq 90\%$ et $HR_{\max} = 100\%$
	<b>Jour pluvieux chaud</b> Hausse de température $T_{\max} - T_{\min} \geq 10^{\circ}\text{C}$		Humidité relative élevée $HR_{\text{moyenne}} \geq 90\%$ et $HR_{\max} = 100\%$
	<b>Jour de gel</b> Température négative $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$		Humidité relative élevée $HR_{\text{moyenne}} \geq 90\%$ et $HR_{\max} = 100\%$
	<b>Jour Autre</b> Faible variation de température $T_{\max} - T_{\min} < 10^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 0^{\circ}\text{C}$		Humidité relative élevée $HR_{\text{moyenne}} < 90\%$ et $HR_{\max} < 100\%$

Figure IV-8. Catégorisation des jours typiques (Huby 2021)

	MICRO -CLIMAT ENSOLEILLÉ	MICRO -CLIMAT OMBRAGÉ
	Orientation	
	Sud et Ouest	Nord et Est
<b>Caractérisation</b>		
Température - extremums (°C)	-8 à 52,9 °C	-8,8 à 44,2°C
Vitesse température - moyenne (°C.min <sup>-1</sup> )	0,19	0,09
Humidité relative - moyenne (%)	75,5 %	76,1 %
Cycles rapides - nombre moyen	24	4
<b>Répartition des jours (%)</b>		
Jour ensoleillé	59	41
Jour pluvieux frais	21	21
Jour pluvieux chaud	3	< 1
Jour de gel	4	5
Autre	13	33
<b>Enchaînement de jours (nombre)</b>		
Pluvieux/ensoleillé	15	4
Ensoleillé/pluvieux	14	3

Figure IV-9. Comparatif des microclimats : caractérisation, répartition et enchaînement des jours typiques. Rouge : élevé, orange : moyen, vert : faible (Huby 2021)

des façades des bâtiments (Figure IV-9). Le microclimat ensoleillé permet la concentration des contraintes thermomécaniques à la surface de la pierre qui contribuent à affaiblir la pierre et peuvent potentiellement conduire à son écaillage. En revanche, le microclimat ombragé favorise le développement de colonisations biologiques et, dans ce cas, la pierre est soumise à une altération par le gel plus durable et plus intense.

Les propriétés intrinsèques de la pierre conditionnent la manière dont celle-ci réagit aux contraintes imposées par l'environnement. Huby (2021) lie donc les différentes altérations observées à la surface des pierres d'un bâtiment avec l'action des microclimats spécifiques développés en fonction de l'orientation des différentes façades. Les propriétés intrinsèques des roches (réseau poreux, propriétés de transfert de l'eau...) leur confèrent une capacité de résistance spécifique aux processus d'altération (Fronteau *et al.* 1999 ; Huby *et al.* 2020).

Même si ce modèle a été développé en réalisant un suivi en altitude sur les façades d'une tour de la Basilique Saint Rémi, sa transposition sur les façades de la Porte de Mars est réaliste, car les deux bâtiments ont en commun une position isolée par rapport aux bâtiments avoisinants (Figure IV-10) et un grand nombre de leurs pierres (en particulier des calcaires du Lutétien et de l'Oolithes vacolaire. Les valeurs de jours typiques définis par Huby seraient probablement à adapter en raison des phénomènes d'ombres portées bien plus significatifs sur la Porte de Mars que sur la Basilique, mais aussi en raison de la moindre altitude de l'Arc.

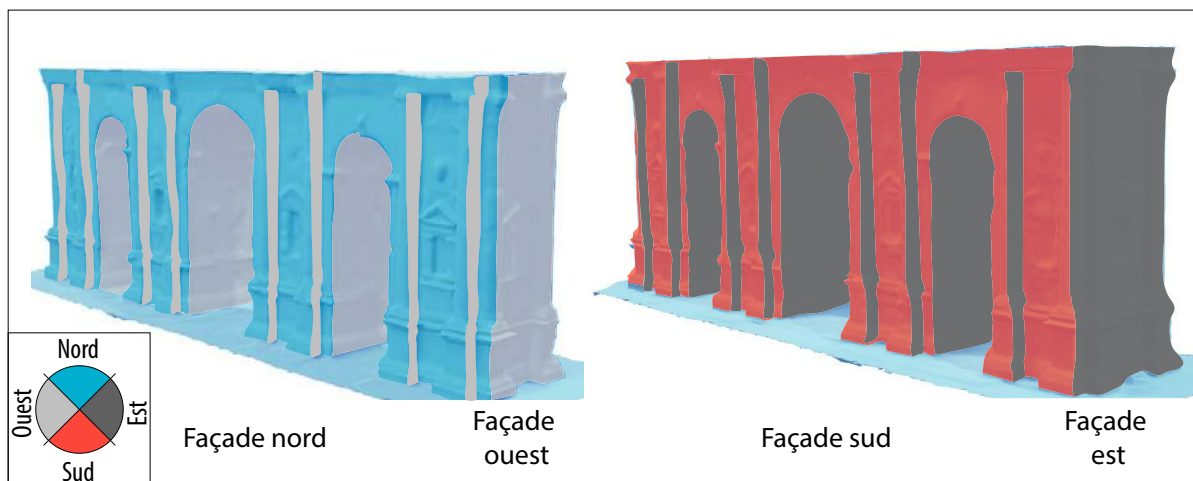


Figure IV-10. Orientations des façades de la Porte de Mars

L'expression de ces microclimats sur les façades se vérifie également dans l'expression des altérations relevées sur les parois de la Porte de Mars (Figure III-76, page III-291 et Figure IV-10). La disparité des conditions microclimatiques régnant au niveau de chaque façade est un des facteurs explicatifs de la diversité de typologie et de développement des altérations des façades précédemment quantifiées (Figure III-61). En plus des influences microclimatiques qui à elles seules expliquent pleinement le différentiel d'altération entre les différentes façades, qui pour mémoire sont bien plus développées sur les façades nord et ouest, il faut également considérer que ces dernières ont parfois été massivement restaurées au cours du XIX<sup>e</sup> siècle avec des matériaux dénotant fortement avec les matériaux originels. Cependant, les réponses variées des différents matériaux à ces contraintes apparaissent comme un facteur important expliquant les divers degrés d'altérations de certains calcaires (en particulier ceux de la façade nord). Les altérations de la façade ouest seraient expliquées plutôt par l'exposition de la façade aux pluies battantes et à la nature légèrement dolomitisée des calcaires utilisés pour sa reconstruction.

### 3.3. Susceptibilité vis-à-vis des sels (SSI)

La Porosité des roches et en particulier la porosité connectée est considérée comme l'un des principaux facteurs de contrôle de la dégradation des pierres de construction (Etris *et al.* 1988 ; Hammecker et Jeannette 1994 ; Benavente *et al.* 2004 ; Yu et Oguchi 2010). La taille des pores est dans le cas de la cristallisation des sels un paramètre important. En effet, d'après de nombreux auteurs, les pores d'un diamètre apparent inférieur à 5 µm subissent une pression plus importante lors de la cristallisation de sels en leur sein (Benavente *et al.* 2004 ; Yu, Oguchi 2010). En s'appuyant sur l'existence d'indices de durabilité antérieurs, Yu et Oguchi (2010) ont proposé un index de susceptibilité des roches à l'altération due aux sels, *Salt Susceptibility Index* (SSI), basé sur les caractéristiques du réseau poreux des matériaux identifiés grâce à la porosimétrie au mercure. Cet index se calcule à partir de l'équation :

$$SSI = (I_{Pc} + P_{m0,01}) (P_{m5}/P_c) \quad \text{Équation 1}$$

Pour Yu et Oguchi (2010), cette équation permet de rapprocher grossièrement la porosité connectée ( $P_c$ ) d'une roche à sa susceptibilité au sel, en considérant que les propriétés hydromécaniques y sont indirectement liées. Il ne s'agit pas uniquement d'utiliser la porosité connectée comme seul descripteur, puisque les auteurs ont également ajouté l'influence de la microporosité ( $P_{m0,01}$ ) et le rapport entre  $P_{m5}$  et  $P_c$  qui traduit l'influence qu'aurait une quantité importante de sel absorbée à exercer une contrainte sur un grand volume de roche.

Les résultats de ce calcul sont présentés dans le tableau (Tableau IV-3). Si l'on se réfère aux classes de susceptibilités définies par Yu et Oguchi (2010 ; Annexe 52), les valeurs d'index comprises entre 2 et 4 indiquent une roche résistante à l'altération par les sels, les valeurs comprises entre 4 et 10 signalent des roches sensibles à l'altération par les sels. Les valeurs supérieures à 10, mais inférieures à 15, désignent les roches très sensibles à l'altération par les sels.

Nom	Positions architecturales	Pm0,1 (%)	Pm 5 (%)	Pc	lpc	lpm0,1	Pm5/Pc	SSI	Résultats
BART b	Soubassement	9,2	16	18,57	5	5	0,9	4,7	Sensible aux sels
BART a	Equivalent soubassement	7,2	5	10,47	5	3	0,5	3,8	Résistants aux sels
Lut IV b	Restaurations	2,9	8	16,99	5	3	0,5	3,8	Sensible
Lut IV a		4,6	11,5	24,39	6	3	0,5	2,8	
Lut III d	Soubassement	2,9	10,6	26,57	2	6	0,4	3,2	Résistants aux sels
Lut III c	Equivalent soubassement	3,3	5,2	11,00	4	3	0,5	3,3	
Lut III b		4,9	8,5	18,00	5	3	0,5	3,8	
Lut III a		4,2	2,4	5,15	3	3	0,5	2,8	
Lut II b	Restaurations	2,7	12,9	27,26	7	3	0,5	4,7	Sensibles aux sels
Lut II a		4,9	8,3	17,52	5	3	0,5	3,8	Résistants aux sels
Lut I d	Equivalents élévations	2,4	8,5	17,91	5	2	0,5	3,3	Sensibles aux sels
Lut I c		4,7	12,2	25,84	7	3	0,5	4,7	
Lut I b		3,6	14,2	29,99	7	3	0,5	4,7	
Lut I a		3,7	19,9	42,12	10	3	0,5	6,1	
SAV	Restaurations	4,5	15,5	32,73	8	3	0,5	5,2	

Tableau IV-3. Indices de résistance aux sels (SSI Index ; Yu et Oguchi 2010) calculés pour les matériaux de cette étude



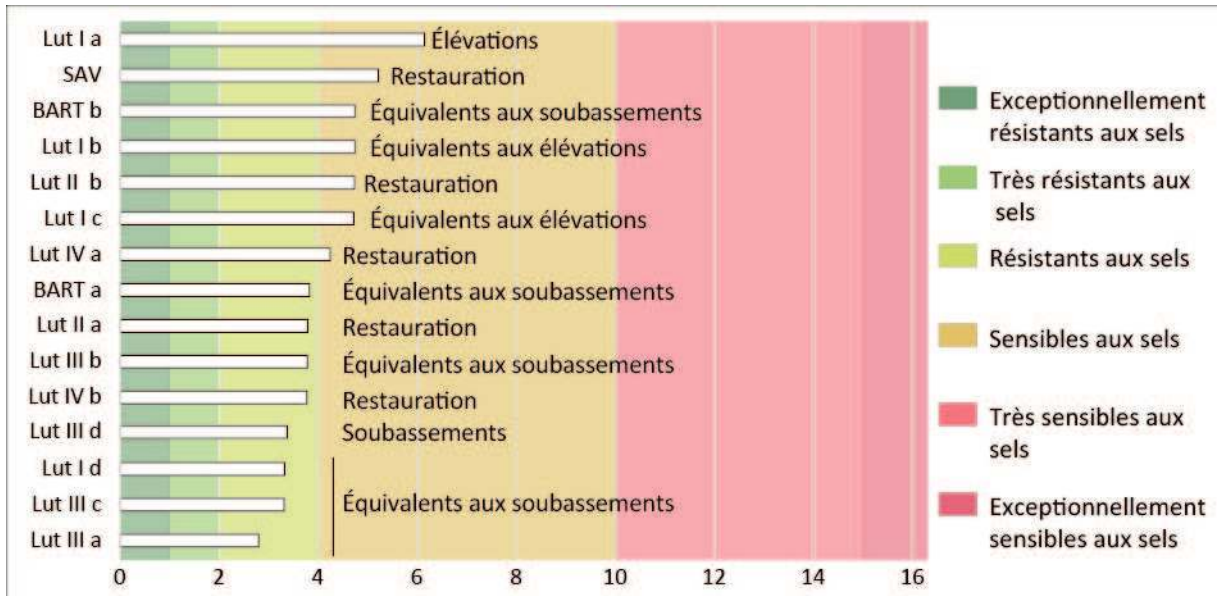


Figure IV-11. Interprétations des index de susceptibilité au sel (SSI)

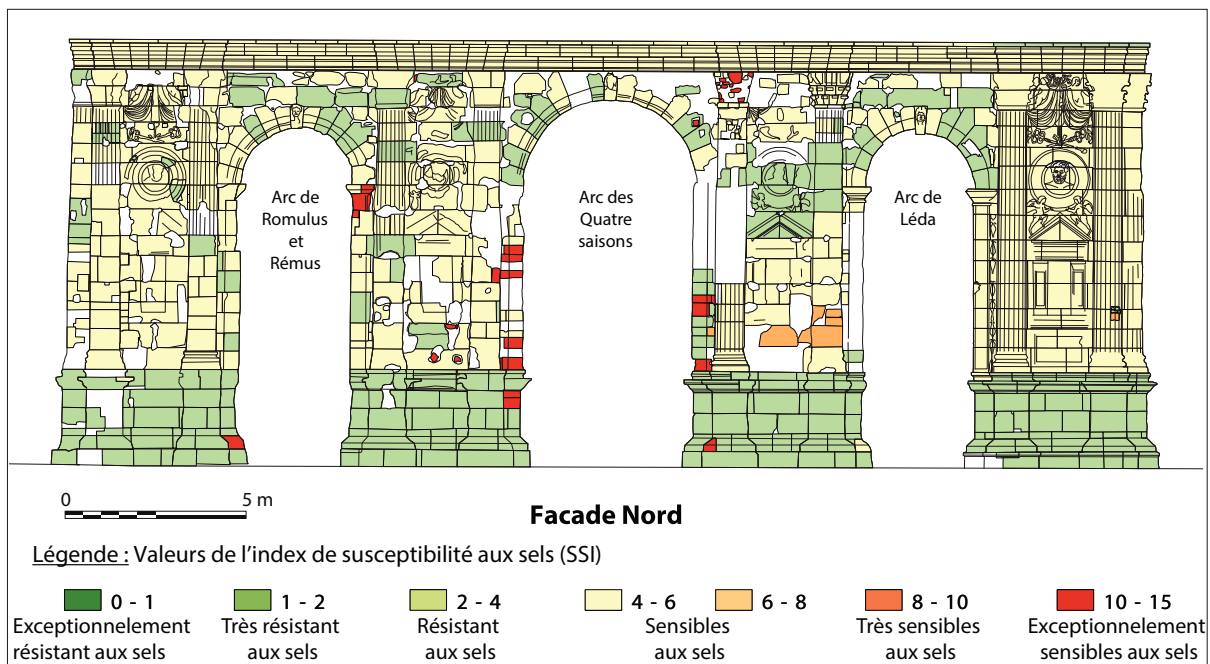


Figure IV-12. Cartographie des indices de susceptibilité aux sels (SSI) à l'échelle de la Porte de Mars. Le découpage des susceptibilités est celui proposé par Yu et Oguchi (2010)

Le calcul de cet index permet de démontrer que les calcaires utilisés préférentiellement pour la construction des élévations sont, de manière générale assez sensibles à l'altération par les sels (Figure IV-11, Figure IV-12 et Annexe 53). Cette sensibilité est étonnamment équivalente pour les calcaires utilisés dans le cadre des restaurations et pour les autres calcaires qu'ils soient engagés dans les maçonneries ou leurs équivalents. Le relevé sur la façade ouest, où ces pierres sont mises en œuvre, fait apparaître de nombreuses desquamations. Le développement

de ce type d'altération découlerait alors de l'action conjuguée des pluies battant cette façade, mais pourrait également être exacerbé par l'utilisation de liants à base de plâtre au cours de la reconstruction de cette pile<sup>88</sup>.

Dans le cas des blocs d'oolithes vacuolaires utilisés en restauration (dite Pierre de Savonnières), la complexité du réseau poral découlant en grande partie de la dissolution des nucleii oolithiques tend à surestimer la microporosité de la pierre dans les mesures de porosité par intrusion de mercure (Huby, 2021). C'est également cet agencement particulier de la porosité qui permet à cette pierre de particulièrement bien accommoder les déformations liées aux croissances cristallines.

---

<sup>88</sup> Études préalables à la restauration de la Porte de Mars réalisées en 2017 et 2018, Eugène Architecte du Patrimoine et Studiolo, documents non publiés.



## CONCLUSION GÉNÉRALE



*Romulus et Rémus sous la louve, bas relief de la baie est de la Porte de Mars*

42, The «Answer to the Ultimate  
Question of Life, the Universe,  
and Everything»  
*Douglas Adams «The Hitchhiker's  
Guide to the Galaxy»*



## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 1. Conclusions générales

Le projet initial de ce travail était de déterminer quels ont été les matériaux mis en œuvre dans la construction antique de la ville de Reims (*Durocortorum*). Au-delà de leurs identifications, il s'agissait également de déterminer l'existence d'une rationalisation dans leur usage et, le cas échéant, selon quel(s) critère(s). Enfin, au travers l'étude de la Porte de Mars, antépénultième monument antique de la ville encore en élévation, de comprendre comment ces critères se sont manifestés au travers d'une documentation efficace relative aux éléments de construction du bâtiment et la caractérisation de leurs propriétés pétrophysiques.

Pour répondre à ces questionnements initiaux, l'étude des matériaux a été réalisée suivant une démarche multiscalaire depuis la région au bâtiment. Elle a d'abord consisté en un recensement et une description des matériaux de construction disponibles à *Durocortorum* et dans ses différentes aires d'approvisionnement jusqu'à l'échelle régionale. À l'échelle de l'agglomération, l'étude s'est d'abord intéressée aux grands types de construction dont les traces ont été relevées dans les archives archéologiques de la ville, puis, à l'échelle du monument, avec l'étude des matériaux de la Porte de Mars. Enfin à partir des caractérisations pétrophysiques des pierres de cet édifice, ce travail a permis d'identifier autour de quel(s) critère(s) leur usage a été rationalisé. En dernier lieu, ces caractérisations ont permis d'évaluer leur susceptibilité vis à vis de certains paramètres d'altération.

Les observations de terrain ont conduit à définir l'éventail des pierres utilisées dans la construction antique. Ces observations ont apporté la preuve d'une grande **homogénéité dans les usages des matériaux à l'échelle de l'agglomération** durant l'Antiquité. Cette cohésion découle largement de l'accessibilité aux ressources lithiques et lapidaires **déterminée par la géologie locale et régionale**.

**Plusieurs stratégies d'approvisionnement** en pierres de construction ont été mises en place afin de pourvoir aux besoins de l'agglomération. Ces stratégies dépendent principalement de l'implantation initiale de la ville sur les dépôts de craie du Mésozoïque et à proximité des formations sédimentaires du Cénozoïque de la Côte d'Île de France. Ces matériaux aux caractéristiques et aptitudes pour la construction très diverses sont issus d'aires d'approvisionnement de rayons croissants (Figure V-1). **L'exploitation des matériaux disponibles dans l'aire *in situ*** est logiquement l'objet d'un usage préférentiel pour répondre aux besoins en matériaux les plus communs. Cela passe en particulier par l'utilisation des terres crues dans les maçonneries, déjà identifiée comme une spécificité régionale. **L'exploitation des pierres de l'aire d'approvisionnement locale, est destinée à l'extraction de pierres à moellons** (calcaires, grès et meulières) ou même de matériaux meubles (argiles et sables)

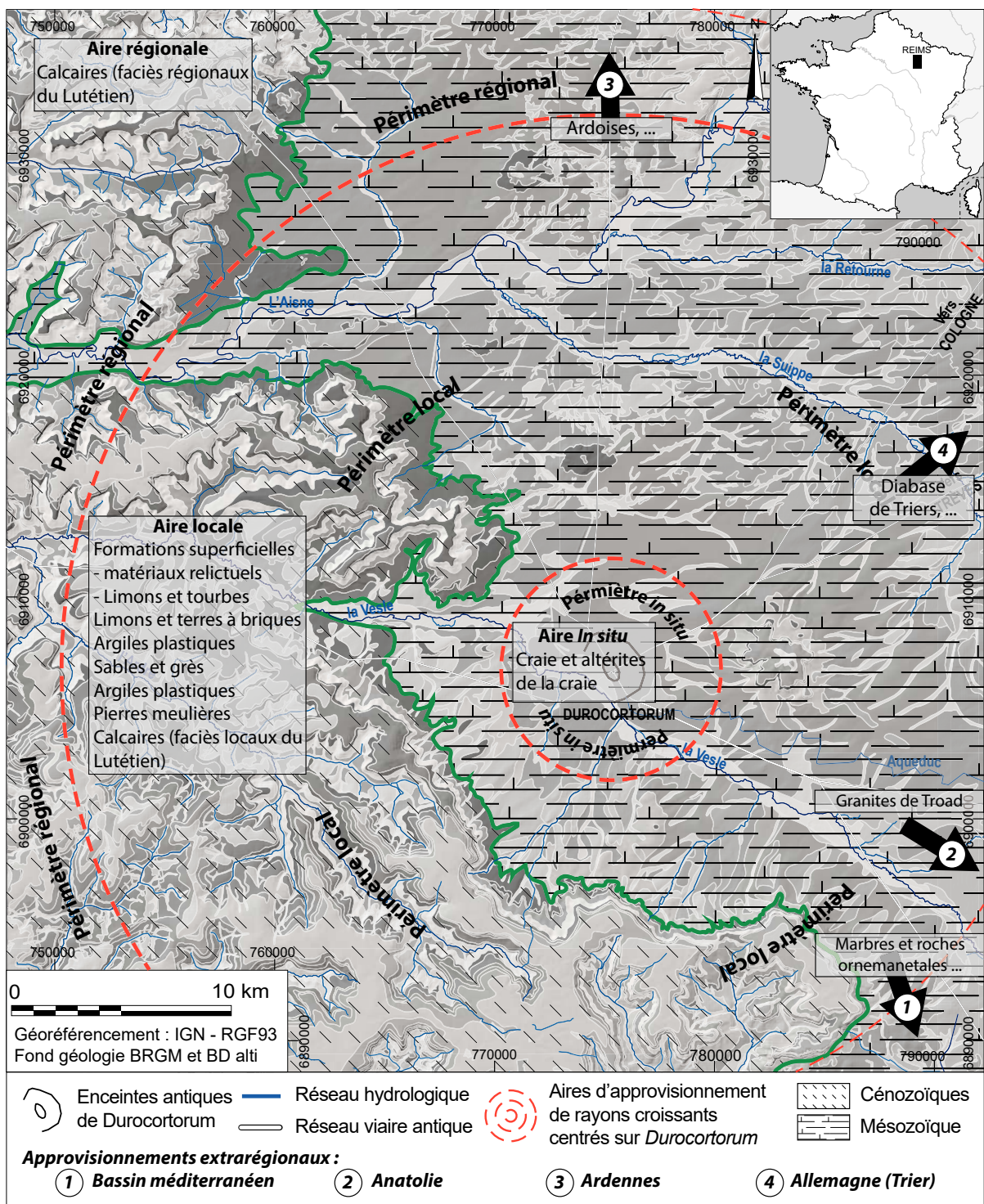


Figure V-1. Carte synthétique des approvisionnements en matériaux de construction en fonction de leurs aires de provenances

intensivement utilisés dans de très nombreux pans de l'architecture de *Durocortorum*. **Les importations de matériaux issus de l'aire d'approvisionnement régionale** sont synchrones de l'adoption des modalités architecturales romaines et en particulier du grand appareil quadrangulaire. Enfin, **l'importation depuis des aires extrarégionales** de matériaux lithiques spécifiques, indisponibles à proximité de Reims, a bénéficié à l'agglomération dont la position au carrefour de grands axes routiers a largement profité. Cette **sectorisation entre différentes aires d'approvisionnement** prend alors tout son sens puisque chacune de ces aires possède

des ressources lithiques spécifiques mobilisables en réponse à des besoins précis. Il en découle une certaine **optimisation de l'usage des matériaux** en fonction de leur positionnement finale dans les édifices.

L'étude des matériaux issus d'un large spectre architectural a démontré que pour chacun d'entre eux étaient utilisés **des ensembles spécifiques de pierres**. Ce premier niveau **de l'usage des matériaux en fonction des typologies architecturales** est complété par un second niveau lisible au sein des bâtiments, depuis les fondations jusqu'aux entablements. Cet usage rationalisé est également perceptible dans les cas de remploi tout en maintenant un **haut niveau d'optimisation pour les usages spécialisés**.

Cette étude des matériaux de construction a permis de mettre en évidence **l'explosion de l'utilisation des pierres dans les procédés de construction** dans tous les domaines de l'architecture dès les premières années de l'agglomération gallo-romaine. Ce développement technique découle d'un savoir empirique assimilé par les bâtisseurs de la ville (ou de la cité) en transposant **les méthodes de construction italiques aux matériaux locaux et régionaux**. Les besoins importants et croissants en matériaux de construction imposés par l'édification (et l'entretien) d'une ville de plus de 600 ha, de son importante parure monumentale et de ses équipements urbains, a nécessité **l'ouverture et le maintien** de carrières de pierres calcaires et de matériaux meubles.

Au cours de l'Antiquité, une forte évolution des stratégies d'approvisionnement a été identifiée à la charnière entre le Haut Empire et l'Antiquité Tardive. La première période est caractérisée par des approvisionnements largement tournés vers les aires locales et régionales, puis progressivement ces stratégies évoluent pour se tourner vers le remploi systématique des matériaux disponibles dans la frange de la ville située à l'extérieur du rempart.

La description et l'étude spécifique de la Porte de Mars, un des derniers monuments antiques encore en élévation dans la ville, a été l'occasion de mener une **réflexion sur la façon dont les informations issues de ce travail ont été stockées et valorisées**. La méthode choisie repose sur **la construction d'une maquette numérique géométriquement fiable**, dont les produits dérivés ont été utilisés comme support d'une information sémantique riche, dans **un projet structuré dans une plateforme SIG**. Au-delà de l'interopérabilité nécessaire à la valorisation d'un projet patrimonial et multidisciplinaire, l'outil a permis l'enregistrement d'un grand nombre de données issues en particulier de l'étude géologique du bâtiment. Les matériaux de construction originels ont été discriminés de ceux utilisés au cours des diverses phases de restauration et leurs proportions relatives ont été quantifiées grâce aux fonctionnalités du SIG.

À l'échelle d'un monument, l'étude des matériaux a démontré **l'emploi d'un ensemble de calcaires importés depuis l'aire régionale** (au-delà de 25 km), conformément aux pratiques mises en évidence pour les monuments en grand appareil. Elle a également permis d'identifier **la rationalisation du positionnement architectural des pierres** à l'échelle d'un monument en élévation. La caractérisation des pierres a mis en exergue un emploi reposant principalement sur les **propriétés de transferts hydriques des pierres** et en particulier la capillarité. L'examen des altérations présentes et de leurs moteurs a également permis **l'évaluation de la susceptibilité des pierres du monument** vis-à-vis de certains agents de dégradation environnementaux tels que les sels ou les facteurs thermo-hydriques.



## 2. Perspectives

Les résultats obtenus dans cette thèse ont soulevé de nouvelles interrogations et de mettre en évidence certaines limites permettant de dégager des perspectives :

Les tentatives de quantification des matériaux de construction ont montré qu'elles pouvaient aboutir à une estimation, qui, bien que discutable, permet de poser les bases d'une réflexion. La quantification des matériaux à l'échelle de l'agglomération antique s'appuyant sur une synthèse cartographique précise et sur une réflexion quant à l'évolution de la structuration urbaine, apporterait probablement une quantification des matériaux importés sur le site de l'agglomération depuis sa fondation jusqu'à aujourd'hui. L'utilisation de données de subsurfaces (sondages et fouilles archéologiques), donnant des datations pour les différentes interfaces rencontrées permettrait à la fois des corrélations, donc des évaluations de volumes pour chaque période envisagée. Cependant des incertitudes demeurent sur les quantités de matériaux déplacés par les travaux d'édification des enceintes (fossés et rempart) mais aussi pour les quantités de matériaux remployés au cours de l'histoire de la ville.

L'une des spécificités principales de l'architecture antique réside dans l'utilisation de liants de maçonnerie caractéristiques. Or, au cours de ce travail, il est rapidement apparu que la diversité de composition des mortiers et enduits utilisés dans la construction locale aurait nécessité à elle seule un travail dont l'ampleur aurait probablement dépassé la tâche que représentait l'étude des pierres. Sur ces aspects, outre **les typologies, les compositions et les utilisations architecturales des mortiers**, les comparaisons à l'échelle régionale permettraient de compléter le travail sur les pierres afin de dresser un panorama de l'utilisation des ressources minérales dans la construction.

Une synthèse cartographique fondée sur des données archéologiques, géologiques et géotechniques à l'échelle de la ville, afin de préciser le « potentiel archéologique de la cité », ou plus sobrement une cartographie de la paléosurface antique (surface topographique antérieure à la fondation de la ville), permettrait d'argumenter les estimations des quantités de matériaux utilisés, mais également un support à l'évaluation du potentiel archéologique de la ville tout en reconstituant un état environnemental périurbain.

La prise en compte de datations plus fines, au-delà d'un phasage entre Haut Empire et Antiquité Tardive, des différents sites dont les matériaux ont été décrits, permettrait d'accéder à une vision plus fine de l'éventuelle évolution dans les usages des matériaux. Ce degré supplémentaire de précision serait appréciable en particulier pour la période succédant immédiatement à la conquête puisqu'elle mettrait en avant la manière dont s'est généralisé l'emploi des matériaux. À cette occasion, l'application d'une approche statistique sur l'ensemble du corpus de matériaux serait à rapidement privilégier afin d'affiner la lecture de l'emploi des matériaux dans l'agglomération antique.

**Comparer ces résultats avec ceux issus d'autres agglomérations antiques proches** (Châlons-en-Champagne, Soissons et Laon notamment), permettrait éventuellement de contraster ces résultats en proposant des phasages à l'échelle régionale (et peut-être de percevoir les influences sociopolitiques extrarégionales).

L'aboutissement méthodologique des techniques éprouvées dans ce travail est actuellement limité par l'outil SIG et ses développements. La consultation, même simplifiée, à distance des informations disponibles passerait par une extension de cet outil (interface web-SIG). D'autre part, l'évolution/migration vers un outil nativement en 3D plutôt qu'en 2D, permettrait de mieux appréhender les volumes et les relations géométriques entre les différentes façades en travaillant directement sur un modèle tridimensionnel plutôt que sur des données projetées sur des plans. L'évolution des outils de SIG pour permettre une application directe à un modèle tridimensionnel augmenterait alors sensiblement la précision de la documentation d'un monument.

L'élargissement presque à l'infini des bases de données de matériaux et de leurs propriétés, à d'autres caractérisations pétrophysiques et géotechniques ainsi que l'ajout d'autres pierres, permettrait d'augmenter la pertinence des scénarii de susceptibilité et de tendre vers la conception de cartes de durabilité *sensu stricto*. L'évaluation des compatibilités entre différentes pierres et en particulier celles utilisées dans le cadre des restaurations pourrait également être testée préalablement à leur mise en place. Après plusieurs thèses de doctorat menées sur les matériaux de l'agglomération, leurs modalités d'altérations et leurs facteurs de contrôle (Turmel 2014 ; Gibeaux 2017 ; Huby, 2021), l'utilisation de ces données peut maintenant servir de base à la réalisation de modèles d'altération des pierres de façades des monuments rémois dans leur ensemble.



## BIBLIOGRAPHIE



Grande Mosaïque au « *memento mori* » de Pompéi. Tête de mort avec les attributs du mendiant et du roi, Le crâne est surmonté d'une *libella* (équerre-niveau)  
*Emblema* de la mosaïque d'une maison de Pompéi (I, V, 2) 79 av. J.C., Musée d'archéologie de Naples



## TEXTES ANCIENS

**CÉSAR**, 1981, *Guerre des Gaules*, texte établi par L.-A. Constans, Société d'Édition « Les Belles Lettres », coll. des universités de France, Paris, 1981, 2 vol., 337 p., 2 cartes. S.l. : s.n.

**CICÉRON**, 1837, *De Divinatione*. De la divination, traduction de M. de Golbery. Paris, C. L. F. Panckoucke, 482 p.

**FLODOARD**, 1881, Histoire de l'Église de Reims, tome 1, édition et traduction J. Lejeune, Reims, 1854-1855 : *Historia remensis ecclesiae*, éd. J. Heller et G. Watz, *Monumenta Germaniae Historica Scriptores, Rerum merovingicarum*, Hannover, p. 405-599

**PLINE L'ANCIEN**, 2015. Histoire Naturelle, Livre IV, Texte établi, traduit et commenté par H. Zehnacker et A. Silberman. Belles-Lettres. Paris : s.n.

**STRABON**, *Geōgraphikà*. Géographie, traduction nouvelle par A. Tardieu, sous-bibliothécaire de l'Institut. Volume 1 : livres I à VI ; Volume 2 : livres VII à XII ; Volume 3 : livres XIII à XVII. Paris, Librairie de L. Hachette et Cie, 1867-1890 (3ème édition, 1909), 1 533 p.

**TACITE**, *Historiae* (Histoires), tome I, livre I, éditeur et traducteur P. Wuilleumier et H. Le Bonniec, annoté par J. Hellegouarc'h, Les Belles Lettres (CUF, série latine), 2002

**TITE-LIVE**, Abrégés des Livres de l'Histoire romaine, « Periochae » transmises par les manuscrits, édité et traduit. P. Jal, Paris, Les Belles Lettres (CUF, série latine) 1984,

**VITRUVÉ**, *De Architectura*. Les dix livres d'architecture, traduction de C. Perrault revue par M. Nisard. Paris, Éditions Errance, 2005, 160 p.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### A

**ABRARD, R.**, 1925. *Le Lutétien du Bassin de Paris*. Thèse de Troisième Cycle. Angers : Université d'Angers.

**ACHARD-COROMPT, N.**, 2011. *Deux nécropoles et un habitat antique en périphérie de Durocortorum : Bezannes (Marne), ZAC 1, Sites K et L, phase Tramway : rapport de fouilles*. Rapport Final d'Opération. Metz : Inrap GEN.

**ACHARD-COROMPT, N. et DELOR-AHÜ, A.**, 2012. La fouille d'un petit établissement gallo-romain de la seconde moitié du 1er s. ap. J.-C. à Bezannes, en périphérie de Reims (Marne). . 2012. pp. 14.

**ACHARD-COROMPT, N., KASPRZYK, M., DUROST, R. et BONTROND, R.**, 2016. Présence des élites en milieu rural en territoires rème et tricasse durant le Haut-Empire : l'apport dans les monuments funéraires. In : **CASTORIO, Jean-Noël et MALIGORNE, Yvan (éd.)**, *actes du séminaire, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 18 avril 2015*. Bordeaux Pessac : Ausonius

éditions. 2016. pp. 35-64. Scripta antiqua. ISBN 978-2-35613-167-6. 936.402

**ACHILLI, V.**, 2012. Spoliations et remplois aux III<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> siècles à Reims antique (Durocortorum). **CAMPORALE, S., DESSALES, H. et PIZZO, A. (éd.)**, *Arqueología de la construcción III Los procesos constructivos en el mundo romano: la economía de las obras* [en ligne]. 2012. pp. 245-257.

**ACIERNO, M., CURSI, S., SIMEONE, D. et FIORANI, D.**, 2017. Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. mars 2017. Vol. 24, pp. 124-133. DOI 10.1016/j.culher.2016.09.010.

**ADAM, J.-P.**, 1984. *La construction romaine. Matériaux et techniques 7e édition* [en ligne]. 7e édition 2017. Picard. ISBN 2-7084-1037-7.

**ADAMOPOULOS, E., TSILIMANTOU, E., KERAMIDAS, V., APOSTOLOPOULOU, M., KAROGLU, M., TAPINAKI, S., IOANNIDIS, C., GEORGOPOULOS, A. et MOROPOULOU, A.**, 2017. Multi-sensor documentation of metric and qualitative information of historic stone structures. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 16 août 2017. Vol. IV-2/W2, pp. 1-8. DOI 10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-1-2017.

**AFNOR**, 2006. *NF B10-601 - Produits de carrière - Pierres naturelles - Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles* [en ligne]. 2006. AFNOR.

**AFNOR**, 2007. *NF EN 1936, B10-615, Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale* [en ligne]. mai 2007.

**AFNOR**, 2010. *NF EN 15801 - Conservation des biens culturels - Méthodes d'essai - Détermination de l'absorption par capillarité* [en ligne]. AFNOR.

**AGAPIOU, A., LYSANDROU, V., THEMISTOCLEOUS, K. et HADJIMITSIS, D. G.**, 2016. Risk assessment of cultural heritage sites clusters using satellite imagery and GIS: the case study of Paphos District, Cyprus. *Natural Hazards* [en ligne]. 1 octobre 2016. Vol. 83, n° 1, pp. 5-20. DOI 10.1007/s11069-016-2211-6.

**AGISOFT**, 2019. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5* [en ligne]. Agisoft.

**AIRES-BARROS, L.**, 2000. Modes and mechanisms of rock weathering. In : *Protection and conservation of the cultural heritage of the Mediterranean cities*. Séville. 2000. pp. 3-6.

**AKE, D.**, 2016. *Le BIM, c'est pour quoi ? C'est pour qui ? C'est pour quand ? (Version 2 étendue) : La maquette numérique et ses applications - Guide BIM à destination ... de construction, gestionnaires de patrimoine*. LVLavergne : CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 978-1-5369-2832-7.

**ALLAIN, J., FAUDUET, I. et TUFFREAU-LIBRE, M.**, 1992. *La nécropole du Champ de l'Image à Argentomagus-Saint-Marcel (Indre)*. Saint-Marcel. Mémoire du Musée d'Argentomagus, 3e suppl. à la R.A.C.F.

**ALLEN, K.M.S. et GREEN, S.W.**, 1990. *Interpreting space: Gis and archaeology*. Taylor & Francis Group, London.

**ALLOUC, J.**, 2013. Les craies hydrofracturées de Champagne marnaise (de la Côte de Champagne à la Côte d'Ile de France). Approche cartographique et relations avec la tectonique régionale. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*. 2013. Vol. 51, n° 3, pp. 3-23.

**AMY, R.**, 1970. L'inscription de la maison carrée de Nîmes. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres* [en ligne]. 1970. Vol. 114, n° 4, pp. 670-686. DOI 10.3406/crai.1970.12583.

**ANONYME**, 1993. Notice no PA00078825, base Mérimée, ministère français de la Culture. [en ligne]. 1993.

**ANSON-CARTWRIGHT, T., VERGÈS-BELMIN, V., BOURGUIGNON, E., BROMBLET, P., CASSAR, J., CHAROLA, A. E., DE WITTE, E., DELGADO-RODRIGUES, J., FASSINA, V., FITZNER, B., FORTIER, L., et OTHERS**, 2008. *Illustrated glossary on stone deterioration : Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*. Paris : ICOMOS. Monuments and sites, 15. ISBN 978-2-918086-00-0.

**ANTÓN, D., MEDJDOUB, B., SHRAHILY, R. et MOYANO, J.**, 2018. Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage* [en ligne]. 4 juillet 2018. Vol. 12, n° 5, pp. 790-805. DOI 10.1080/15583058.2017.1415391.

**APOLLONIO, F. I., GAIANI, M. et BENEDETTI, B.**, 2012. 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: a framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. *Journal of Archaeological Science* [en ligne]. 1 mai 2012. Vol. 39, n° 5, pp. 1271-1287. DOI 10.1016/j.jas.2011.12.034.

**ARDHUIN, M.**, 1985. Jonchery-sur-Suippe. In : **NEISS, R. (éd.)**, *Champagne-Ardenne*. pp. 367. Gallia, 43.

**ASIMOV, I.**, 2006. *Le cycle de fondation*. ISBN 978-2-07-036053-6.

**AUBRY, M.-P., THIRY, M., DUPUIS, C. et BERGGREN, W. A.**, 2005. The Sparnacian deposits of the Paris Basin: A lithostratigraphic classification. *Stratigraphy*. 2005. Vol. 2, n° 1, pp. 65-100.

**AUER, M., AGUGIARO, G., BILLEN, N., LOOS, L. et ZIPF, A.**, 2014. Web-based Visualization and Query of semantically segmented multiresolution 3D Models in the Field of Cultural Heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 28 mai 2014. Vol. II-5, pp. 33-39. DOI 10.5194/isprsannals-II-5-33-2014.

## B

**BAGNOLO, V., ARGIOLOS, R. et CUCCU, A.**, 2019. HBim for archaeological sites: from SFM based survey to algorithmic modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 31 janvier 2019. Vol. XLII-2/W9,



pp. 57-63. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-57-2019.

**BALLIF, J.-L., GUÉRIN, H. et MULLER, J.-C.**, 1995. *Éléments d'agronomie champenoise - connaissance des sols et de leur fonctionnement-Rendzines sur craie et sols associés. Esquisse géomorphopédologique*. INRA. Versailles.

**BALMELLE, A.**, 1995. *Reims (Marne), Le site de la « villa des Capucins ». Occupation de la Tène finale, les fortifications de l'oppidum et occupation du Haut-Empire*. Reims, 57, rue des Capucins/14-20, rue Boulard. DFS de sauvetage urgent. Châlons-en-Champagne : SRA de Champagne-Ardenne, Afan.

**BALMELLE, A.**, 1999. *Reims (Marne), 14-16 rue des moissons, document Final de synthèse*. Rapport Final d'Opération. Chalons-en-Champagne : AFAN, SRA Champagne-Ardenne.

**BALMELLE, A., BERTHELOT, F. et PODGORNÝ, A.**, 1988. *Reims (Marne) - 28, boulevard Joffre sauvetage programmé*. Rapport Final d'Opération. Reims : AFAN.

**BALMELLE, A. et NEISS, R.**, 2003. Les maisons de l'élite à Durocortorum. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 2003. Vol. 96, n° 4, pp. 102.

**BALMELLE, A., NEISS, R., SINDONINO, S., HUART, P. et RABASTÉ, Y.**, 2021. Survol d'un demi-siècle d'archéologie urbaine à Reims. **BESSON, C. et BLIN, O. (éd.)**, *Nouvelles de l'archéologie, L'archéologie urbaine en mouvement*. 2021. N° 164, pp. 46-54.

**BALMELLE, A. et SINDONINO, S.**, 2004. *Reims (Marne) 6, rue des Fuseliers, rue Chanzy, rue Rockefeller : Médiathèque Cathédrale : rapport de fouilles*. Rapport Final d'Opération. Metz : Inrap GEN.

**BALTSAVIAS, E. P.**, 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en ligne]. 1 juillet 1999. Vol. 54, n° 2, pp. 83-94. DOI 10.1016/S0924-2716(99)00014-3.

**BARRIER, P., LECONTE, P. et PACAUD, M.**, 2020. Provenance des matériaux de construction du site de la citadelle d'Amiens (Somme) de l'Antiquité à nos jours : un circuit court pour des matériaux oubliés. In : **BLARY, F. et GÉLY, J.-P. (éd.)**, *Ressources et construction : la transmission des savoirs sur les chantiers* [en ligne]. Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques. ISBN 978-2-7355-0899-0.

**BART, E., FRONTEAU, G. et ROLLET, P.**, 2017. Les monuments funéraires sculptés de la rue Belin à Reims (Marne). *Revue du Nord* [en ligne]. 2017. Vol. 423, n° 5, pp. 39-75. DOI 10.3917/rdn.423.0039.

**BATARDY, C., BUCHSENSCHUTZ, O. et DUMASY, F.**, 2001. *Le Berry antique: atlas 2000*. Tours : FERAC. Supplément à la « Revue archéologique du Centre de la France », 21. ISBN 978-2-913272-05-7. 930.120 9445

**BAUER, A. M.**, 2012. Flieh alleine, wenn du kannst! Über die Geschwindigkeit eines Trosses. In : *Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft in Wien (MAGW)* [en ligne]. Wien. 1 janvier 2012. pp. 61-74.

**BECCALETTO, L., HANOT, F., SERRANO, O. et MARC, S.**, 2011. Overview of the subsurface structural pattern of the Paris Basin (France): Insights from the reprocessing and interpretation of regional seismic lines. *Marine and Petroleum Geology* [en ligne]. avril 2011. Vol. 28, n° 4, pp. 861-879. DOI 10.1016/j.marpetgeo.2010.11.006.

**BECK, K.**, 2006. *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*. Thèse de doctorat. Orléans : Université d'Orléans.

**BECK, K. et AL-MUKHTAR, M.**, 2010. Evaluation of the compatibility of building limestones from salt crystallization experiments. *Geological Society, London, Special Publications* [en ligne]. 2010. Vol. 333, n° 1, pp. 111-118. DOI 10.1144/SP333.11.

**BEDON, R.**, 1984. *Les carrières et les carriers de la Gaule romaine*. Paris : Picard. ISBN 978-2-7084-0107-5. DC63 .B38 1984

**BEDON, R.**, 2000. La pierre et les carrières de l'Occident romain dans les textes antiques. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France* [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1, pp. 49-59.

**BENAVENTE, D., GARCÍA DEL CURA, M.A., FORT, R. et ORDÓÑEZ, S.**, 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology* [en ligne]. juillet 2004. Vol. 74, n° 1-2, pp. 113-127. DOI 10.1016/j.enggeo.2004.03.005.

**BENDICHO, V.M. L.-M., ORTEGA, Á. M., VINCENT, M., MARTÍN-BUITRAGO, Á. J. C. et PINTADO, J. O.**, 2017. Combined use of digital nightlight photography and photogrammetry in the process of petroglyphs documentation: the case of Alcázar de San Juan (Ciudad Real, Spain). *Virtual Archaeology Review* [en ligne]. 26 juillet 2017. Vol. 8, n° 17, pp. 64-74. DOI 10.4995/var.2017.6820.

**BENOÎT, P., BLANC, A., GÉLY, J.-P., GUINI, A. S., OBERT, D. et VIRÉ, M.**, 2000. La pierre de Paris. Méthode d'étude de la pierre à bâtir depuis son extraction jusqu'à sa mise en œuvre. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France* [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1, pp. 121-158.

**BERGIER, N.**, 1622. *Histoire des grands chemins de l'Empire romain, contenant l'origine, progrès, et estenduë quasi incroyable des chemins militaires*. Paris : Morel.

**BERNDT, E. et CARLOS, J.**, 2000. Cultural heritage in the mature era of computer graphics. *IEEE Computer Graphics and Applications* [en ligne]. janvier 2000. Vol. 20, n° 1, pp. 36-37. DOI 10.1109/38.814549.

**BERNOT, E.**, 1995. *Reims une ville qui se fortifie : étude des comptes pour la fortification de 1346 à 1360*. Mémoire de Maîtrise d'histoire. Université de Reims Champagne-Ardenne.

**BERTHELOT, F., BALMELLE, A. et ROLLET, P.**, 1993. Archéologie urbaine 3 : sauvetage programmé : Conservatoire National de Musique et de Danse, rue Gambetta. *Bulletin de la Société archéologique champenoise*. 1993. Vol. 87, n° 4, pp. 199.

**BERTHELOT, F., BALMELLE, A., ROLLET, P. et BILLOIN, D.**, 1993. *Fouilles archéologiques. Site du Conservatoire national de région de musique et de danse, rue Gambetta, Reims (Marne), Reims, SAC (coll. Archéologie Urbaine, 3 ; BSAC, 87, 4), 132 p.* Bulletin de la société d'archéologie Champenoise. Archéologie urbaine à Reims, 3.

**BERTHELOT, F., BRIAND, X., DESJARDIN, E., PARGNY, D. et POIRIER, M.**, 2009. La restitution 3D, outil de l'archéologie de Reims antique (Durocortorum). In : **VERGNIEUX, R. (éd.)**, *Virtual Retrospect 2009* [en ligne]. Pessac, France. novembre 2009. pp. 11-17. halshs-01863933

**BERTHELOT, F., POIRIER, M., ROLLET, P. et BALMELLE, A.**, 2013. L'analyse de la composition urbaine de Reims entre la fin de la période gauloise et le IV<sup>e</sup> siècle : apport de trente ans de fouilles préventives. In : **RODIER, X. et LORANS, E. (éd.)**, *Archéologie de l'espace urbain* [en ligne]. Tours : Presses universitaires François-Rabelais. pp. 51-65. Perspectives Villes et Territoires. ISBN 978-2-86906-545-1.

**BESSAC, J.-C., CHAPELOT, O., DE FILIPPO, R., FERDIÈRE, Alain, JOURNOT, F., PRIGENT, D., SAPIN, A., PRIGENT, D. et SEIGNE, J.**, 2020. *La construction - les matériaux durs : pierre et terre cuite*. Réimpression. Arles : Éditions Errance. Archéologiques. ISBN 978-2-87772-649-8.

**BESSAC, J.-C. et SABLAYROLLES, R.**, 2002. Problématique archéologique des carrières antiques en Gaule. *Gallia* [en ligne]. 2002. Vol. 59, n° 1, pp. 3-9. DOI 10.3406/galia.2002.3092.

**BIANCO, S., CIOCCA, G. et MARELLI, D.**, 2018. Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines. *Journal of Imaging* [en ligne]. août 2018. Vol. 4, n° 8, pp. 98. DOI 10.3390/jimaging4080098.

**BIEGERT, S., DERU, X., FRONTEAU, G. et PAICHELER, J.-C.**, 2004. Les productions du « groupe de pâtes champenois » : caractérisations archéologiques, pétrographiques et chimiques. *Revue du Nord* [en ligne]. 2004. Vol. 358, n° 5, pp. 135. DOI 10.3917/rdn.358.0135.

**BITELLI, G., GATTA, G., GUCCINI, A.-M. et ZAFFAGNINI, A.**, 2019. GIS and Geomatics for archive documentation of an architectural project: The case of the big Arc of entrance to the Vittorio Emanuele II Gallery of Milan, by Giuseppe Mengoni (1877). *Journal of Cultural Heritage*. 2019. Vol. 38, pp. 204-212. DOI 10.1016/j.culher.2019.01.002. Scopus

**BLANC, A.**, 1984. *La Porte de Mars à Reims, Etude des matériaux*. Rapport d'expertise. Centre de Recherches sur les Monuments Historiques.

**BLANC, A., GIRARDY-CAILLAT, C., LORENZ, J., PÉNISSON, E. et TARDY, D.**, 2004. L'approvisionnement en pierre de Périgueux antique (sculpture, décor architectonique et décor plaqué). In : **LORENZ, J. et GÉLY, J.-P. (éd.)**, *Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes IV, Actes du 126<sup>ème</sup> congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Toulouse, 2001*. Toulouse : éd. du C.T.H.S. 2004. pp. 13-37.

**BLARY, F.**, 1999. Château-Thierry. *Revue archéologique de Picardie* [en ligne]. 1999. Vol. 16, n° 1, pp. 55-59. DOI 10.3406/pica.1999.2050.

**BLARY, F. et GÉLY, J.-P.**, 2020. *Pierres de construction : de la carrière au bâtiment*. Comité des travaux historiques et scientifiques (CTHS). Paris. Collection Orientations et méthodes. ISBN 978-2-7355-0917-1.

**BLONDEAU, A.**, 1966. Le calcaire grossier du Bassin de Paris. *Bulletin Bureau De Recherche Géologique Et Minière*. 1966. Vol. 2, n° 4, pp. 7-17.

**BLONDEAU, A., CAVELIER, C., FEUGUEUR, L. et POMEROL, C.**, 1965. Stratigraphie du Paléogène du Bassin de Paris en relation avec les bassins avoisinants. . 1965. DOI 10.2113/GSSGFBULL.S7-VII.2.200.

**BOLLOT, N., DEVOS, A., PIERRE, G., CHALUMEAU, L. et LEJEUNE, O.**, 2014. Détente mécanique et dynamique de versant dans l'Eocène de l'est du Bassin de Paris, France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [en ligne]. 2 septembre 2014. Vol. 20, n° vol. 20-n° 2, pp. 121-132. DOI 10.4000/geomorphologie.10573.

**BONTROND, R.**, en cours. *Reims (51), 140 rue des Capucins et rue des Moulins*. Rapport final de fouille préventive. Châlons-en-Champagne : Service archéologie du Grand Reims, DRAC Grand Est.

**BONTROND, R.**, 2018. *Reims, « Boulevard Désaubeau », Marne, Grand-Est (Alsace - Champagne-Ardennes - Lorraine), Phase 2 : couverture*. Rapport de fouille. Reims : Service Archéologie du Grand Reims.

**BONTROND, R., GUIOT, M., TROUBLARD, A. et VITZIKAM, S.**, 2015. *Reims « Boulevard Désaubeau »*. Rapport de fouille. Reims : SRA Champagne-Ardenne.

**BONTROND, R. et LENOBLE, M.**, 2018. Bilan sur les ateliers de tuiliers antiques et leurs productions dans les cités des Tricasses et des Rèmes. In : *SFECAG, actes du congrès de Reims*. Reims. 2018. pp. 227-232.

**BORDES, F.**, 1954. *Les limons quaternaires du Bassin de la Seine : stratigraphie et archéologie paléolithique*. Thèse de Troisième Cycle. Paris : Université de Paris, Faculté des sciences.

**BOUET, A.**, 2012. Le forum en Gaule : historiographie et problématiques actuelles. In : **BOUET, A. (éd.)**, *Le forum en Gaule et dans les régions voisines* [en ligne]. Ausonius. Bordeaux. pp. 13-40. Ausonius Mémoires.

**BOULEN, M.**, à paraître. Une histoire du paysage végétal à travers les analyses palynologiques du boulevard Dr Henri-Henrot à Reims. *Gallia. Archéologie des Gaules*. à paraître. Vol. 79, n° 1.

**BOURNÉRIAS, M.**, 1979. *Guide des groupements végétaux de la région parisienne*. SEDES-Masson. Paris.

**BOURNÉRIAS, M. et TIMBAL, J.**, 1979. Le Hêtre (*Fagus silvatica* L.) et les climax en Champagne crayeuse. *Bulletin de la Société botanique de France, Lettres botaniques*. 1979. Vol. 126, n° 2, pp. 336-240.

**BOYER, F. et FRONTEAU, G.**, 2011. Les géomatériaux meuliers : de l'identification des sources géologiques à la définition de catégories de gisements. In : **BUCHSENSCHUTZ, O., JACOTTEY, L., JODRY, F. et BLANCHARD, J.-L. (éd.)**, *Evolution typologique et technique des meules du Néolithique à l'an mille*. Editions de la Fédération Aquitania. pp. 121-135.

**BRIVES, A.-L.**, 2008. *Sépultures et société en Aquitaine romaine : étude de la fonction du mobilier métallique et du petit mobilier à partir des ensembles funéraires : (1er siècle avant J.-C./début du IVème siècle après J.-C.)* [en ligne]. Thèse de doctorat (Archéologie). Bordeaux 3.

**BRIVES, A.-L.**, 2017 Eléments d'harnachement et d'attelage en lien avec l'extraction de matériaux de construction sur le site du 22 rue Lecointre à Reims (Marne, 51). Dans : FEUGRERE, M. (dir.), *Monographie Instrumentum*. Vol. 70. , p. 77 89

**BRKOJEWITSCH, G.**, 2007. *Reims, Rues Edouard Mignot et Gaston Boyer*. Rapport de diagnostic archéologique. Reims : INRAP.

**BRUNET, M.-F. et LE PICHON, X.**, 1982. Subsidence of the Paris basin. *Journal of Geophysical Research*. 1982. Vol. 87, n° B10, pp. 8547-8560. DOI 10.1029/JB087iB10p08547. Scopus

**BRUNETAUD, X., DE LUC, L., JANVIER-BADOSA, S., BECK, K. et AL-MUKHTAR, M.**, 2012. Application of digital techniques in monument preservation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012. Vol. 16, n° 5, pp. 543-556. DOI 10.1080/19648189.2012.676365. Scopus

**BRUNET-GASTON, V.**, 2008. *Esquisse du paysage architectural de Reims : le lapidaire de la Médiathèque, rue Rockefeller (Durocortorum)*. Reims : BSAC. Archéologie urbaine à Reims, 2.

**BRUNET-GASTON, V.**, 2016. Catalogue raisonné du lapidaire : Décor architectural et blocs architectoniques. In : SINDONINO, S., *Reims (Marne), rue Saint-Symphorien, RFO de fouille préventive, Metz, Inrap Grand Est Nord, vol. 2*. pp. 433-466.

**BRUNET-GASTON, V., BONTROND, R., GASTON, C., HUARD, P., LARATTE, S. et FRONTEAU, G.**, 2020. *L'arc monumental dit « la Porte de Mars » (Reims), rapport final d'étude archéologique du bâti*. Rapport Final d'Opération. Reims - Chalons-en-Champagne : Service Archéologique du Grand Reims - SRA Champagne-Ardenne.

**BRUNET-GASTON, V. et MONIER, F.**, 2008. Une pièce semi-enterrée à Eckbolsheim (Bas-Rhin) et sa décoration peinte. In : *Une pièce semi-enterrée à Eckbolsheim (Bas-Rhin) et sa décoration peinte* [en ligne]. Bordeaux : Aquitania. 9 octobre 2008. pp. 321.

**BRUNETTE, N.**, 1846. *Plan de Reims antique pour servir aux explorations archéologiques du sous-sol de la cité gallo-romaine, Reims*. Brissart-Binet.

**BRUNETTE, N.**, 1861. *Notice sur les antiquités de Reims, les découvertes récemment faites, et les mesures adoptées pour la conservation des anciens monuments de la ville*. Brissart-Binet. Reims, France.

**BRUNETTE, N.**, 1885. *Souvenirs archéologiques et notes relatives à l'état de la ville de Reims*. Meaux.

**BUCHSENSCHUTZ, O.**, 2000. Les oppida celtiques, un phénomène original d'urbanisation. In : **GUICHARD, V, SIEVERS, S. et URBAN, O. H. (éd.)**, *Les processus d'urbanisation à l'Age du Fer - Eisenzeitliche Urbanisationsprozesse, Actes du colloque de Glux-en-Glenne, 8-11 juin 1998*. Glux-en-Glenne : Arbeitsgemeinschaft Eisenzeit bei den Deutschen Verbänden für Altertumsforschung (Allemagne). 2000. pp. 61-64. collection Bibracte 4. ISBN 2-909668-21-5.

**BUCHSENSCHUTZ, O.**, 2004. Les Celtes et la formation de l'Empire romain. *Annales. Histoire, Sciences Sociales* [en ligne]. avril 2004. Vol. 59, n° 2, pp. 337-361. DOI 10.1017/S039526490000384X.

**BUCHSENSCHUTZ, O., FRONTEAU, G., JACCOTTEY, L., JODRY, F. et SAUREL, M.**, 2017. Les meules gauloises d'Acy-Romance (Ardennes), 'La Warde'. In : *Actes du 2ème colloque du Groupe Meule, Reims, 15-17 mai 2014*. Reims : Revue Archéologique de l'Est, Dijon. 2017. pp. 117-134.

**BUCHSENSCHUTZ, O., FRONTEAU, G. et LEPAREUX-COUTURIER, S. (éd.)**, 2020. *Les meules du Néolithique à l'époque médiévale : technique, culture, diffusion* [en ligne]. Dijon : ARTEHIS Éditions. Suppléments à la Revue archéologique de l'Est. ISBN 978-2-915544-78-7.

**BÜNDGEN, S., GARMOND, N., CHALUMEAU, L. et LARATTE, S.**, 2014. Des fosses profondes dans des cuvettes géologiques : deux exemples dans la périphérie de Reims (Marne). In : *Bulletin de la Société archéologique champenoise*. 2014. pp. 299-312.

**BUNDGEN, S. et RICHEZ, S.**, [sans date]. *Villers-Aux-Noeuds, «Le Bois Doriot», Tranche 1, Marne, Grand Est*. Rapport Final d'Opération. REIMS : Service archéologique du Grand Reims.

**BURIDANT, J.**, 2003. La forêt mutilée - la reconstitution forestière dans l'Aisne après la Grande Guerre. *Graines d'Histoire - La mémoire de l'Aisne*. 2003. Vol. 17, pp. 13-24.

**BURIDANT, J.**, 2007. Des plantations pour régulariser les eaux : Champagne, XVIIIe-XXe siècle. In : **CORVOL, A. (éd.)**, *Forêt et eau : XIIIe-XXIe siècle*. L'Harmattan. pp. 115-130.

**BURIDANT, J.**, 2008. *Le premier choc énergétique : la crise forestière dans le nord du Bassin parisien, début XVIIIe-début XIXe siècle*. Habilitation à Diriger les Recherches. Paris : Université de Paris IV-Sorbonne : HDR (Histoire).

**BUSSON, D. et OSORIO-ROBIN, S.**, 2009. *Les grands monuments de Lutèce: premier projet urbain de Paris: crypte archéologique du parvis de Notre-Dame, 21 janvier 2009-31 janvier 2010*. Paris : Paris-Musées. ISBN 978-2-7596-0062-5. NA9198.P2 G73 2009

**C**

**CAMPANARO, D. M., LANDESCHI, G., DELL'UNTO, N. et LEANDER TOUATI, A.-M., 2016.** 3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow. *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. 1 mars 2016. Vol. 18, pp. 321-332. DOI 10.1016/j.culher.2015.09.006.

**CAMPY, M. et MACAIRE, J.-J., 2005.** *Géologie de la surface: érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. Paris : Dunod. ISBN 978-2-10-005992-8.

**CARBON, D., FABRE, G., VOLANT, P., FICHES, J.-L., LEVRET, A. et COMBES, P., 2005.** L'aqueduc de Nîmes dans la haute Vistrenque : Analyse interdisciplinaire d'un tronçon souterrain. *Gallia* [en ligne]. 2005. Vol. 62, n° 1, pp. 69-86. DOI 10.3406/galia.2005.3221.

**CARTER, N.E.A et VILES, H.A, 2003.** Experimental investigations into the interactions between moisture, rock surface temperatures and an epilithic lichen cover in the bioprotection of limestone. *Building and Environment* [en ligne]. septembre 2003. Vol. 38, n° 9-10, pp. 1225-1234. DOI 10.1016/S0360-1323(03)00079-9.

**CARTRON, G., à paraître.** *Reims, 25 rue des Élus, RFO de fouille préventive*. Rapport Final d'Opération. Troyes : Éveha.

**CARTRON, G., 2019.** La couverture d'ardoise à l'époque romaine à la lumière des découvertes récentes dans les Ardennes. In : **BOULANGER, K. et MOULIS, C. (éd.), Pierre à Pierre. Economie de la pierre de l'Antiquité à l'époque moderne en Lorraine et régions limitrophes. Actes du colloque de Nancy.** PUN – Editions Universitaires de Lorraine. Nancy, France. pp. 193-203. ISBN 978-2-8143-0556-4.

**CASELLA, V., CHIABRANDO, F., FRANZINI, M. et MANZINO, A. M., 2020.** Accuracy Assessment of a UAV Block by Different Software Packages, Processing Schemes and Validation Strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [en ligne]. mars 2020. Vol. 9, n° 3, pp. 164. DOI 10.3390/ijgi9030164.

**CAVÉ, M., à paraître.** *Reims, « Boulevard Jules César ». Les fouilles de l'îlot B3*. Rapport Final d'Opération de fouille préventive. Metz : Inrap Grand Est.

**CAVÉ, M., à paraître.** *Reims, « Boulevard Jules César ». Les fouilles du complexe aqualudique*. Rapport Final d'Opération de fouille préventive. Metz : Inrap Grand Est.

**CAVÉ, M., 2016.** *Bezannes (Marne), ZAC 1, Sites G et H. Une occupation du Hallstatt et deux établissements ruraux antiques en bordure de voie*. rapport de fouille archéologique. Metz : Inrap Grand Est nord.

**CAVÉ, M., 2017.** *6, rue Ponsardin. Une riche domus des Ile-IIIe s. ap. J.-C. sous des vestiges médiévaux et modernes, RFO de fouille préventive, Metz, Inrap Grand Est Nord, vol. 2.*

**CAVÉ, M., HERRSCHER, P, MATHELART, P., MENDISCO, F., PRUVOST, M., ROLLET, P et THIOL, S., à paraître.** Regards croisés sur une pratique funéraire marginale à Reims aux IIIe-IVe s. de n. è. : études archéo-anthropologique, isotopique et paléogénomique. In : *Les sociétés de*

*l'antiquité tardive face à la mort - Nouvelles méthodes, nouvelles questions*. Aix en Provence : revue Archéologie Méditerranéenne. à paraître.

**CAVELIER, C., MÉGNIEN, C., POMEROL, C. et RAT, P.**, 1980. France, introduction à la géologie du Bassin de Paris. *Bulletin d'information des géologues du Bassin de Paris*. 1980.

**CERUTTI, E., NOARDO, F. et SPANÒ, A.**, 2015. Architectural Heritage Semantic Data Managing and Sharing in GIS: In : *Proceedings of the 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management* [en ligne]. Barcelona, Spain : SCITEPRESS - Science and Technology Publications. 2015. pp. 121-128. ISBN 978-989-758-099-4.

**CHAPELOT, J., CHAPELOT, O. et RIETH, B. (éd.)**, 2009. *Terres cuites architecturales médiévales et modernes en Ile-de-France et dans les régions voisines*. Université de Caen-Basse Normandie, CRAHM. Caen : Publications du CRAHM. ARCHEOLOGIE MED. ISBN 978-2-902685-63-9. NA3549.A1 T47 2009

**CHOSSENOT, R., ESTÉBAN, A., NEISS, R. et PROVOST, M.**, 2010. *Reims (51.2)*. Éd. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres. Paris : Éd. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres [u.a.]. Carte archéologique de la Gaule, dressée sous la dir. de Michel Provost. ISBN 978-2-87754-243-2.

**CLARKE, K. C.**, 1986. Advances in Geographic Information Systems. *Computers, Environment and Urban Systems* [en ligne]. 1 janvier 1986. Vol. 10, n° 3, pp. 175-184. DOI 10.1016/0198-9715(86)90006-2.

**CLAUZEL, T., RICHARDIN, P., RICARD, J., LE BÉCHENNEC, Y., AMIOT, R., FOUREL, F., PHOUYBANHDY, B., VINÇON-LAUGIER, A., FLANDROIS, J.-P. et LÉCUYER, C.**, 2020. The Gauls experienced the Roman Warm Period: Oxygen isotope study of the Gallic site of Thézy-Glimont, Picardie, France. *Journal of Archaeological Science: Reports* [en ligne]. décembre 2020. Vol. 34, pp. 102595. DOI 10.1016/j.jasrep.2020.102595.

**CLÉMENT, B.**, 2013. *Les couvertures de tuiles en terre cuite en Gaule du Centre-Est: Ile s. av. - IIIe s. ap. J-C*. Montagnac : Mergoïl. Monographies instrumentum, 46. ISBN 978-2-35518-035-4.

**COHEN, K.M., FINNEY, S.C., GIBBARD, P.L. et FAN, J.-X.**, 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*. mise à jour 2013. Vol. 36, n° 199-204.

**COOKE, R. U., INKPEN, R. J. et WIGGS, G. F. S.**, 1995. Using gravestones to assess changing rates of weathering in the United Kingdom. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. 1995. Vol. 20, n° 6, pp. 531-546. DOI 10.1002/esp.3290200605.

**COQUELET, C.**, 2013. Les « pierres blanches » dans les monuments publics et funéraires de la cité des Tongres. *Signa* [en ligne]. 2013. Vol. 2, pp. 29.

**CORSIEZ, A.**, 2016. *La céramique romaine de cinq pagi du Nord de la Gaule (p. Laudunensis, Suessionensis, Tardunensis, Noviomensis et Vermandensis) : caractérisation,*



*chronologie, fonctions et économie*. Thèse de doctorat (Archéologie). Lille : Université Lille 3-Charles de Gaule.

**CORSIEZ, A.**, 2019. *La céramique romaine de cinq pagi du nord de la Gaule (p. Laudunensis, Suessionensis, Tardunensis, Noviomensis et Vermandensis) : caractérisation, chronologie, fonctions et économie*. Drémil Lafage : Éditions Mergoïl. Archéologie et histoire romaine, 41. ISBN 978-2-35518-089-7. MLCM 2021/40615 (N)

**COULON, G.**, 2000. Le transport des blocs de la carrière à l'agglomération. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France* [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1, pp. 36-40.

**COULON, G. et GOUDINEAU, C.**, 1996. *Argentomagus, du site gaulois à la ville gallo-romaine*. Éditions Errance.

**COULON, G., TARDY, D., LORENZ, J., DEYTS, S. et PICHON, M.**, 2000. Argentomagus, agglomération secondaire de la Cité des Bituriges. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France* [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1, pp. 15-19.

**COULON, M.**, 2011. Reconnaissance par sondages pénétrométriques et histoire du couloir alluvial de la Vesle au niveau du champ captant de Couraux. *Bulletin de la Société d'étude des sciences naturelles de Reims*. 2011. N° 25, pp. 3-14.

**COURTEHOUS, H.**, 1968. *Contribution à l'étude cartographique et géologique de la feuille de Fismes au 1/50 000ème (Fismes 7-8)*. Diplôme d'études supérieures de Sciences Naturelles. Faculté des Sciences de Reims.

**COUTELAS, A. (éd.)**, 2009. *Le mortier de chaux*. Paris : Errance. Archéologiques. ISBN 978-2-87772-385-5. 666.93

**COUTELAS, A. B.**, 2003. *Pétraarchéologie du mortier de chaux gallo-romain. Essai de reconstitution et d'interprétation des chaînes opératoires : du matériau au métier antique* [en ligne]. Thèse de doctorat. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.

**COWEN, D.J.**, 1988. GIS versus CAD versus DBMS: What Are the Differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1988. Vol. 54, n° 11, pp. 1551-1555.

**CÜPPERS, H.**, 1979. Das römische Forum der Colonia Augusta Treverorum. In : **VON ZABERN, P. (éd.)**, *100 Jahre Rheinisches Landesmuseum Trier*. Main am Rhein: pp. 211-262.

## D

**DAMIEN, T.**, 2019. *Comportement hydrodynamique des Marais de Saint-Gond (Marne, France)* [en ligne]. Thèse de doctorat. Reims : Université de Reims Champagne Ardenne.

**DAMIEN, T., PIERRE, G., DEVOS, A., LEJEUNE, O. et JAVAUX, B.**, 2016. Typologie des karsts de la côte d'Île-de-France entre Sézanne et Reims., Pierre G., Devos A., Lejeune O., Javaux B. *Karstologia*. 2016. Vol. 67, pp. 59-64.

**DE CARBONNIÈRES, P.**, 1997. *Lutèce - Paris ville romaine - Philippe De Carbonnières - Librairie Eyrolles* [en ligne]. Découvertes Gallimard. Paris. ISBN 978-2-07-053389-3.

**DE CHAZELLES, C.-A., FICHES, J.-L. et POUPET, P.**, 1985. La Gaule Méridionale. In : **LASFARGUES, J. (éd.)**, *Architectures de terres et de bois. L'habitat privé des provinces occidentales du monde romain. Antécédents et prolongement : Protohistoire, Moyen-Âge et quelques expériences contemporaines..* - Actes du 2ème congrès archéologique de Gaule méridionale. Lyon : Édition de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris. 1985. pp. 61-72. Documents d'Archéologie Française.

**DE REU, J., DE SMEDT, P., HERREMANS, D., VAN MEIRVENNE, M., LALOO, P. et DE CLERCQ, W.**, 2014. On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science*. 2014. Vol. 41, pp. 251-262. DOI 10.1016/j.jas.2013.08.020. Scopus

**DE REU, J., PLETS, G., VERHOEVEN, G., DE SMEDT, P., BATS, Machteld, CHERRETTÉ, B., DE MAEYER, W., DECONYNCK, J., HERREMANS, D., LALOO, P., VAN MEIRVENNE, M. et DE CLERCQ, W.**, 2013. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* [en ligne]. février 2013. Vol. 40, n° 2, pp. 1108-1121. DOI 10.1016/j.jas.2012.08.040.

**DE WEVER, P., GUILLOCHEAU, F., REYNAUD, J.-Y., VENNIN, E., ROBIN, C., CORNÉE, A. et ROUBY, D.**, 2002. Deux siècles de stratigraphie dans le Bassin de Paris. *Comptes Rendus Palevol* [en ligne]. décembre 2002. Vol. 1, n° 6, pp. 399-414. DOI 10.1016/S1631-0683(02)00071-4.

**DELAINE, J.**, 1997. *The baths of Caracalla: a study in the design, construction, and economics of large-scale building projects in imperial Rome*. Portsmouth, R.I : Journal of Roman Archaeology. Journal of Roman archaeology, no. 25. ISBN 978-1-887829-25-0. NA317 .D45 1997

**DELAMARRE, X.**, 2018. *Dictionnaire de la langue gauloise: une approche linguistique du vieux-celtique continental*. 3e éd. Arles : Éditions Errance. ISBN 978-2-87772-631-3. 491.6

**DELEGOU, E. T, SANDRI, E., MARAKAKIS, J., SAYAS, J. et MOROPOULOU, A.**, 2011. From Building Pathology to Durability Via GIS. . 2011. pp. 1-8.

**DELEGOU, E. T., TSILIMANTOU, E., OIKONOMOPOULOU, E., SAYAS, J., IOANNIDIS, C. et MOROPOULOU, A.**, 2013. Mapping of Building Materials and Conservation Interventions Using GIS: The Case of Sarantapicho Acropolis and Erimokastro Acropolis in Rhodes. *International Journal of Heritage in the Digital Era* [en ligne]. décembre 2013. Vol. 2, n° 4, pp. 631-654. DOI 10.1260/2047-4970.2.4.631.

**DELENCRE, F.**, 2017. *Terres et pierres pour matières de cultures : l'apparition et la diffusion de nouveaux modes et matériaux de construction dans le Nord-Est de la Gaule romaine (IIème siècle avant J.-C. - IIème siècle après J.-C.)* [en ligne]. Thèse de doctorat. Bourgogne Franche-Comté.

**DELENCRE, F. et GARCIA, J.-P.**, 2015. Les matériaux de construction de la romanisation. . 2015. pp. 147-154.

**DELL'UNTO, N.**, 2014. The use of 3D models for intra-site investigation in archaeology. *3D Surveying and Modeling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and Best Practices*. 2014. pp. 151-158. Scopus

**DELL'UNTO, N., LANDESCHI, G., LEANDER TOUATI, A.-M., DELLEPIANE, M., CALLIERI, M. et FERDANI, D.**, 2016. Experiencing Ancient Buildings from a 3D GIS Perspective: a Case Drawn from the Swedish Pompeii Project. *Journal of Archaeological Method and Theory* [en ligne]. mars 2016. Vol. 23, n° 1, pp. 73-94. DOI 10.1007/s10816-014-9226-7.

**DELL'UNTO, N., LEANDER, A. M., DELLEPIANE, M., CALLIERI, M., FERDANI, D. et LINDGREN, S.**, 2013. Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project. In : *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*. octobre 2013. pp. 621-628.

**DEMAISON, L.**, 1879. Les Portes antiques de Reims et la captivité d'Ogier le Danois. *Travaux de l'Académie Nationale de Reims*. 1879. Vol. 65, pp. 433-458.

**DEMAISON, L.**, 1885. *Les Thermes de Reims* [en ligne]. Bibliothèque numérique de l'École nationale des chartes.

**DEMAISON, L., LEFEVRE-PONTALIS, E., JADART, H. et BROCHE, L.**, 1912. Guide archéologique du congrès de Reims. In : *Tome I Guide du Congrès*. Paris : Picard. 1912.

**DEMITRA, H.**, 1910. Autour de Reims antique. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 1910. N° 1, pp. 7-17.

**DEMITRA, H.**, 1912. Fortifications Gallo-romaine, rue Philippe à Reims. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 1912. N° 2, pp. 35-37.

**DEMOUY, P.**, 2005. *Genèse d'une cathédrale : les archevêques de Reims et leur église aux XIe et XIIe siècles*. Langres : Editions Dominique Guéniot. ISBN 978-2-87825-313-9. BX1532. R4 D45 2005

**DEMOUY, P., POMARÈDE, F. et LASLIER, R.**, 1985. *Reims. Panorama monumental et architectural des origines à 1914*. Contades.

**DENEUX, H.**, 1944. Dix ans de fouilles dans la cathédrale de Reims 1919-1930. *Conférence donnée à la Société des Amis du Vieux-Reims*. Reims. 1 juin 1944.

**DERCOURT, J., GAETANI, M., VRIELYNCK, B. et COMMISSION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DU MONDE**, 2000. *Atlas peri-tethys palaeogeographical maps*. [carte]. Paris, France, France : CCGM.

**DERU, X. et DELMAIRE, R.**, 2016. *La Gaule Belgique*. Paris : Picard. ISBN 978-2-7084-1009-1. DH451 .D47 2016

**DERU, X., REDON, B., LOUVION, C., ALLARD, P., BAYARD, D., DELMAIRE, Roland, FRONTEAU, G., PAICHELER, J.-C. et WILLEMS, S.**, 2003. Prospections à Trépail, « Le Trou de

la Batacaude » (Marne) : l'atelier de potiers et le site gallo-romain. *Revue du Nord* [en ligne]. 2003. Vol. 353, n° 5, pp. 181. DOI 10.3917/rdn.353.0181.

**DERU, X., ROLLET, P. et FRONTEAU, G.**, 2013. Les ateliers de potiers gallo-romains de la « rue de l'Équerre » et du « boulevard de la Paix » à Reims. In : *SFECAG, Actes du congrès d'Amiens, 9-12 mai 2013, Marseille, Sfecag, p. 99-116*. Amiens : Marseille, SFECAG. 2013. pp. 99-116.

**DESHOULIÈRES, F.**, 1927. Les hipposandales. *Bulletin Monumental* [en ligne]. 1927. Vol. 86, n° 1, pp. 154-155.

**DESHOULIÈRES, F.**, 1932. L'enceinte gallo-romaine du Mans. *Bulletin Monumental* [en ligne]. 1932. Vol. 91, n° 2, pp. 295-295.

**DESSPORTES, P (éd.)**, 1983. *Histoire de Reims*. Privat. Toulouse.

**DESSAINT, M.**, 2019. Variabilité des sources et biais scientifiques : le cas du territoire des Rèmes. In : **MATOMOU-ADZO, N., MILLOT-RICHARD, C., RAMÉ, B. et CARON-LAVIOLETTE, E. (éd.)**, *Biais, hiatus et absences en archéologie* [en ligne]. Paris : Éditions de la Sorbonne. Archéo.doct. ISBN 979-10-351-0322-4.

**DESSALES, H.**, 2008. Des usages de l'eau aux évaluations démographiques. *Histoire urbaine* [en ligne]. 1 décembre 2008. Vol. n° 22, n° 2, pp. 27-41.

**DESSALES, H.**, 2011. Les savoirs-faire des maçons romains, entre connaissance et disponibilité des matériaux. Le cas pompéien. In : **MONTEIX, N. et TRAN, N. (éd.)**, *Les savoirs professionnels des gens de métier : études sur le monde du travail dans les sociétés urbaines de l'Empire romain*. Naples : Centre Jean Bérard. pp. 41-63. Collection du Centre Jean Bérard, 37. ISBN 978-2-918887-09-6. HD2346.R6 S28 2011

**DESSALES, H.**, 2014. *L'architecture prise en défaut : les malfaçons dans les bâtiments romains*.in : **BOURDIN S., DUBOULOZ J., ROSSO E. (éd)** *Peupler et habiter l'Italie et le monde romain. Etudes d'histoire et d'archéologie offertes à Xavier Lafon*. Archéologies méditerranéennes. 157-162

**DESSALES, H.**, 2017. L'archéologie de la construction : Une nouvelle approche de l'architecture romaine. *Annales. Histoire, Sciences Sociales* [en ligne]. mars 2017. Vol. 72, n° 1, pp. 75-94. DOI 10.1017/S039526491700004X.

**DESSANDIER, D.**, 1995. *Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre*. Thèse de doctorat. Orléans : Université d'Orléans.

**DESSANDIER, D.**, 2000. BRGM/RP-50137-FR : *Guide méthodologique de sélection des pierres des monuments en termes de durabilité et compatibilité*. Rapport public. Orléans.

**DESSANDIER, D., BROMBLET, P. et MERTZ, J.-D.**, 2000. Durability of tuffeau stone in buildings: Influence of mineralogical composition and microstructural properties. In : **FASSINA, V. (éd.)**, *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of*

Stone [en ligne]. Amsterdam : Elsevier Science B.V. pp. 69-78. ISBN 978-0-444-50517-0.

**DEVOS, A., BOLLOT, N., CHALUMEAU, L., FRONTEAU, G. et LEJEUNE, O.**, 2015. Impact of lateral variations of geologic facies on water resources in homogeneous basins: example of tertiary plateaus in the Paris Basin. *Geodinamica Acta* [en ligne]. 2 janvier 2015. Vol. 27, n° 1, pp. 15-24. DOI 10.1080/09853111.2014.979531.

**DEVOS, A., FRONTEAU, G., LEJEUNE, O., SOSSON, C., CHOPIN, E. et BARBIN, V.**, 2010. Influence of geomorphological constraints and exploitation techniques on stone quarry spatial organisation: Example of Lutetian underground quarries in Rheims, Laon and Soissons areas. *Engineering Geology* [en ligne]. 1 octobre 2010. Vol. 115, n° 3, pp. 268-275. DOI 10.1016/j.enggeo.2010.05.004.

**DEVOS, A., LARATTE, S., TABORELLI, P., ORTONOVI, S., FRONTEAU, G., RABASTÉ, Y. et DUCHÊNE, B.**, 2021. Approche géotechnique du remplissage des « polémoformes » de la Grande Guerre. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [en ligne]. 30 décembre 2021. Vol. 27, n° 4, pp. 279-292. DOI 10.4000/geomorphologie.16212.

**DEVOS, A., LEJEUNE, O. et CHOPIN, E.**, 2007. Karstic infiltration dynamics and spatialisation of chalk aquifer drain, example of the upper Vesle basin (dry champagne, France). *European Journal of Water Quality*. 2007. Vol. 38, n° 1, pp. 23-38.

**DEVOS, A., PICHARD, C., FRONTEAU, G. et LARATTE, S.**, à paraître. Géographie et hydrologie de la cite de Durocortorum et de ses environs. *Gallia*. à paraître. Vol. 79, n° 1.

**DEVOS, A., SOSSON, C., LEJEUNE, O. et FRONTEAU, G.**, 2008. Rôle des contextes géomorphologique et géologique dans l'abandon des carrières de pierre du Lutétien autour de Reims. In : **BLARY, F., GÉLY, J.-P. et LORENZ, J. (éd.)**, *Actes du colloque international « Pierres du Patrimoine européen »*. Château-Thierry : Editions du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques. 2008. pp. 1-10. Actes du colloque tenu à Château-Thierry en Octobre 2005.

**DEVOS, A., TABORELLI, P., DAMIEN, T., BOLLOT, N., BLANC, A., FRONTEAU, G., LARATTE, S., LEJEUNE, O., DESFOSSÉS, Y. et EMBRY, M.**, 2017. La Grande Guerre sur la Cote d'Île-de-France, en Champagne crayeuse et en Argonne- Journées d'étude d'Automne - World War I in Ile-de-France cuesta, Chalky Champagne and Argonne- Days of autumn study -. *Bulletin Information des Géologues du bassin de Paris*. 2017. Vol. 54, n° 3, pp. 3-19.

**DEVOS, A., TABORELLI, P. et LARATTE, S.**, 2018. Les traces morphologiques : la Grande Guerre morphogène - les polémo-paysages. In : **AGBP et BERGERAT, F. (éd.)**, *Géologie et Grande Guerre - Impacts environnementaux de la grande guerre – l'apport des géosciences*. Paris : Association des Géologues du Bassin de Paris. pp. 12.

**DION, R.**, 1961. Le « bon » et « beau » pays nommé champagne pouilleuse. *L'Information Géographique* [en ligne]. 1961. Vol. 25, n° 5, pp. 209-214. DOI 10.3406/ingeo.1961.2099.

**DOERR, M.**, 2003. The CIDOC Conceptual Reference Module: An Ontological Approach to Semantic Interoperability of Metadata. *AI Magazine* [en ligne]. 15 septembre 2003. Vol. 24, n° 3, pp. 75-75. DOI 10.1609/aimag.v24i3.1720.

**DOLLIMORE, D.**, 1980. Introduction to Powder Surface Area : S. Lowell, Wiley and Sons, New York, 1979, 199 pp. £11.00. . 1980. DOI 10.1016/0040-6031(80)80086-4.

**DOMERGUE, C.**, 1963. L'Arc de triomphe de Caracalla à Volubilis. *Annales de l'École pratique des hautes études* [en ligne]. 1963. Vol. 96, n° 1, pp. 283-293. DOI 10.3406/ephe.1963.4776.

**DONATO, V., GIANNETTI, S. et BOCCONCINO, M.M.**, 2017. H-BIM and web-database to deal with the loss of information due to catastrophic events. In : *eCAADe2017 | ShoCK – Sharing of Computable Knowledge*. Rome. septembre 2017. pp. 11.

**DREESEN, R. et DUSAR, M.**, 2004. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment. *Materials Characterization* [en ligne]. novembre 2004. Vol. 53, n° 2-4, pp. 273-287. DOI 10.1016/j.matchar.2004.07.001.

**DULLIEN, F. A. L et DHAWAN, G. K.**, 1974. Characterization of pore structure by a combination of quantitative photomicrography and mercury porosimetry. *Journal of Colloid and Interface Science* [en ligne]. 1 mai 1974. Vol. 47, n° 2, pp. 337-349. DOI 10.1016/0021-9797(74)90265-3.

**DUMAS-LATTAQUE, P., ARNAUD, M., HUART, L. et POUPON, F.**, 2012. *Bezannes (Marne), Le Champ Drillon, site F.* rapport de fouille archéologique. Reims : ReimsMétropole.

**DUNHAM, R.J.**, 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures. [en ligne]. 1962. Vol. 38, pp. 108-121.

**DUTIL, P. et BALIF, J.-L.**, 1968. Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés. *Sciences du sol*. 1968. Vol. 2, pp. 79-91.

**DUVAL, P.-M.**, 1955. Le Forum de Reims. *Bulletin de la Société Nationale des Antiquaires de France* [en ligne]. 1955. Vol. 1952, n° 1, pp. 172-173. DOI 10.3406/bsnaf.1955.4923.

**DUVAL, P.-M.**, 1989. De Lutèce à Paris. 2. Lutèce gauloise et gallo-romaine. *Publications de l'École Française de Rome* [en ligne]. 1989. Vol. 116, n° 1, pp. 913-940.

## E

**ELKHRACHY, I.**, 2021. Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60, n° 6, pp. 5579-5590. DOI 10.1016/j.aej.2021.04.011. Scopus

**EL-MEKAWY, M., ÖSTMAN, A. et HIJAZI, I.**, 2012. A Unified Building Model for 3D Urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [en ligne]. septembre 2012. Vol. 1, n° 2, pp. 120-145. DOI 10.3390/ijgi1020120.

**ESRI**, 1998. *ESRI Shapefile Technical Description*. ESRI.

**ETCHART-SALAS, M.**, 2017. Le matériel de mouture de Bezannes (Marne) du Néolithique à la période gallo-romaine : Synthèse d'une quinzaine d'années d'archéologie préventive. In : **BUCHSENSCHUTZ, O., FRONTEAU, G. et LEPAREUX-COUTURIER, S. (éd.)**, *Les meules du Néolithique à l'époque médiévale : technique, culture, diffusion* [en ligne]. Dijon : ARTEHIS Éditions. pp. 103-116. Suppléments à la Revue archéologique de l'Est. ISBN 978-2-915544-78-7.

**ETRIS, E.L., BRUMFIELS, D.S., EHRlich, R. et CRABTREE, S.J.**, 1988. Relations between pores, throats and permeability : a petrographic/physical analysis of some carbonate grainstones and packstones. , 3, 1, p. 17-32. *Carbonates and Evaporites*. 1988. Vol. 3, n° 1, pp. 17-32.

**EUGENE ARCHITECTES DU PATRIMOINE**, 2018. *Porte de Mars à Reims. Restauration de l'édifice - phase 2. Notice architecturale. Diagnostic*. Rapport non publié.

**EYSSAUTIER-CHUINE, S., MARIN, B., THOMACHOT-SCHNEIDER, C., FRONTEAU, G., SCHNEIDER, A., GIBEAUX, S. et VAZQUEZ, P.**, 2016. Simulation of acid rain weathering effect on natural and artificial carbonate stones. *Environmental Earth Sciences* [en ligne]. 25 avril 2016. Vol. 75, n° 9, pp. 748. DOI 10.1007/s12665-016-5555-z.

## F

**FERDIÈRE, A.**, 1988. *Les campagnes en Gaule romaine*. Paris : Editions Errance. Collection des Hespérides. ISBN 978-2-903442-72-9. DC62.A2 F47 1988

**FICHTL, S.**, 2000. *La ville celtique: les oppida de 150 av. J.-C. à 15 ap. J.-C.* Paris : Errance. Collection des Hespérides. ISBN 978-2-87772-183-7. D70 .F49 2000

**FICHTL, S.**, 2004. Des capitales de cités gauloises aux chefs-lieux de province : le cas de Reims-Durocortorum. In : **RUIZ DE ARBULO, J. (éd.)**, *Simulacra Romae, Roma y las capitales provinciales del Occidente Europeo. Rome et les capitales provinciales de l'Occident, actes du colloque de Tarragone (12- 14 décembre 2002)*. Tarragona. 2004. pp. 295-306.

**FICHTL, S.**, 2005. *La ville celtique. Les oppida de 150 av. J.-C. à 15 apr. J.-C.* Paris.

**FICHTL, S.**, 2006. Murus et pomerium : réflexions sur la fonction des remparts protohistoriques. *Revue archéologique du Centre de la France* [en ligne]. 1 décembre 2006. N° Tome 44.

**FIERRO, A.**, 1996. *Histoire et dictionnaire de Paris*. Paris : R. Laffont. Bouquins. ISBN 978-2-221-07862-4. DC704 .F53 1996

**FLODOART**, 1824. *Historia ecclesiae Remensis, Histoire de l'église de Rheims* [en ligne]. M. Guizot. Paris. Collection des mémoires relatifs à l'histoire de France.

**FOLK, R. L.**, 1959. Practical Petrographic Classification of Limestones. *AAPG Bulletin*. 1959. Vol. 43, pp. 1-38.

**FOLK, R.L.**, 1962. Spectral Subdivision of Limestone Types. [en ligne]. 1962. Vol. 38, pp. 62-84.

**FOUCAULT, A. et RAOULT, J.-F.**, 1995. *Dictionnaire de géologie*. 4. éd. rév. et augmentée. Paris : Masson. Guides géologiques régionaux. ISBN 978-2-225-84635-9.

**FRÉZOULS, E.**, 1973. Le cryptoportique de Reims. *Publications de l'École Française de Rome* [en ligne]. 1973. Vol. 14, n° 1, pp. 293-313.

**FRONTEAU, G.**, 2000. *Comportements tétogénétiques des principaux calcaires de Champagne-Ardenne : en relation avec leur faciès de dépôt et leur séquençage diagénétique* [en ligne]. These de doctorat. Reims.

**FRONTEAU, G.**, 2010. Caractérisation et provenance des matériaux. In : **RABASTÉ, Y. et ARDHUIN, M. (éd.)**, *L'aqueduc gallo-romain de Durocortorum*. Bulletin de la Société Archéologique Champenoise. pp. 96-84. « Archéologie Urbaine à Reims n°9 », 4.

**FRONTEAU, G.**, 2011. « Les mortiers ». In : **ROLLET, P., BERTHELOT, F., FLORENT, G., JOUHET, E. et AUXIETTE, G.**, *Durocortorum, rue Maucroix. Un quartier excentré d'une capitale de province romaine (fin du 1er s. av. J.-C./début du IVe s.)*. Société Archéologique Champenoise. Reims : Société Archéologique Champenoise. pp. 104-105. Archéologie urbaine à Reims, 10.

**FRONTEAU, G., BARBIN, V. et PASCAL, A.**, 1999. Impact du faciès sédimento-diagénétique sur l'altération en œuvre d'un géomatériau calcaire. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* [en ligne]. 1 mai 1999. Vol. 328, n° 10, pp. 671-677. DOI 10.1016/S1251-8050(99)80176-1.

**FRONTEAU, G., BARBIN, V. et PASCAL, A.**, 2000. Les principaux calcaires utilisés en construction en Champagne-Ardenne : caractérisation des microfaciès et analyse comparative de leur altération en œuvre. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France* [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1, pp. 183-186.

**FRONTEAU, G., BERTHELOT, F., ROLLET, P., BALMELLE, A. et DECROCK, B.**, 2008. Évolution historique de l'approvisionnement en pierre des monuments rémois : comparaison entre les périodes gallo-romaine et médiévale. In : **BLARY, F., GÉLY, J.-P. et LORENZ, J. (éd.)**, *Pierres du patrimoine européen. Économie de la pierre de l'antiquité à la fin des temps modernes*. Edition du CTHS. Editions du CTHS. pp. 267-274.

**FRONTEAU, G., LARATTE, S. et DEVOS, A.**, 2021. Variations et diversité des faciès lutétiens de l'Aisne et de la Marne Impact sur les gisements Epernay de pierres calcaires. In : *27e réunion des Sciences de la Terre*. Lyon. octobre 2021. pp. Poster.

**FRONTEAU, G., LARATTE, S., DEVOS, A. et PICHARD, C.**, à paraître. L'emploi antique des géomatériaux à Reims/Durocortorum. *Gallia*. à paraître. Vol. 79, n° 1.

**FRONTEAU, G., MOREAU, C., THOMACHOT-SCHNEIDER, C. et BARBIN, V.**, 2010. Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation. *Natural stones for historical monuments, testing, durability and provenance* [en ligne]. 1 octobre 2010. Vol. 115, n° 3, pp. 158-166. DOI 10.1016/j.enggeo.2009.08.001.



**FRONTEAU, G. et PAICHELER, J.-C.**, 1999. *Rapport préliminaire de l'analyse des faciès et des microfaciès des éléments architecturaux de la rue Belin*. Rapport d'expertise. Université de Reims Champagne Ardennes - GEGENAA.

**FRONTEAU, G. et PAICHELER, J.-C.**, 2005. *Identification pétrographique (faciès & provenance) des blocs de pierre des cuvelages de puits de la Rue-Belin (Reims) et relation avec leur emploi*. Reims : GEGENAA, Université de Reims Champagne-Ardenne en collaboration avec l'INRA Reims.

**FRONTEAU, G., RABASTÉ, Y., ARDHUIN, M., TURMEL, A. et BARBIN, V.**, 2011. Les matériaux de l'aqueduc gallo-romain de Durocortorum (Reims). In : *Archéométrie 2011*. Liège. 2011. pp. 1.

**FRONTEAU, G. et TURMEL, A.**, 2017. Les pierres de la cathédrale de Reims. In : **DEMOUY, P. (éd.)**, *La cathédrale de Reims. Actes du colloque du 800ème centenaire de la cathédrale de Reims*. PUPS. 2017. pp. 133-143.

**FRONTEAU, G., TURMEL, A., DECROCK, B., LARATTE, S., CHALUMEAU, L., LEJEUNE, O. et DEVOS, A.**, 2019. Approche pluridisciplinaire des matériaux du bâti à Reims (Marne) : méthodologie d'étude des pierres et des sites carriers. In : **BOULANGER, K. et MOULIS, C. (éd.)**, *Pierre à Pierre. Economie de la pierre de l'Antiquité à l'époque moderne en Lorraine et régions limitrophes. Actes du colloque de Nancy*. [en ligne]. PUN – Editions Universitaires de Lorraine. pp. 25-33.

**FRONTEAU, G., TURMEL, A., PICHARD, C., DECROCK, B., DEVOS, A., LEJEUNE, O., MÉNIVAL, D., CHALUMEAU, L. et COMBAUD, A.**, 2014. Les approvisionnements en pierre de construction à Reims : des choix marqués par de fortes contraintes géologiques, géographiques et socio-économiques. In : *Construire la ville. Histoire urbaine de la pierre à bâtir*. 2014.

**FURUKAWA, Y. et PONCE, J.**, 2007. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. In : *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* [en ligne]. Minneapolis, MN, USA : IEEE. juin 2007. pp. 1-8. ISBN 978-1-4244-1179-5.

**FURUKAWA, Y. et PONCE, J.**, 2010. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1 août 2010. Vol. 32, pp. 1362-76. DOI 10.1109/TPAMI.2009.161.

## G

**GÉLY, J.-P., HANOT, F., et AGBP**, 2014. *Le Bassin parisien: un nouveau regard sur la géologie*. ISBN 978-2-9550042-0-3.

**GÉLY, J.-P.**, 1996. Le Lutétien du Bassin parisien : de l'analyse séquentielle haute-résolution à la reconstitution paléogéographique. *Bulletin d'information du Bassin de Paris*. 1996. Vol. 34, n° 2, pp. 3-27.

**GÉLY, J.-P.**, 2009. Le Lutétien : une période charnière de l'histoire du Bassin parisien. *Saga Information*. février 2009. N° 284, pp. 6-24.

**GÉLY, J.-P.**, 2016. Le Paléogène du Bassin de Paris : corrélations et reconstitutions paléogéographiques - The Paleogene of the Paris Basin : Correlations and Paleogeography. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*. 2016. Vol. 53, n° 4, pp. 2-13.

**GÉLY, J.-P. et BLARY, F.**, 2013. Les centres carriers de Saint-Leu-d'Esserent et de Saint-Maximin au cours des siècles : développement de l'exploitation et diffusion de la pierre. In : **HANQUIEZ, D. et PETIT, A. (éd.)**, *Saint-Leu-d'Esserent et l'implantation monastique dans la basse vallée de l'Oise. Actes du colloque de Saint-Leu-d'Esserent*. Saint-Leu-d'Esserent. 2013. pp. 221-246.

**GÉLY, J.-P. et HANOT, F. (éd.)**, 2014. Coupe du Bassin parisien simplifiée - Coupe géologique du Bassin parisien et du Fossé rhénan. , *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*. 2014. Vol. Mémoire hors-série n° 9, pp. 1pl.

**GIBEAUX, S.**, 2017. IFEPAR Impact des Facteurs Environnementaux sur le Patrimoine Restauré [en ligne]. Thèse de doctorat. Reims, France : Université de Reims Champagne-Ardenne.

**GINOUVÈS, R., BILLOT, M.-F., BOURAS, C., COARELLI, F., COULTON, J. J., GROS, P., HADJIMICHALI, V., HELLMANN, M.-C. et KRAUSE, C.**, 1992. *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. II. Eléments constructifs : supports, couvertures, aménagements intérieurs* [en ligne]. Persée - Portail des revues scientifiques en SHS.

**GINOUVÈS, R., BOURAS, C., COULTON, J. J., GROS, P., GUIMIER-SORBETS, A.-M., HADJIMICHALI, V., HELLMANN, M.-C., KOHL, M., MORIZOT, Y. et PESANDO, F.**, 1998. *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome III. Espaces architecturaux, bâtiments et ensembles* [en ligne]. Persée - Portail des revues scientifiques en SHS.

**GINOUVÈS, R., MARTIN, R., GROS, P., COARELLI, F., COULTON, J. J., HADJIMICHALI, V., KRAUSE, C. et GUIMIER-SORBETS, A.-M.**, 1985. *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor* [en ligne]. ISBN 978-2-7283-0105-0.

**GLUHAK, T. M. et WEFERS, S.**, 2011. Geochemische Herkunftsbestimmung römischer Getreidemühlen vom Magdalensberg, Kärnten. ("Geochemical provenance determination of Roman flour mills from the Magdalensberg, Carinthia"). In : **CEMPER-KIESSLICH, J., LANG, F., MOSER, S., SCHALLER, K., UHLIR, Chr. et UNTERURZACHER, M. (éd.)**, *Secundus conventus austriacus archaeometriae : Tagungsband zum Zweiten Österreichischen Archäometrie Kongress*. Universität Salzburg Interfakultärer Fachbereich Gerichtsmedizin, Salzburg : ArchaeoPlus - Schriften zur Archäologie und Archäometrie an der Paris Lodron-Universität Salzburg. 2011. pp. 79-82.

**GLUHAK, T.M. et HOFMEISTER, W.**, 2009. Roman lava quarries in the Eifel region (Germany): geochemical data for millstone provenance studies. *Journal of Archaeological Science* [en ligne]. août 2009. Vol. 36, n° 8, pp. 1774-1782. DOI 10.1016/j.jas.2009.04.007.

**GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, J., ZALAMA, E. et FELIZ, R.**, 2013. Automated Registration of 3D Scans Using Geometric Features and Normalized Color Data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* [en ligne]. 2013. Vol. 28, n° 2, pp. 98-111. DOI 10.1111/j.1467-8667.2012.00785.x.

**GOMEZ-HERAS, M., MCCABE, S., SMITH, B.J. et FORT, R.,** 2009. Impacts of Fire on Stone-Built Heritage. *Journal of Architectural Conservation* [en ligne]. 2009. Vol. 15, n° 2, pp. 47-58.

**GÓMEZ-HERAS, M., SMITH, Bernard J. et FORT, Rafael,** 2006. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology* [en ligne]. 30 août 2006. Vol. 78, n° 3, pp. 236-249. DOI 10.1016/j.geomorph.2005.12.013.

**GÓMEZ-HERAS, M., SMITH, Bernard J. et FORT, Rafael,** 2008. Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty. *Environmental Geology* [en ligne]. décembre 2008. Vol. 56, n° 3-4, pp. 547-560. DOI 10.1007/s00254-008-1356-3.

**GOMEZ-HERAS, M., SMITH, Bernard J. et VILES, Heather A.,** 2010. Oxford stone revisited: causes and consequences of diversity in building limestone used in the historic centre of Oxford, England. *Geological Society, London, Special Publications* [en ligne]. 2010. Vol. 333, n° 1, pp. 101-110. DOI 10.1144/SP333.10.

**GOUDINEAU, C.,** 1990. *César et la Gaule*. Paris : Errance. Collection « De la Gaule à la France: histoire et archéologie ». ISBN 978-2-87772-049-6. DG264 .G68 1990

**GRANIER, X., CHAYANI, M., ABERGEL, V., BENISTANT, P., BERGEROT, L., BOHBOT, H., CASSEN, S., DE LUCA, L., DUTAILLY, B., EPAUD, F., ESPINASSE, L., EUSÈBE, S., FLAMMIN, A., FLEURY, P., GRIMAUD, V., JEANSON, L., JOFFRES, A., KEROUANTON, J.-L., LAROCHE, F., LE MORT, F., LEFÈVRE, N., LESCOPI, L., MADELEINE, S., MANSÉRI, H., MARLET, O., VERGNIEUX, R., MATHIEU, V., MORA, P., MORINEAU, C., PAITIER, H., PAMART, A., POUYET, T., QUANTIN, M., RODIER, X., SANZ LALIBERTÉ, S., SCHMITT, A., SORIN, S., TOURNON-VALIENTE, S. et BERNARD, J.-F.,** 2019. *Les recommandations du Consortium 3D SHS* [en ligne].

**GREEN, S., BEVAN, A. et SHAPLAND, M.,** 2014. A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. *Journal of Archaeological Science* [en ligne]. 1 juin 2014. Vol. 46, pp. 173-181. DOI 10.1016/j.jas.2014.02.030.

**GRIFFIN, P. S., INDICTOR, N. et KOESTLER, R. J.,** 1991. The biodeterioration of stone: a review of deterioration mechanisms, conservation case histories, and treatment. *International Biodeterioration* [en ligne]. 1 janvier 1991. Vol. 28, n° 1, pp. 187-207. DOI 10.1016/0265-3036(91)90042-P.

**GROS, P.,** 1996. *L'architecture romaine : du début du IIIe siècle av. J.-C. à la fin du Haut-Empire*. Paris : Picard. Les manuels d'art et d'archéologie antiques. ISBN 978-2-7084-0500-4. NA310 .G79 1996

**GROS, P.,** 2001. *L'architecture romaine du début du IIIe siècle av. J.-C. à la fin du Haut-Empire : Volume 2, maisons, palais, villas et tombeaux*. Paris : Picard. Les manuels d'art et d'archéologie antiques.

**GRUSSENMEYER, P. et LANDES, T.,** 2011. Lasergrammétrie terrestre. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie* [en ligne]. 2011. Vol. 12, n° 1, pp. 11-28. DOI 10.3406/edyte.2011.1174.

**GRUSSENMEYER, P., LANDES, T., VOEGTLE, T. et RINGLE, K.,** 2008. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2008. pp. 213-218. Scopus

**GUARNIERI, A., VETTORE, A., EL-HAKIM, S. et GONZO, L.,** 2004. Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2004. pp. 154-158. Scopus

**GUCKER, D.,** 2020. Les aménagements portuaires antiques de la Vesle à Reims/ Durocortorum (Marne). *Gallia* [en ligne]. 30 décembre 2020. Vol. 77, n° 1, pp. 303-316. DOI 10.4000/gallia.5549.

**GUÉRIN, H.,** 1991. L'exploitation des meulières en montagne de Reims. In : *Actes du 115e congrès national des Sociétés Savantes, Section d'Histoire des sciences et techniques, Avignon, 1990*. Paris. 1991. pp. 107-116.

**GUERNET, C.,** 2013. La stratigraphie du Paléogène et les ostracodes du Bassin de Paris. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*. 2013. Vol. 50, n° 2, pp. 5-16.

**GUICHARD, V.,** 2017. Les oppida, une parenthèse dans l'histoire de l'Europe tempérée ? *Pallas* [en ligne]. 30 novembre 2017. N° 105, pp. 159-171. DOI 10.4000/pallas.8190.

**GUILLETTE, O.,** 1995. Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Science of The Total Environment* [en ligne]. mai 1995. Vol. 167, n° 1-3, pp. 215-220. DOI 10.1016/0048-9697(95)04582-L.

**GUILLOCHEAU, F., ROBIN, C., ALLEMAND, P., BOURQUIN, S., BRAULT, N., DROMART, G., FRIEDENBERG, R., GARCIA, J.-P., GAULIER, J.-M., GAUMET, F., GROSDOY, B., HANOT, F., LE STRAT, P., METTRAUX, M., NALPAS, T., PRIJAC, C., RIGOLLET, C., SERRANO, O. et GRANDJEAN, G.,** 2000. Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints. *Geodinamica Acta* [en ligne]. 1 août 2000. Vol. 13, n° 4, pp. 189-245. DOI 10.1016/S0985-3111(00)00118-2.

**GUINDOLLET, B.,** 1991. La fourniture de pierre à bâtir sur les chantiers de la ville de Paris, fin 15e-début 16e siècle. . 1991.

## H

**HALL, K.,** 2007. Evidence for freeze–thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada: II. The temperature at which water freezes in rock. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. février 2007. Vol. 32, n° 2, pp. 249-259. DOI 10.1002/esp.1389.

**HAMILTON, P.F.,** 2005. *L'étoile de Pandore*. Paris : Bragelonne. Bragelonne SF. ISBN 978-2-915549-43-0. 803

**HAMMECKER, C.,** 1993. *Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en oeuvre*. Thèse de doctorat. Strasbourg : Université Louis Pasteur.

**HAMMECKER, C. et JEANNETTE, D.**, 1994. Modelling the capillary imbibition kinetics in sedimentary rocks: Role of petrographical features. *Transport in Porous Media* [en ligne]. 1 janvier 1994. Vol. 17, n° 3, pp. 285-303. DOI 10.1007/BF00613588.

**HARRIS, C., ARENSON, L.U., CHRISTIANSEN, H.H., ETZELMÜLLER, B., FRAUENFELDER, R., GRUBER, S., HAEBERLI, W., HAUCK, C., HÖLZLE, M., HUMLUM, O., ISAKSEN, K., KÄÄB, A., KERN-LÜTSCHG, M.A., LEHNING, M., MATSUOKA, N., MURTON, J.B., NÖTZLI, J., PHILLIPS, M., ROSS, N., SEPPÄLÄ, M., SPRINGMAN, S.M. et VONDER MÜHLL, D.**, 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* [en ligne]. 1 février 2009. Vol. 92, n° 3, pp. 117-171. DOI 10.1016/j.earscirev.2008.12.002.

**HATRIVAL, J.-N.**, 1977. *Notice Explicative de la Carte géologique d'Epernay (0157N)*. [Carte géologique]. Brgm. Orléans : BRGM, Orléans.

**HAUL, R., GREGG, S.J. et SING, K.S.W.**, 1982. Adsorption, Surface Area and Porosity. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie* [en ligne]. 1982. Vol. 86, n° 10, pp. 957-957. DOI 10.1002/bbpc.19820861019.

**HENK, A.**, 1993. Late orogenic Basin evolution in the Variscan internides: the Saar-Nahe Basin, southwest Germany. *Tectonophysics* [en ligne]. 15 août 1993. Vol. 223, n° 3, pp. 273-290. DOI 10.1016/0040-1951(93)90141-6.

**HERSCHDORFER, N.**, 2015. *Le dictionnaire de la photographie*. Paris : Éditions de La Martinière. ISBN 978-2-7324-7126-6. 770.3

**HIRSCHWALD, J.**, 1911. *Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung* [en ligne]. Gebriider Borntraeger. Berlin : Nature Publishing Group.

**HISTORIC ENGLAND**, 2017. *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice* [en ligne]. Historic England. Swindon.

**HOWLAND, M.D., KUESTER, F. et LEVY, T.E.**, 2014. Structure from Motion: Twenty-First Century Field Recording with 3D Technology. *Near Eastern Archaeology* [en ligne]. 1 septembre 2014. Vol. 77, n° 3, pp. 187-191. DOI 10.5615/neareastarch.77.3.0187.

**HUBY, E.**, 2021. *Réponse de matériaux à des contraintes thermo-hydriques obtenues par suivi climatique : étude de cas de la basilique Saint-Remi de Reims*. Thèse de doctorat. REIMS : Université de Reims Champagne Ardenne.

**HUBY, E., THOMACHOT-SCHNEIDER, C., VÁZQUEZ, P. et FRONTEAU, G.**, 2020. Use of micro-climatic monitoring to assess potential stone weathering on a monument: example of the Saint-Remi Basilica (Reims, France). *Environmental Monitoring and Assessment* [en ligne]. décembre 2020. Vol. 192, n° 12, pp. 796. DOI 10.1007/s10661-020-08753-w.

**HUSSEINI, B. et BALI, Z.**, 2015. Documentation, using GIS techniques in conservation of a World Heritage Site, a case study of "The Old City of Jerusalem" *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 12 août 2015. Vol. XL-5/W7, pp. 229-234. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-229-2015.

**HUYGHE, D., MERLE, D., LARTAUD, F., CHEYPE, E. et EMMANUEL, L.**, 2012. Middle Lutetian climate in the Paris Basin: implications for a marine hotspot of paleobiodiversity. *Facies* [en ligne]. octobre 2012. Vol. 58, n° 4, pp. 587-604. DOI 10.1007/s10347-012-0307-3.

## I

**ILAVSKY, J., BERNDT, C. C. et KARTHIKEYAN, J.**, 1997. Mercury intrusion porosimetry of plasma-sprayed ceramic. *Journal of Materials Science* [en ligne]. 1 août 1997. Vol. 32, n° 15, pp. 3925-3932. DOI 10.1023/A:1018612815364.

**IMBAULT, D.**, 1986. *La Champagne: architecture régionale*. Jaher. ISBN 978-2-903821-06-7.

**INKPEN, R., DUANE, B., BURDETT, J. et YATES, T.**, 2008. Assessing stone degradation using an integrated database and geographical information system (GIS). *Environmental Geology* [en ligne]. décembre 2008. Vol. 56, n° 3-4, pp. 789-801. DOI 10.1007/s00254-008-1309-x.

**INKPEN, R. J., FONTANA, D. et COLLIER, P.**, 2001. Mapping decay: integrating scales of weathering within a GIS. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. août 2001. Vol. 26, n° 8, pp. 885-900. DOI 10.1002/esp.234.

## J

**JADART, H., DEMAISON, L. et GIVELET, C.**, 1900. *Répertoire archéologique de l'arrondissement de Reims, 10eme fascicule, canton de Beine, Reims*.

**JANVIER-BADOSA, S.**, 2012. *Le carnet de santé d'un monument : Application au château de Chambord*. PhD. Orléans : Université d'Orléans.

**JANVIER-BADOSA, S., STEFANI, C., BRUNETAUD, X., BECK, K., DE LUCA, L. et AL-MUKHTAR, M.**, 2015. Documentation and analysis of 3D mappings for monument diagnosis. *Research for Development*. 2015. pp. 347-357. DOI 10.1007/978-3-319-08533-3\_29. Scopus

**JEMIN, R.**, 2010. *Bezannes (Marne), routes d'accès à la gare TGV. Voies antiques et portion d'un établissement rural de l'Antiquité tardive*. rapport de fouille archéologique. Metz : Inrap Grand Est nord.

**JEMIN, R.**, 2012. Étude archéologique de la voie antique Reims-Trèves à Witry-lès-Reims (Marne). *Revue archéologique de l'Est* [en ligne]. 1 octobre 2012. N° Tome 61, pp. 175-203.

**JODRY, F. et LONGEPIERRE, S.**, 2011. Les moulins de type Pompéi en France. In : BUCHSENSCHUTZ, O., JACCOTTEY, L., JODRY, F. et BLANCHARD, J.-L. (éd.), *Actes des III e Rencontres Archéologiques de l'Archéosite gaulois* [en ligne]. 2011. pp. 95-107.

**JODRY, F., ROLLET, P., PICAUVET, P., MOIRET, F. et FRONTEAU, G.**, 2014. Meules antiques de Reims. In : BUCHSENSCHUTZ, O., LEPAREUX-COUTURIER, S. et FRONTEAU, G. (éd.), *Actes du 2ème colloque du Groupe Meule, Reims, 15-17 mai 2014*. Dijon : Revue Archéologique de l'Est. 2014. pp. 133-143.

**JONES, C.A. et CHURCH, E.**, 2020. Photogrammetry is for everyone: Structure-from-motion software user experiences in archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports* [en ligne]. 1 avril 2020. Vol. 30, pp. 102261. DOI 10.1016/j.jasrep.2020.102261.

**JUNG, A.**, 1991. *Le pavage des rues de Reims, à la fin du Moyen Age, d'après les registres de comptes des chaussées*. Mémoire de Maîtrise (Histoire médiévale). Reims : Université de Reims Champagne-Ardenne.

**JUNIQUE, T., VÁZQUEZ, P., GÉRAUD, Y., THOMACHOT-SCHNEIDER, C. et SIDIBÉ, H.**, 2021. Microstructural evolution of granitic stones exposed to different thermal regimes analysed by infrared thermography. *Engineering Geology* [en ligne]. 5 juin 2021. Vol. 286, pp. 106057. DOI 10.1016/j.enggeo.2021.106057.

## K

**KIOUSSI, A., KAROGLU, M., BAKOLAS, A., LABROPOULOS, K. et MOROPOULOU, A.**, 2013. Documentation protocols to generate risk indicators regarding degradation processes for cultural heritage risk evaluation. In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. Copernicus GmbH. 22 juillet 2013. pp. 379-384.

**KLAPPA, C.F.**, 1979. Calcified filaments in Quaternary calcretes : organo-mineral interactions in the subaerial vadose environment. *Journal of Sedimentary Petrology*. 1979. N° 49, pp. 955-968.

**KOEHLER, A. et MORIZE, D.**, 2003. *Witry-les-Reims (Marne) « Voie romaine » : Voie romaine Reims-Trèves : Barreau est de Reims, contournement de Witry-les-Reims, itinéraire de substitution*. Rapport Final d'Opération. Metz : Inrap GEN.

**KOŠIR, A.**, 2004. Microcodium Revisited: Root Calcification Products of Terrestrial Plants on Carbonate-Rich Substrates. *Journal of Sedimentary Research* [en ligne]. 1 novembre 2004. Vol. 74, n° 6, pp. 845-857. DOI 10.1306/040404740845.

**KUNOW, J.**, 1983. *Der römische Import in der Germania libera bis zu den Markomannenkriegen: Studien zu Bronze- und Glasgefäßen*. Neumünster : Wachholtz. ISBN 978-3-529-01521-2.

## L

**LAMBOT, B. et CASAGRANDE, P.**, 1996. Les Rèmes à la veille de la romanisation. Le Porcien au 1er siècle avant J.-C. *Revue archéologique de Picardie* [en ligne]. 1996. Vol. 11, n° 1, pp. 13-38. DOI 10.3406/pica.1996.1885.

**LANCASTER, L. C.**, 2005. *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context*. Cambridge University Press. ISBN 978-1-139-44434-7.

**LARATTE, S. et CONREUX, A.**, 2017. *Étude géomorphologique, Site de Villers-aux-Noeuds, « Le Bois Doriot » (F16-07), Villers-Aux-Noeuds (51) - Service Archéologique du Grand Reims*. GEGENAA - URCA.

**LARATTE, S. et FRONTEAU, G., 2014.** *Détermination de la provenance de matériaux archéologiques (Schistes ardoisiers), Warcq RD16 - 2012.* GEGENAA - URCA.

**LASSEUR, E., 2007.** *La Craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campanien, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D.* [en ligne]. Thèse de doctorat. Université Rennes 1.

**LATO, M.J., HUTCHINSON, D. J., GAUTHIER, D., EDWARDS, T. et ONDERCIN, M., 2015.** Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. *Canadian Geotechnical Journal* [en ligne]. 1 février 2015. Vol. 52, n° 2, pp. 129-140. DOI 10.1139/cgj-2014-0051.

**LAURAIN, M., 1985.** *Carte géologique de la France 1/50000, feuille d'Avize et sa notice explicative.* BRGM. Orléans.

**LAURAIN, M., 2001.** Conséquences des périodes froides du Quaternaire en Champagne. *Bulletin annuel de l'Association Géologique Aubeoise.* 2001. Vol. 22, pp. 21-38.

**LAURAIN, M., GUÉRIN, H. et BARTA, L., 1976.** *Notice explicative de la feuille de Fismes au 1/50 000<sup>ième</sup>* [en ligne]. BRGM. Orléans. Carte géologique de France, N°131.

**LAURAIN, M., GUÉRIN, H. et DURAND, R., 1981.** *Notice explicative de la feuille de Reims au 1/50 000<sup>ième</sup>.* BRGM. Orléans. Carte géologique de France.

**LAURAIN, M., GUÉRIN, H., MARRE, A. et RICHARD, Et J., 1995.** Processus Génétiques à l'origine des Formations de Pente à Gravier de Craie en Champagne. *Permafrost and Periglacial Processes* [en ligne]. 1995. Vol. 6, n° 2, pp. 103-108. DOI 10.1002/ppp.3430060207.

**LAURAIN, M et MEYER, R., 1986.** Stratigraphie et Paléogéographie de la base du Paléogène champenois. *Géologie de la France.* 1986. Vol. 1, pp. 103-123.

**LAURAIN, M., GUÉRIN, H., BARTA, L., MONCIARDINI, C., DURAND, C., NEISS, R., CHERTIER, R., LOUIS, P., et MORFAUX, P., 1981.** *Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille de Reims.* [Carte géologique]. Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières.

**LAURAIN, M., MARRE, A. et GUÉRIN, H., 1997.** La cryosuccion : un des mécanismes de formation des poches de cryoturbation sur les substrats crayeux. Cryosuccion : a mechanism of formation of periglacial involutions in chalk substrata. *Annales de la société Géologique du Nord.* Octobre 1997. pp. 373-379.

**LAUSSEDAT, A., 1859.** Mémoire sur l'emploi de la photographie dans la levée des plans. *Compte rendu de l'Académie des Sciences.* 1859. Vol. 49, pp. 732-734.

**LE GALL, J., 1959.** Modes de construction et techniques dans l'architecture romaine. *Revue Archéologique* [en ligne]. 1959. Vol. 1, pp. 181-202.

**LE NY, F., 1992.** *La Production des matériaux de construction en terre cuite en Gaule romaine : Synthèse* [en ligne]. Thèse de doctorat. Rennes 1.



**LE SOLLEUZ, A., DOIN, M. -P., ROBIN, C. et GUILLOCHEAU, F.**, 2004. From a mountain belt collapse to a sedimentary basin development: 2-D thermal model based on inversion of stratigraphic data in the Paris Basin. *Tectonophysics* [en ligne]. 2 août 2004. Vol. 386, n° 1, pp. 1-27. DOI 10.1016/j.tecto.2004.03.006.

**LEFÈVRE, F.**, 1974. Bref aperçu de l'historiographie de la « Porte de Mars » à Reims. In : . -. pp. 75-83.

**LEFÈVRE, F.**, 1980. Historique de la « Porte de Mars » de Reims. In : *Mémoires de la Société d'agriculture, commerce, sciences et arts du département de la Marne*. pp. 47-55. XCV.

**LEFÈVRE, F., LEGROS, R. et ARDHUIN, M.**, 1985. *La Porte Mars de Reims* [en ligne]. G.E.A.C.A. (Groupe d'études archéologiques Champagne-Ardenne), Centre Saint-Exupéry. Reims.

**LEFILS, M.**, 2008. *Reims (Marne), 29 rue Pontgivart, Rapport final d'opération*. Rapport Final d'Opération. Chalons-en-Champagne : SRA Champagne-Ardenne – INRAP G.E.N.

**LEJEUNE, O.**, 2005. *Dynamiques d'érosion des bas plateaux de l'Est de la France : l'exemple du bassin-versant amont de la Marne*. Thèse de doctorat (Géographie). Reims : Université de Reims Champagne Ardenne.

**LEJEUNE, O., DEVOS, A., FRONTEAU, G., ROCHE, D., LEFEVRE, A. et SOSSON, C.**, 2007. Les Microcodium : un traceur naturel des écoulements karstiques dans les craies champenoises à proximité des formations paléocènes (Marne-France). *Karstologia*. 2007. pp. 1-8.

**LEMAN, P.**, 1975. La voie du Léman à l'Océan. *Caesorodunum*. 1975. Vol. X, pp. 102-108.

**LEÓN-ROBLES, C.A., REINOSO-GORDO, J.F. et GONZÁLEZ-QUIÑONES, J.J.**, 2019. Heritage building information modeling (H-BIM) applied to a stone bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8, n° 3. DOI 10.3390/ijgi8030121. Scopus

**LETAVERNIER, G. et OZOUF, J.-C.**, 1987. La gélifraction des roches et des parois calcaires. *Quaternaire* [en ligne]. 1987. Vol. 24, n° 3, pp. 139-145. DOI 10.3406/quate.1987.1841.

**LETELLIER, R.**, 2015. *Recording, Documentation and Information Management for the Conservation of Heritage Places* [en ligne]. 1. Routledge. ISBN 978-1-315-79391-7.

**LETELLIER, R. et EPPICH, R.**, 2015. *Recording, documentation, and information management for the conservation of heritage places* [en ligne]. ISBN 978-1-317-74293-7.

**LEVEAU, P.**, 2002. Introduction : les incertitudes du terme villa et la question du vicus en Gaule Narbonnaise. *Revue archéologique de Narbonnaise* [en ligne]. 2002. Vol. 35, n° 1, pp. 5-26. DOI 10.3406/ran.2002.1093.

**LÉVÊQUE, S.**, 1991. *Rapport de sauvetage programmé, rue de l'Université à Reims*. Rapport de fouille programmée. SRA Champagne-Ardenne.

**LINOIR, D.**, 2014. *Les horizons d'accumulations carbonatées en Champagne-Ardenne : répartition régionale, caractérisation et impact sur les transferts hydriques* [en ligne]. Thèse de doctorat. Reims.

**LITKE, R., BÜKER, C., HERTLE, M., KARG, H., STROETMANN-HEINEN, V. et ONCKEN, O.**, 2000. Heat flow evolution, subsidence and erosion in the Rheno-Hercynian orogenic wedge of central Europe. *Geological Society, London, Special Publications* [en ligne]. 2000. Vol. 179, n° 1, pp. 231-255. DOI 10.1144/GSL.SP.2000.179.01.15.

**LIU, Ci xin**, 2016. *Le problème à trois corps: roman*. Arles : Actes Sud. Exofictions. ISBN 978-2-330-07074-8. 803

**LOBJOIS, G.**, 1964. L'oppidum du Vieux-Laon à Saint-Thomas (Aisne). *Revue du Nord* [en ligne]. 1964. Vol. 46, n° 181, pp. 159-174. DOI 10.3406/rnord.1964.2493.

**LÓPEZ GONZÁLEZ, L.**, 2015. *Aplicación de herramientas gis para la cartografía y correlación de datos de ensayos no destructivos en el diagnóstico de edificios históricos* [en ligne]. Thèse de doctorat. E.T.S. Arquitectura (UPM).

**LORENZ, J. et POMEROL, C.**, 1989. Évocation de la géologie du Bassin parisien des origines à l'aube du XXe siècle. Géologie du Bassin parisien. In : *Géologie du Bassin parisien*. éditions du C.T.H.S.,. 1989. pp. 9-21.

**LORENZ, J., TARDY, D. et COULON, G (éd.)**, 2000. La pierre dans la ville antique et médiévale. Actes du colloque d'Argentomagus. [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1.

**LOZANO, N.**, 2012. *Compatibilité et durabilité des pierres de substitutions dans les monuments. Aspects physicochimiques et visuels*. [en ligne]. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne : C2MA - Centre des Matériaux des Mines d'Alès. NNT:2012EMSE0654

**LOZOUET, P.**, 2012. *Stratotype Stampien*. Paris Mèze : Muséum national d'Histoire naturelle Biotope. Patrimoine géologique, 4. ISBN 978-2-914817-87-5. 551.785 094436

**LOZOUET, P.**, 2014. Temporal and latitudinal trends in the biodiversity of European Atlantic Cenozoic gastropod (Mollusca) faunas. a base for the history of biogeographic provinces. *Carnets de Géologie*. 2014. Vol. 14, n° 14, pp. 273-314. DOI 10.4267/2042/54150. Scopus

**LUBELLI, B., CNUUDE, V., DIAZ-GONCALVES, T., FRANZONI, E., VAN HEES, Rob P. J., IOANNOU, I., MENENDEZ, B., NUNES, C., SIEDEL, H., STEFANIDOU, M., VERGES-BELMIN, V. et VILES, H.**, 2018. Towards a more effective and reliable salt crystallization test for porous building materials: state of the art. *Materials and Structures* [en ligne]. 5 avril 2018. Vol. 51, n° 2, pp. 55. DOI 10.1617/s11527-018-1180-5.

**LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. et BOEHM, J.**, 2020. *Close-range photogrammetry and 3d imaging*. 3rd edition. Berlin : Walter de Gruyter GmbH. ISBN 978-3-11-060724-6. TR693 .L8613 2020

**LUSSE, J. et PATROLIN, A.**, 1994. *L'archéologie en Champagne-Ardenne 1960-1990 / Jackie Lusse* [en ligne]. Société archéologique champenoise. Reims.

## M

**MA, Z. et REN, Y.**, 2017. Integrated Application of BIM and GIS: An Overview. *Procedia Engineering* [en ligne]. 1 janvier 2017. Vol. 196, pp. 1072-1079. DOI 10.1016/j.proeng.2017.08.064.

**MAQUART, J.-J., MOREAU, E., REIMBEAU-DUCHESNE et BAUSSONNET, G.**, 1854. *Anciens remparts et portes de Reims / album composé & dessiné par J-J Maquart et offert par sa veuve à la ville de Reims* [en ligne]. [Chez Maquart]. [Reims].

**MARTÍNEZ-TORRES, L. M.**, 2007. Lithological maps of churches in the Diocese of Vitoria (Spain): Space–time distribution of building stones and ancient quarries. *Building and Environment* [en ligne]. 1 février 2007. Vol. 42, n° 2, pp. 860-865. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.10.004.

**MATHELART, P.**, à paraître. L'amphithéâtre de Reims : nouveaux éléments de localisation et de datation. *Gallia. Archéologie des Gaules*. à paraître. Vol. 79, n° 1.

**MATHELART, P., BOCQUET-LIÉNARD, A. et FRONTEAU, G.**, 2018. L'artisanat de la céramique en Champagne : du cadre géographique et géologique à l'implantation des zones de productions. In : [en ligne]. SFECAG. 2018. pp. 19.

**MATHELART, P. et ROLLET, P.**, 2019. Reims (Marne), rue de l'Équerre : un site de production, de diffusion et de consommation de vaisselle dans les quartiers sud du Durocortorum. Apports et limites du traitement statistique de la céramique à la chronologie. In : *Collectif, Sfecag, Actes du congrès de Maubeuge-Bavay, 30 mai-2 juin 2019*. Maubeuge-Bavais : Sfecag, Marseille. 2019. pp. 405-438.

**MATSUOKA, N.**, 2001. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. *Earth-Science Reviews* [en ligne]. 1 octobre 2001. Vol. 55, n° 1, pp. 107-134. DOI 10.1016/S0012-8252(01)00057-5.

**MATSUOKA, Norikazu**, 1991. A model of the rate of frost shattering: Application to field data from Japan, Svalbard and Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes* [en ligne]. octobre 1991. Vol. 2, n° 4, pp. 271-281. DOI 10.1002/ppp.3430020403.

**MATTERNE, V.**, 2009. Premier aperçu des activités agricoles en plaine champenoise à partir des études carpologiques. In : **VANMOERKERKE, J. (éd.)**, *Le bassin de la Vesle du Bronze final au Moyen Age à travers les fouilles du TGV Est*. pp. 45-55. BSAC, 102.

**MAUMONT, M.**, 2010. L'espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. In *Situ. Revue des patrimoines* [en ligne]. 3 août 2010. N° 13. DOI 10.4000/insitu.6413.

**MÉGNIEN, C. (éd.)**, 1980. *Synthèse géologique du Bassin de Paris. Stratigraphie et paléogéographie*. BRGM. Orléans : Éd. du BRGM. Synthèse géologique du Bassin de Paris. ISBN 978-2-7159-5005-4.

**MÉNILLET, F.**, 1987. *Les meulières du Bassin de Paris (France) et les faciès associés. Rôle des altérations supergènes néogènes à quaternaire ancien dans leur genèse*. Thèse de doctorat. Strasbourg : Université Louis Pasteur.

**MENU, H.**, 1907. Note sur les camps retranchés de Reims à l'époque gallo-romaine. In : *Congrès de l'A.F.A.S. tenu à Reims du 1 au 7 août 1907*. Reims. 1907. pp. 892-897.

**MERLE, Didier (éd.)**, 2008. *Stratotype Lutétien - Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris* [en ligne]. Muséum national d'histoire naturelle. Paris : Biotope, Méze, Orléans. Patrimoine géologique.

**MERTZ, Jean-Didier**, 1991. *Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès*. Thèse de doctorat. Strasbourg : Université Louis Pasteur de Strasbourg.

**MISCIAPELLI, E.**, 1981. Les monuments funéraires de Reims gallo-romain. Catalogue des monuments figurés du Musée saint-Rémi et d'autres collections. *Bulletin de la société archéologique champenoise*. 1981. N° 74, pp. 3-48.

**MOHEN, J.-P.**, 1999. *Les sciences du patrimoine : identifier, conserver, restaurer*. Paris : Editions Odile Jacob. Sciences et art. ISBN 978-2-7381-0660-5. CC135 .M64 1999

**MONTENAT, C. et MERLE, D.**, 2018. *Stratotype Danien* [en ligne]. Muséum national d'Histoire naturelle. Paris : Muséum national d'Histoire naturelle. Patrimoine géologique, 9.

**MORLET, M.-T.**, 1953. La Toponymie de la Thiérache. *Revue internationale d'onomastique* [en ligne]. 1953. Vol. 5, n° 1, pp. 17-27. DOI 10.3406/rio.1953.1308.

**MOROPOULOU, A., APOSTOLOPOULOU, M., MOUNDOULAS, P., KAROGLOU, M., DELEGOU, E., LAMPROPOULOS, K., GRITSOPOULOU, M. et BAKOLAS, A.**, 2015. The combination of NDTs for the diagnostic study of historical buildings: the case of Kaisariani monastery. In : *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2015)* [en ligne]. Crete Island, Greece : Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research School of Civil Engineering National Technical University of Athens (NTUA) Greece. 2015. pp. 2321-2336. ISBN 978-960-99994-7-2.

**MURPHY, Maurice, MCGOVERN, Eugene et PAVIA, Sara**, 2009. Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey* [en ligne]. 27 août 2009. Vol. 27, n° 4, pp. 311-327. DOI 10.1108/02630800910985108.

## N

**NADEAU, A.**, 2008. Barzan – Le Moulin de Fâ (le théâtre). *ADLFI : Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia* [en ligne]. 1 mars 2008.

**NAULEAU, J.-F.**, 2013. Les matériaux de construction en terre cuite d'époque romaine dans l'ouest des Pays de la Loire – Premier bilan. *Revue archéologique de l'Ouest* [en ligne]. 25 décembre 2013. N° 30, pp. 223-259. DOI 10.4000/rao.2154.

**NAZE, Y., FRONTEAU, G. et ROBERT, B.,** 2011. L'atelier de meules rotatives en calcaire à cérithes de Vendresse-Beaulne (Aisne). Note à propos des outils de mouture en calcaire Lutétien. . 2011. Vol. Supplément 23.

**NEAUD, P.,** à paraître. *Fouille d'un quartier romain et d'un cimetière du Moyen Âge à Reims, rue Marie-Stuart*. RFO de fouille préventive. Inrap Grand Est, Metz.

**NEAUD, P., HUARD, P. et TESTARD, P.,** [sans date]. *Évolution d'un secteur urbain de l'Antiquité à nos jours*.

**NEISS, R.,** à paraître. Durocortorum ville gauloise ? Propositions pour une nouvelle problématique des origines de l'agglomération. *Gallia. Archéologie des Gaules*. à paraître. Vol. 79, n° 1.

**NEISS, R.,** 1973. *Reims, Porte Bazée, Rapport de fouille*. Rapport Final d'Opération. Champagne Ardenne : Ville circonscription des antiquités historiques.

**NEISS, R.,** 1976. Nouvelles observations sur les fossés d'enceinte antique de Reims, Marne. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 1976. Vol. LXIX, pp. 47-62.

**NEISS, R.,** 1982. Une dédicace de la cité des Rèmes à C. César et à L. César. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 1982. N° 4, pp. 3-8.

**NEISS, R.,** 1984. La structure urbaine de Reims antique et son évolution du Ier au IIIe siècle ap. J.-C. *Revue archéologique de Picardie* [en ligne]. 1984. Vol. 3, n° 1, pp. 171-191. DOI 10.3406/pica.1984.1439.

**NEISS, R.,** 2005. Durocortorum : état des recherches après vingt années d'archéologie préventive à Reims. *Revue Archéologique* [en ligne]. 2005. Vol. 1, n° 1, pp. 207-211.

**NEISS, R.,** 2010. Reims, « Le rempart (de l'oppidum) », « L'enceinte augustéenne », « L'urbanisme », « L'habitat résidentiel », « L'antiquité tardive ». **CHOSSENOT, R., ESTÉBAN, A. et NEISS, R. (éd.),** *Carte archéologique de la Gaule, 51/2*. Paris.

**NEISS, R.,** 2016. Contexte archéologique, le site de la porte Bazée - Recueil des inscriptions lapidaires de Reims. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 2016. Vol. 109, n° 2, pp. 283-292.

**NEISS, R. et BERRY, W.,** 1995. *Reims, cathédrale, Bilan scientifique*. Châlons-en-Champagne : DRAC, SRA Champagne-Ardenne.

**NEISS, R., BERTHELOT, F., DOYEN, J.-M. et AGARD, P.,** 2015. Reims/Durocortorum, cité des Rèmes Les principales étapes de la formation urbaine. *Gallia*. 2015. Vol. 72, n° 1, pp. 131-176.

**NEISS, R. et DENIAUX, E.,** 1992. L'inscription de la porte Bazée à Reims et la célébration des princes de la jeunesse. In : *Fêtes et politique en Champagne. Actes du colloque du Centre d'Études Champenoises 15-16 juin 1990*. Nancy, France : Presses universitaires de Nancy. 1992.

pp. 9-22.

**NEISS, R. et ROLLET, P.**, 2010. Reims. L'oppidum et les débuts de la ville gallo-romaine. . 2010. N° 330, pp. 15.

**NEISS, R. et SINDONINO, S.**, 2004. Civitas Remi, Reims et son enceinte au IV<sup>e</sup> siècle. *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 2004. Vol. 4, n° 97, pp. 128.

**NIETO, J.E., MOYANO, J.J., RICO DELGADO, F. et ANTÓN GARCÍA, D.**, 2016. Management of built heritage via HBIM Project: A case of study of flooring and tiling. *Virtual Archaeology Review* [en ligne]. 31 mai 2016. Vol. 7, n° 14, pp. 1. DOI 10.4995/var.2016.4349.

**NOCERINO, E., MENNA, F. et REMONDINO, F.**, 2014. Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 6 juin 2014. Vol. XL-5, pp. 465-472. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-5-465-2014.

## O

**OLIVIER, A.**, 1982. Dalles de toiture en pierre sciée à Glanum : « opus pavonaceum » ? *Revue archéologique de Narbonnaise* [en ligne]. 1982. Vol. 15, n° 1, pp. 69-98. DOI 10.3406/ran.1982.1199.

**OPITZ, R. et NOWLIN, J.**, 2012. Photogrammetric modeling + GIS: better methods for working with mesh data. *ArcUser*. 2012. pp. 46-49. Scopus

**ORTEGA-CALVO, J. J., ARIÑO, X., HERNANDEZ-MARINE, M. et SAIZ-JIMENEZ, C.**, 1995. Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototrophic microorganisms. *Science of The Total Environment* [en ligne]. 1 mai 1995. Vol. 167, n° 1, pp. 329-341. DOI 10.1016/0048-9697(95)04593-P.

**ORTEGA-CALVO, J. J., HERNANDEZ-MARINE, M. et SAIZ-JIMENEZ, C.**, 1991. Biodeterioration of building materials by cyanobacteria and algae. *International Biodeterioration* [en ligne]. 1 janvier 1991. Vol. 28, n° 1, pp. 165-185. DOI 10.1016/0265-3036(91)90041-O.

## P

**PARRIAUX, A. et ARNOULD, M.**, 2009. *Géologie : bases pour l'ingénieur*. ISBN 978-2-88074-810-4.

**PASQUINI, B.**, 2017. Proposition of a method to determine portages routes: the example of the connection between the Saône and the Moselle rivers (France) in ancient times. In : *Archaeological Approaches to Breaking Boundaries: Interaction, Integration and Division. Proceedings of the Graduate Archaeology at Oxford Conferences 2015–2016 (BAR)*. Oxford. 2017. pp. 172-182.

**PASQUINI, B.**, 2020. *Mesurer le développement économique en Gaule du I<sup>er</sup> siècle av. J.-C. au VII<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. Analyse méthodologique et épistémologique*. Thèse de doctorat (Archéologie). Paris : Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

**PÉCHART, S. et ARNAUD, M.**, 2014. *Reims, 22, Rue Lecointre, Marne, Champagne-Ardenne*. Rapport Final d'Opération. REIMS : Reims métropole.

**PÉCHART, S., JOUHET, E., ROLLET, P., ARNAUD, M. et FRONTEAU, G.**, 2019. Approvisionnement et utilisation de la craie dans l'architecture privée et publique à Reims (Marne) au Haut-Empire. In : *Pierre à Pierre. Economie de la pierre de l'Antiquité à l'époque moderne en Lorraine et régions limitrophes. Actes du colloque de Nancy* [en ligne]. PUN – Editions Universitaires de Lorraine. pp. 51-65.

**PÉCHART, S. et POUPON, F.**, à paraître. Le temple polygonal de la rue Lecointre. *Gallia. Archéologie des Gaules*. à paraître. Vol. Dossier Reims Antique, n° 79, pp. 1.

**PEÑA-VILLASENÍN, S., GIL-DOCAMPO, M. et ORTIZ-SANZ, J.**, 2019. Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. 1 mai 2019. Vol. 37, pp. 238-246. DOI 10.1016/j.culher.2018.10.009.

**PERRAS, M. et DIEDERICHS, M.**, 2011. The importance of classification for carbonates and mudrocks in engineering. In : *Proceedings of the 2011 Pan-Am Canadian Geotechnical Conference*. Toronto, Canada. 2 octobre 2011.

**PERRIER, R.**, 2004. *Les roches ornamentales*. Ternay : Pro Roc. ISBN 978-2-9508992-6-2.

**PERRODON, A. et ZABEK, J.**, 1990. Paris Basin: Chapter 32: Part II. Selected Analog Interior Cratonic Basins: Analog Basins. [en ligne]. 1990. Vol. 134, pp. 633-679.

**PETIT, J.-P., MANGIN, M. et BRUNELLA, P. (éd.)**, 1994. *Atlas des agglomérations secondaires de la Gaule belge et des Germanies*. Paris : Editions Errance. Archéologie aujourd'hui. ISBN 978-2-87772-099-1. DC63 .A85 1994

**PICARD, G.**, 1974. La « Porte de Mars » à Reims. In : *Actes du 95e Congrès national des Sociétés Savantes, Reims*. Reims. 1974. pp. 59-73.

**PICAVET, P.**, 2015. Production régionale et importation de meules rotatives dans le sud de l'Entre-Sambre-et-Meuse dans l'Antiquité Les collections du musée du Malgré-Tout (Treignes, Prov. de Namur). . 2015. pp. 15.

**PICAVET, P.**, 2019. *Les meules rotatives de la fin de l'Âge du Fer au haut Moyen Âge entre la Seine et le Rhin* [en ligne]. Thèse de doctorat (Archéologie). Université de Lille.

**PICAVET, P., RENIERE, S., CNUUDE, V., DE CLERCQ, W., DREESSEN, R., FRONTEAU, G., GOEMAERE, E. et HARTOCH, E.**, 2018. The Macquenoise sandstone (Devonian – Lochkovian), a suitable raw material for ancient querns and millstones: quarries, properties, manufacture and distribution in France and Belgium. *Geologica Belgica* [en ligne]. 2018. Vol. 21, n° 1-2, pp. 27-40. DOI 10.20341/gb.2018.002.

**PICHARD, C.**, 2014. *La construction de la forme urbaine : approche archéologique et archéogéographique du processus urbain de Reims du début du Moyen Âge à la ville préindustrielle*. [en ligne]. Thèse de doctorat. Reims : Université de Reims Champagne Ardenne.

**PICHARD, C.**, 2018. Étude chrono-chorématique de Reims pré-industrielle (Ier siècle av. J.-C.–XIXe siècle). In : **RODIER, X. et LORANS, E. (éd.)**, *Archéologie de l'espace urbain* [en ligne]. Tours : Presses universitaires François-Rabelais. pp. 353-369. Perspectives Villes et Territoires. ISBN 978-2-86906-545-1.

**PICHARD, C., DECROCK, B. et PHILIPPE, M.**, 2010. *Aménagement du secteur Boulingrin. Mission de recherche archivistique*. Reims : Service Archéologique du Grand Reims.

**PICHON, B.**, 2002. *L'Aisne*. Paris : Académie des inscriptions et belles-lettres. Carte archéologique de la Gaule, 02. ISBN 978-2-87754-081-0. DC611.A298 P53 2002

**PIERACCINI, M., GUIDI, G. et ATZENI, C.**, 2001. 3D digitizing of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. 1 janvier 2001. Vol. 2, n° 1, pp. 63-70. DOI 10.1016/S1296-2074(01)01108-6.

**PIERROT-DESEILLIGNY, M., DE LUCA, L. et REMONDINO, F.**, 2011. Automated Image-Based Procedures for Accurate Artifacts 3D Modeling and Orthoimage Generation. *Geoinformatics FCE CTU* [en ligne]. 21 décembre 2011. Vol. 6, pp. 291-299. DOI 10.14311/gi.6.36.

**PIETRI, L., BEAUJARD, B., ROME, R. et BIARNE, J.**, 2006. *Topographie chrétienne des cités de la Gaule, des origines au milieu du VIIIe siècle -Province ecclésiastique de Reims (Belgica secunda)*. Paris : De Boccard. ISBN 978-2-7018-0026-4. BR844 .T66 1986

**POINSIGNON**, 1878. *Géographie du département de la Marne - Reims, Beine et Suippes*. [carte]. Châlons.

**POLINSKI, A.**, 2012. *Provenance et utilisation de la pierre dans la basse vallée de la Loire (Ier siècle av. J. -C-VIIIe siècle ap. J. -C.)* [en ligne]. Thèse de doctorat. Nantes.

**POMEROL, C.**, 1974. Le Bassin de Paris. In : **DEBELMAS, J. (éd.)**, *Géologie de la France*. Paris : Doin. pp. 544. ISBN 978-2-7040-0011-1. QE268 .D39

**POMMEPUY, C.**, 1999. Le matériel de mouture de la vallée de l'Aisne de l'Âge du Bronze à La Tène finale : formes et matériaux. *Revue archéologique de Picardie* [en ligne]. 1999. Vol. 3, n° 1, pp. 115-141. DOI 10.3406/pica.1999.2217.

**POTIER, D.**, 2017. *Reims, 1919-1930. Reconstruire la cité*. Reims : Carnet de Sentier Editions. ISBN 978-2-9553729-0-6.

**PRIJAC, C., DOIN, M. P., GAULIER, J. M. et GUILLOCHEAU, F.**, 2000. Subsidence of the Paris Basin and its bearing on the late Variscan lithosphere evolution: a comparison between Plate and Chablis models. *Tectonophysics* [en ligne]. 2000. Vol. 323, n° 1-2, pp. 1-38.

**PRINS, A. B., ADAMS, M. J., HOMSHER, R. S. et ASHLEY, M.**, 2014. Digital Archaeological Fieldwork and the Jezreel Valley Regional Project, Israel. *Near Eastern Archaeology* [en ligne]. 1 septembre 2014. Vol. 77, n° 3, pp. 192-197. DOI 10.5615/neareastarch.77.3.0192.



**R**

**RABASTÉ, Y.**, 2010. *L'aqueduc antique de Reims (Durocutorum) : Reims, Marne, Croix Blandin (secteurs 1 et 2) : rapport de fouilles*. Rapport Final d'Opération. Metz : Inrap GEN.

**RABASTÉ, Y. et ARDHUIN, M.**, 2010. *L'aqueduc gallo-romain de Durocortorum*. Archéologie urbaine à Reims.

**RABASTÉ, Y., BALMELLE, A. et ARDHUIN, M.**, 2009. L'eau à Durocortorum (Reims) à travers les aménagements hydrauliques. In : *Les réseaux d'eau courante dans l'Antiquité, réparations, modifications, réutilisations, abandon, récupération* [en ligne]. Nancy, France : Presses universitaires de Rennes. novembre 2009. pp. 147-158. Les réseaux d'eau courante dans l'Antiquité, réparations, modifications, réutilisations, abandon, récupération, actes du colloque international de Nancy du 20-21 novembre 2009,.

**RAEPSAET, G.**, 1984. Transport de tambours de colonnes du Pentélique à Éleusis au IVe siècle avant notre ère. *L'Antiquité Classique* [en ligne]. 1984. Vol. 53, n° 1, pp. 101-136. DOI 10.3406/antiqu.1984.2115.

**RAEPSAET, G.**, 2002. *Attelages et techniques de transport dans le monde gréco-romain*. Livre Timperman. ISBN 978-90-71868-62-7.

**RAEPSAET-CHARLIER, M.-T.**, 2008. Les Gaules et les Germanies. In : **LEPELLEY, Cl. (éd.)**, *Rome et l'intégration de l'Empire, 44 av. J.-C.-260 ap. J.-C.* Paris : Nouvelle-Clio. pp. 143-195. Approches régionales du Haut-Empire romain.

**RALSTON, I. et BÜCHSENSCHÜTZ, O.**, 1975. Late pre-Roman Iron Age forts in Berry. *Antiquity* [en ligne]. mars 1975. Vol. 49, n° 193, pp. 8-18. DOI 10.1017/S0003598X00063195.

**RAMPONI, C., BARTHÉLEMY, D, VIDEAU, G, JACQUET, P., CAMBOU, D, CANTIN, N, CONNET, N, JACCOTTEY, Luc et ROTILLON, S.**, 2006. *Rapport final d'opération Sennecé-les-Mâcon (71), ZAC extension nord - En Putet. Volume 1 : Texte et figures*. Rapport Final d'Opération. Dijon : Inrap Grand-Est Sud.

**RAPONE, F.**, 2016. *La citadelle, Amiens, Somme : l'occupation médiévale et moderne (secteurs 4, 5 et 8). Rapport final d'opération*. Rapport Final d'Opération. Amiens : Service d'archéologie préventive d'Amiens métropole (SAAM).

**REIMS**, 2002. *Arkéo. Actualité des fouilles archéologiques à Reims 2000-2002*. Reims. Catalogue d'exposition.

**REINOSO-GORDO, J., RODRÍGUEZ-MORENO, C., GÓMEZ-BLANCO, A. et LEÓN-ROBLES, C.**, 2018. Cultural Heritage Conservation and Sustainability Based on Surveying and Modeling: The Case of the 14th Century Building Corral del Carbón (Granada, Spain). *Sustainability* [en ligne]. 27 avril 2018. Vol. 10, n° 5, pp. 1370. DOI 10.3390/su10051370.

**REMY, J.-M.**, 1993. *Influence de la structure du milieu poreux carbonate sur les transferts d'eau et les changements de phase eau-glace : application à la durabilité au gel de roches*

*calcaires de Lorraine* [en ligne]. Thèse de doctorat. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.

**RENARD, J.**, 1966. *Recherche des influences du déboisement en Champagne crayeuse : premiers éléments d'étude*. Rapport du ministère de l'agriculture.

**RENARD, J.**, 1970. Le déboisement en Champagne crayeuse au cours des deux dernières décennies. In : *Atelier régional d'études économiques et d'aménagement rural (A.R.E.E.A.R.)*. Châlons-sur-Marne. 1970.

**REVENU, M.**, 2010. *Ressources et utilisations de la pierre dans le Bassin parisien à l'époque romaine* [en ligne]. Thèse de doctorat. Paris 10.

**RICHARDS, J., LOCK, G. et STANCIC, Z.**, 1997. Archaeology and geographical information systems : a European perspective. . 1997. DOI 10.2307/506256.

**RICHARDS, J.D.**, 1998. Recent trends in computer applications in archaeology. *Journal of Archaeological Research* [en ligne]. décembre 1998. Vol. 6, n° 4, pp. 331-382. DOI 10.1007/BF02446083.

**RICHARDS-RISSETTO, H. et VON SCHWERIN, J.**, 2017. A catch 22 of 3D data sustainability: Lessons in 3D archaeological data management & accessibility. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* [en ligne]. 1 septembre 2017. Vol. 6, pp. 38-48. DOI 10.1016/j.daach.2017.04.005.

**RICHÉ, P. et LE MAÎTRE, P.**, 2003. *Les invasions barbares* [en ligne]. PUF. Paris. Que sais-je ? ISBN 978-2-13-053228-6.

**ROLLET, P.**, 1994. *Reims, place d'Erlon*. DFS de fouille préventive. SRA Champagne Ardenne : AFAN.

**ROLLET, P.**, 2004. *Reims rue de l'Équerre, BSR Champagne-Ardenne 2001*. Rapport Final d'Opération. Châlons-en-Champagne : DRAC Champagne-Ardenne, SRA, ministère de la Culture.

**ROLLET, P.**, 2006a. *Reims (Marne) 59, rue Belin : Archéologie Urbaine : rapport de fouilles*. Rapport final d'opération. Metz : INRAP GEN.

**ROLLET, P.**, 2006b. *Reims (Marne) 59 rue Belin*. Rapport final d'opération. Reims : INRAP, SRA Champagne-Ardenne. Archéologie urbaine, Reims (Marne).

**ROLLET, P.**, 2016. *Reims - Marne, Zac du Vieux Port, bd. Henrot, Aménagements antiques et médiévaux en bord de Vesle (Ie-Ves. et XIe-XVes.)*. Rapport Final d'Opération. Reims : INRAP.

**ROLLET, P., BERTHELOT, F., BALMELLE, A. et NEISS, R.**, 2001. Archéologie urbaine 4 : Reims (Marne), le quartier gallo-romain de la rue de Venise et sa réoccupation à l'époque moderne. *Bulletin de la Société archéologique champenoise*. 2001. Vol. 2-3.

**ROLLET, P., BOUCHET, F., GUILLAUME, F., PHILIPPE, R., JOUHET, E., AUXIETTE, G., BOUCHET, F. et BRUNET, M.**, 2009. *Reims (Marne) - « 17-19, rue Mont d'Arène et 6-8, rue*

*Maucroix* » : rapport de fouilles. Metz : Inrap GEN.

**ROLLET, P. et JOUHET, E.**, à paraître. Le lieu-dit des « Trois-Piliers » à Reims/ Durocortorum : un ensemble à caractère « monumental » du IIIe s. apr. J. C. *Gallia. Archéologie des Gaules*. à paraître. Vol. 79, n° 1.

**RONDOT, N.**, 1843. Etude géologique du Pays de Reims. *Annales de l'Académie de Reims*. 1843. Vol. 1, pp. 209-254.

**ROSE, D A**, 1963a. Water movement in porous materials: Part 1 - Isothermal vapour transfer. *British Journal of Applied Physics* [en ligne]. mai 1963. Vol. 14, n° 5, pp. 256-262. DOI 10.1088/0508-3443/14/5/308.

**ROSE, D A**, 1963b. Water movement in porous materials: Part 2 - The separation of the components of water movement. *British Journal of Applied Physics* [en ligne]. août 1963. Vol. 14, n° 8, pp. 491-496. DOI 10.1088/0508-3443/14/8/310.

**ROSE, D. A.**, 1968. Water movement in porous materials III. Evaporation of water from soil. *Journal of Physics D: Applied Physics* [en ligne]. décembre 1968. Vol. 1, n° 12, pp. 1779-1791. DOI 10.1088/0022-3727/1/12/327.

**ROUSSET-TOURNIER, B.**, 2001. *Transferts par capillarité et évaporation dans des roches. Rôle des structures de porosité*. Thèse de doctorat.

**ROYER, C. (éd.)**, 2001. *Champagne Ardenne*. Paris : Ed. A Die. L'architecture rurale française / Musée National des Arts et Traditions Populaires., 4. ISBN 978-2-908730-44-9.

**ROZENBAUM, O., BARBANSON, L., MULLER, F. et BRUAND, A.**, 2008. Significance of a combined approach for replacement stones in the heritage buildings' conservation frame. *Comptes Rendus Geoscience* [en ligne]. juin 2008. Vol. 340, n° 6, pp. 345-355. . DOI 10.1016/j.crte.2008.04.005.

**RUPPIENE, V.**, 2018. Granito Verde a Erbetta from the Ruwer-valley near Trier: preliminary results from petrography and major element compositions. *Roman ornamental stones in north-western Europe natural resources, manufacturing, supply, life; after-life*. [en ligne]. 2018. N° 38, pp. 51-62.

**RUSSELL, B.**, 2013. *The economics of the Roman stone trade*. First edition. Oxford, United Kingdom ; New York, NY, United States of America : Oxford University Press. Oxford studies on the Roman economy. ISBN 978-0-19-965639-4. HD9621.R662 R87 2013

## S

**SALAC, V.**, 2013. De la vitesse des transports à l'âge du Fer. In : **COLIN, A. et VERDIN, F. (éd.)**, *Actes du 35e colloque AFEAF tenu à Bordeaux en 2011* [en ligne]. Bordeaux : Fédération Aquitania. 2013. pp. 490-512. Aquitania supplément 30.

**SALET, F.**, 1951. Les Thermes de Cluny. *Bulletin Monumental* [en ligne]. 1951. Vol. 109, n° 1, pp. 74-75.

**SALONIA, P. et NEGRI, A.**, 2003. Cultural Heritage emergency: GIS- based tools for assessing and deciding preservation and management. In : *Twenty-Third Annual ESRI International User Conference, San Diego, California*. San Diego, California. 2003. pp. 10.

**SAMAAN, M.**, 2016. *La photogrammétrie rapprochée au service de l'archéologie préventive*. PHD. Paris Est : Paris Est.

**SANZ, J.O., DOCAMPO, M.dIL., RODRÍGUEZ, S.M., SANMARTÍN, M.T.R. et CAMESELLE, G.M.**, 2010. A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras. *Journal of Archaeological Science* [en ligne]. décembre 2010. Vol. 37, n° 12, pp. 3158-3169. DOI 10.1016/j.jas.2010.07.017.

**SCHARSTEIN, D. et SZELISKI, R.**, 2002. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision* [en ligne]. 2002. Vol. 47, n° 1/3, pp. 7-42. DOI 10.1023/A:1014573219977.

**SCHEIDEL, W.**, 2015. Orbis: The Stanford Geospatial Network Model of the Roman World. *SSRN Electronic Journal* [en ligne]. 2015. DOI 10.2139/ssrn.2609654.

**SCHEIDEL, Walter et MEEKS, Elijah**, 2020. ORBIS: The Stanford Geospatial Network Model of the Roman World. [en ligne]. 5 juillet 2020.

**SCHÖNING, J. et HEIDEMANN, G.**, 2015. Evaluation of Multi-view 3D Reconstruction Software. In : **AZZOPARDI, G. et PETKOV, N. (éd.)**, *Computer Analysis of Images and Patterns*. Cham : Springer International Publishing. 2015. pp. 450-461. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-319-23117-4.

**SCIANNA, A., GRISTINA, S. et PALIAGA, S.**, 2014. Experimental BIM Applications in Archaeology: A Work-Flow. *Lecture Notes in Computer Science* [en ligne]. 2014. pp. 490-498.

**SINDONINO, Stéphane**, 2013. *Reims, fouilles du tramway -Référence à compléter -*. Rapport final d'opération.

**SIZUN, J.-P.**, 1995. *Modifications des structures de porosité de grès lors de transformations pétrographiques dans la diagenèse et l'hydrothermalisme : application au trias de la marge ardechoise et du fosse rhénan* [en ligne]. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur (Strasbourg) (1971-2008).

**SKARLATOS, D. et KIPARISSI, S.**, 2012. Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 20 juillet 2012. Vol. 1-3, pp. 299-304. DOI 10.5194/isprsannals-1-3-299-2012.

**SMITH, B. J., TÖRÖK, A., MCALISTER, J. J. et MEGARRY, Y.**, 2003. Observations on the factors influencing stability of building stones following contour scaling: a case study of oolitic

limestones from Budapest, Hungary. *Building and Environment* [en ligne]. 1 septembre 2003. Vol. 38, n° 9, pp. 1173-1183. DOI 10.1016/S0360-1323(03)00076-3.

**SMITH, B.J., GOMEZ-HERAS, M. et MCCABE, S.,** 2008. Understanding the decay of stone-built cultural heritage. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* [en ligne]. 1 août 2008. Vol. 32, n° 4, pp. 439-461. DOI 10.1177/0309133308098119.

**SNAVELY, Noah, SEITZ, Steven M. et SZELISKI, Richard,** 2008. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision* [en ligne]. novembre 2008. Vol. 80, n° 2, pp. 189-210. DOI 10.1007/s11263-007-0107-3.

**SORDINI, M., BROGI, F. et CAMAPANA, S.,** 2014. *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and best practices: Theory and best practices* [en ligne]. Ann Arbor, MI : University of Michigan Press. ISBN 978-1-4073-1230-9.

**STEFANI, Chiara, BRUNETAUD, Xavier, JANVIER-BADOSA, Sarah, BECK, Kévin, DE LUCA, Livio et AL-MUKHTAR, Muzahim,** 2014. Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform. *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. janvier 2014. Vol. 15, n° 1, pp. 1-9. DOI 10.1016/j.culher.2013.01.011.

**STREIFF, R.,** 1952. La Normandie avant les normands - Époque Gallo-Romaine. *Études Normandes* [en ligne]. 1952. Vol. 4, n° 10, pp. 133-144. DOI 10.3406/etnor.1952.3019.

**SZABÓ, D., TÍMÁR, L. et SZABÓ, M.,** 2007. La basilique de Bibracte - Un témoignage précoce de l'architecture romaine en Gaule centrale. *Archäologisches Korrespondenzblatt* [en ligne]. 2007. Vol. 37, n° 3, pp. 389-408.

## T

**TABORELLI, P.,** 2018. *Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre : application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)*. Thèse de doctorat. Reims, France : Université de Reims-Champagne-Ardennes.

**TARBÉ, P.,** 1844. *Reims : ses rues et ses monuments*. Quentin-Dailly. Reims.

**TARDY, D.,** 2000. Les sources d'approvisionnement de la ville antique. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France* [en ligne]. 2000. Vol. 18, n° 1, pp. 40-44.

**TERRISSE, J.,** 2000. Découvertes archéologiques au lieu-dit « Les Trois piliers à Reims (Marne). *Bulletin de la Société Archéologique Champenoise*. 2000. Vol. 93, pp. 43-53.

**THIÉBAUX, A., FELLER, M., DUCHÊNE, B. et GOEMAERE, E.,** 2016. Roman whetstone production in northern Gaul (Belgium and northern France). *Journal of Lithic Studies* [en ligne]. 31 octobre 2016. Vol. 3, n° 3, pp. 565. DOI 10.2218/jls.v3i3.1672.

**THIRY, M.,** 1999. Diversity of Continental Silicification Features: Examples from the Cenozoic Deposits in the Paris Basin and Neighbouring Basement. In : **THIRY, M. et SIMON-COINÇON, R. (éd.),** *Palaeoweathering, Palaeosurfaces and Related Continental Deposits* [en ligne]. Oxford, UK : Blackwell Publishing Ltd. pp. 85-127. ISBN 978-1-4443-0419-0.

**THOMACHOT, C.**, 2002. *Modifications de propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts « d'encroûtements noirs vernissés »* [en ligne]. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur (Strasbourg) (1971-2008).

**THOMANN, A. et PÉCHART, S.**, 2013. *43, Rue de Sébastopol à Reims*. Rapport Final d'Opération. Bordeaux : Archéosphère.

**TOURTEBATTE, P.**, 1996. Ville de Reims, voie des sacres ; les carrières souterraines de craie à Reims. In : **LORENZ, J. (éd.)**, *Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes*. CTHS. Paris. pp. 119-133.

**TUCKER, M.E.**, 2001. *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. 3rd ed. Oxford ; Malden, MA : Blackwell Science. ISBN 978-0-632-05735-1. QE471 .T827 2001

**TURMEL, A.**, 2014. *Répartition et utilisation des pierres et géomatériaux de construction dans le bâti du Pays rémois - analyse spatiale et propriétés pétrophysiques*. Thèse de doctorat. Reims : Université de Reims Champagne Ardenne.

**TURMEL, A., FRONTEAU, G., THOMACHOT-SCHNEIDER, C., MOREAU, C., CHALUMEAU, L. et BARBIN, V.**, 2014. Stone uses in Reims Cathedral: provenance, physical properties and restoration phases. *Geological Society, London, Special Publications*. 2014. Vol. 391, n° 1, pp. 17-30. DOI 10.1144/sp391.7.

## V

**VALENTE, R. et BARAZZETTI, L.**, 2020. Methods for Ancient Wall Graffiti Documentation: Overview and Applications. *Journal of Archaeological Science: Reports* [en ligne]. 1 décembre 2020. Vol. 34, pp. 102616. DOI 10.1016/j.jasrep.2020.102616.

**VALETTE, J.-J., BARBIN, V. et FRONTEAU, G.**, 2011. Le sarcophage de la chasse au lion dit tombeau de jovin (musée historique Saint Remi, Reims, France). In : . 1 janvier 2011. pp. 211.

**VAN ANDRINGA, W.**, 2017. *La religion en Gaule romaine: piété et politique (Ier-IVe siècle apr. J.-C.)*. éditions Errance. Arles. ISBN 978-2-87772-617-7.

**VAN LYNDEN TOT OLDENALLER, C.**, 2017. Étude des roches décoratives. In : CAVÉ, Magalie, *6, rue Ponsardin. Une riche domus des Ile-IIIe s. ap. J.-C. sous des vestiges médiévaux et modernes, RFO de fouille préventive, Metz, Inrap Grand Est Nord, vol. 2*. pp. 669-707.

**VASSILEIOU, A.**, 1982. La dédicace d'un monument de Reims élevé en l'honneur de Caius et Lucius César. *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik*. 1982. N° 47, pp. 119-129.

**VERHOEVEN, G., DONEUS, M., BRIESE, C. et VERMEULEN, F.**, 2012. Mapping by matching: A computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science*. 2012. Vol. 39, n° 7, pp. 2060-2070. DOI 10.1016/j.jas.2012.02.022. Scopus

**VISCUSI SIMONIN, V. et JACCOTTEY, L.**, 2013. Faire parler les pierres : approche de l'évolution de la villa de Brans (Jura) par le biais de ses approvisionnements en matériaux de construction. *Revue archéologique de l'Est* [en ligne]. 6 novembre 2013. Vol. 62, pp. 231-251.

**VON SCHWERIN, J., RICHARDS-RISSETTO, H., REMONDINO, F., AGUGIARO, G. et GIRARDI, G.**, 2013. The MayaArch3D project: A 3D WebGIS for analyzing ancient architecture and landscapes. *Literary and Linguistic Computing* [en ligne]. 1 décembre 2013. Vol. 28, n° 4, pp. 736-753. DOI 10.1093/lc/fqt059.

**VON SCHWERIN, J., RICHARDS-RISSETTO, H., REMONDINO, F., SPERA, M.-G., AUER, M., BILLEN, N., LOOS, L., STELSON, L. et REINDEL, Markus**, 2016. Airborne LiDAR acquisition, post-processing and accuracy-checking for a 3D WebGIS of Copan, Honduras. *Journal of Archaeological Science: Reports* [en ligne]. 1 février 2016. Vol. 5, pp. 85-104. DOI 10.1016/j.jasrep.2015.11.005.

## W

**WARDLAW, N.C., MCKELLAR, M. et YU, Li**, 1988. Pore and throat size distributions determined by mercury porosimetry and by direct observation. *Carbonates and Evaporites* [en ligne]. 1 mars 1988. Vol. 3, n° 1, pp. 1-16. DOI 10.1007/BF03174408.

**WARKE, P. A., SMITH, B. J. et MAGEE, R. W.**, 1996. Thermal response characteristics of stone: implications for weathering of soiled surfaces in urban environments. *Earth Surface Processes and Landforms* [en ligne]. mars 1996. Vol. 21, n° 3, pp. 295-306. DOI 10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<295::AID-ESP637>3.0.CO;2-8.

**WARSCHEID, Th. et BRAAMS, J.**, 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation* [en ligne]. 1 décembre 2000. Vol. 46, n° 4, pp. 343-368. DOI 10.1016/S0964-8305(00)00109-8.

**WEISS, T., SIEGESMUND, S., KIRCHNER, D. et SIPPEL, J.**, 2004. Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology* [en ligne]. août 2004. Vol. 46, n° 3-4. DOI 10.1007/s00254-004-1041-0.

**WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J. et REYNOLDS, J. M.**, 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* [en ligne]. 15 décembre 2012. Vol. 179, pp. 300-314. DOI 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

**WHEATLEY, D. et GILLINGS, M.**, 2002. Spatial Technology and Archaeology: The Archaeological Applications of GIS. In : . 2002.

**WIGHTMAN, E.M.**, 1985. *Gallia Belgica*. Berkeley : University of California Press. ISBN 978-0-520-05297-0. DG59.B44 W53 1985

**WILKINSON, M.W., JONES, R.R., WOODS, C.E., GILMENT, S.R., MCCAFFREY, K.J.W., KOKKALAS, S. et LONG, J.J.**, 2016. A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. *Geosphere* [en ligne]. décembre 2016. Vol. 12, n° 6, pp. 1865-1880. DOI 10.1130/GES01342.1.

---

**X**

**XIMÉNÈS, S. et MOERMAN, M.**, 1998. Fouille de l'épave de la calanque de l'Âne (Marseille). *Archaeonautica* [en ligne]. 1998. Vol. 14, n° 1, pp. 299-302. DOI 10.3406/nauti.1998.1221.

**YANG, X., GRUSSENMEYER, P., KOEHL, M., MACHER, H., MURTIYOSO, A. et LANDES, T.**, 2020. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. novembre 2020. Vol. 46, pp. 350-360. DOI 10.1016/j.culher.2020.05.008.

**YANG, X., KOEHL, M., GRUSSENMEYER, P. et MACHER, H.**, 2016. Complementarity of Historic Building Information Modelling and Geographic Information Systems. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en ligne]. 15 juin 2016. Vol. XLI-B5, pp. 437-443. DOI 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-437-2016.

**Y**

**YU, S. et OGUCHI, C. T.**, 2010. Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. *Engineering Geology* [en ligne]. octobre 2010. Vol. 115, n° 3-4, pp. 226-236. DOI 10.1016/j.enggeo.2009.05.007.

**Z**

**ZECH-MATTERNE, V.**, à paraître. La flore sauvage du boulevard Dr Henri-Henrot à Reims : approche carpologique de l'environnement du site et des espaces de production des denrées végétales. *Gallia. Archéologie des Gaules*. à paraître. Vol. 79, n° 1.



## TABLES



## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure I-1. Contexte et principales unités géographiques des environs de Reims (modifié d'après Pichard 2014).....	I-28
Figure I-2. Topographie du site de <i>Durocortorum</i> (modifié d'après Pichard 2014). .....	I-30
Figure I-3. Coupes topographiques interprétatives de l'emprise de la Reims antique avec l'emplacement schématique des terrasses alluviales, des remblais anthropiques et des talwegs du secteur.....	I-31
Figure I-4. Situation du Bassin de Paris par rapport aux autres grands ensembles géologiques de France (Linoir 2014).....	I-34
Figure I-5. Carte géologique du Bassin de Paris, localisation des accidents majeurs (Beccaletto et al. 2011) et coupe ouest-est montrant également la structuration des Bassins paléozoïques (Gély et Hanot 2014). .....	I-35
Figure I-6. Carte géologique de la régions de Reims (source BRGM BD Charm). .....	I-37
Figure I-7. Coupe géologique simplifiée de la couverture sédimentaire cénozoïque du Bassin de Paris, depuis le Laonnois à l'Orléanais (Gély 2016). La tectonique compressive synsédimentaire à courte et à grande longueur d'onde est représentée par les plis et par la migration des dépo-centres vers l'ouest du Bassin. ....	I-38
Figure I-8. Cartes paléogéographiques des formations paléogènes du Bassin de Paris (Gély 2016). A. Thanétien supérieur ; B. Yprésien (Sparnacien) ; C. Yprésien (Cuisien) ; D. Lutétien moyen ; E. Lutétien supérieur à Bartonien ; F. Priabonien (Ludien moyen). .....	I-39
Figure I-9. Reconstitution paléogéographique du sud du Bassin de Paris au Lutétien moyen d'après Huyghes <i>et al.</i> (2012). .....	I-41
Figure I-10. Formation des poches de cryoturbation d'après (Laurain, Marre et Guérin 1997). .....	I-44
Figure I-11. Évolution des gélifracsts de la craie en fonction de leur position sur le versant d'après Laurain <i>et al.</i> (1995) modifié in Devos <i>et al</i> (sous presse). 1. Craie ; 2. Graveluches grossières à fines ; 3. Sols polygonaux ; 4. Remblais et déblais hétérométriques ; 5. Remplissage alluvial tardiglaciaire ; 6. Alluvions holocènes ; 7. Rendosol ; 8. Surface piézométrique ; 9. Végétation. ....	I-44
Figure I-12. Carte paléogéographique de la surface d'érosion ante Lutétien (Gély 2009). ..	I-46
Figure I-13. Synthèse du log stratigraphique du Lutétien (d'après Gély 1996, 2009).....	I-47
Figure I-14. Variations latérales de faciès dans la région de Reims, depuis les faciès littoraux du tuffeau de Damery jusqu'aux faciès plus distaux du Soissonnais (Fronteau <i>et al.</i> 2021). ....	I-48
Figure I-15. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant la Glauconie grossière (d'après Gély 2009).....	I-49
Figure I-16. Carte des paléoenvironnements de la mer lutétienne pendant le dépôt de la « Pierre à Liards » (d'après Gély 2009) .....	I-50
Figure I-17. Carte des paléoenvironnements de la mer lutétienne pendant la sédimentation des « Calcaires à <i>Ditrupa strangulata</i> » (d'après Gély 2009). .....	I-51
Figure I-18. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant la sédimentation du « Banc à vérins » (d'après Gély 2009).....	I-52
Figure I-19. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant lu « banc vert » (d'après Gély 2009). .....	I-53
Figure I-20. Carte paléogéographique de la mer lutétienne au cours du début du Lutétien supérieur (d'après Gély 2009). .....	I-54
Figure I-21. Carte paléogéographique de la mer lutétienne pendant le dépôt des Marnes et Caillasses (Gély 2009). .....	I-55
Figure I-22. Carte paléogéographique de l'évolution du trait de côte de la mer lutétienne au	

cours de la période (modifié d'après Gély 2009).....	I-56
Figure I-23. Comparaison entre les séries lutétiennes du Massif Saint-Thierry et du Soissonnais (Fronteau, <i>et al.</i> 2021).....	I-57
Figure I-24. Localisation de la Cité des <i>Rèmes</i> , à l'échelle du nord de la Gaule (Goudineau 1990 ; <i>in</i> Corsiez 2016). .....	I-58
Figure I-25. Emprise restituée du territoire des <i>Rèmes</i> et réseau de transport durant le Haut Empire. Une partie des agglomérations secondaire du territoire des <i>Rèmes</i> et limitrophe sont représentées (d'après Petit, Mangin, Brunella 1994 ; Achard-Corompt <i>et al.</i> 2016 ; Dessaint 2019).....	I-59
Figure I-26. Dalle située dans l'allée centrale de l'actuelle cathédrale de Reims commémorant la décapitation par les Vandales de l'évêque Saint Nicaise sur le seuil de la première cathédrale.....	I-61
Figure I-27. Modélisation d'une couverture en tuiles antique a. <i>tegula</i> ; b) <i>imbrex</i> (modifié d'après Le Ny 1992 ; <i>in</i> Delencre 2017) .....	I-63
Figure I-28. Schéma de mise en œuvre d'une toiture en dalles sciées (Olivier 1982 <i>in</i> Delencre 2017).....	I-63
Figure I-29. Exemple d'utilisation des terres cuites architecturales antiques dans deux monuments antiques emblématiques. A. L'enceinte romaine du Mans ; B. Les thermes de Cluny à Paris .....	I-64
Figure I-30. Stèle gallo-romaine du II <sup>e</sup> siècle après J.-C. dédiée à Cernunnos flanqué d'Apollon à gauche et de Mercure à droite, preuve du syncrétisme religieux de l'Antiquité romaine, exposée au Musée Saint Remi, Reims .....	I-65
Figure I-31. Reconstitution de Durocortorum au cours de la période alto-impériale. L'organisation à plan orthonormé, et les édifices repérés figurent des formes canoniques de l'architecture et de l'urbanisme romain (Aquarelle de Jean-Claude Golvin. Musée départemental Arles Antique © Jean-Claude Golvin /Éditions Errance, avec son aimable autorisation). ....	I-67
Figure I-32. Exemple d'une <i>Domus</i> respectant toutes les caractéristiques de la résidence urbaine. Maison de Trebius Valens, Rue de l'Abondance à Pompéi (Adam 1984). .....	I-69
Figure I-33. Exemples de monuments funéraires mis au jour à Reims, tous deux exposés au Musée Saint Remi. A. Stèle funéraire de deux époux, découverte en remploi dans la muraille tardo-antique, Rue de Contrai à Reims ; B. Couverture d'un petit mausolée avec l'aigle représentant l'âme du défunt.....	I-70
Figure I-34. Exemples de grand appareil quadrangulaire : A. Murailles en grand appareil de la ville antique de Pompéi et de la Porta Nocera ; B. Arc de Suse (cliché V. Brunet-Gaston), et C. vue du Mausolée 28 du secteur est de Pompéi. ....	I-72
Figure I-35. Éléments constitutifs de l'architecture à pan de bois antique (Adam 1984).....	I-73
Figure I-36. Exemples d'appareils observés sur des maçonneries antiques à Reims. A. <i>opus incertum</i> , soubassements de la fouille de la rue Marie Stuart, 2018 ; B. Appareil en hérisson sur le même site de la rue Marie Stuart ; C. <i>Opus vittatum</i> associé à de l' <i>opus mixtum</i> , murs extérieurs du cryptoportique de Reims (la partie haute à partir des départs de voûtes est restaurée ; D. Restes des murs bahuts caractéristiques de l' <i>opus craticium</i> de soubassement de l'habitat antique à proximité de la Porte de Mars.....	I-74
Figure I-37. A. Vue des ruines de grands édifices publics à Rome intégralement érigée en briques ; B. Exemple de l' <i>opus testaceum</i> dans la construction antique rémoise (photo R. Bontrond, SAGR).....	I-75
Figure I-38. Chronologie des différentes phases urbaines de Reims (modifiée d'après Pichard 2014 ; Fronteau 2014). .....	I-76
Figure I-39. La Tène C2 D1 premières phases d'occupation du site de Durocortorum. (Données	

SRA, Neiss et Rollet 2010). .....	I-79
Figure I-41. L'enceinte de l'Oppidum de Durocortorum pendant La Tène D2 (entre le II <sup>e</sup> et le I <sup>er</sup> siècle av J.-C. ; Données SRA, Neiss et Rollet 2010).....	I-80
Figure I-40. Comparaison des sites de (A) <i>Durocortor</i> ( <i>Rèmes</i> ) et de (B) La Cheppe (Suessons), tous deux <i>oppida</i> de plaine, munis d'enceintes à tracé circulaire.....	I-80
Figure I-42. Emprise des deux grandes enceintes antiques projetées sur la ville moderne. Le secteur palustre est repris à partir du plan Kalas (d'après les données du SRA Champagne Ardenne et Chossenot et al 2010 ; Berthelot et al. 2013 ; Neiss et al. 2015). .....	I-82
Figure I-43. Coupe dans le fossé de l'enceinte augustéenne, les cliniformes progradantes des comblements sont soulignées par les traits tiretés, la limite du creusement par le trait plein (Thomann et Péchart 2013).....	I-83
Figure I-44. Refondation urbaine de Durocortorum et édification de l'enceinte augustéenne (développement à l'intérieur de la « Grande enceinte ») (Données SRA, Neiss et Rollet 2010). .....	I-84
Figure I-45. Contraction urbaine et densification de l'occupation dans l'enceinte tardo-antique (« petite enceinte » par contraste) (Données SRA, Neiss et Rollet 2010). .....	I-86
Figure I-46. Localisation des éléments de la parure monumentale et des aménagements de Durocortorum documentés à ce jour (d'après les données du SRA Champagne Ardenne et Péchart et Arnaud 2014 ; Neiss <i>et al.</i> 2015 ; Neud <i>et al.</i> à paraître). .....	I-88
Figure I-47. A. Le cryptoportique de Reims dans son état actuel ; B. Restitution du Forum de <i>Durocortorum</i> projeté à son emplacement dans l'urbanisme de Reims (infographie Xavier Briand d'après Maxence Poirier (Berthelot <i>et al.</i> 2009) ; C. et D. vues d'ensemble de la reconstitution 3D du <i>forum</i> de Lutèce et écorchée sur les boutiques et les cryptoportiques montrant une structure très similaire des deux bâtiments (infographie Archéo 3D ; Collectif 2009). .....	I-89
Figure I-48. L'inscription attribuée au cénotaphe des dieux Mânes de la jeunesse tel que reconstitué par Neiss (2016) suite à sa découverte dans les fondations du Rempart de l'Antiquité Tardive et reconstituée au musée Saint Rémi. ....	I-90
Figure I-49. La « Maison carrée » de Nîmes initialement dédiée aux princes de la jeunesse, Caius et Julius César.....	I-91
Figure I-50. Coupe et proposition de restitution de l'aqueduc en tranchée (cliché, DAO : Y. Rabasté, INRAP Rabasté et Ardhuin 2010). .....	I-91
Figure I-51. A. L'arc monumental dit « Porte de Mars » aujourd'hui (cliché : P. Huart, INRAP). ; B. Gravure de l'arc occidental de la Porte Bazée encore en élévation au XVIII <sup>e</sup> siècle (G. Baussonnet gravé par E. Moreau, in Maquart <i>et al.</i> 1854).....	I-92
Figure I-52. Les ruines de la Porte Bazée dans l'enceinte du Collège Université à Reims. A. Vue de la face ouest des ruines depuis l'intérieur du collège ; B. Relevé archéologique interprétatif de la même face (Neiss 1973). .....	I-93
Figure I-53. Différentes restitutions d'un même ensemble architectural : Le sanctuaire monumental de la rue Belin A. Proposition de restitution du complexe (vue axonométrique, Maxence Poirier in Rollet 2006) et B. Seconde proposition de restitution du même édifice après étude des blocs architectoniques relevés lors de l'opération (Brunet-Gaston 2008). .	I-94
Figure I-54. Tête monumentale du Dieu Mercure trouvée en 1910 rue de Pontgivart sur le site d'un édifice public cultuel du III <sup>e</sup> siècle après J.-C., auquel il était dédié (Musée Saint Remi, Reims).....	I-95
Figure I-55. A. Restitution du tracé des fondations du temple octogonal de la rue Lecointre (Péchart et Arnaud 2014) B. Restitution numérique du temple par modélisation 3D (Poirier M. et F. Coqueret, <i>in</i> Péchart et Arnaud 2014). .....	I-95
Figure I-56. Lieu-dit du Mont d'Arène. Vue des vestiges des superstructures de l'amphithéâtre, Restes du Mont-Arène (lithographie d'après les croquis de Mr Maquart dans Chronique de	

Champagne t II p 21 ; BMR n° XXIX, II, 1).....	I-97
Figure I-57. A. Reconstitution de la portion de rempart exhumée au cours des fouilles de la médiathèque – Rue Rockefeller (Balmelle et Sindonino 2004). B. Restitutions numériques du rempart de la ville tardo-antique au sein duquel s’insèrent les arcs monumentaux reconvertis en portes de ville (M. Poirier <i>in</i> Berthelot <i>et al.</i> 2009).....	I-98
Figure I-58. Reconstitution, plans et superstructures d’habitat protohistorique. À : Reconstitution d’une ferme protohistorique à l’Archéodrome de Beaune (photo C. Finot) B. Maisons rectangulaire de La Tène finale d’Orconte, « Les Noues », Marne (Lusse et Patrolin 1994).....	I-99
Figure II-1. Échelle de classification des approvisionnements en pierre de la ville de Reims en fonction de la distance entre les sites d’extraction et le site d’emploi du matériau (Extrait de Fronteau <i>et al.</i> 2014 b).....	II-105
Figure II-2. Carte géologique de la région de Reims. Les cercles concentriques de distances croissantes représentent les distances de Reims aux différents gisements de géomatériaux.....	II-107
Figure II-3. Carte des affleurements de la craie campanienne et de ses altérites autour de l’agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-111
Figure II-4. Exemple d’utilisation de la craie mise en œuvre comme parement des murs d’une cave antique. Fouille des Hautes promenades, Reims (R.O. B. Panouillot, SAGR).....	II-112
Figure II-5. Coupe au carrefour de deux rues sur le chantier du Conservatoire, rue Gambetta, Reims. Les différentes phases d’évolution de la voirie sont soulignées par les recharges régulières en craie concassée qui alternent avec des dépôts de silts argileux grisâtres (photo F. Berthelot, <i>in</i> Chossenot <i>et al.</i> 2010).....	II-113
Figure II-6. Schéma des différentes phases de creusement des crayères (Devos <i>et al.</i> 2017).....	II-114
Figure II-7. Carte des formations superficielles alluviales des vallées de la Vesle, de la Suippe et de l’Aisne dans le secteur de l’agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-115
Figure II-8. Exemples de découvertes de carreaux de terre dans les élévations de constructions domestiques privées observées lors des fouilles des Hautes promenades à Reims en 2018. A et B restes des élévations d’un mur dont l’effondrement d’un bloc a préservé les matériaux et leur organisation. C. Reliefs de mur enduit en carreaux de terre dont les pans de bois ont disparu. D. Restes de carreaux de terre au pied d’un mur bahut. E. Mur bahut en place surmonté de 3 assises préservées de briques crues. F. Mur en carreaux de terre partiellement effondré.....	II-116
Figure II-9. Aperçus de matériaux relictuels et de leur utilisation dans les soubassements. A. Bloc de grès du Thanétien relictuel dans les limons quaternaires (diagnostic archéologique, Gueux) ; B. et C. Hérissons de fondation d’un grand édifice public obtenu par assemblage de moellons de meulière, de grès et de calcaires silicifiés dont une majorité porte des arêtes émoussées et liées suivant des assises successives par de la craie compactée (Fouilles de la Rue Marie Stuart).....	II-118
Figure II-10. Carte de répartition des argiles susceptibles d’être utilisées pour la réalisation de divers types de céramiques et de terres cuites autour de l’agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-120
Figure II-11. Exemples de l’usage des terres cuites architecturales dans les constructions antiques A et B Terres cuites utilisées en assises de réglage dans les maçonneries des fouilles, de la rue Marie Stuart (A) et des Hautes promenades (B) ; C. et D. Briquettes de terre cuite assemblées en tant que pilettes d’hypocaustes exhumés dans les fouilles des Hautes promenades ; E et F : Utilisation des terres cuites en assises de réglage et comme arc de	

décharge dans les substructures du Cryptoportique de Reims. ....	II-121
Figure II-12. Carte des affleurements de lœss répertoriés comme « limons des plateaux ». Cette cartographie ne comprend pas les affleurements de petite taille qui peuvent exister au revers des croupes crayeuses. ....	II-122
Figure II-13. Carte des affleurements susceptibles de permettre l'extraction de sable autour de l'agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-123
Figure II-14. A. Plan général du secteur des carrières de sables dans l'emprise de la fouille du « Bois Doriot » à Villers-aux-Noeuds (S. Bundgen SAGR) ; B. Photographie d'une coupe traversant un caisson d'extraction et son encaissant (photographie SAGR, Bundgen et Richez 2020) ; C. Analyse granulométrique du comblement d'un caisson d'extraction comparée aux sédiments constituant l'encaissant (S.Laratte in Bundgen et Richez 2020. ....	II-125
Figure II-15. Exemples d'utilisations de moellons de différentes natures dans des maçonneries. A. Murs de soubassement du Cryptoportique de Reims, seule la partie inférieure (plus sombre) est antique B. Murs bahut de <i>Domus</i> aux moellons bien équarris mêlant des pierres de natures très diverses et laissant apparaître au centre de l'image les restes d'une poutre en bois carbonisée (Hautes Promenades) ; C. Mur de soubassement d'un grand édifice public associant des calcaires à des grès quartzite (Rue Marie Stuart, Reims) ; D. Mur d'une <i>Domus</i> incendiée en moellons calcaires ( <i>opus incertum</i> ; Hautes Promenades). ....	II-126
Figure II-16. Coupe simplifiée des dépôts lutétiens à l'ouest de Reims dans le Massif de Saint-Thierry (Prouilly-Trigny, modifié d'après Fronteau, Laratte, Devos 2021). ....	II-128
Figure II-17. Carte des principaux affleurements des argiles à Meulières à proximité de l'agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-129
Figure II-18. Carte de répartition des dépôts lutétiens autour de l'agglomération de <i>Durocortorum</i> jusqu'aux plateaux du Soissonnais/Laonnois. Les formations composant les dépôts de cet étage ne sont pas différenciées. ....	II-130
Figure II-19. Bloc de marbre dit « <i>Cipolino verde</i> » présentant une face polie, fouilles de la rue des Élus (photo G. Cartron, EVEHA) .....	II-133
Figure II-20. Bloc de roche marbrière verte (OI212) de la rue Marie Stuart, Reims A. Bloc lors de sa découverte ; B. Faciès du bloc ; C. et D. Microphotographie au microscope polarisant, en lumière naturelle et en lumière polarisée .....	II-134
Figure II-21. Exemples de plaques d'ardoise utilisés comme couverture pendant l'Antiquité. A. Plaque de couverture entière trouvée à Charleville-Mézières en 2013 ; B. Fragments de plaques d'ardoise issues des fouilles de Warcq en 2012 (Laratte et Fronteau 2014).....	II-135
Figure II-22. Meule pompéienne rejetée dans un puits sur le chantier de la rue de Cernay (Photos P. Rollet). A. Avant son dégagement et B. au cours de l'opération d'extraction....	II-136
Figure II-23. Synthèse des approvisionnements en matériaux de construction en lien avec leurs aires d'approvisionnement respectives pour l'agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-137
Figure II-24. Synthèse des approvisionnements en pierres de construction et pierres ornementales en lien avec leurs aires d'approvisionnement respectives pour l'agglomération de <i>Durocortorum</i> .....	II-138
Figure II-25. Carte de localisation et typologie des sites ayant fait l'objet d'une étude des matériaux de construction .....	II-140
Figure II-26. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction des soubassements et substructures des bâtiments de l'architecture privée.....	II-145
Figure II-27. Aperçus des éléments de l'architecture privée et de l'échelle que les restitutions donnent à ces aménagements (d'après Brunet-Gaston 2008) : À. Proposition de restitution de l'élévation du portique à treillage et imbrications d'ordre composite : B. Proposition d'association des différents chapiteaux toscans et des bases en fonction de la rétraction possible du diamètre du fût de la colonne. ; C. Hypothèse de restitution d'un édifice à portique	

rhodien à Reims.....	II-146
Figure II-28. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction pour les éléments architectoniques des bâtiments de l'architecture privée. ....	II-147
Figure II-29. Aperçus des éléments de soutènement appartenant à des portiques de <i>domus</i> . A. Aperçu de quelques éléments de colonne du corpus ; B. Base de colonne toscane en calcaire fin à milioles. C. et D. Aperçu du faciès des calcaires à <i>Ditrupa</i> et Milioles. E. et F. Tambour de colonne en calcaire fin à <i>Ditrupa</i> et milioles. ....	II-148
Figure II-30. Calcaires appartenant aux piliers des portiques des habitations (Boulevard Jules César, Reims) A. aperçu des blocs unitaires, qui assemblés forment les piliers de portiques ; B. Calcaire massif à cérithes et à milioles ; C. Calcaire à milioles et lamellibranches.....	II-150
Figure II-31. Calcaires appartenant aux piliers des portiques des habitations (Boulevard Jules César, Reims) A. Aperçu des blocs unitaires, qui assemblés forment les piliers de portiques ; B. Calcaire massif à cérithes et à milioles ; C. Calcaire à milioles et lamellibranches. ....	II-151
Figure II-32. Les matériaux de l'habitat urbain projetés sur une restitution d'une rue de <i>Durocortorum</i> à la fin du II <sup>e</sup> siècle (modifié à partir de la reconstitution de la <i>Villa de Muranus</i> , M. Poirier <i>in</i> Balmelle et Neiss 2003) .....	II-152
Figure II-33. Aperçu de la diversité des faciès utilisés pour l'architecture funéraire A. Stèle dite « des deux époux » en calcaire micritique à Limnées du Lutétien-Bartonien ; B. Épitaphe de l'esclave <i>Bergussa</i> en calcaires à Huîtres et <i>Ditrupa</i> du Lutétien ; C. Épitaphe de l'affranchi <i>Priscius Marcianus</i> par son épouse <i>Priscia Calliope</i> en calcaires massifs à milioles du Lutétien .....	II-155
Figure II-34. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction des monuments et stèles funéraires .....	II-156
Figure II-35. Carte topographique (A) et géologique (B) du tracé de l'Aqueduc de Reims avec ses différentes modalités de tracé (modifié d'après Rabasté, Arduin 2010) ; Fond de carte Open Street Map et BRGM (RGF 93).....	II-158
Figure II-36. Aperçu de fragments de piédroits de l'Aqueduc déposé lors des fouilles de Saint Léonard en 2016.....	II-159
Figure II-37. Aperçu des matériaux de construction des maçonneries des piédroits de l'aqueduc (photos X. Drothière) : A. bloc de meulière siliceuse (brune à cortex blanc et jaune) ; B. Meulière blanche à cortex jaune ; C. Meulière caverneuse à portants massifs ; D. bloc de grès siliceux mamelonné ; E. Galets de silex gris ; F. bloc de grès ferrugineux.....	II-160
Figure II-38. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des piédroits de l'aqueduc .....	II-161
Figure II-39. Calcaires des dalles basales de l'Aqueduc (clichés G. Fronteau) A. Calcaire beige à Milioles, <i>Ditrupa</i> et Bivalves ; B. Calcaire à très nombreuses milioles ; C. Calcaire à très nombreux <i>Ditrupa</i> ; D. Calcaire à milioles, Orbitolites et Alvéolines ; E. ; F. Microphotographie du calcaire à nombreuses milioles. ....	II-162
Figure II-40. A. Proposition de restitution annotée du canal de l'aqueduc en tranchée (Rabasté et Arduin 2010) ; B. Proposition de restitution du canal de l'aqueduc pour les passages en tunnel (Dessin P. Prillieux Rabasté et Arduin 2010).....	II-163
Figure II-41. Zones tampons de rayons croissants déployées autour du tracé de l'aqueduc.....	II-165
Figure II-42. Élément de fontaine publique en calcaire à milioles et à Cérithes (Musée Saint Remi, photographie C. Galopeau de Almeida) .....	II-167
Figure II-43. Répartition des faciès, des lithologies et des origines des matériaux de construction des aménagements hydrauliques urbains.....	II-168



Figure II-44. A. Cryptoportique de Reims. Plan de l'aile est (Frézouls 1973) ; B. Plan d'ensemble de la reconstitution de Frézouls (1973) sur la base du forum de Bavay ; C. Reims, galerie de la nef orientale du Cryptoportique. Au premier plan, pilier en pierre de grand appareil ; D. Vue de la façade ouest du bâtiment ; E. Vue de la façade est du bâtiment au cours de son dégagement en 1929 (cliché : Base Mérimée <a href="https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/PA00078788">https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/PA00078788</a> , Monuments historiques).....	II-169
Figure II-45. Analyse de la composition des matériaux des soubassements du Cryptoportique .....	II-170
Figure II-46. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des soubassements du Cryptoportique .....	II-171
Figure II-47. Aperçu des modalités d'assemblage des maçonneries et des faciès les plus représentés dans les moellons des élévations du Cryptoportique (mur de la Façade Est du bâtiment). A et B. Assemblage en petit appareil des élévations du monument ; C. Calcaire massif à nombreux <i>Ditrupa</i> et lamellibranches ; D. Calcaire massifs à <i>Ditrupa</i> et gros grains de quartz ; E. Moellon de grès quartzite gris F. Moellon de pierre meulière (sa couleur très rouge découle d'une exposition au feu) .....	II-172
Figure II-48. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des maçonneries des élévations du Cryptoportique .....	II-173
Figure II-49. Répartition en proportion et origines des matériaux de construction des piliers du Cryptoportique.....	II-174
Figure II-50. Répartition en proportion et origines des matériaux des fondations des grands bâtiments publics .....	II-176
Figure II-51. Répartition en proportion et origines des matériaux des fondations des assises de réglage faisant office de dallage des grands bâtiments publics.....	II-176
Figure II-52. Répartition en proportion et origines des matériaux des soubassements et substructures des grands bâtiments publics .....	II-177
Figure II-53. Répartition en proportion et origines des matériaux des éléments de soutènement des grands bâtiments publics. ....	II-179
Figure II-54. Répartition en proportion et origines des matériaux des éléments d'élévations et des éléments architectoniques .....	II-180
Figure II-55. Répartition en proportion et origines des matériaux des éléments d'entablements des grands bâtiments publics.....	II-181
Figure II-56. Synthèse des matériaux mis en œuvre dans la construction des grands bâtiments publics de <i>Durocortorum</i> (modifié d'après Adam, 1984) .....	II-183
Figure II-57. Répartition en proportion et origines des calcaires de construction des éléments iconographiques et de décors .....	II-184
Figure III-1. Vue générale de la Façade Nord de la Porte de Mars .....	III-192
Figure III-2. Vue de la façade orientale de l'Arc de Caracalla à Volubilis, Tunisie (Domergue 1963) .....	III-192
Figure III-3. Les ruines du château des Archevêques vers 1595 où on distingue ce qui serait la Porte de Mars insérée dans l'enceinte castrale « <i>Le viel chastav de Reims rviné</i> », Chastillon, BMR 20-008 & 010. ....	III-193
Figure III-4. À. vue de la Porte de Mars, Silvestre, seconde moitié du XVIIe siècle. L'emprise de la porte est soulignée par le tireté rouge (BMR XXX_I_3_5) ; B. vue de la Porte de Mars à Reims vers 1817-1825, Goblain (BMR XXX_I_3_4). ....	III-194
Figure III-5. A. Détail de la partie est de la façade nord de la Porte de Mars (cliché de Martin-Sabon, 1851, ministère de la Culture) ; B. Représentation des travaux de reconstruction de la pile ouest de la Porte de Mars par Brunette en 1844 (Dauzats, 1844, BMR XXX_I_4_51) ; C. Vu de la façade sud en 1858. À l'issue de son dégagement, les maçonneries sont étayées	

(BMR XXX_I_3_14) ; D. Vue de la façade est en 1857 lors de son dégagement des maçonneries du rempart (BMR XXX_I_3_15). .....	III-195
Figure III-6. Proposition de restitution de la Porte de Mars antique par N. Brunette vers 1830 (B.M.R. 22-036) .....	III-196
Figure III-7. A et B vus sous différents angles des dégâts infligés au monument pendant la Première Guerre Mondiale. Il s’agit majoritairement d’impacts de projectiles divers que l’on discerne par la marque claire qu’ils ont laissée (Carte postale, anonyme, vers 1918).....	III-198
Figure III-8. Schéma global des différents types de modélisation du patrimoine bâti avec des interactions de techniques combinées (Yang <i>et al.</i> 2020) .....	III-200
Figure III-9. Deux exemples de modélisation BIM de monuments A. Exemple de la modélisation paramétrique d’une colonne répétée à l’identique dans tout le modèle ; B. Modélisation H-BIM de l’église San Salvatore (Campi di Norcia) détruite au cours d’un séisme (Donato <i>et al.</i> , 2017). .....	III-202
Figure III-10. Exemple de structuration en couches typologiques et thématiques d’un SIG (modifié d’après Letellier et Eppich 2015).....	III-205
Figure III-11. Comparaison entre une photographie redressée (A) et une orthophotographie (B). L’image redressée ne permet pas de conserver les parallèles des objets représentés, les effets de perspective ne sont pas annulés par ce traitement, il subsiste des points de fuite à l’image et cette dernière subit une anamorphose. Dans le cas de l’orthophotographie, le point de fuite est à l’infini (absence apparente) et les parallèles sont bien respectés. Il n’y a pas d’anamorphose de l’image.....	III-211
Figure III-12. Restituteur analogique (A) et analytique (B) (Photographies L. Polidori <i>in</i> Maumont 2010) .....	III-212
Figure III-13. A. Acquisition d’une multitude de « couples » stéréoscopiques dans une configuration convergente « normale » autour d’un objet d’intérêt (d’après Historic England 2017). B. Position des prises de vues illustrant les positions des prises de vues dans le cas de la modélisation photogrammétrique de la Porte de Mars. ....	III-216
Figure III-14. Déformations géométriques induites par l’optique utilisée pour la prise de vue et par l’absence de calage géométrique du modèle exemple du sarcophage de la chasse au lion dit Tombeau de Jovin, Musée Saint Remi. A. La photographie présente une aberration optique liée à l’objectif utilisé, les surfaces parallèles deviennent courbes (photo C. Devleeschauwer – Musée Saint Remi ; B Le modèle n’a pas été « mis à l’échelle avec des points de contrôle provoquant une légère déformation géométrique : la partie droite est plus haute que la partie gauche. ....	III-217
Figure III-15. Aperçu des différentes étapes de la modélisation photogrammétrique : A. Collection de photographie stéréoscopique ; B. Spatialisation des photos et calage du modèle ; C. Calcul d’un nuage de point clairsemé ; D. Calcul d’un nuage de point dense ; E. Génération d’un maillage ; F. Calcul d’une texture.....	III-218
Figure III-16. De la photographie jusqu’au modèle 3D, la chaîne opératoire de l’acquisition et du traitement photogrammétrique avec Agisoft Metashape© .....	III-221
Figure III-17. Extraction des orthophotographies de chaque façade de la Porte de Mars à partir du modèle 3D texturé à haute résolution .....	III-222
Figure III-18. A. Fenêtre de travail dans QGIS avec analyse thématique ; B. Fenêtre de la base de données des matériaux de la Porte de Mars.....	III-224
Figure III-19. Photographies anciennes redressées et projetées sur l’enveloppe actuelle du monument A. 1 Façade Nord en 1860 (Varin, 1860, BMR-XXX-I-4-36) 2 — Façade Sud à la fin du XIXe siècle (Collection privée) ; 3. Façade Est (BMR B514546101_XXX_I_3_14_BMR22) ; 4 Façade Ouest à la fin du XIXe siècle (Anonyme, collection Thibault) ; B. 1 & 2 : Vues de	

la Porte de Mars au lendemain de la Première Guerre Mondiale (Anonyme, collection Thibault).....	III-226
Figure III-20. Aperçu des couches de données intégrées dans le SIG pour la façade nord de la Porte de Mars. L'orthophotographie dérivée du modèle 3D constitue la couche de base avec le modèle numérique d'élévation pour le relevé architectural. Le relevé de calepinage est issu de la digitalisation de l'orthophotographie .....	III-228
Figure III-21. Références de vocabulaire architectonique utilisé dans la base de données des matériaux (V. Brunet-Gaston).....	III-229
Figure III-22. Synthèse méthodologique de l'étude des matériaux d'un monument à l'aide d'une SIG et de la modélisation photogrammétrique .....	III-230
Figure III-23. Synthèse des matériaux de construction de la Porte de Mars selon A.Blanc (1984) .....	III-231
Figure III-24. A. Nouvelle couverture du monument mise en place en 2016 ; B. Description des pierres du sommet de la façade est depuis l'échafaudage ceignant le monument ; C. Vues extérieure de la Porte de Mars échafaudée en 2016 ; D. Description des pierres des façades des baies de l'Arc à l'aide d'une nacelle ciseau.....	III-233
Figure III-25. Parement de la pile ouest et tracé du carottage technique creusé dans la pile ouest (Bontrond <i>et al.</i> , 2019) .....	III-234
Figure III-26. Zonation des calcaires grossiers du Lutétien et découpage de secteurs de faciès types (Fronteau <i>et al.</i> 2021) .....	III-236
Figure III-27. Localisation des sites de prélèvements d'équivalents aux matériaux de la Porte de Mars .....	III-237
Figure III-28. Différentes modalités d'assemblages des matériaux de construction observés dans le monument. ....	III-240
Figure III-29. Exemple de calcaires à <i>Ditrupea</i> photographie des calcaires à Miliolites et <i>Orbitolites</i> A Photographie du calcaire en œuvre ; B. et C. Observations macroscopiques .....	III-241
Figure III-30. Microphotographie de Lut Ia. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-242
Figure III-31. Microphotographie de Lut I b. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).. .....	III-243
Figure III-32. Microphotographie de Lut I d. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-243
Figure III-33. Calcaires lumachelliques à <i>Ostrea</i> A. Faciès coquiller, B. Forte concentration localisée de tubes de <i>Ditrupea</i> .....	III-244
Figure III-34. Microphotographie de Lut I c. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-245
Figure III-35. Faciès des calcaires à miliolites et <i>Orbitolites</i> A. Photographie du calcaire en œuvre ; B et C. Observation macroscopique .....	III-246
Figure III-36. Photographie des calcaires à cérithes et miliolites A. Photo d'ensemble d'un bloc ; B. Observation macroscopique du faciès. ....	III-247
Figure III-37. Microphotographie de l'échantillon Lut IIIa. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-248
Figure III-38. Microphotographie de l'échantillon Lut IIIb. A. Observation au microscope	

optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).....	III-248
Figure III-39. Microphotographie de Lut IIIc. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-249
Figure III-40. Microphotographie d'un échantillon de calcaire à milioles et cérithes du socle de l'Arc, Lut IIIId. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).....	III-249
Figure III-41. Microphotographie de Lut IVa. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-250
Figure III-42. Microphotographie de l'échantillon Lut IVb. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).....	III-250
Figure III-43. Photographie des calcaires lacustres à Limnées ; A. Vue d'ensemble ; B. Agrandissement .....	III-251
Figure III-44. Microphotographie de Bart a. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-252
Figure III-45. Microphotographie de Bart b. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). .....	III-253
Figure III-46. Cartographie de la nature des blocs du sommet des élévations de la Porte de Mars .....	III-254
Figure III-47. Position stratigraphique des faciès calcaires attribués à la partie Antiques de la porte de Mars positionnés sur une coupe synthétique des dépôts du Lutétien dans le Soissonais.....	III-256
Figure I-58. Photographie des calcaires à milioles et rares coquilles d' <i>Ostrea</i> utilisés dans les restaurations de N. Brunette de 1844. ....	III-257
Figure III-48. Microphotographie des calcaires à milioles et lamellibranches à Orbitolites Lut II. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40).....	III-258
Figure III-49. Photographie du faciès type des calcaires à « oolithe vacuolaire » de type pierre de Savonnière. A ; Base de colonne restaurée au XIXe siècle ; B : Pseudo-attique de couverture construit en 2016 ; C : Moellon de restauration du XIXe siècle ; D : Aperçu macroscopique des calcaires oolithiques.....	III-260
Figure III-50. Microphotographie d'un échantillon d'oolithe vacuolaire de type « Pierre de Savonnières » SAV. A. Observation au microscope optique en lumière polarisée (X40) ; B. Observation au microscope optique en lumière polarisée analysée (X40). ....	III-261
Figure III-51. Exemples de remploi de blocs de grand-appareil antique dans des restaurations du XIXe siècle. A et B : Remploi de bloc de faciès compatible avec leur position architecturale, mais comportant un trou de louve sur une face latérale ; C et D. : Remploi d'un bloc calcaire de faciès et de module incompatible avec sa position architecturale et comportant une feuillure sur une face, manifestement héritée de son emploi antérieur. ....	III-262
Figure III-52. Exemples de faciès de pierres meulières dans les restaurations des élévations de l'édifice. ....	III-264
Figure III-53. Carte d'authenticité des matériaux de la façade nord de la Porte de Mars	III-266
Figure III-54. Cartographie des phases de restauration sur la façade nord de la porte de Mars .....	III-266

Figure III-55. Éclaté de la structure de la Porte de Mars avec les indications de surfaces et de volumes pour chacun des éléments d'architecture.....	III-269
Figure III-56. Variabilité du nombre d'éléments de grand appareil comparé aux moellons de restauration par unité de surface. Les rectangles bleus et rouges sont de même surface, mais pour 1 bloc de grand appareil, on compte 40 moellons de petit appareil. ....	III-270
Figure III-57. Différentes positions des pierres dans les murs de grand appareil quadrangulaire antique (d'après Adam 1984) .....	III-271
Figure III-58. Schéma des principaux aspects du grand appareil quadrangulaire antique où les dispositions des blocs alternent entre carreau et boutisses que cela soit en alternance en absence ou non de fourure (A et B), ou encore en assemblage isodome (C) et pseudo-isodome (D) (d'après Adam 1984).....	III-271
Figure III-59. Répartition architecturale des faciès des blocs antiques exprimé en pourcentage des surfaces afin de s'affranchir de la variabilité de la dimension des blocs de construction .....	III-272
Figure III-60. Aperçu de l'assise de réglage de l'édifice (Bontrond et al. 2015 ; Brunet-Gaston et al. 2020). A. Vue générale du pavage de l'arc de Romulus et Rémus (arche ouest) B. Hypothèse de restitution volumétrique de l'avancée nord de l'assise de réglage ; C. Ornières formées dans l'assise de réglage de l'arche des Quatre Saisons. ....	III-273
Figure III-61. Cartographie synthétique des faciès des blocs de calcaire de grand appareil de la façade nord du monument. ....	III-275
Figure III-62. Distribution des surfaces des éléments de construction en fonction du phasage des travaux réalisés sur le monument.....	III-276
Figure III-63. Classification des formes de l'altération des pierres en œuvre selon Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre (Anson-Cartwright <i>et al.</i> 2008) .....	III-278
Figure III-64. Exemples de fissures et fractures visibles dans les parties hautes de l'édifice, la fracture a fait l'objet d'un rebouchage récent au mortier.....	III-279
Figure III-65. Cartographie des détachements de matières sur la façade Nord de la Porte de Mars .....	III-280
Figure III-66. Exemples de détachements de matières : A. : Désagrégation granulaire et B. : Desquamation en plaques.....	III-280
Figure III-68. Exemples de dégradation mécanique d'origine anthropique A. et B exemples de graffitis situés dans les parties hautes de l'Arc ; C. : traces de bûchage des bas-reliefs à l'intérieur des baies ; D. : Traces d'impacts de projectiles sur un tambour de colonne remplacé au XIX <sup>e</sup> siècle.....	III-282
Figure III-69. Cartographie des pertes de matières essentiellement dues à des impacts de munitions et au creusement de cavités de prédatons des agrafes métalliques sur la façade Nord de la Porte de Mars .....	III-283
Figure III-70. Traces de rubéfiations, rougissemments des surfaces et désagréations de la pierre en lien avec une exposition à de hautes températures .....	III-284
Figure III-71. Aperçu et localisation d'exemples de croûtes noires développées sur les façades de la Porte de Mars .....	III-285
Figure III-72. Observations au Microscope Électronique à Balayage (MEB) de deux prélèvements de croûtes noires affectées de nombreuses cristallisations de sulfates dans leur habitus caractéristique en fer de lance (A et B) et la présence de sphérules de silice (B). ....	III-286
Figure III-73. Exemples d'encrassements des parois du bâtiment. A. : dépôts de particules noires sur toutes les surfaces protégées des intempéries ; B. Encrassement des voûtes mis en avant par contraste avec une petite zone ayant fait l'objet d'un test de nettoyage des surfaces. ....	III-287

Figure III-74. Colonisations biologiques A : enracinement dans les joints de maçonnerie de végétaux supérieurs ; B et C colonisation des surfaces par des lichens et des mousses sur des plans inclinés ou des surfaces planes .....	III-288
Figure III-75. Cartographie des colonisations biologiques de la façade nord de la Porte de Mars .....	III-289
Figure III-76. Évaluation des surfaces altérées catégorisées par types d'altérations et par façades .....	III-291
Figure III-77. Quantification des surfaces de maçonneries altérées en fonction des positions architecturales des altérations du monument .....	III-292
Figure III-78. Étapes de l'expérience menant à la détermination de la porosité totale à l'eau en laboratoire ; 1. Dégazage de l'eau et des échantillons ; 2. Imbibition sous vide ; 3. Maintien en immersion pendant 24h ; 4. Pesées de la masse hydrostatique et de la masse saturée de l'échantillon. ....	III-298
Figure III-79. Déroulement de l'essai de détermination de la porosité à 48h .....	III-299
Figure III-80. Porosité totale à l'eau ( $N_t$ en %) des différentes pierres (Les échantillons en bleu correspondent aux pierres des soubassements, ceux en rouge aux élévations et ceux en vert aux corniches et rejaillissement. Les échantillons qui ne sont pas en gras sont ceux de Turmel, 2014.....	III-301
Figure III-81. Porosité totale $N_t$ % en fonction de la porosité à 48 h $N_{48\%}$ (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches). ....	III-302
Figure III-82. Détermination graphique des paramètres descriptifs d'une analyse de porosimétrie au mercure ; A. Courbe incrémentale ; B. Courbe cumulée avec $N_{Hg}$ ; C. Courbe exprimée en % de porosité envahie permettant d'identifier les rayons envahis respectivement à 20, 50 et 80 % nécessaires au calcul du Coefficient de dispersion $C_d$ .....	III-304
Figure III-83. Courbes incrémentales de références porosimétrie au mercure ( $N_{Hg}$ en %) pour chaque positionnement architectural envisagé (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches et entablements ).....	III-306
Figure III-84. Graphique Rayons d'accès aux pores ( $R_m$ ) en fonction des porosités totales au mercure ( $N_{Hg}$ ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches) .....	III-307
Figure III-85. Détermination des paramètres de capillarité de la roche.....	III-309
Figure III-86. Exemple de cinétique d'imbibition capillaire d'une roche calcaire A. Courbe d'évolution en fonction de la racine carrée du temps ; B. Interprétation des phases de la courbe .....	III-309
Figure III-87. Imbibition capillaire des échantillons ( $C_1$ en $g.m^2. s^{-1/2}$ ) des différentes pierres (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches ; en gras les échantillons de ce travail. ....	III-310
Figure III-88. Expérience séchage d'échantillons de pierres poreuses .....	III-312
Figure III-89. Cinétique de séchage d'un calcaire poreux : identification des trois phases d'évaporation des fluides F : Flux ; $S_c$ : Saturation critique ; $T_{sc}$ : temps d'atteinte de la saturation critique (Rousset-Tournier 2001; Thomachot 2002).....	III-313
Figure III-90. Flux d'évaporation en phase 1 $F_1$ des échantillons ( $F_1$ en $g.m^2. s^{-1}$ ) des différentes pierres (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches ; en gras les échantillons de ce travail.....	III-314
Figure III-91. Flux d'évaporations de la phase 1 $F_1$ ( $g.cm^2. s^{-1}$ ) en fonction de la saturation critique (en % ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches) .....	III-315

Figure III-92. Représentation du flux d'évaporations de la phase 1 F1 ( $\text{g.cm}^2. \text{s}^{-1}$ ) exprimé en fonction de la porosité capillaire (en % ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches) .....	III-315
Figure III-93. Saturation Critique SC (en %) des différentes pierres (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches ; en gras les échantillons de ce travail, 2014).....	III-316
Figure III-94. Représentation du flux d'évaporations de la phase 1 F1 ( $\text{g.cm}^2. \text{s}^{-1}$ ) exprimé en fonction de la cinétique d'imbibition capillaire (en $\text{g.cm}^2. \text{s}^{-1/2}$ ; en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches) .....	III-317
Figure IV-1. Extrait de la norme NF B10-601 pour les préconisations dans les emplois de pierres de construction de grand module .....	IV-325
Figure IV-2. Façade principale de la Basilique Saint Rémi dont le porche est orné de part et d'autre de colonnes antiques remployées en granite de Troad .....	IV-328
Figure IV-3. Le cycle de vie des pierres du bâti (modifié d'après Fronteau <i>et al.</i> 2019)...	IV-330
Figure IV-4. Carte des zones régionales des calcaires grossiers (Fronteau 2000).....	IV-335
Figure IV-5. A. Statue en buste d'un jeune homme (gaulois ?) en marbre blanc découverte à Reims (photo T. Ollivier/Musée du Louvre) ; B. Tombeau de Jovin, milieu du III <sup>e</sup> siècle en marbre de Marmara (musée Saint-Remi, Reims) .....	IV-336
Figure IV-6. Carte des réseaux routiers antiques et du réseau fluvial portant indication des possibles flux de transport pour les calcaires utilisés pour le grand appareil quadrangulaire .....	IV-340
Figure IV-7. Vues extraites de la modélisation photogrammétrique du Cryptoportique .	IV-345
Figure IV-8. Catégorisation des jours typiques (Huby 2021).....	IV-349
Figure IV-9. Comparatif des microclimats : caractérisation, répartition et enchaînement des jours typiques. Rouge : élevé, orange : moyen, vert : faible (Huby 2021) .....	IV-349
Figure IV-10. Orientations des façades de la Porte de Mars .....	IV-350
Figure IV-11. Interprétations des index de susceptibilité au sel (SSI).....	IV-352
Figure IV-12. Cartographie des indices de susceptibilité aux sels (SSI) à l'échelle de la Porte de Mars. Le découpage des susceptibilités est celui proposé par Yu et Oguchi (2010) .....	IV-352
Figure V-1. Carte synthétique des approvisionnements en matériaux de construction en fonction de leurs aires de provenances .....	V-358

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Comparaison des superficies de quelques agglomérations de Gaule et de Rome.....	I-83
Tableau II-1. Liste simplifiée des géomatériaux classés par type d'emplois (Fronteau <i>et al.</i> 2019).....	II-104
Tableau II-2. Extrait des premiers niveaux de la classification hiérarchique des matériaux....	II-109
Tableau II-3. Localisation, typologie et période des sites étudiés.....	II-143
Tableau II-4. Longueurs de l'Aqueduc et proportions respectives en fonction de la nature de la construction (modifié d'après Rabasté et Ardhuin 2010).....	II-164
Tableau II-5. Évaluation des proportions respectives des matériaux dans les piédroits et le radier du Specus de l'Aqueduc de Reims.....	II-164
Tableau II-6. Estimations des volumes de matériaux engagés dans la construction de l'aqueduc.....	II-165
Tableau II-7. Estimation du volume de pierre meulière à collecter par unité de surface à l'intérieur de zones tampons de rayons croissants, rendus nécessaires pour l'édification des maçonneries de l'aqueduc.....	II-166
Tableau II-8. Synthèse des matériaux de construction du bâti antique de <i>Durocortorum</i> .....	II-185
Tableau III-1. Inventaire synthétique des travaux de restauration réalisé sur le monument depuis le début du XIXe siècle.....	III-197
Tableau III-3. Avantages et Inconvénients de la lasergrammétrie.....	III-209
Tableau III-2. Avantages et Inconvénients de la Photogrammétrie.....	III-209
Tableau III-4. Approches techniques retenues pour la construction de la documentation des bâtiments.....	III-212
Tableau III-5. Exemples d'études dans divers domaines de la géologie et de l'archéologie qui utilisent des techniques de photogrammétrie.....	III-213
Tableau III-6. Caractéristiques des appareils photographiques utilisés.....	III-215
Tableau III-7. Caractéristiques techniques (données chiffrées) du processus de modélisation 3D de la Porte de Mars.....	III-220
Tableau III-8. Tableau des caractéristiques générales des échantillons de la Porte de Mars et leurs équivalents supposés, collectés en carrière.....	III-255
Tableau III-9. Synthèse des travaux de restauration, des matériaux utilisés et de leurs modalités d'assemblages.....	III-267
Tableau III-10. Synthèse des données géométriques chiffrées de la Porte de Mars extraites de la maquette numérique.....	III-268
Tableau III-11. Quantification des surfaces des faciès calcaires « authentiques » relevés sur les façades de la Porte de Mars (exprimées en m <sup>2</sup> ).....	III-275
Tableau III-12. Synthèse des surfaces affectées par des dégradations non anthropiques (en m <sup>2</sup> ).....	III-290
Tableau III-13. Identification, description succincte des calcaires caractérisés par Turmel (2014).....	III-294
Tableau III-15. Positions architecturales attribuées ou avérées des échantillons comparés...	III-295
Tableau III-14. Nombre d'échantillons caractérisés par méthodes et par matériaux.....	III-295
Tableau III-16. Limites des différentes classes de porosité (Linoir 2014).....	III-296
Tableau III-17. Synthèse des paramètres de porosité totale à l'eau (Nt %, N48 %, S48 % et Np %) mesurés pour tous les calcaires testés (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge	



les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches). .....	III-300
Tableau III-18. Synthèse des paramètres de porosité par intrusion de mercure (NHg%, Rm % et Cd avec les proportions de chaque classe de porosités) mesuré pour tous les calcaires testés (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches). .....	III-305
Tableau III-19. Description des réseaux poreux des échantillons caractérisés pour la Porte de Mars (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge les échantillons issus des élévations et en vert les échantillons des corniches). .....	III-307
Tableau III-20. Paramètres des flux d'imbibition capillaire pour les calcaires testés (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches). .....	III-310
Tableau III-21. Synthèse des paramètres de capillarité mesurés pour tous les calcaires testés F1, SC et TSc (en bleu les échantillons issus des soubassements et en rouge ceux des élévations et en vert ceux des corniches). .....	III-314
Tableau III-22. Synthèse des propriétés pétrophysiques des calcaires engagés dans les différentes positions architecturales de la Porte de Mars. ....	III-318
Tableau IV-1. Critères techniques et leurs critères de pondérations pour les pierres de construction .....	IV-327
Tableau IV-2. Classification des matériaux de construction utilisés pendant l'Antiquité selon des critères techniques pour l'agglomération de Reims. ....	IV-327
Tableau IV-3. Indices de résistance aux sels (SSI Index ; Yu et Oguchi 2010) calculés pour les matériaux de cette étude .....	IV-351

## ANNEXES



Restitution des motifs de la voûte centrale Arc Central Lithographie de N.Brunette , vers 1850 (Bibliothèque municipale de Reims BMR 22-037)



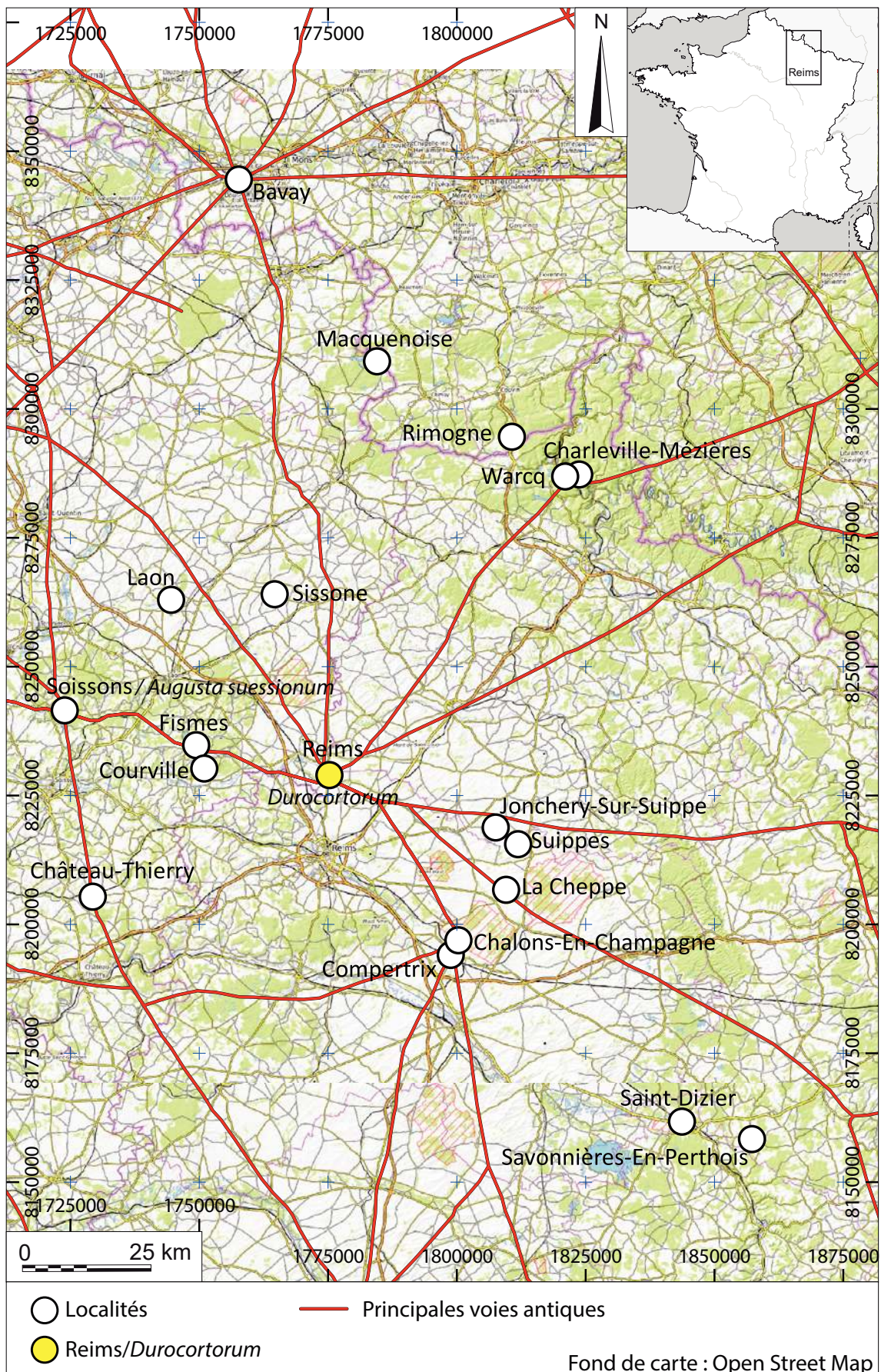
## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Carte des sites dont les toponymes apparaissent dans le corps du texte.....	429
Annexe 2. Carte des sites du secteur de Reims dont les toponymes apparaissent dans le corps du texte. ....	430
Annexe 3. Historique des subdivisions du Lutétien (d’après Fröhlich, Schubnel et MNHN 2001) .....	431
Annexe 4. Synthèse des typologies architecturales en fonction des sites ayant fait l’objet d’une étude de matériaux .....	432
Annexe 5. Synthèse des matériaux observés en fonction des catégories architecturales étudiées .....	433
Annexe 6. Synthèse des provenances exprimées en aire d’approvisionnement estimées en fonction de chaque matériaux observé.....	434
Annexe 7. Synthèse des catégories architecturales en fonction de chaque matériaux observé. ....	435
Annexe 8. L’aqueduc de Reims, annotation des cotes de l’ouvrage utilisées dans l’estimation des quantités de matériaux.....	436
Annexe 9. Paramètres de traitement de la construction de la maquette numérique de la Porte de Mars .....	437
Annexe 10. Aperçu du modèle photogrammétrique après l’étape d’optimisation (affichage dans Blender (double vérification du modèle) .....	439
Annexe 11. Compositions des bases de données attributaire relatives aux matériaux de la Porte de Mars .....	440
Annexe 12. Synthèse des travaux connus réalisés sur la Porte de Mars depuis sa construction jusqu’à ce jour (Juin 2022).....	442
Annexe 13. Critique d’authenticité des matériaux de la Porte de Mars (d’après Blanc 1984).....	445
Annexe 14. Extrait du rapport de l’architecte Millet en 1856 , Médiathèque de l’Architecture et du Patrimoine, cote 176, 0081/051/235 à 0081/051/238 .....	446
Annexe 15. Aptitude d’emploi des matériaux étudiés en laboratoire par Turmel 2014 projeté dans un diagramme développé par Mamillan (1994) .....	447
Annexe 16. Supports orthophotographiques dérivés de la maquette numérique, habillés par les grands traits architecturaux .....	448
Annexe 17. Relevé d’appareil complet du monument.....	450
Annexe 18. Carte des faciès des blocs de grand appareil du monument .....	452
Annexe 19. Critique d’Authenticité du monument .....	454
Annexe 20. Phasage des travaux de restaurations .....	456
Annexe 21. Quantification des matériaux en œuvre rapportés à leur surfaces (en m <sup>2</sup> ).....	458
Annexe 22. Tableau de quantification des matériaux en œuvre rapportés à leur surfaces (m <sup>2</sup> ) .....	463
Annexe 23. Pargnan - Origine des échantillons .....	466
Annexe 24. Veslud - Origine des échantillons.....	466
Annexe 25. Colligis Crandelain - Origine des échantillons .....	466
Annexe 26. Vendresse-Beaulne - Origine des échantillons.....	467
Annexe 27. Écartement apparent vers le nord de la colonne située à l’angle de la pile est du monument.....	468
Annexe 28. Cartographie des détachements.....	469
Annexe 29. Les cavités de prédation des agrafes de fer antiques et leurs remplissages au cours du XX <sup>e</sup> siècle (photographie Martin-Sabon, 1851, Ministère de la Culture) .....	471
Annexe 30. Altérations - Cartographie des pertes de matières .....	472
Annexe 31. Altérations - Cartographie des altérations chromatiques et des dépôts .....	474
Annexe 32. Obseration MEB des croûtes noires et semi quantification à la microsonde ionique de leurs compositions .....	476

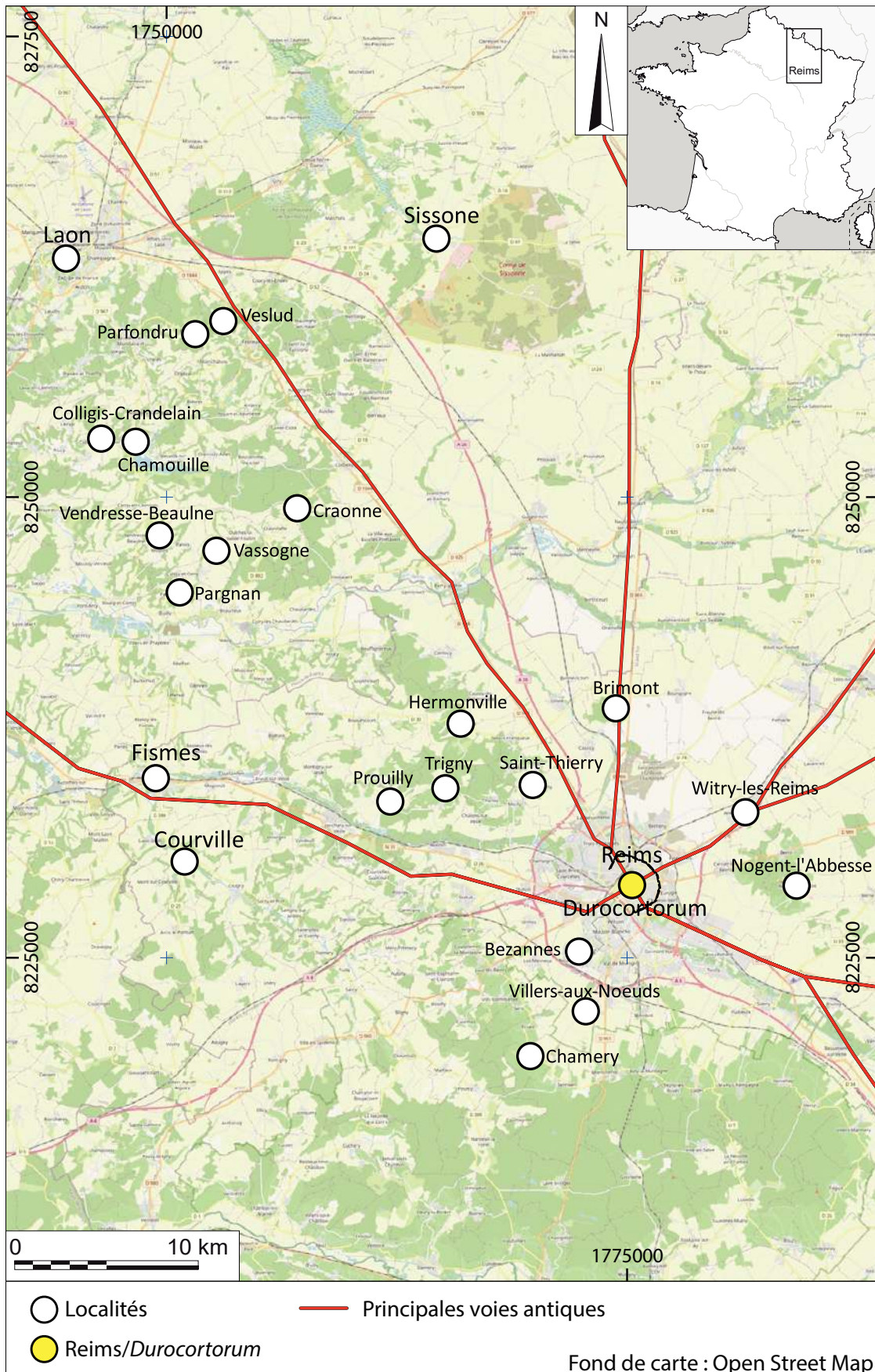
---

Annexe 33. Altérations - Cartographie des colonisations biologiques.....	477
Annexe 34. Altérations - Cartographie des altérations chromatiques et des dépôts .....	479
Annexe 35. Altérations - Cartographie des altérations causées par la présence d'eau dans ou sur la pierre .....	480
Annexe 36. Tableau de synthèse des altérations relevées sur les façades de la Porte de Mars (les surfaces mesurées sont exprimées en m <sup>2</sup> ) .....	482
Annexe 37. Synthèse des échantillons caractérisés.....	483
Annexe 38. Synthèse des paramètres mesurés pour les calcaires de construction du pays rémois (Turmel, 2014) .....	484
Annexe 39. Tableau des valeurs de porosité totale à l'eau de ce travail et issus des études antérieures (Turmel, 2014).....	486
Annexe 40. Carte des porosités des pierres du monument (MIP, exprimées en %) .....	487
Annexe 41. Carte des porosités totales (Nt, exprimées en %) des pierres de la Porte de Mars .....	489
Annexe 42. Carte des porosités piégées (Np, exprimées en %) des pierres de la Porte de Mars .....	491
Annexe 43. Tableau des valeurs de porosité au Mercure de ce travail et issus des études antérieures (Turmel, 2014).....	493
Annexe 44. Courbes des intrusion différentielle de mercure (mL/g) des calcaires étudiés...	494
Annexe 45. Caractérisations du réseau poreux des pierres par la méthode de porosimétrie par intrusion de mercure .....	496
Annexe 46. Capillarités mesurées et issus des études antérieures (Turmel, 2014) .....	508
Annexe 47. Courbes d'imbibition capillaire des échantillons caractérisés .....	509
Annexe 48. Carte des capillarités (C1) des pierres du monument .....	511
Annexe 49. Valeurs des flux d'évaporations de ce travail et issus des études antérieures (Turmel, 2014).....	513
Annexe 50. Courbes d'évaporation des échantillons caractérisés .....	514
Annexe 51. Cartographie des cinétiques d'évaporation des pierres du monument .....	516
Annexe 52. Indice de susceptibilité aux sels - Salt Susceptibility Index - SSI - Équation de calcul et tables.....	518
Annexe 53. Carte de susceptibilité des pierres du monument aux sels (évaluée par les SSI) .....	519

## Annexe 1. Carte des sites dont les toponymes apparaissent dans le corps du texte.



**Annexe 2. Carte des sites du secteur de Reims dont les toponymes apparaissent dans le corps du texte.**



### Annexe 3. Historique des subdivisions du Lutétien (d'après Fröhlich, Schubnel et MNHN 2001)

FORMATIONS	A. De Lapparent 1885	A. De Lapparent 1893		A. Abrard 1925	A. Blondeau 1965	A. Blondeau C. Cavalier Cl. Megnien CH. Pomerol 1968
Marnes et caillasses Niveau de Foulanges Marnes et caillasses	Caillasses	Caillasses	LUTETIEN SUPERIEUR	Zone Ivb	Lutétien supérieur	Lutétien supérieur
Banc de roche Calcaires à cérithes	Calcaire grossier supérieur	Calcaire grossier à cérithes		Zone Iva		
Calcaires ; Banc Francs (Liais) ; Calcaires à milioles et cérithes Banc vert : calcaire à milioles						
Banc royal : calcaire à milioles et orbitolites Lambourdes ou Vergelés : calcaire à milioles, orbitolites et mollusques (tests dissous)	Calcaire grossier moyen	Calcaire grossier à milioles	LUTETIEN INFÉRIEUR ET MOYEN	Zone III	Lutétien moyen	Lutétien moyen
Bancs à verrins : calcaire à <i>Campanile giganteum</i> Banc de Saint Leu : calcaire à <i>Ditrupa</i> et à <i>N. Variolarus</i> Banc à Mollusques : Calcaire à mollusque et premiers miliolidés	Calcaire grossier inférieur	Calcaire grossier glauconieux et calcaires à nummulites				
Pierre à Liards : calcaires à <i>Nummulites laevigatus</i> Calcaires et sables glauconieux : calcaire à <i>Nummulites laevigatus</i> , polypiers et bryozoaires						
				Zone II	Lutétien inférieur	Lutétien inférieur
				Zone I		



#### Annexe 4. Synthèse des typologies architecturales en fonction des sites ayant fait l'objet d'une étude de matériaux

	Indéterminé	49
	Aqueduc	2455
	Caniveau/ Fontaine/ margelle	3
	Décoratif tous types	3
	Pavage	3
	Base / Dé	9
	Colonne base	6
	Colonne/pilier	21
	Colonne chapiteau	7
	Entablement	2
	Mur fondation - Radier	629
	Mur élévation/Moellon	15
	soubassements / bases	326
	Architectonique	3
Ancien couvent des capucins		3
Aqueduc		15
Basilique Saint Remi		629
Collection		7
Cryptoportique		2
Hauts Promenades		242
Médiathèque/rue Rockefeller		88
Rue Marie Stuart		79
Musée St Rémi		35
Rue Belin		5
Rue des Elus		87
		52
		26
		115
		23
		5
		2
		3
		14
		3
		2
		2
		1
		1
		1
		9
		22
		1
		3
		3
		28
		3
		6
		13
		1
		10
		33
		7
		21
		6
		9
		3
		3
		3
		49
		2455
		3
		3
		3
		9
		6
		21
		7
		21
		15
		326
		3
		295
		405
		398
		774
		147
		28
		42
		139
		7
		54
		19
		22
		20
		20
		2514
		117
		59
		16
		45
		7

## Annexe 5. Synthèse des matériaux observés en fonction des catégories architecturales étudiées

	Craie	Silex	Marcassite	Calcaire	Grès	Marbre	Grès /conglomérats	Meulière	Mortier	Terre crue	Terre cuite	Autres/ Endogènes / metamorphique	Indéterminé
Aqueduc	32	28	1	113	6			2052	105		8		
Carniveau/ Fontaine/ margelle				16									
Sculpture / Stèle				147									
Entablement				28									
Mur élévation/Moellon	10			137	103			43		36		4	21
Architectonique				293	1								2
Colonne chapiteau				41									
Colonne/pilier				132								7	
Colonne base				7									
Base / Dé				58	1								
Soubassement/bases				364	25		1	12			3		
Mur fondation- Radier		2		51	6			688	14		3	1	9
Pavage				19									
Décoratif de tous types				22									
Indéterminé				101	7	1			1			5	1
<b>Total général</b>	<b>42</b>	<b>30</b>	<b>1</b>	<b>1529</b>	<b>149</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2795</b>	<b>120</b>	<b>36</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>33</b>

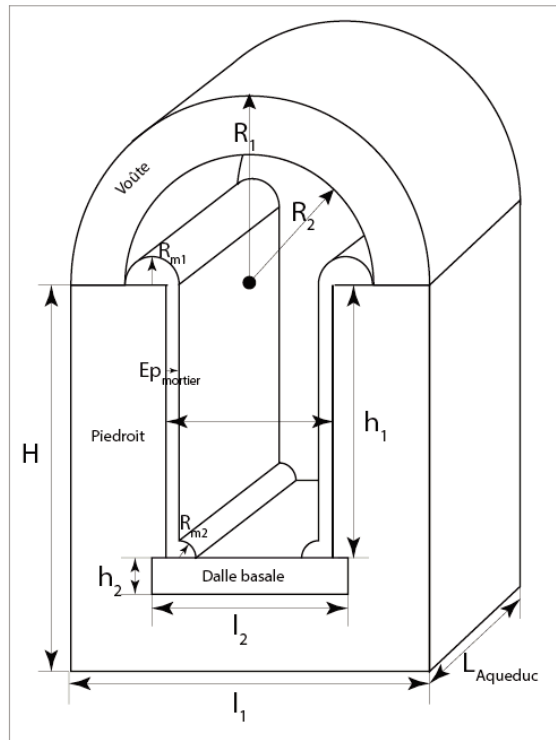
### Annexe 6. Synthèse des provenances exprimées en aire d'approvisionnement estimées en fonction de chaque matériaux observé.

	<i>in situ</i>	Périmètre attenant	Local	Régional	Extra-Régional	Indéterminé
Caclaire grossier (à Ditrupa ou Nummulithes)			16			
Calcaire à cérithes			34	54		
Calcaire à Ditrupa			10	46		1
Calcaire à Ditrupa et Orbitolites				119		
Calcaire à milioles				355		3
Calcaire à Cérithes et à milioles				1		
Calcaire coquillier grossier			1			
Calcaire gréseux à Ditrupa			33	7		15
Calcaire à Ditrupa				54		
Calcaire gréseux glauconieux			9	14		1
Calcaire lacustre (à Limnées et gyrongonites de Charophytes)				61		
Calcaire lumachelliques à Ostrea et Ditrupa				50		
Calcaire lumachelliques à Ostrea et milioles				30		
Calcaire sublithographique			23	2		13
Calcaire indéterminé			82	59		17
Carreau de terre	35					
Craie blanche	368					
Galet de silex			25			
Grès arkosique					4	
Grès grossier			113			5
Grès-quarzite gris			28			16
Maracassite	1					
Marbre blanc					1	
Pierre Meulière		2953				
Mortier	144					
Roche endogène (Granite)					7	
TCA et fragments de céramique		26	8			
Travertin indifférentié				1		
Indéterminé						51
<b>Total général</b>	<b>539</b>	<b>26</b>	<b>3324</b>	<b>853</b>	<b>20</b>	<b>134</b>

## Annexe 7. Synthèse des catégories architecturales en fonction de chaque matériaux observé.

	Architectonique	Décoratif tous types	soubassements / bases	Mur élévation/Moellon	Fondation - Radier	Entablement	Sculpture / Stèle	Colonne chapiteau	Colonne base	Colonne/pilier	Pavage	Base / Dé	Indéterminé	Aqueduc	margelle
Calcaire grossier (à Ditrupa ou N	8			3	5									1	
Calcaire à cérithes	14			45	3		4	2		4	2	4	10		4
Calcaire à Ditrupa	45	7		2	2	1	17	9		9		9	10	1	5
Calcaire à Ditrupa et Orbitolites	29	3		1		3	31	6	1	23	1	3	9		2
Calcaire à milioles	125	5		9	1	19	41	19	5	72	4	18	33	3	7
Calcaire à cérithes et à milioles													1		
Calcaire gréseux à Ditrupa	2		6	53	8		1	2				1			1
Calcaire gréseux glauconieux	8			14			3			1		1	6		1
Calcaire indéterminé	15	2	30	2	4	4	22	2		3		1	12	91	
Calcaire à Limnées	20	2		3	2	1	6	1			7	13	4		
Calcaire lumachelliques à Ditrupa	13						21			12		2	1		
Calcaire lumachelliques à milioles	13	3			1					7	4		2		
Calcaire sublithographique			2	18	13								7		
Carreau de terre				35											
Craie blanche			326	10											32
Galet de silex					2										26
Maracassite															1
Grès arkosique			1										3		
Grès grossier				100	5							1	3	23	
Grès-quartzite gris	1		25	6	16								2	6	
Marbre blanc		1													
Meulière indifférenciées			12	48	689								2	2192	
Mortier					14									130	
Terre Cuite Architecturale			3	26										8	
Travertin indifférentié												1			
Roche endogène (Granite)									7						
Indéterminé	2			23	9		1		1	1	1		12		
Total général	295	22	405	398	774	28	147	42	7	139	19	54	117	2514	20

### Annexe 8. L'aqueduc de Reims, annotation des cotes de l'ouvrage utilisées dans l'estimation des quantités de matériaux



L'Aqueduc de Reims, Annotation des cotes de l'ouvrage utilisées dans l'estimation des quantités de matériaux

Volume des voûtes :

$$V_{voûtes} = \frac{\pi(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}{2} \times L_{Aqueduc}$$

Volume des piédroits (en tranchée) :

$$V_{pied} = 2(h_{pied} \times l_{pied} \times L_{aqu})$$

Volume des piédroits (en tunnel) :

$$V_{piédroits} = (h_1 + h_2) \times 2l_{specus} \times L_{Aqueduc}$$

Volume du radier :

$$V_{rad} = (h_{rad} \times l_{rad} \times L_{rad})$$

Volume de mortier hydraulique :

$$V_{Mortier\ hydraulique} = (Ep_{mortier} \times h_1 \times L) \times 2 + \frac{\pi(R_{m1}^2 + (R_{m2}^2)/2)}{2} \times L_{Aqueduc}$$

## Annexe 9. Paramètres de traitement de la construction de la maquette numérique de la Porte de Mars

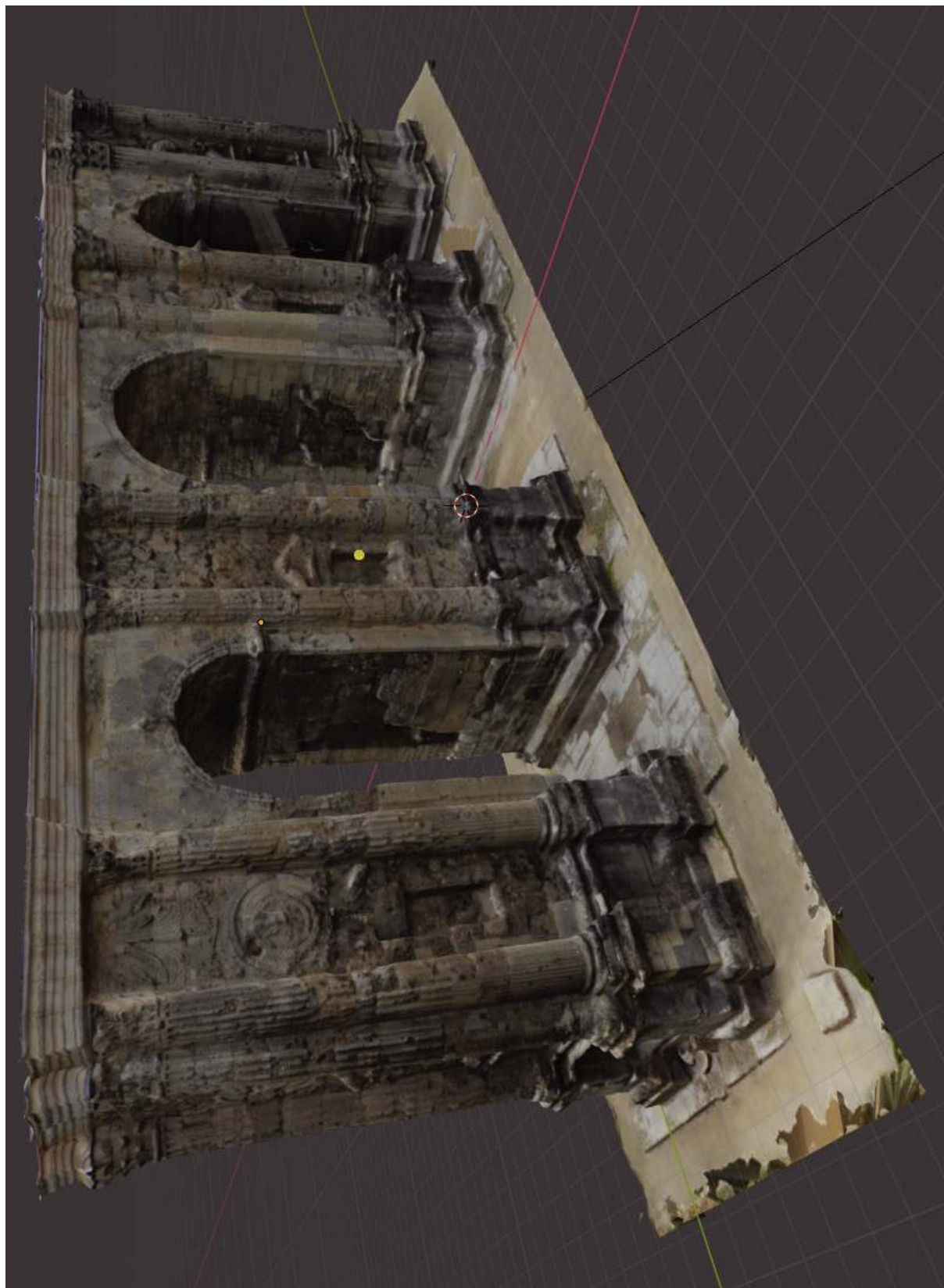
### Paramètres de traitement

Général	
Caméras	381
Caméras alignées	380
Repères	36
Barres d'échelle	20
Système de coordonnées	Local Coordinates (m)
Angles de rotation	Lacet, Tangage, Roulis
Nuage de point	
Points	1,214,882 de 1,470,581
Erreur RMS de reprojection	0.127893 (0.67915 px)
Erreur Max de reprojection	0.390215 (41.0601 px)
Taille moyenne de point	4.74174 px
Couleurs des points	3 bandes, uint8
Points-clé	Non
Multiplécité moyenne des points de liaison	4.05617
Paramètres d'alignement	
Précision	Haute
Présélection générique	Oui
Limite de points	60,000
Limite de points de liaison	300,000
Filtrer les points par masque	Non
Masquer les points de liaison	Non
Ajustement progressif du modèle de la caméra	Oui
Temps de concordance	11 minutes 58 secondes
Temps d'alignement	24 minutes 8 secondes
Version du programme	1.5.4.8885
Cartes de profondeur	
Nombre	380
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Agressif
Temps de traitement	2 jours 5 heures
Version du programme	1.5.4.8885
Nuage de points dense	
Points	92,138,372
Couleurs des points	3 bandes, uint8
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute
Mode de filtrage	Agressif
Temps de traitement	2 jours 5 heures
Paramètres de génération du nuage de points dense	
Temps de traitement	1 jour 9 heures
Version du programme	1.5.4.8885
Modèle	
Faces	18,186,181
Sommets	9,110,006
Couleurs des sommets	3 bandes, uint8
Texture	15,000 x 15,000, 4 bandes, uint8
Paramètres de génération des cartes de profondeur	
Qualité	Ultra haute

---

Général	
Mode de filtrage	Agressif
Temps de traitement	2 jours 5 heures
Paramètres de reconstruction	
Type de surface	Arbitraire
Données source	Nuage dense
Interpolation	Activé
Masques volumétriques stricts	Non
Temps de traitement	1 heure 23 minutes
Paramètres de texturation	
Mode de mappage	Générique
Mode de fusion	Mosaïque
Taille de la texture	15,000
Activer le remplissage de trous	Oui
Activer le filtre fantôme	Oui
Temps de paramétrisation UV	4 minutes 10 secondes
Temps de fusion	1 heure 43 minutes
Version du programme	1.5.4.8885
Orthomosaïque	
Taille	5,757 x 20,190
Système de coordonnées	Local Coordinates (m)
Couleurs	3 bandes, uint8
Paramètres de reconstruction	
Mode de fusion	Mosaïque
Surface	Maillage
Activer le remplissage des trous	Oui
Temps de traitement	30 minutes 13 secondes
Version du programme	1.5.4.8885
Logiciel	
Version	1.5.4 build 8885
Plateforme	Windows 64

**Annexe 10. Aperçu du modèle photogrammétrique après l'étape d'optimisation (affichage dans Blender (double vérification du modèle))**





## Annexe 11. Compositions des bases de données attributaire relatives aux matériaux de la Porte de Mars

Table	Matériaux de construction PDM	
<b>Type de table :</b>	Polygones	objectif : relevé des matériaux
<b>Nom du champ</b>	Objet	
<b>id</b>	Champ unique d'identification	Numérique
<b>Fid</b>	Champ de dénombrement	Numérique
<b>num-facade</b>	identification de la façade du monument	Numérique
<b>NumPylone</b>	Identification du Pylone du monument auquel l'élément appartient	Numérique
<b>orientatio</b>	Orientation de la la façade auquel appartient l'élément concerné	Alphanumérique
<b>archi</b>	Position architectonique simplifiée	Alphanumérique
<b>Arch-antique</b>	Position architectonique en référence à la classification canonique de l'architecture gréco-romaine (Ginouves et al. (TI à III) avec l'aimable participation de V. Brunet-Gaston)	Alphanumérique
<b>type</b>	Typologie des éléments (moellons, grand appareil...)	Alphanumérique
<b>Descro 001</b>	Lithologie : Premier degré de description du géomatériaux de construction	Alphanumérique
<b>Descro 002</b>	Faciès type : Second degrés de description du géomatériaux de construction	Alphanumérique
<b>Descro 003</b>	Description complète : Troisième niveau de description des géomatériaux	Alphanumérique
<b>cod-facies</b>	Codification synthétique	Alphanumérique
<b>age</b>	Attribution strtigraphiques	Alphanumérique
<b>aire</b>	Calcul de l'aire de l'élément digitalisé en m <sup>2</sup>	Numérique
<b>mat</b>	Précisions sur l'élément concerné (couleur spécifique, caractéristique marquante, traces d'outils ou autres informations pertinentes)	Alphanumérique
<b>type pierre</b>	Alphanumérique	
<b>Phase</b>	Phase de restauration en référence à la liste des interventions connues sur le monument	Alphanumérique
<b>date-rest</b>	Années de réalisation des travaux de restauration	Alphanumérique
<b>nom_archi</b>	Nom de l'architecte ayant supervisé les travaux de restauration. Plusieurs phases de travaux peuvent être encadrées par un architecte unique et inversement	Alphanumérique
<b>argument</b>	Nature et référence de l'argument qui a présidé à l'attribution à une phase de restauration ou a un architecte	Alphanumérique

Table	Altérations	
<b>Type de table :</b>	Polygones	objectif : Relevé des altérations
<b>Nom du champ</b>	Objet	
<b>id</b>	Champ unique d'identification	Numérique
<b>Fid</b>	Champ de dénombrement	Numérique
<b>Typo-alt</b>	Typologie simplifiée de l'altération considérée selon le «Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre» de ICOMOS	Alphanumérique
<b>Commentaire</b>	Remarques et commentaires spécifique à l'objet/polygone concerné	Alphanumérique
<b>Famille</b>	Catégorie principale selon le «Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre» de ICOMOS	Alphanumérique
<b>Terminologie</b>	Sous-catégorie selon le «Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre» de ICOMOS	Alphanumérique

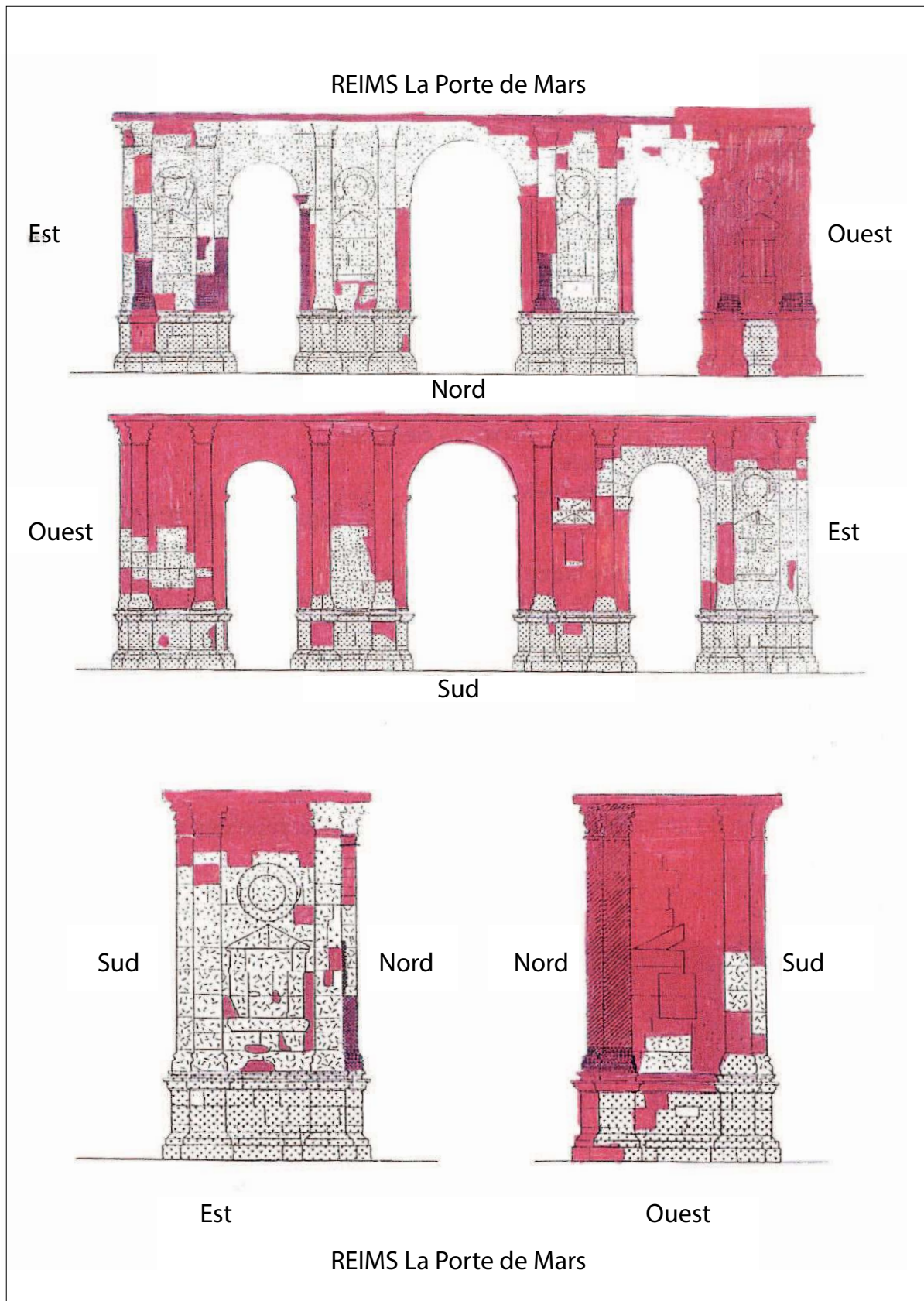
Table	Données pétrophysiques (Jointure de la table Matériaux de construction PDM)	
Type de table	Données	
Nom du champ	Objet	
Jointure	Champ commun aux tables pour la réalisation de la jointure	Alphanumérique
Nom échantillon	Identification de la pierre testée	Alphanumérique
Position archi	Emplacement architectural originel, supposé ou équivalent de la pierre testée dans les monuments	Alphanumérique
Nom définitif	Identification de la pierre testée selon les critères descriptifs des matériaux (cf chapitre II/description des matériaux)	Alphanumérique
Masse volumique apparente (kg.m <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (kg.m <sup>3</sup> ) calculée par pesée hydrostatique pendant la mesure de la porosité totale à l'eau	Numérique
Porosité à l'eau Nt	Valeur de la porosité totale à l'eau	Numérique
Porosité à l'eau Ecart-Type	Ecart type de la porosité totale à l'eau (en %)	Numérique
Porosité à l'eau N48 (%)	Valeur de la porosité à 48h (en %)	Numérique
Porosité à l'eau S48 (%)	Valeur de la Saturation à l'eau 48h (en %)	Numérique
Porosité à l'eau Np (%)	Valeur de la porosité piégée	Numérique
MIP - Ra1 (µm)	Porosité au mercure : Seuil de pore 1	Numérique
MIP - Ra2 (µm)	Porosité au mercure : Seuil de pore 2	Numérique
MIP - Ra3 (µm)	Porosité au mercure : Seuil de pore 3	Numérique
MIP - Rm	Porosité au mercure : Rayon moyen d'accès au pore	Numérique
MIP Cd	Porosité au mercure : Coefficient de dispersion	Numérique
MIP %	Porosité au mercure : porosité en %	Numérique
Capillarité (g.m <sup>2</sup> .s <sup>-1/2</sup> ) C <sub>1</sub>	Capillarité : Coefficient de capillarité C1	Numérique
Capillarité (g.m <sup>2</sup> .s <sup>-1/2</sup> ) C <sub>2</sub>	Capillarité : Coefficient de capillarité C2	Numérique
Capillarité : (g.m <sup>2</sup> .s <sup>-1/2</sup> ) N <sub>cap</sub>	Ncap = N48h, valeur de la porosité interconnectée de la pierre	Numérique
Évaporation 33% SC <sub>1</sub> (g.m <sup>2</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	Cinétique d'évaporation SC1	Numérique
Évaporation 33% SC <sub>2</sub> (g.m <sup>2</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	Cinétique d'évaporation SC2	Numérique
SC (%)	Cinétique d'évaporation : saturation critique Sc	Numérique
SC <sub>2</sub>	Cinétique d'évaporation : SC2	Numérique
Evaporation 33% T <sub>sc</sub>	Temps (en h) entre le début de l'expérience et l'atteinte de la saturation critique	Numérique
Valeurs des SSI	Valeurs des indices de susceptibilités aux sels (SSI; Yu, Oguchi 2010)	Numérique
Résultat SSI	Interprétation de la valeur numérique de l'indice de susceptibilité aux sels (SSI)	Numérique

Date	Nature des travaux	Références
1er quart du IIIe s. ap	<b>Construction</b>	Brunet-Gaston et alii 2020
Début du IVe s ap.	Intégration de la porte de Mars au rempart défensif tardo antique	Neiss et sindonino, 2010
XIIIe et XIVe siècle	Intégration progressive au cours de plusieurs phases d'aménagements de la porte aux fortifications du château des archevêques de Reims et fermeture des baies. La porte n'est plus empruntée pour la circulation des personnes et des biens.	Flodoard, 1824; Varin, 1843 Tarbé 1844; Bernot 1995 Demouy, 2005; Pichard, Decrock, Philippe 2010
XVe siècle (1422)	Destruction partielle du château des archevêques par un incendie	Tarbé 1844 ; Lefevre 1985
XVIe siècle (1544)	Reprise et réaménagement des fortification, enfouissement de la porte avec comblement des arcades par de la terre	Bergier 1622 ; Tarbé 1844 ; Lefevre 1974
XVIIe siècle (1595)	Démolition du château et déblaiement probable de l'arcade occidentale, les éléments restant sont transformés en plateforme d'artillerie et en poudrière pour l'arcade orientale	Bergier 1622; Tarbé 1844; Brunette 1885

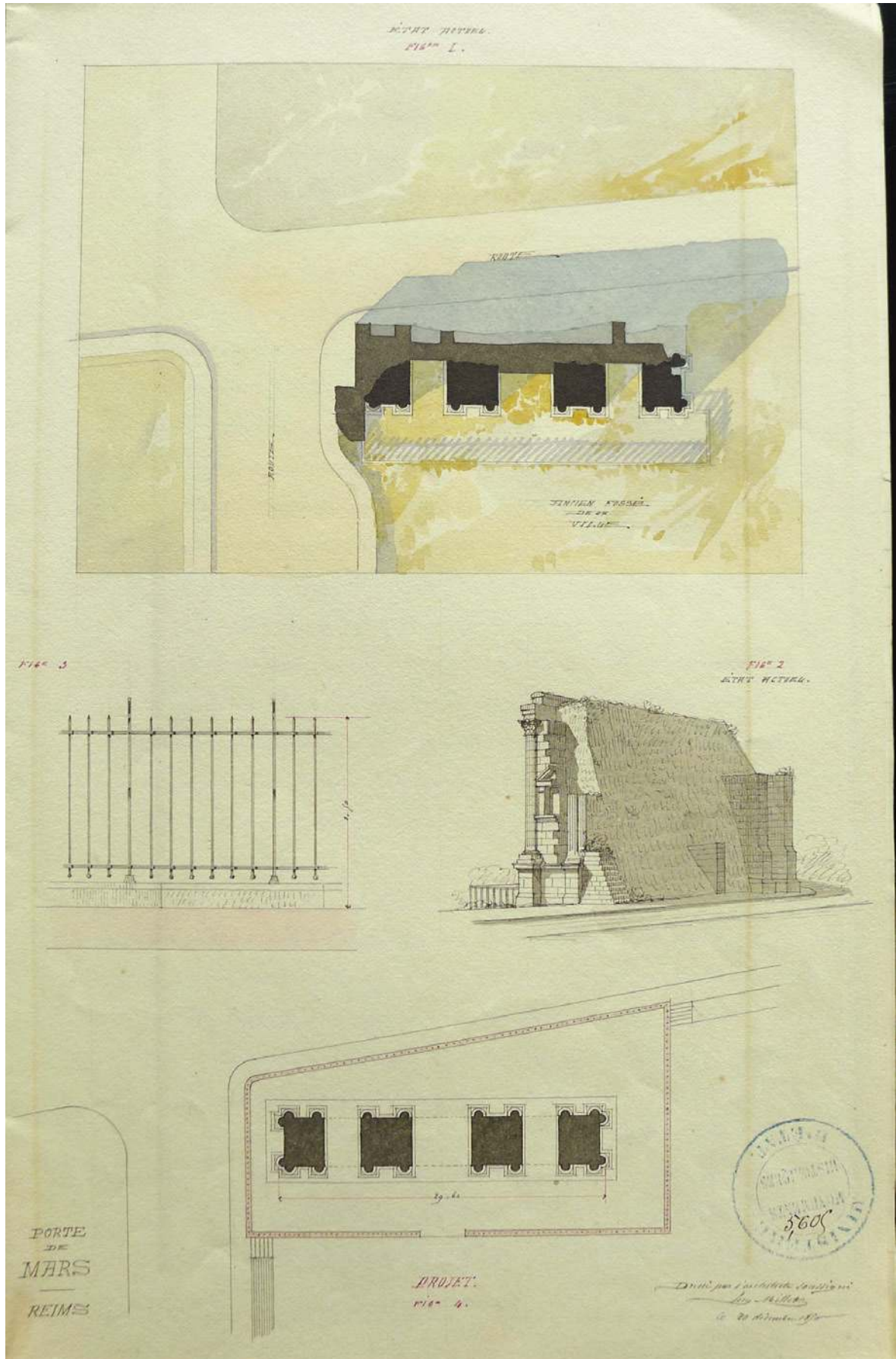
Date	Nature des travaux	Références
1 804	Reprise en sous œuvre des soubassements (confusion possible avec les travaux de Serrurier de 1812)	Brunette 1885 ; Demaison 1912 ; notice EAP 2018
1 812	Consolidation des soubassements et reprise de deux bases de colonnes par l'architecte Serrurier et déblaiement de la base des pylones	
1 816-1 818	Dégagement des façades et restaurations de l'arcade orientale. Mention d'approvisionnement de plusieurs lot de pierre (dont Pierre de Savonnières, de Coligy et de matériaux divers)	Lacatte-Joltrois, BMR, ms 1687; AMC, FM1M66
1837	Déblaiement de la façade orientale. Constat de la destruction de la façade sud de l'Arc	Taylor 1854, Brunette 1885
1 840	Classement de la Porte par Prosper Mérimée	Notice MH
1 843 - 1 845	Reconstruction de la pile Ouest et mise en place d'une couverture en béton et asphalte	Brunette 1885
1 853	Démolition des remparts et bâtiments contigus à la Porte (coté ouest).	Notice EAP 2018
1 856	Démolition des bouchages des baies et construction des éperons en pierres de récupération à l'Est pour le soutènement de l'arc	Lefevre 1980, 1985; Chossenot, Esteban, Neiss 2010; Bontrond 2019;
1 859	Réparation de la façade sud avec reprise des socles, tympans et colonnes pour partie en emploi de matériaux antiques, et partie en moellons de récupération	EAP 2018
1 864	Refaction de la couverture en ciment de 1844-1845, reprise des parties ruinées et consolidation des chapiteau manquants en moellons de «Pierre de Savonnière». Dépose des contreforts de la facade sud.	Lefevre 1980, 1985

Date	Nature des travaux	Références
1 899 et 1 901	Réfaction de la chape détanchéité (posée par Ouradou) et reprise de la corniche pour la placer à son niveau anté 2016.	Lefevre 1980 ; notice EAP 2018
1 923	Réparation des dommages causés par les impacts de quelques obus sur les façades cours de la Première Guerre Mondiale	Lefevre 1980
1 927	Réfaction des joints (« rejointoiement général au ciment de Portland ») et réalisation de réparations mineures (non documentées). Réparations ponctuelles de la couverture	Lefevre 1980
1 976-1 979 1 982	Réfaction complète de la couverture et de l'étanchéité en béton armé, nettoyage et réparation légère du parement et reprise des joints à la demande sur les façades.	notice EAP 2018 Jaton, 1982 Rapport LRMH
2016	Purge de quelques blocs menacant de s'effondrer, réfaction de la couverture de 1982	notice EAP 2018

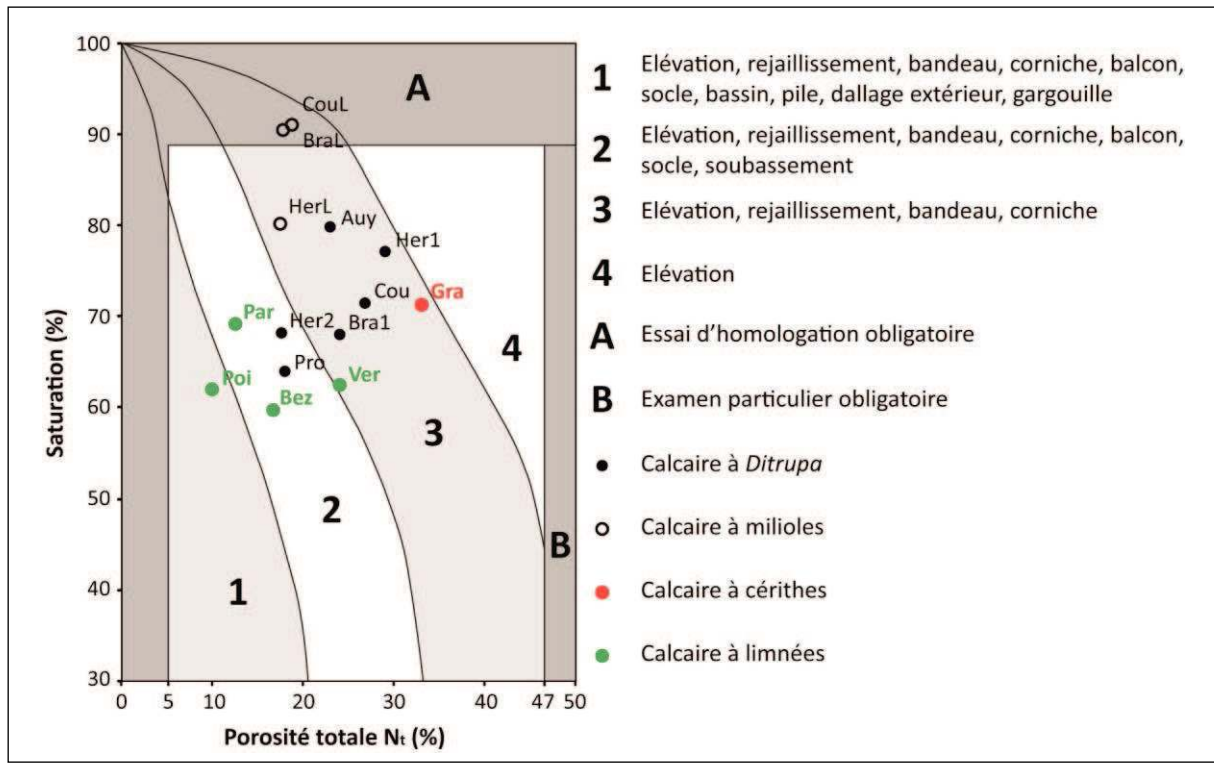
## Annexe 13. Critique d'authenticité des matériaux de la Porte de Mars (d'après Blanc 1984)



**Annexe 14.** Extrait du rapport de l'architecte Millet en 1856, Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, cote 176, 0081/051/235 à 0081/051/238



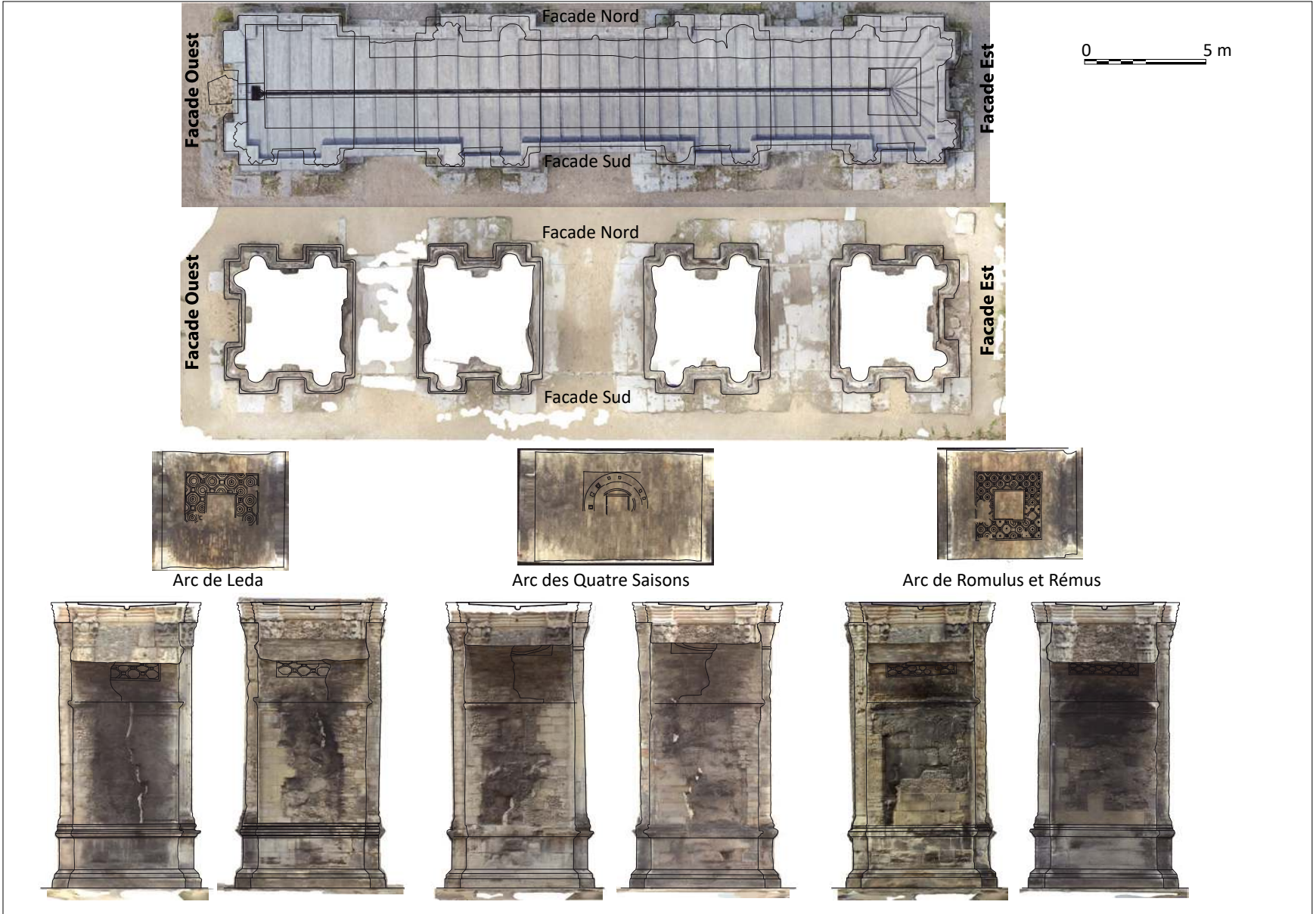
**Annexe 15. Aptitude d'emploi des matériaux étudiés en laboratoire par Turmel 2014 projeté dans un diagramme développé par Mamillan (1994)**



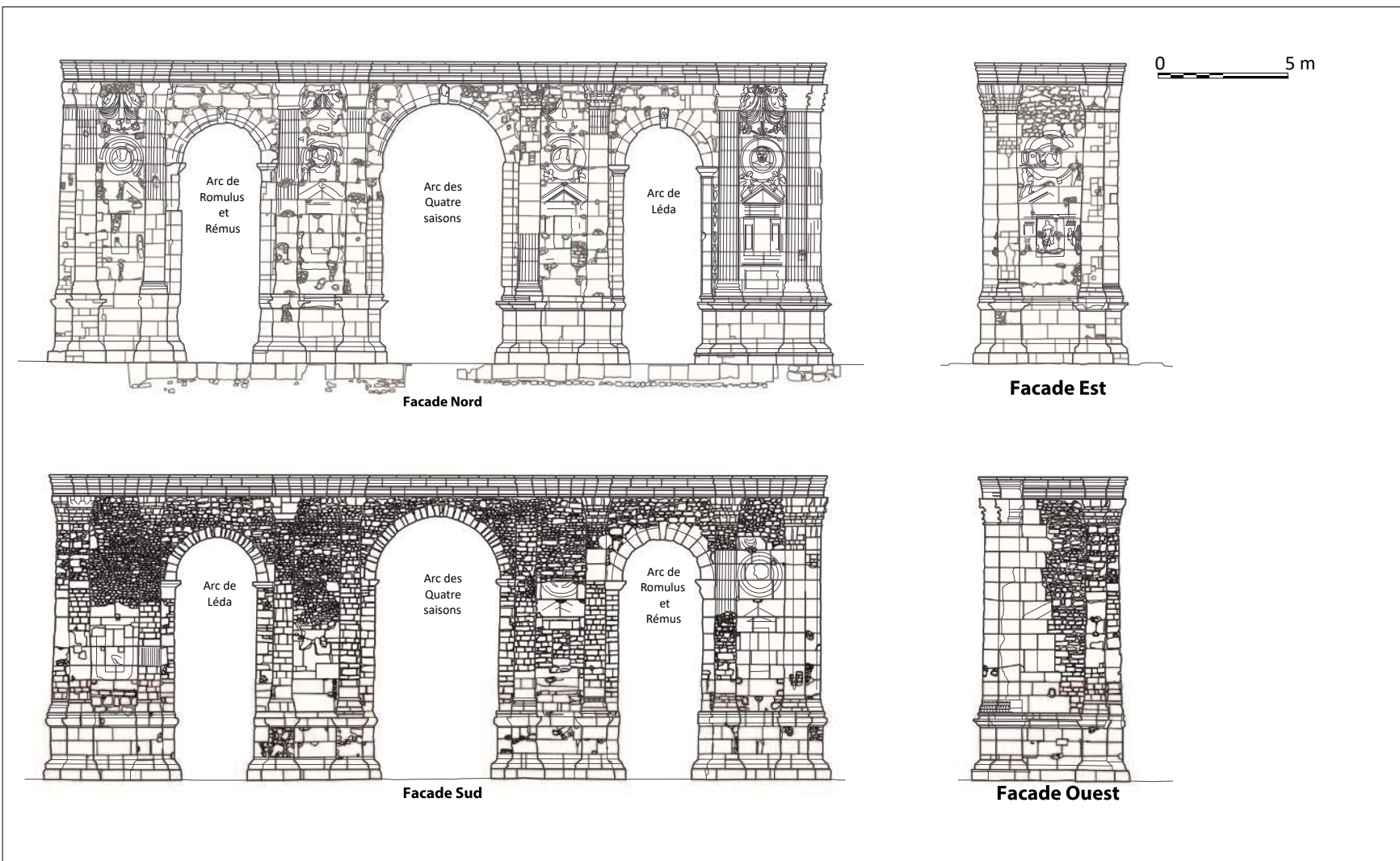


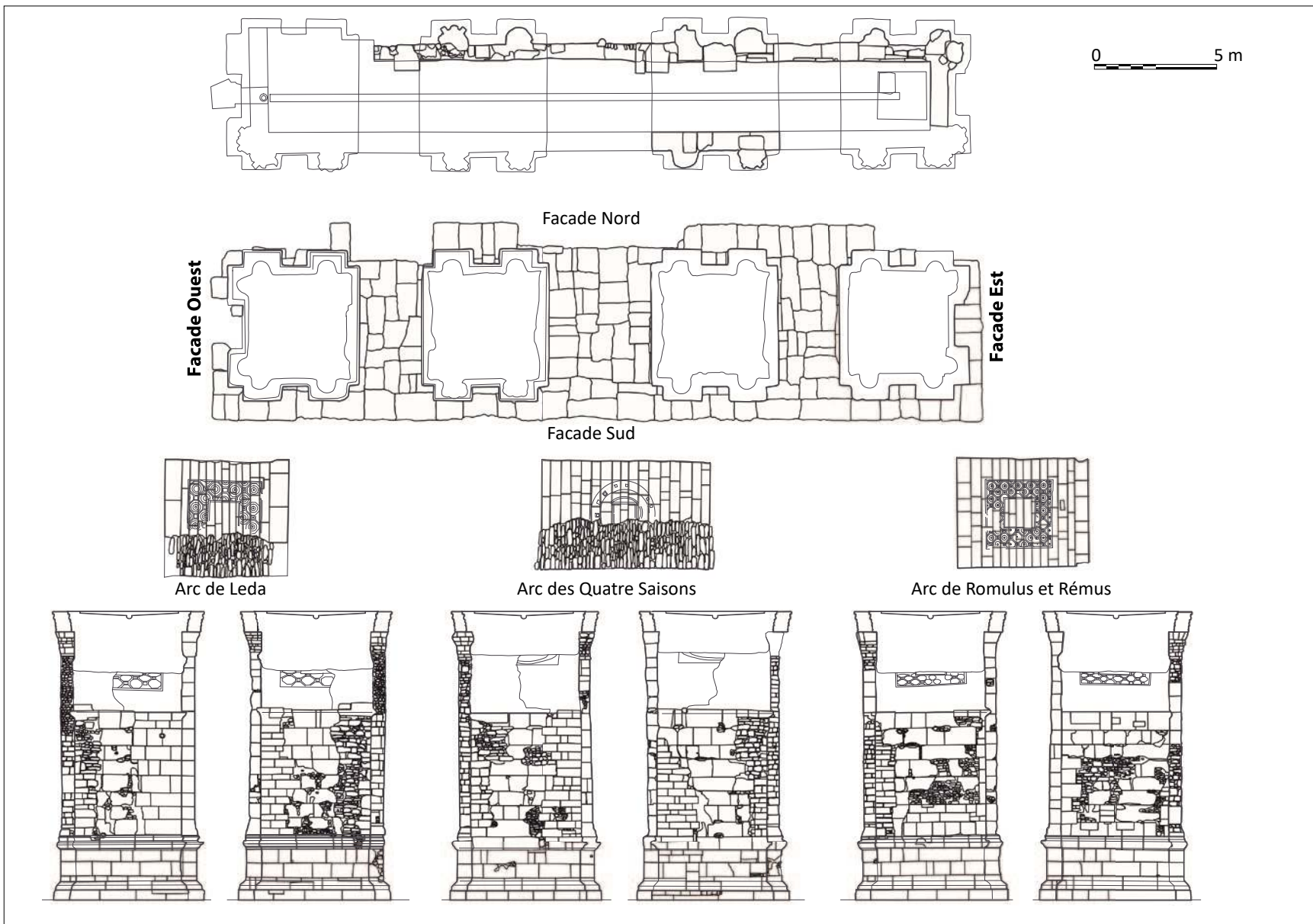
**Annexe 16. Supports orthophotographiques dérivés de la maquette numérique, habillés par les grands traits architecturaux**



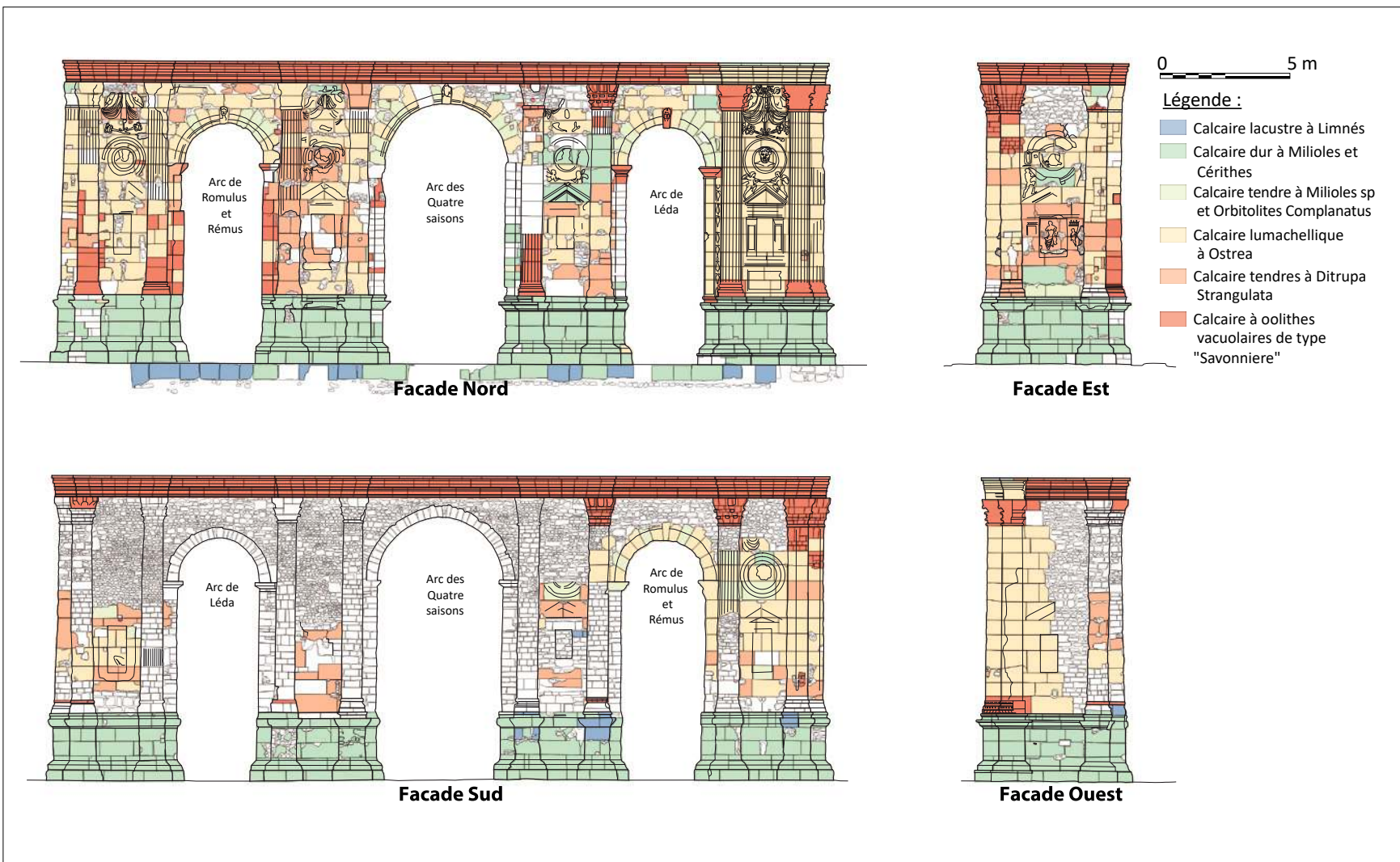


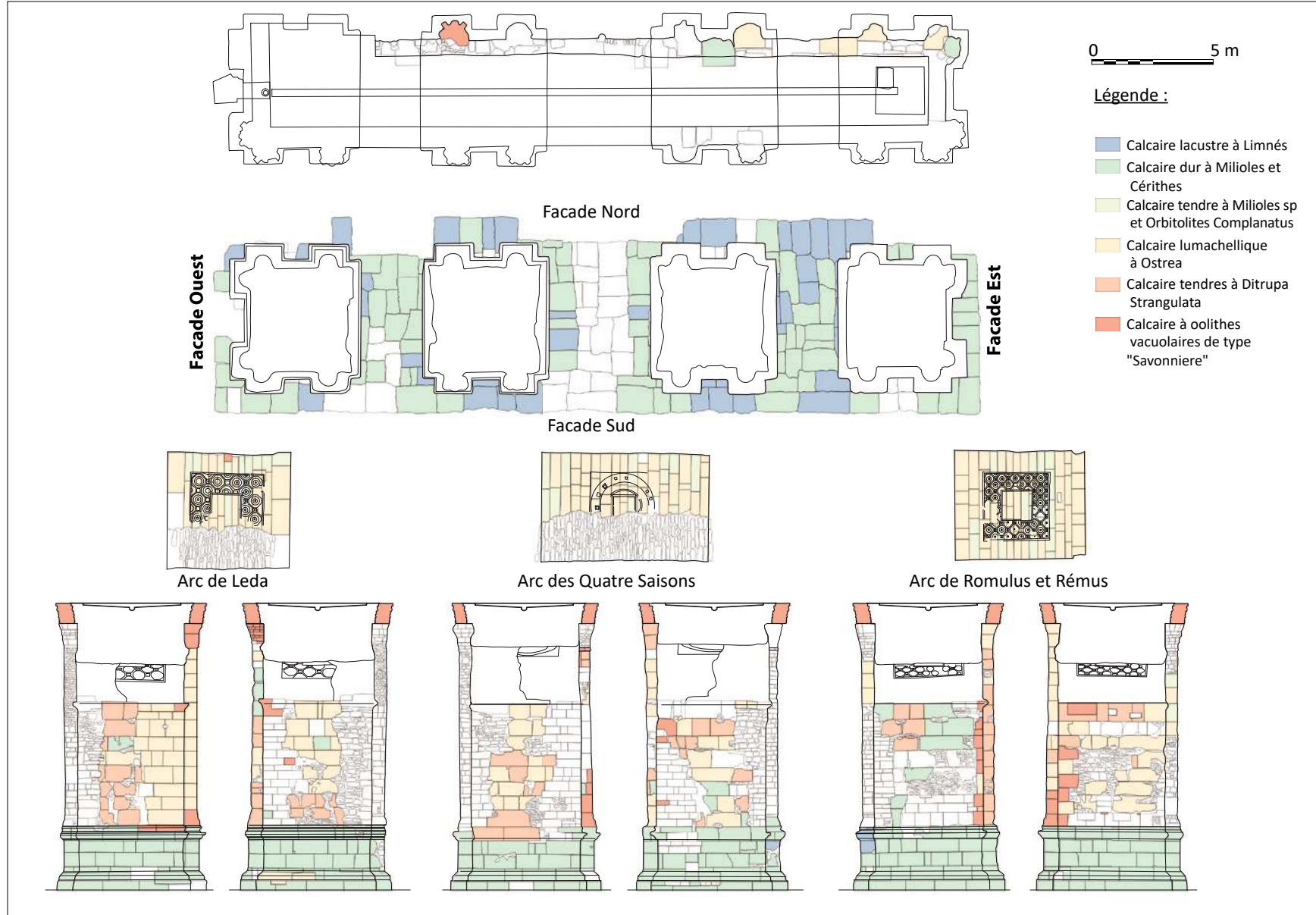
Annexe 17. Relevé d'appareil complet du monument



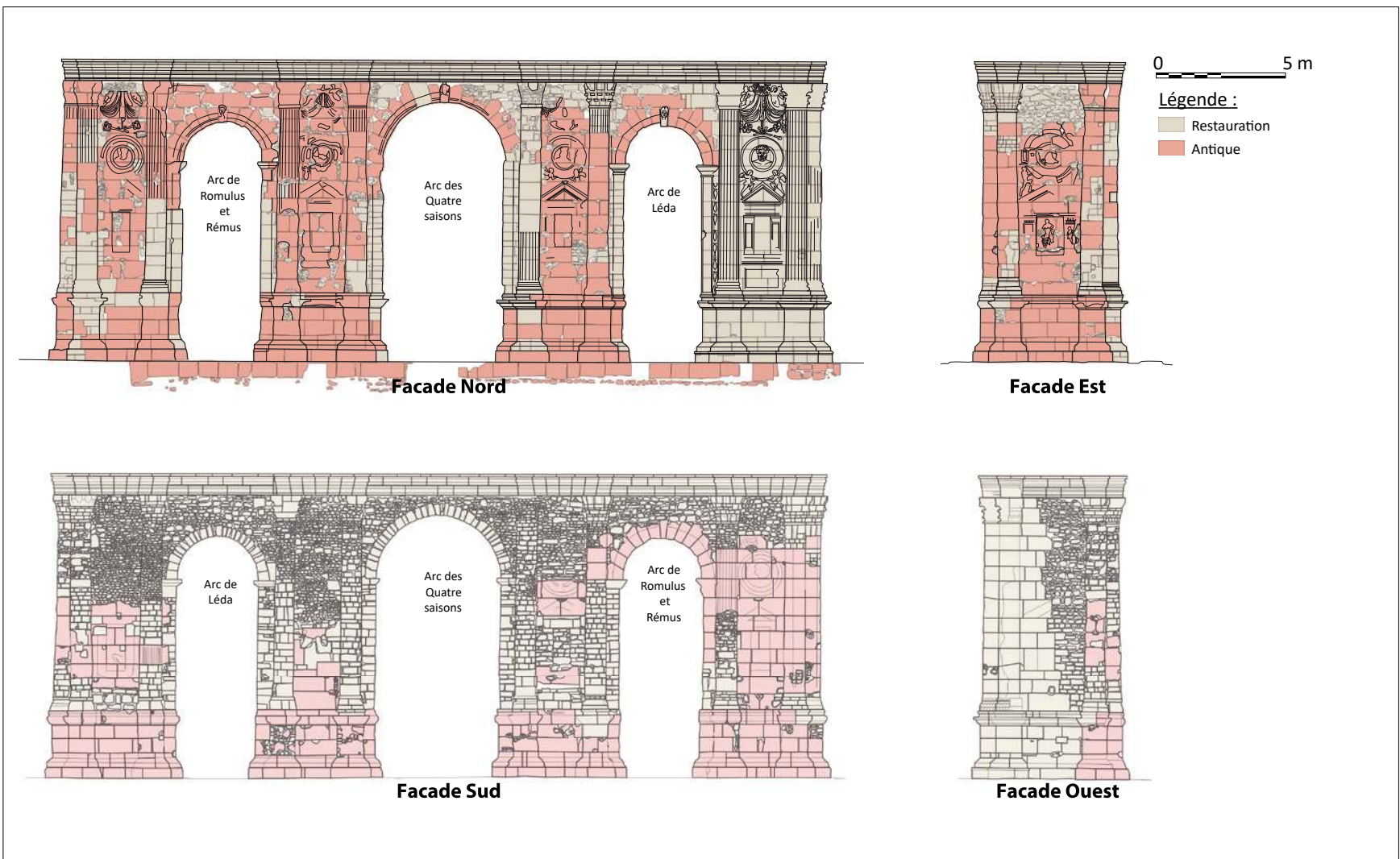


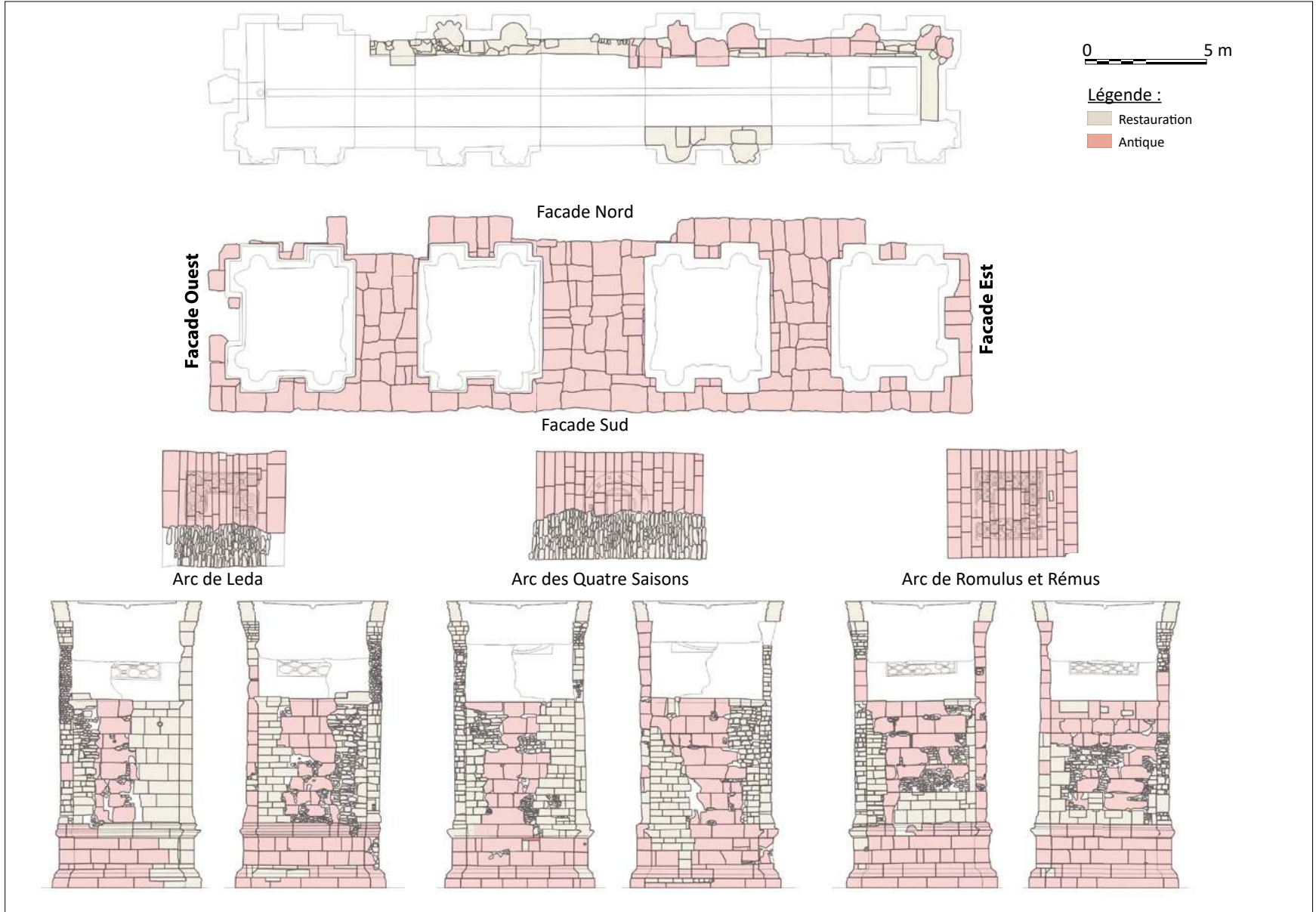
## Annexe 18. Carte des faciès des blocs de grand appareil du monument





## Annexe 19. Critique d'Authenticité du monument

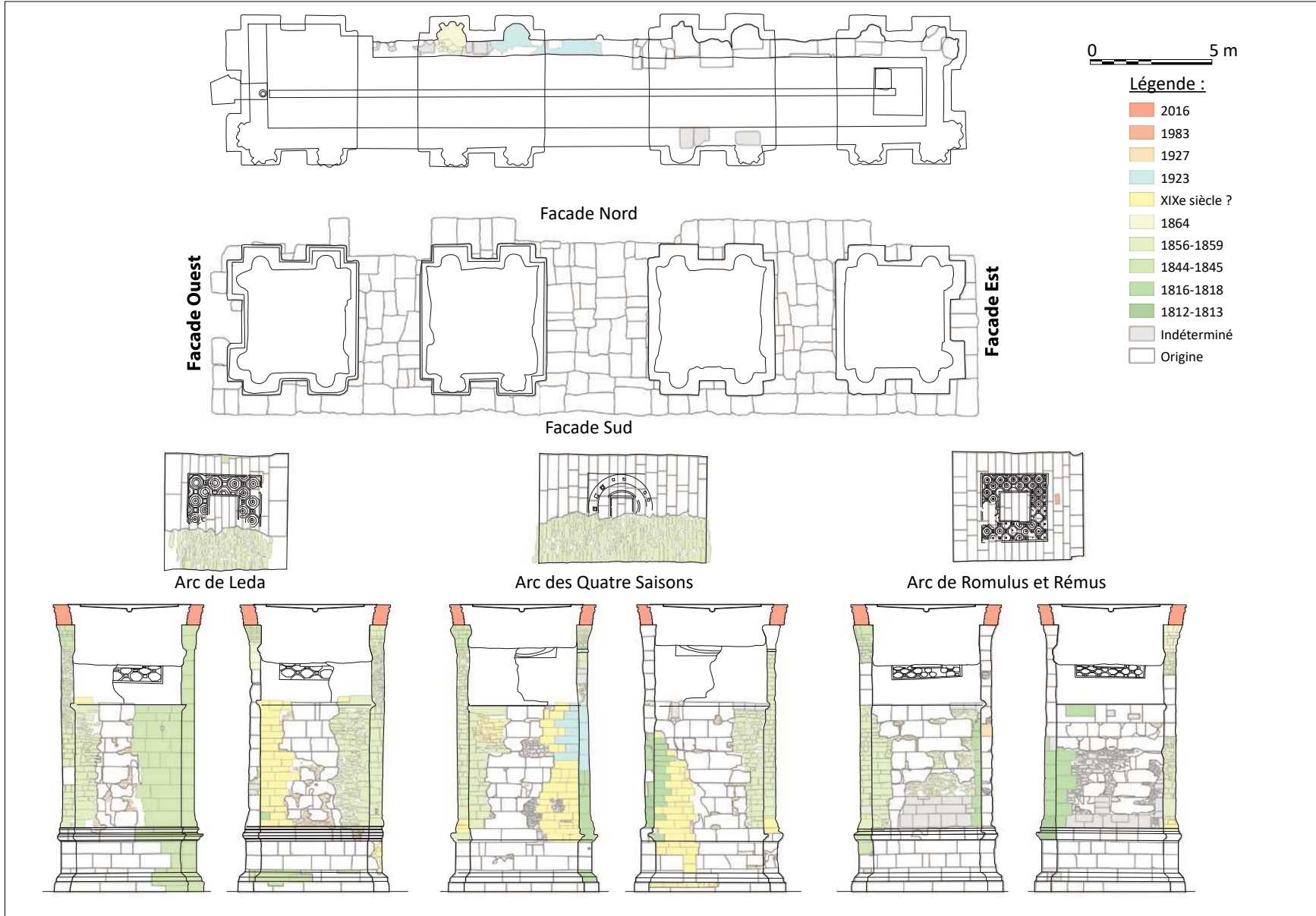




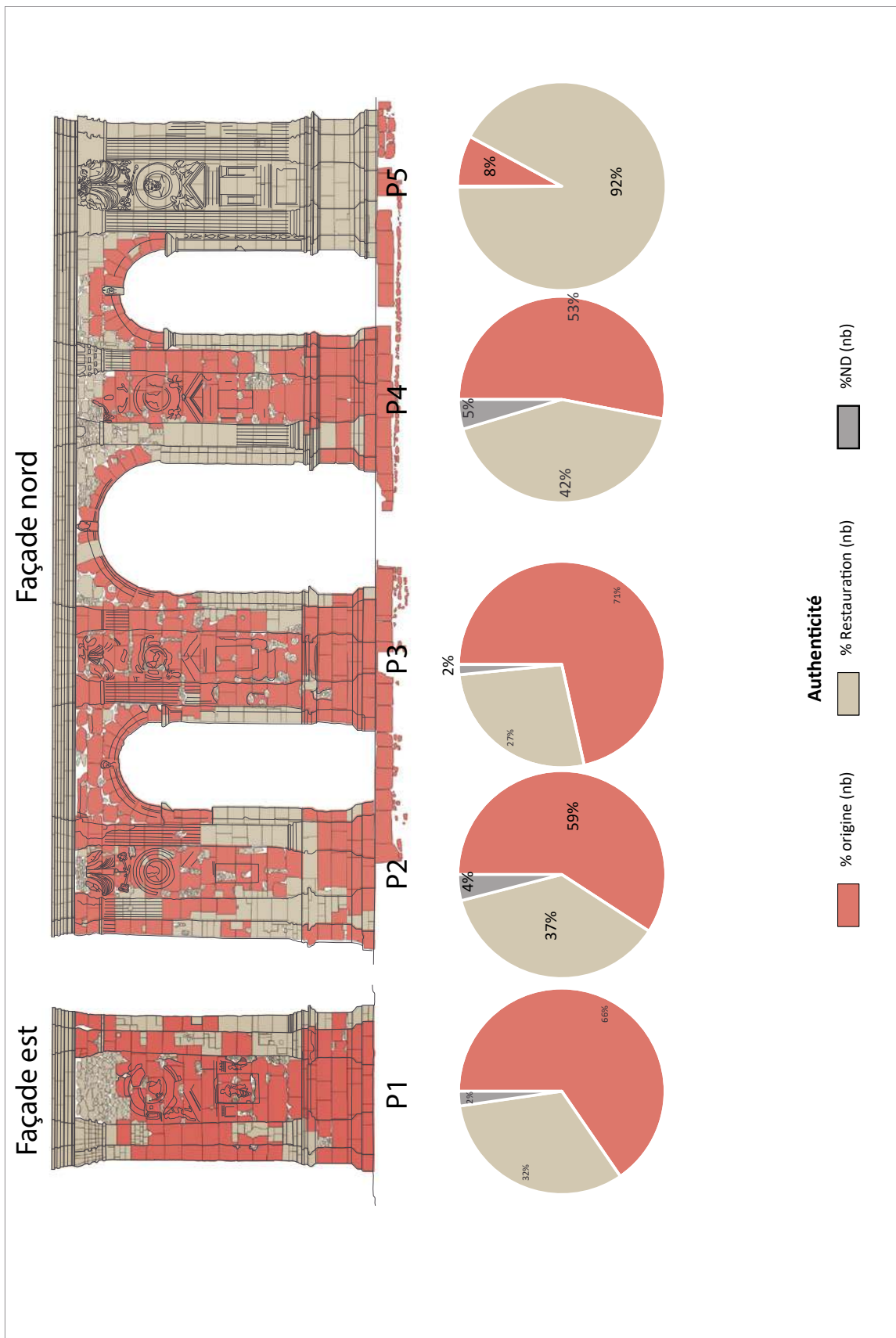


## Annexe 20. Phasage des travaux de restaurations



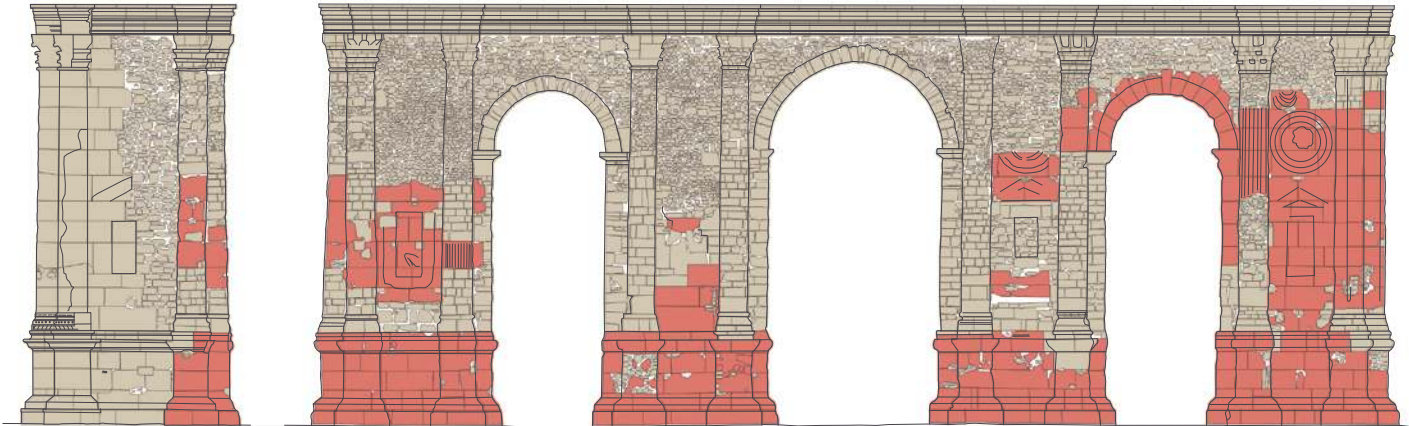


**Annexe 21. Quantification des matériaux en œuvre rapportés à leur surfaces (en m<sup>2</sup>)**



Façade ouest

Façade sud



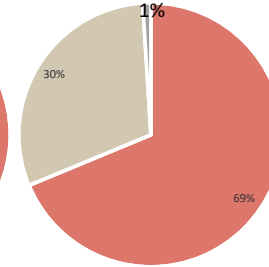
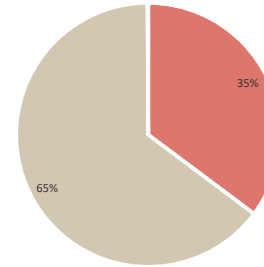
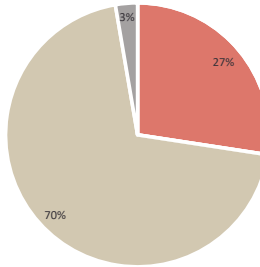
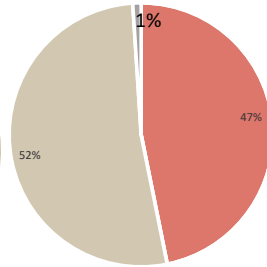
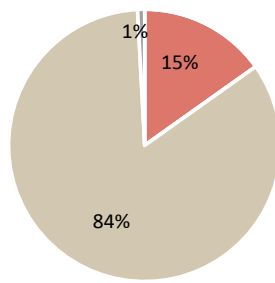
P6

P7

P8

P9

P10

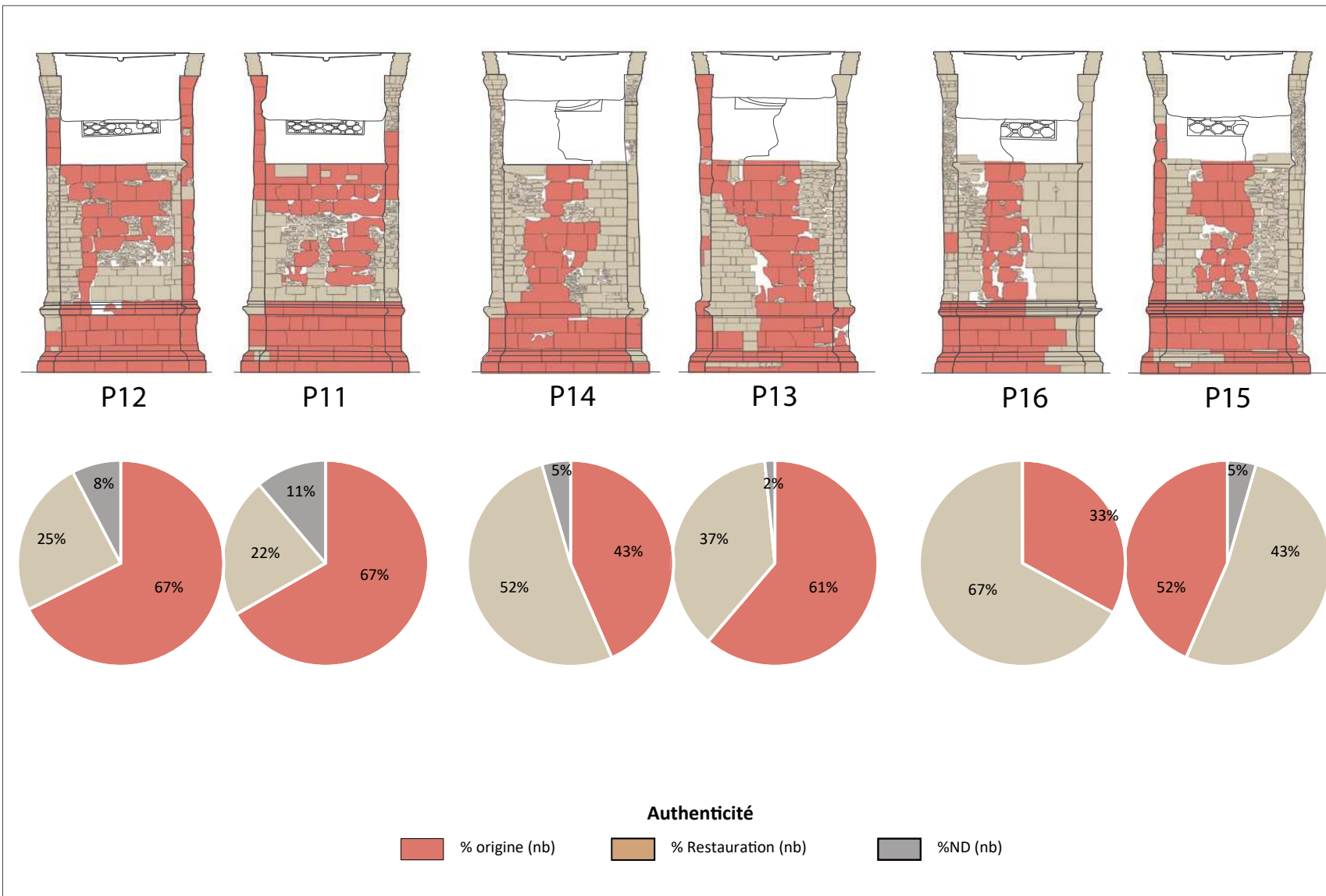


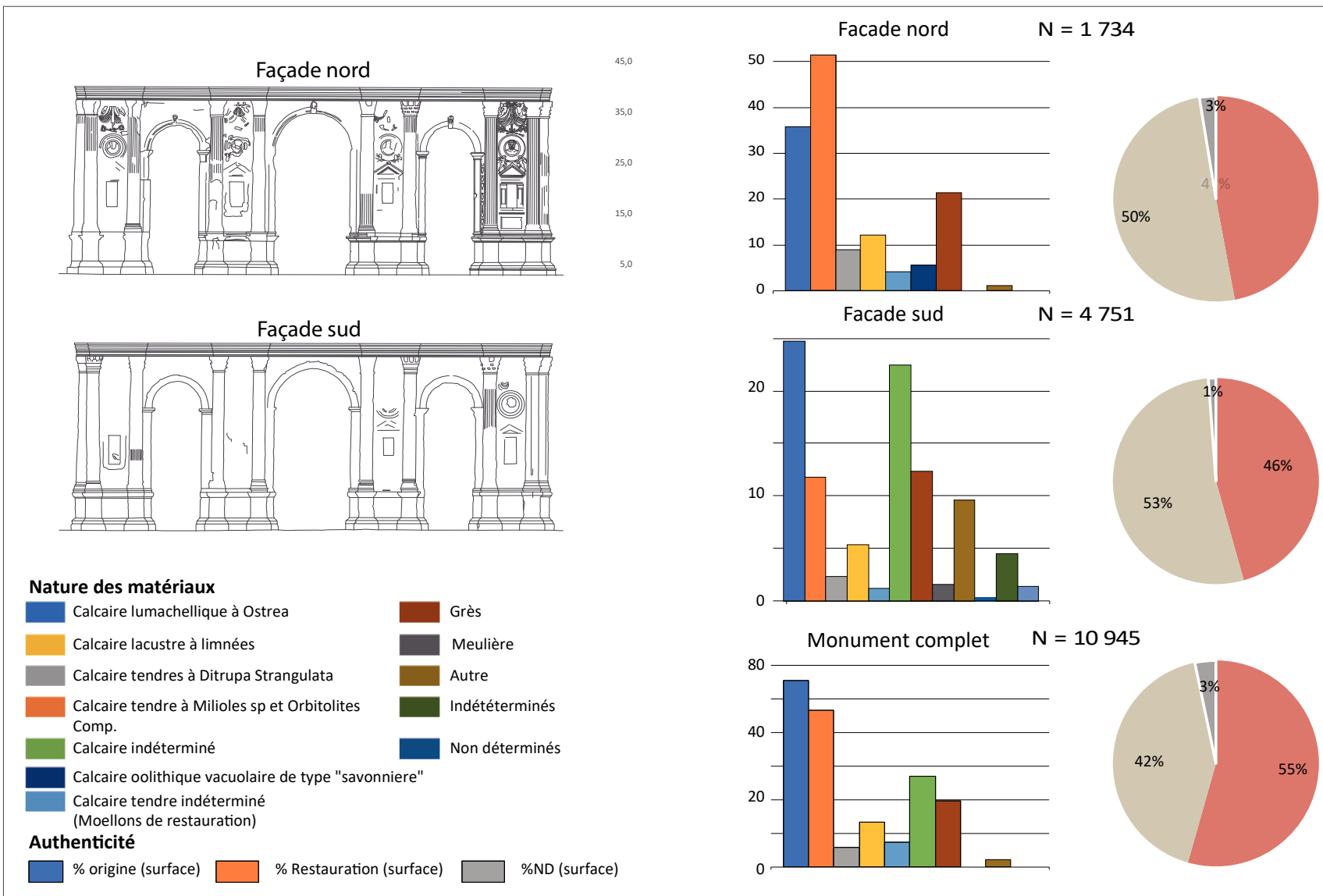
**Authenticité**

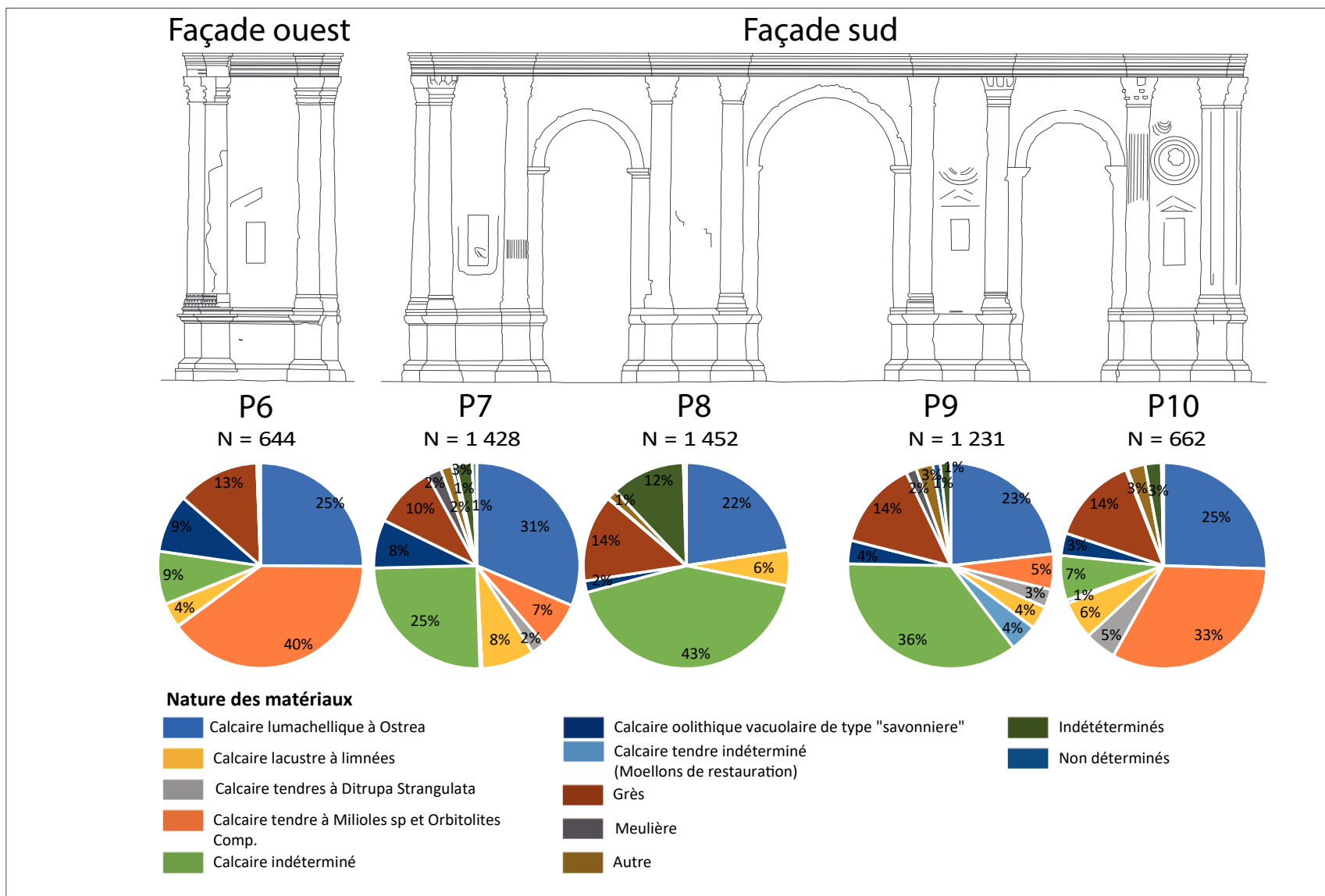
% origine (nb)

% Restauration (nb)

%ND (nb)



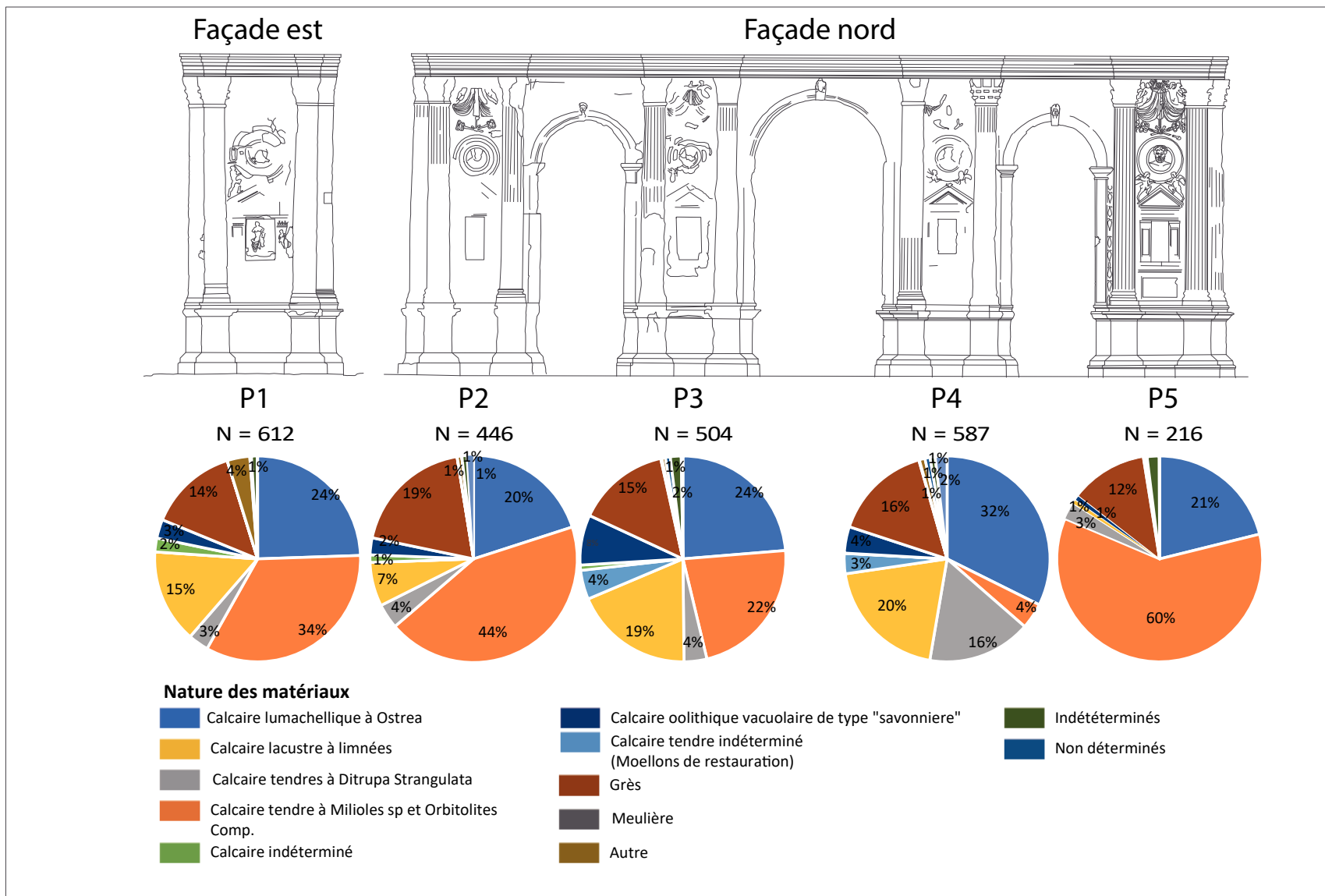


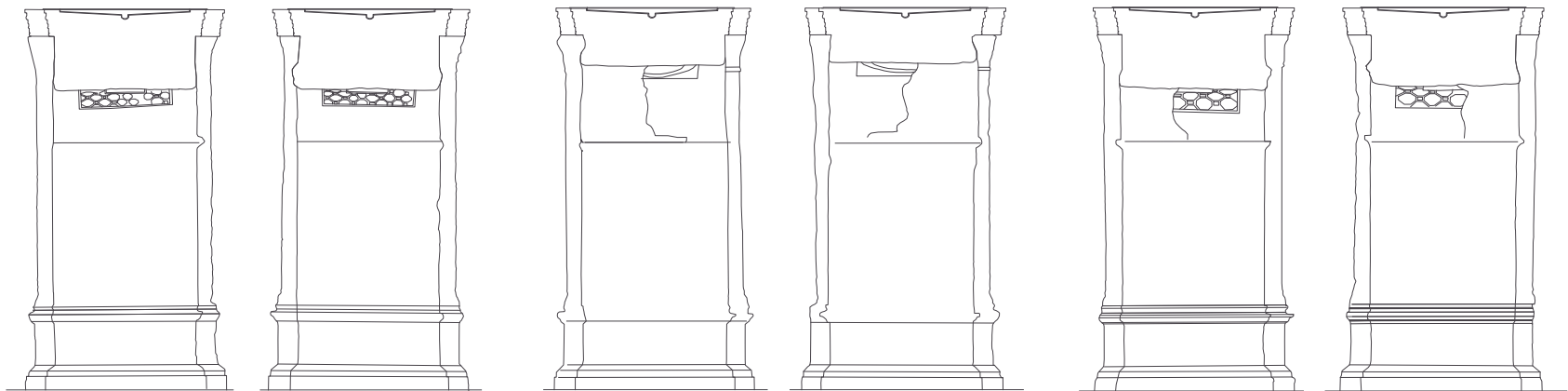


Annexe 22. Tableau de quantification des matériaux en œuvre rapportés à leur surfaces (m<sup>2</sup>)

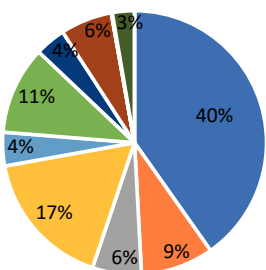
	Calcaire dur à Millioles et Cérithes	Calcaire lumachelitique à Ostrea	Calcaire tendre à Millioles sp et Orbitolites	Calcaire tendres à Ditrupa Stragulata	Calcaire lacustre à limnées	Calcaire tendre indéterminé (Moellons de restauration)	Calcaire indéterminé	Calcaire oolithique vacuolaire de type savonniere	Grès	Meulière	Autre	Non déterminés	Indéterminés	Origine (m <sup>2</sup> )	Restauration (m <sup>2</sup> )	ND (m <sup>2</sup> )	% origine (m <sup>2</sup> )	% Restauration (m <sup>2</sup> )	%ND (m <sup>2</sup> )	N
Porte complète	110,8	93,4	11,5	26,7	14,8	53,9	25,2	39,3	3,1	4,5	14,7	59,0	1,6	225,9	175,8	13,7	54,4%	42,3%	3,3%	10945
Facade nord	32,2	46,3	7,9	10,9	3,7	1,4	4,9	19,1	0,1	0,9		1,4	0,5	61,0	65,3	3,4	47,0%	50,4%	2,6%	1734
Facade sud	24,8	11,8	2,4	5,3	1,2	22,4	4,5	12,3	1,6	9,6	0,4	4,5	1,4	46,5	54,2	1,2	45,6%	53,2%	1,2%	4751
Facade E - Pylone 1	7,9	10,8	1,0	4,7		0,7	1,0	4,5		1,1	0,1	0,3		21,0	10,4	0,7	65,4%	32,3%	2,3%	612
Pylone 2	6,2	13,5	1,2	2,1		0,4	0,8	5,9		0,2		0,2	0,3	19,0	11,8	1,3	59,2%	36,8%	4,0%	446
Pylone 3	7,7	7,4	1,2	6,1	1,5	0,3	2,6	4,8	0,1	0,2	0,2	0,6	0,1	23,3	8,8	0,5	71,5%	26,9%	1,6%	504
Pylone 4	10,4	1,3	5,2	6,4	1,0	0,0	1,3	5,0		0,3	0,3	0,3	0,6	17,0	13,6	1,5	53,0%	42,3%	4,6%	587
Pylone 5	7,4	21,0	0,9	0,2		0,0	0,3	4,2		0,1		0,7		2,8	32,4	0,1	7,9%	92,0%	0,2%	216
Facade W- Pylone 6	7,7	12,1		1,2		2,6	2,8	4,0		0,1				4,7	25,7	0,3	15,2%	84,0%	0,8%	644
Pylone 7	8,1	1,9	0,6	2,1	0,1	6,5	2,0	2,5	0,6	0,4	0,2	0,7	0,2	12,1	13,5	0,3	46,8%	52,1%	1,0%	1428
Pylone 8	5,3			1,3		10,1	0,4	3,2		0,4		2,7	0,1	6,5	16,5	0,6	27,4%	69,9%	2,7%	1452
Pylone 9	6,0	1,4	0,7	0,9	1,1	9,2	0,9	3,6	0,4	0,7	0,3	0,4		9,0	16,6	0,0	35,2%	64,7%	0,1%	1231
Pylone 10	7,1	9,1	1,4	1,7	0,1	2,0	1,0	3,9	0,1	0,8		0,7	0,1	19,1	8,4	0,3	68,7%	30,3%	1,0%	662
Pylone 11	184,5	7,9	2,4	1,6		1,7		6,9	0,1			1,3	0,5	15,9	5,3	2,7	66,8%	22,1%	11,2%	458
Pylone 12	9,6	2,1	1,4	4,0	1,0	2,6	0,9	1,5				0,6		16,1	5,9	1,8	67,6%	24,7%	7,7%	506
Pylone 13	8,7	3,3		3,3	0,9	2,6	0,3	0,8	0,1			2,5		13,8	8,4	0,4	61,2%	37,2%	1,6%	363
Pylone 14	5,7	2,3	2,9	2,1	0,3	3,4	0,4	1,5			0,2	0,8	0,9	8,8	10,6	0,9	43,4%	52,1%	4,5%	486
Pylone 15	8,3	3,3	3,0	2,1		4,2		1,0			13,0	0,9		9,5	0,2		52,2%	42,8%	4,9%	635
Pylone 16	7,9	8,5		2,0	0,3	2,3	1,5	1,7		0,1		0,3		8,1	16,4		33,0%	67,0%		419



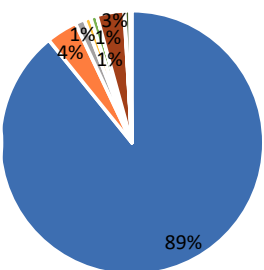




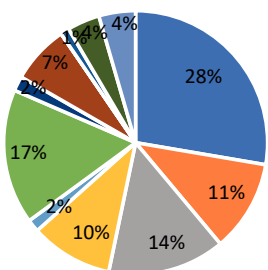
**P12**  
N = 506



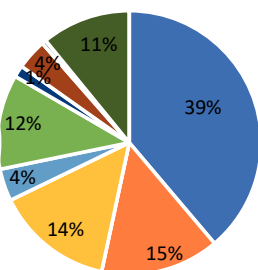
**P11**  
N = 458



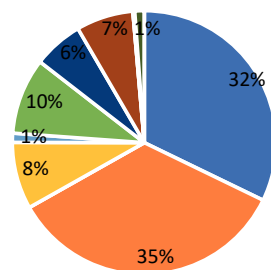
**P14**  
N = 486



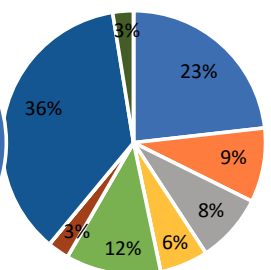
**P13**  
N = 363



**P16**  
N = 419



**P15**  
N = 635

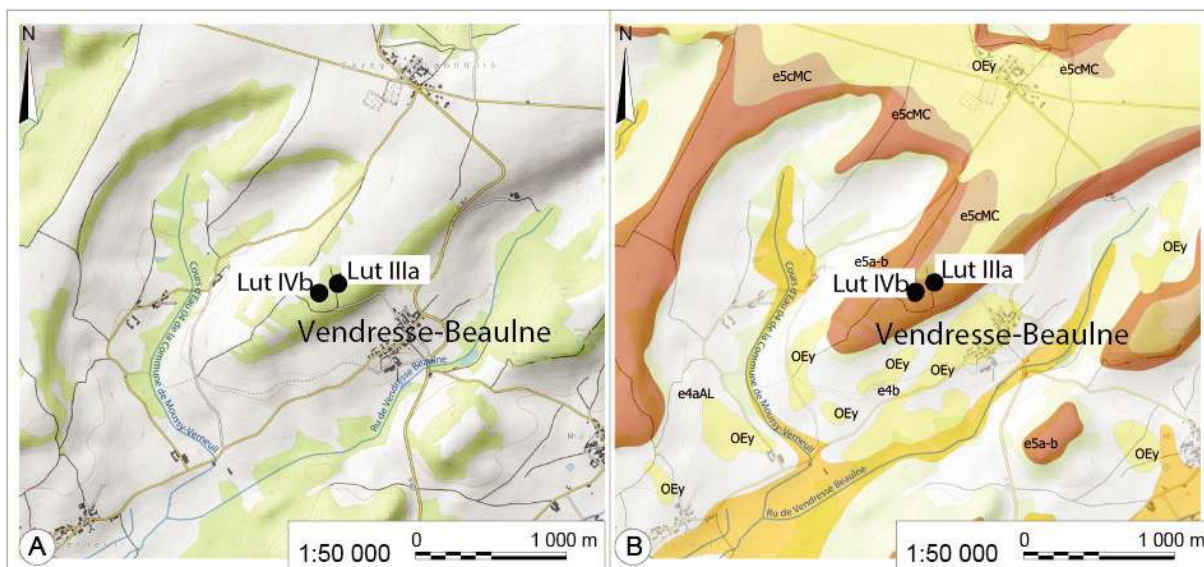


**Nature des matériaux**

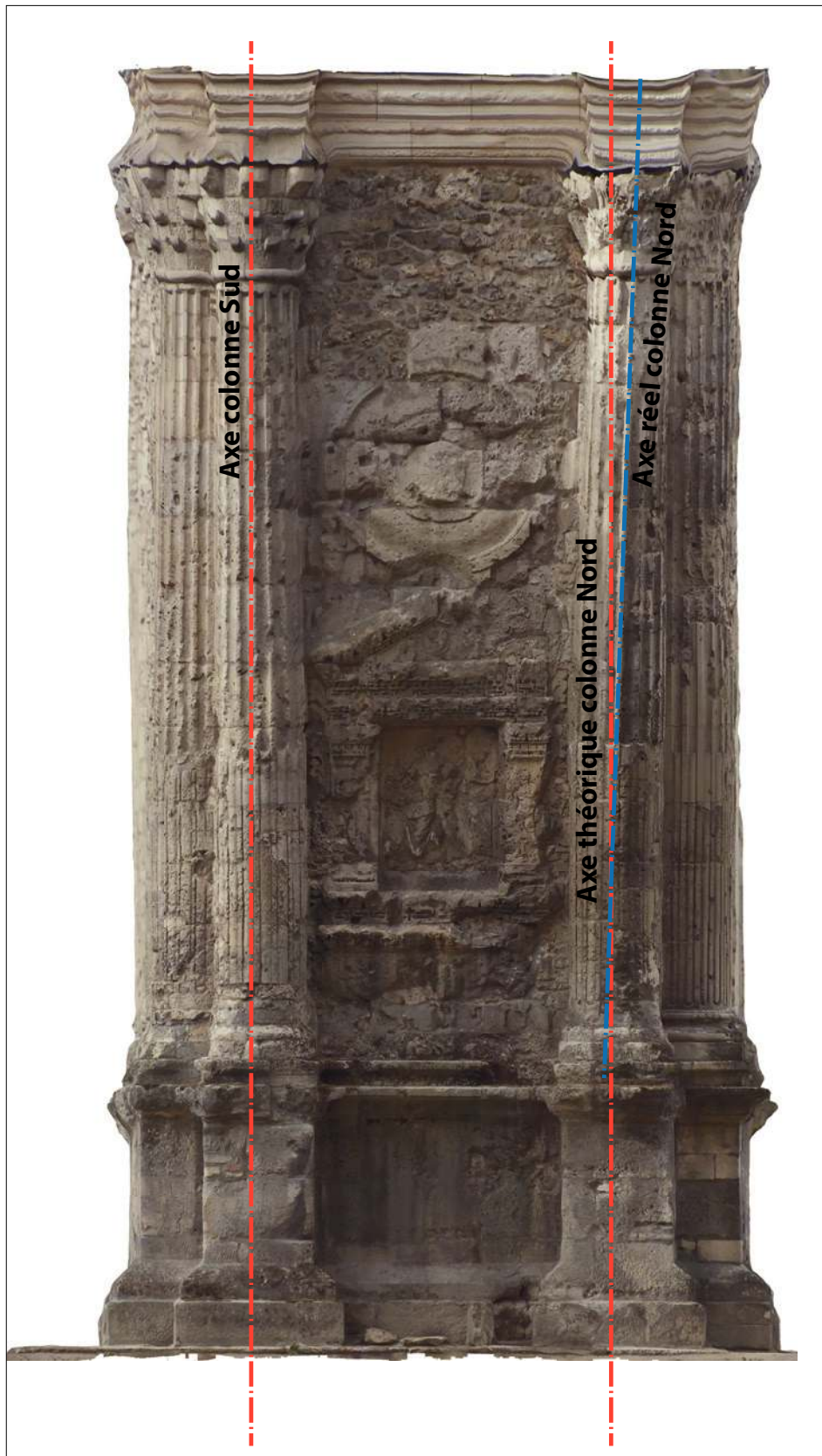
- Calcaire lumachellique à Ostrea
- Calcaire lacustre à limnées
- Calcaire tendres à Ditrupa Stragulata
- Calcaire tendre à Miliolites sp et Orbitolites Comp.
- Calcaire indéterminé
- Calcaire oolithique vacuolaire de type "savonniere"
- Calcaire tendre indéterminé (Moellons de restauration)
- Grès
- Meulière
- Autre
- Indéterminés
- Non déterminés

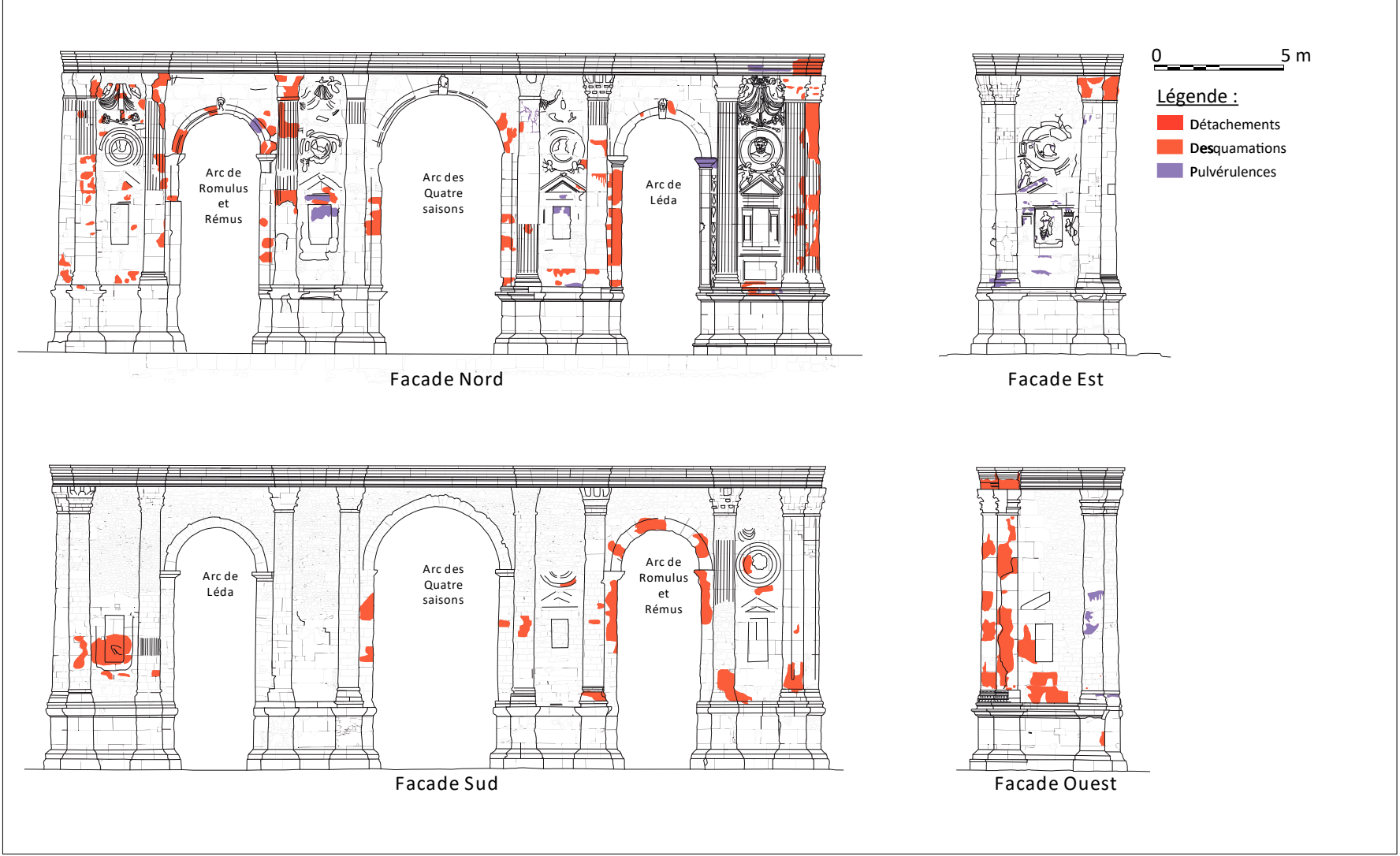


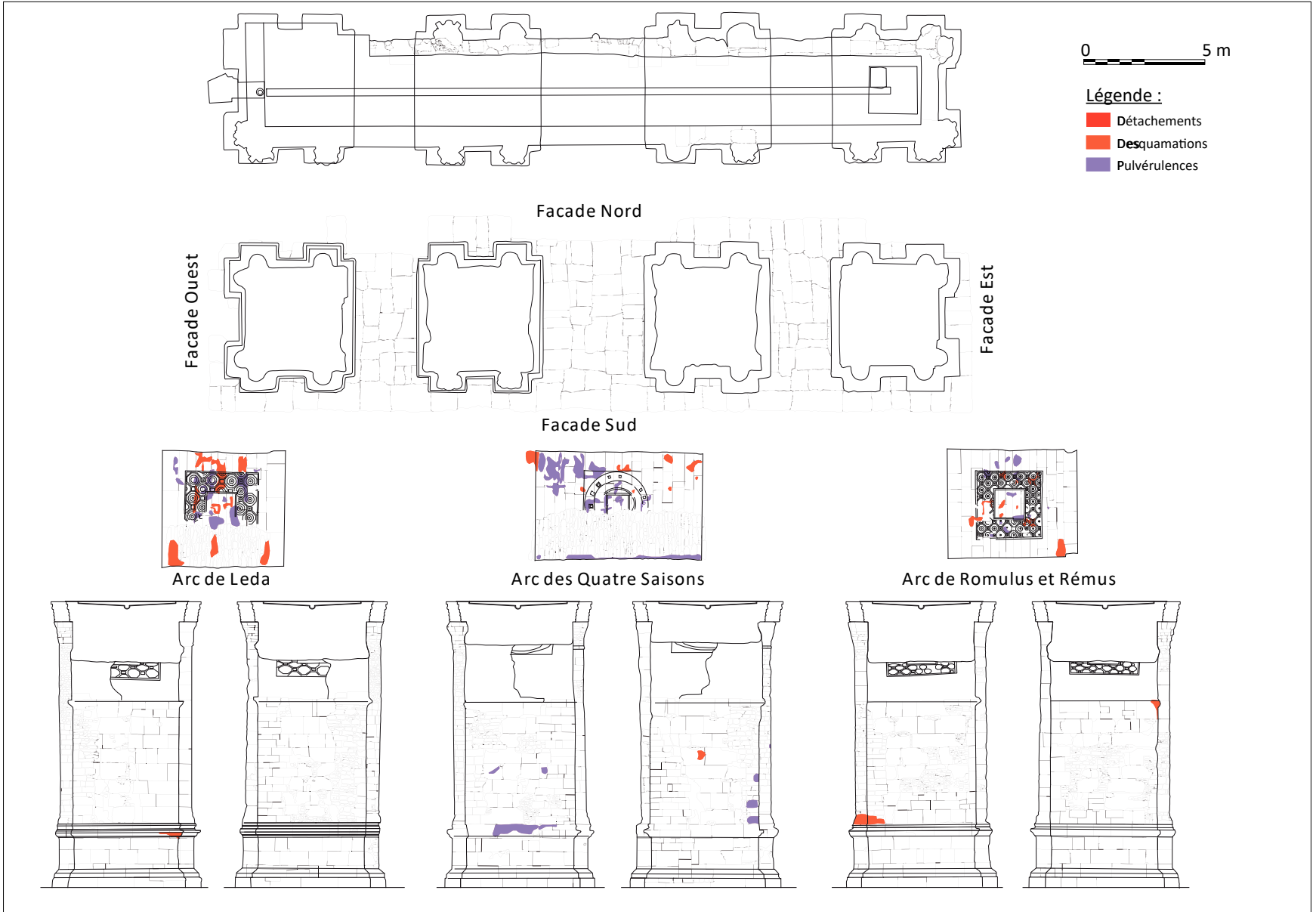
## Annexe 26. Vendresse-Beaulne - Origine des échantillons



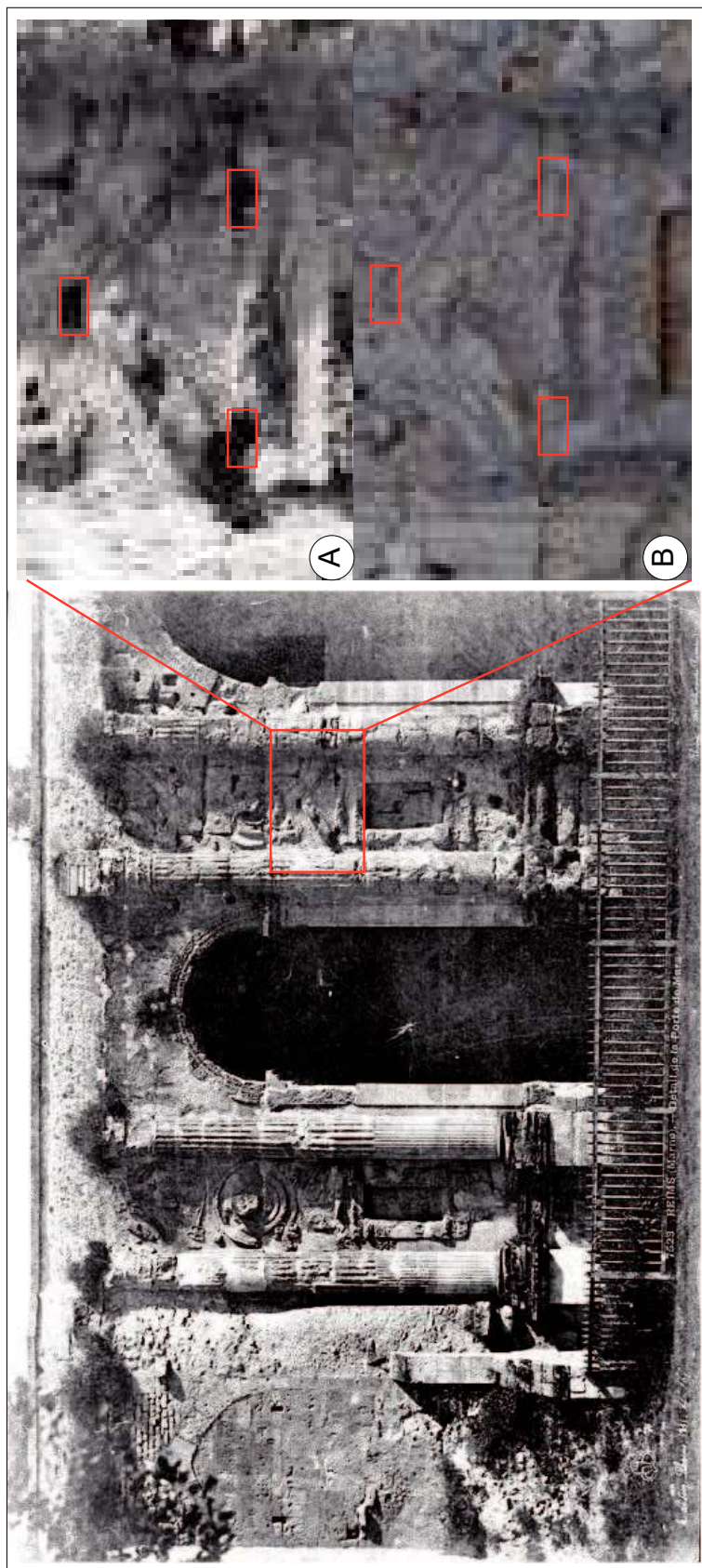
**Annexe 27. Écartement apparent vers le nord de la colonne située à l'angle de la pile est du monument**





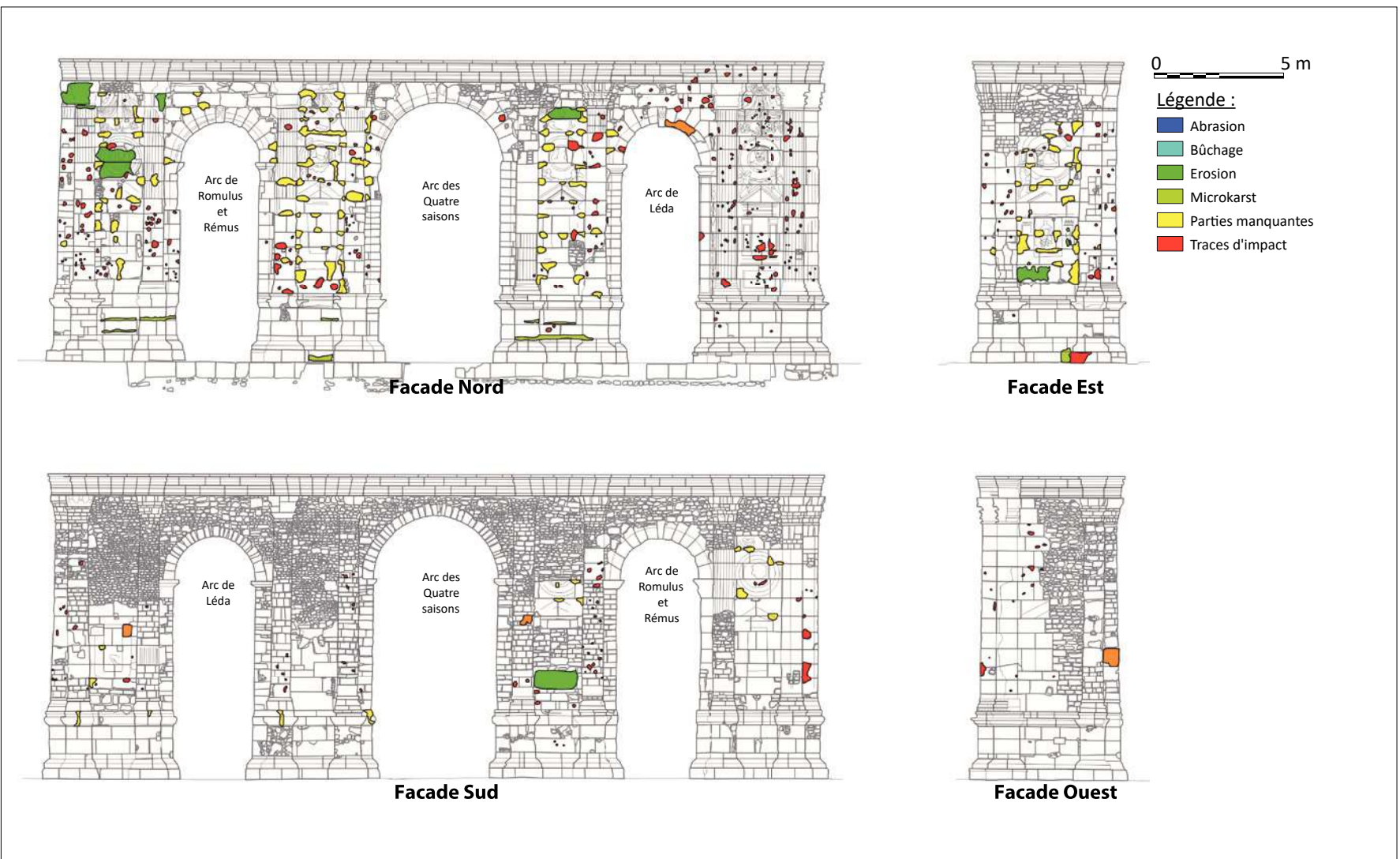


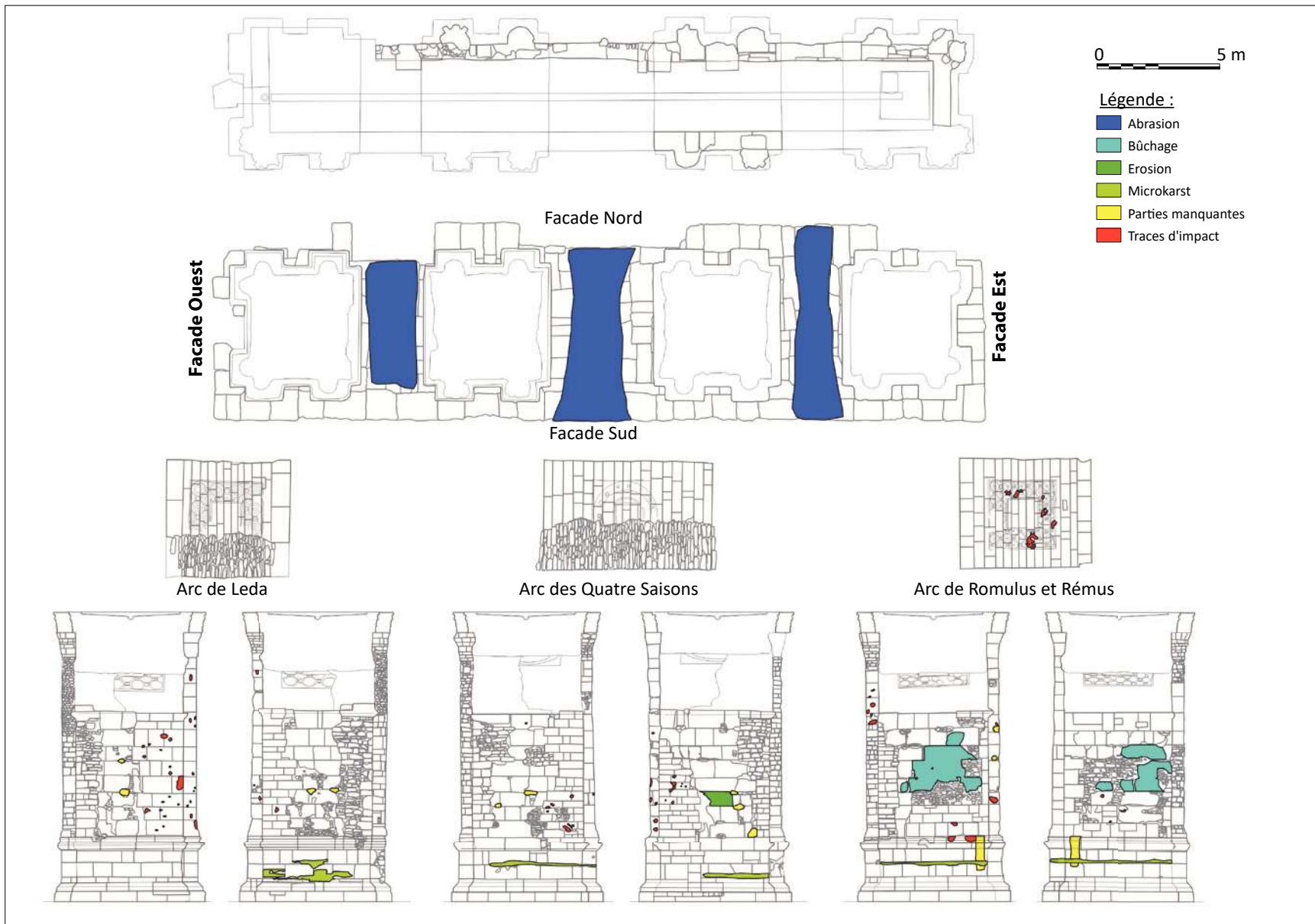
**Annexe 29. Les cavités de prédation des agrafes de fer antiques et leurs remplissages au cours du XX<sup>e</sup> siècle (photographie Martin-Sabon, 1851, Ministère de la Culture)**



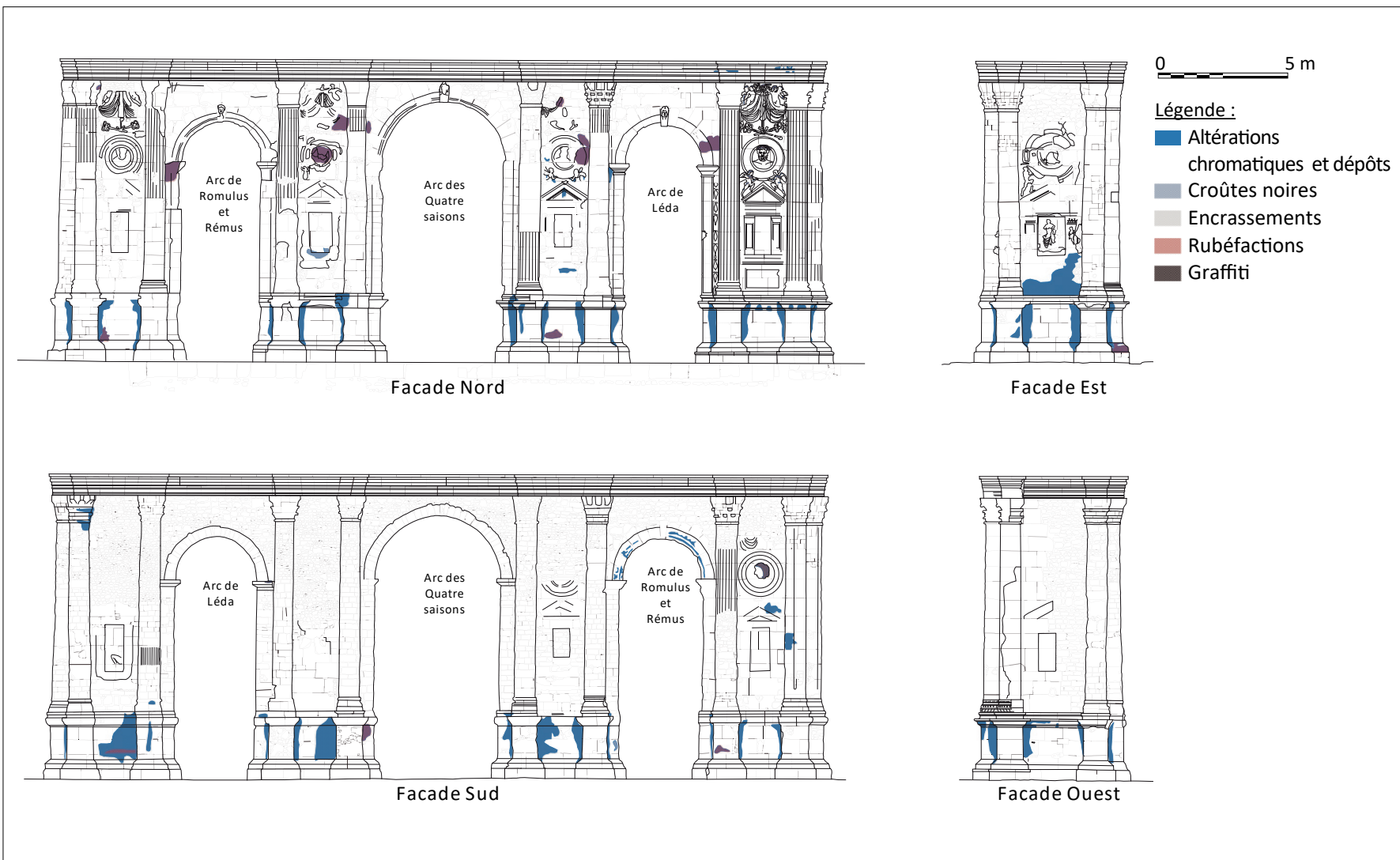


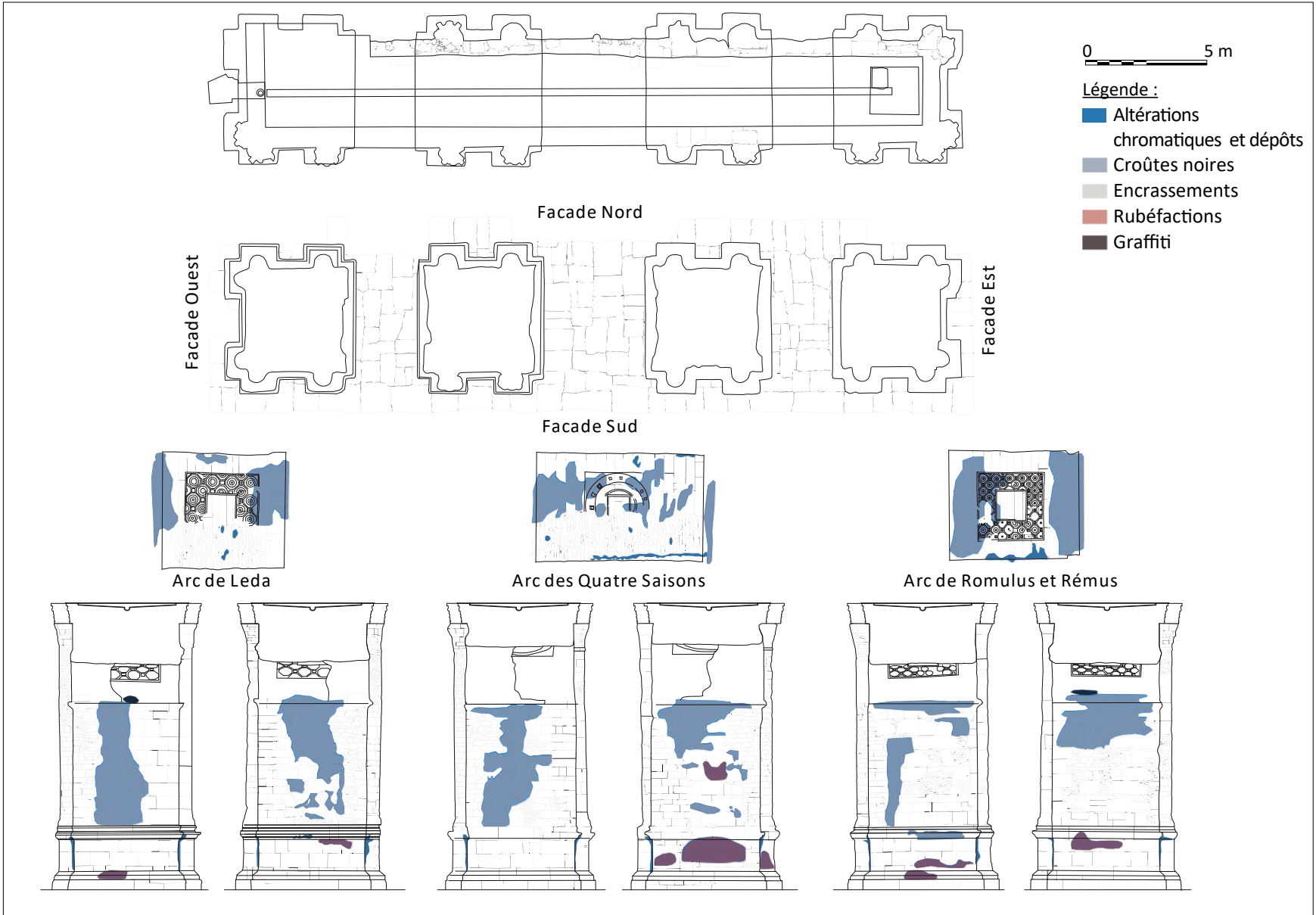
## Annexe 30. Altérations - Cartographie des pertes de matières

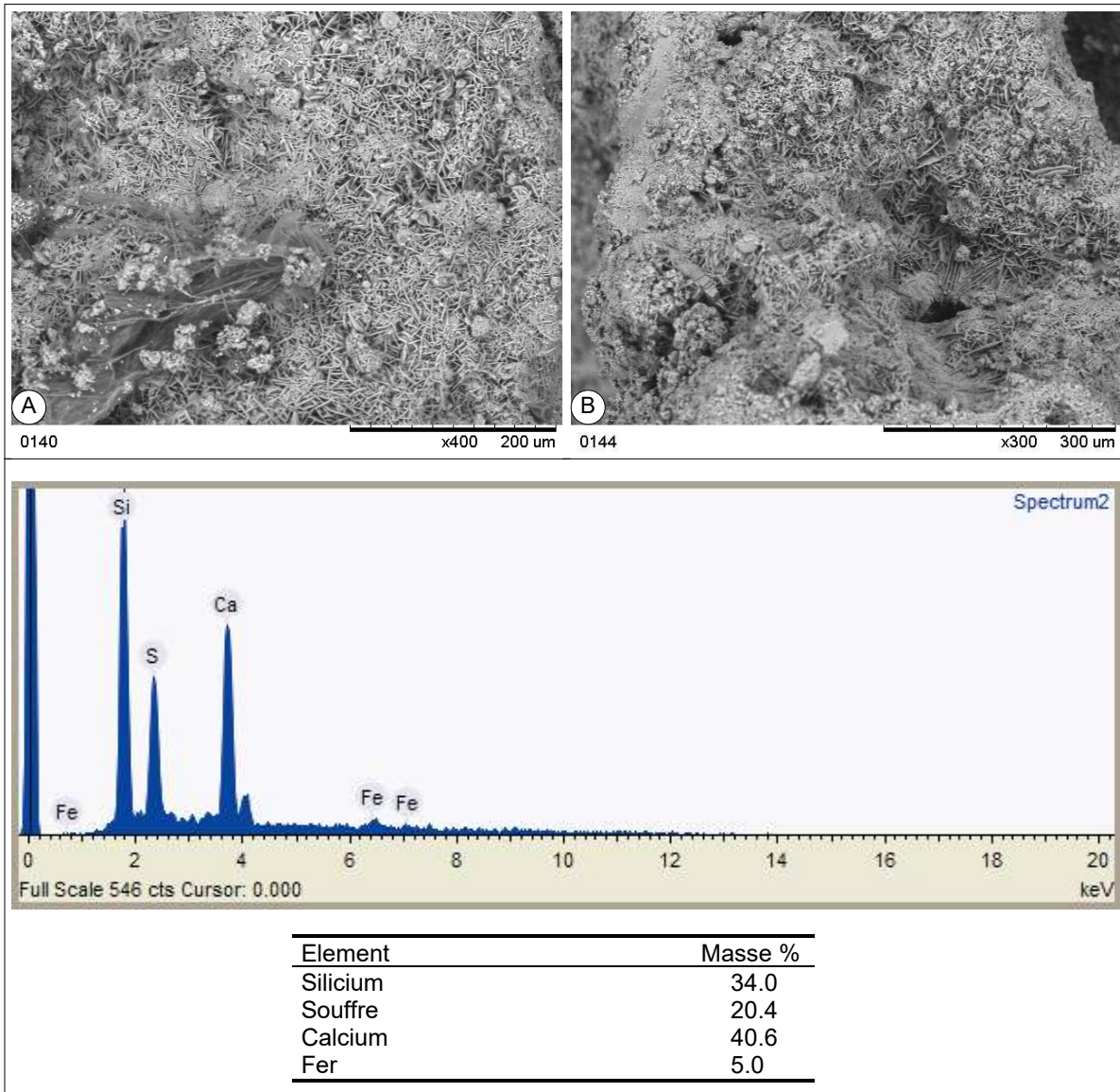


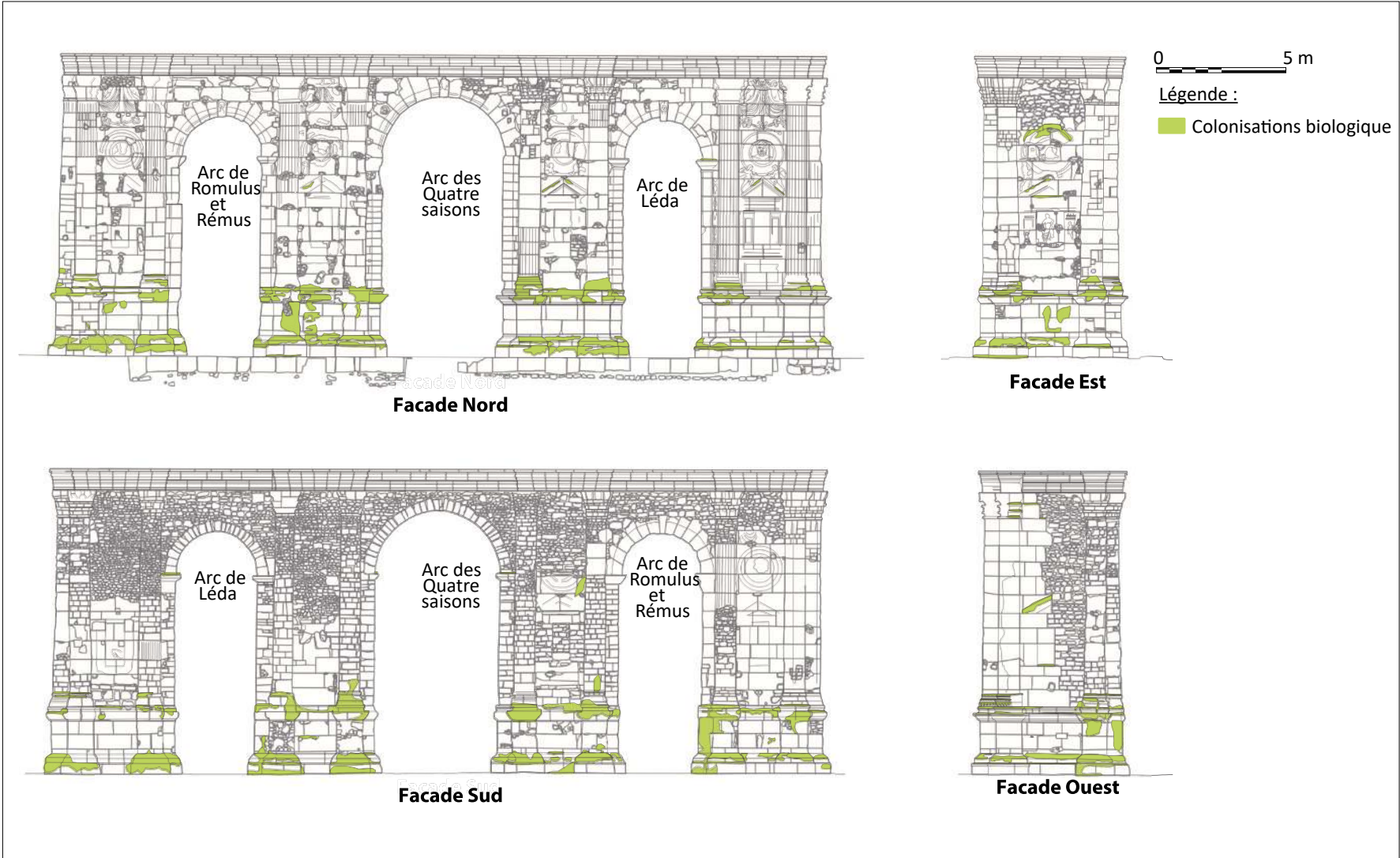


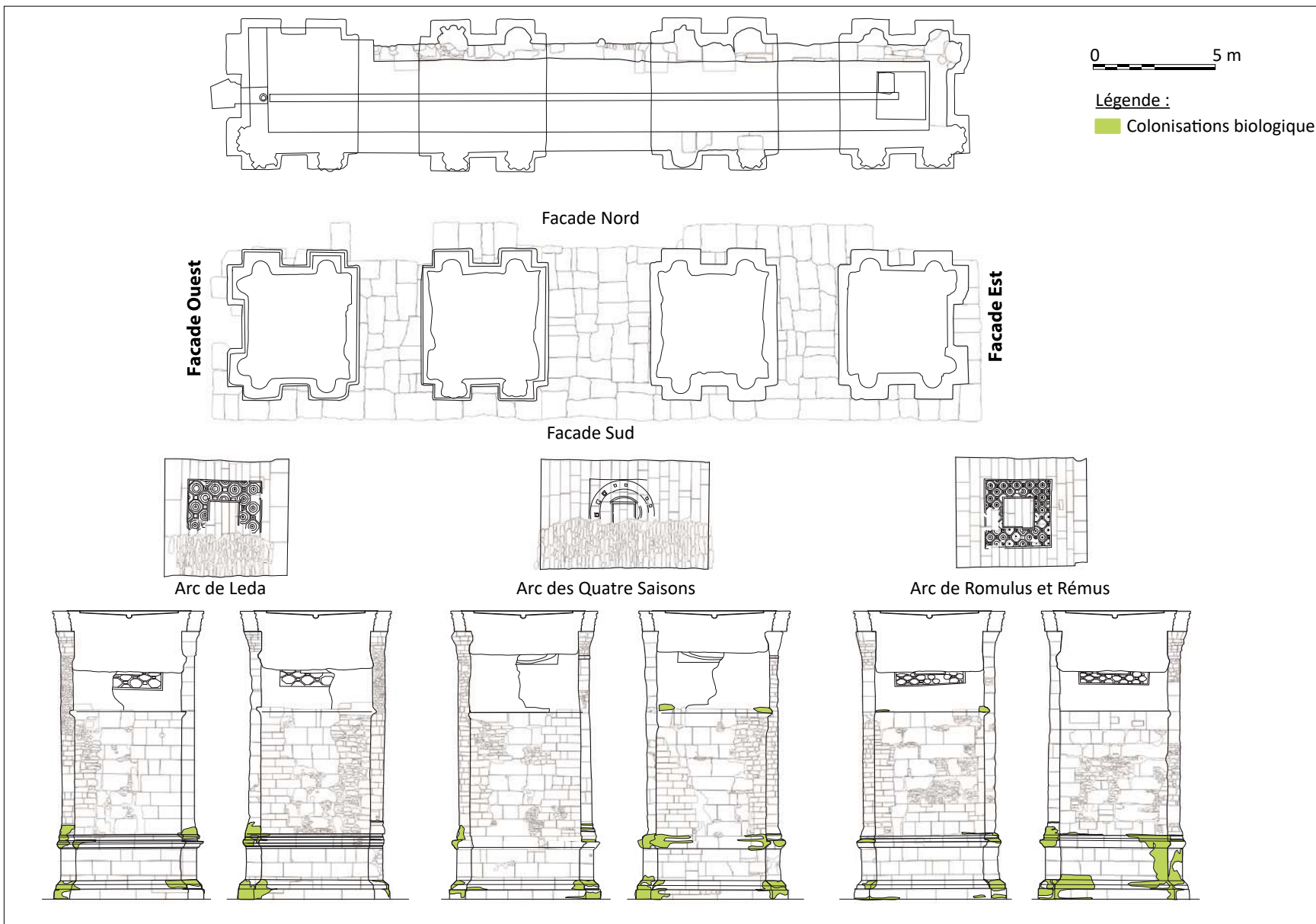
## Annexe 31. Altérations - Cartographie des altérations chromatiques et des dépôts



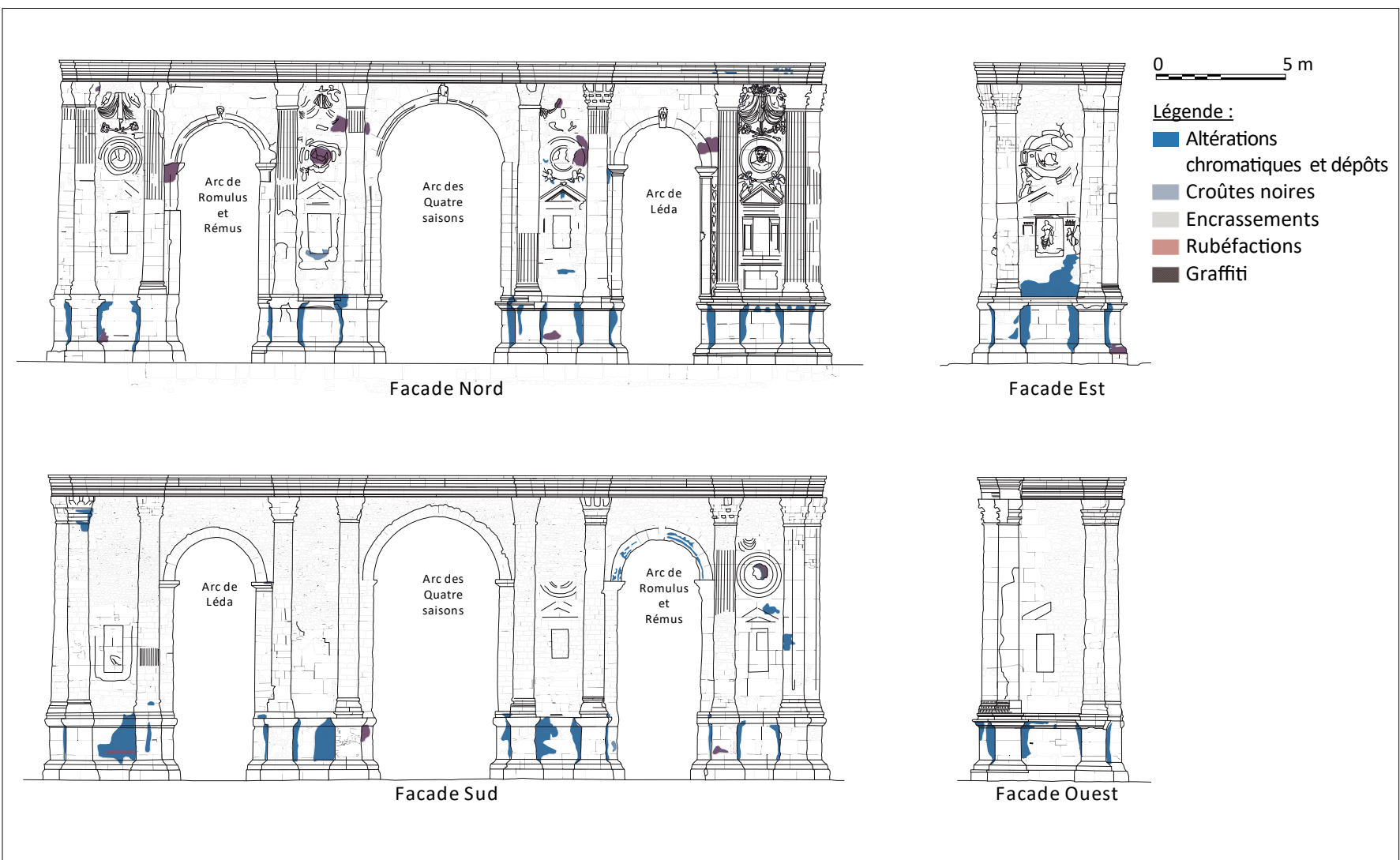


**Annexe 32. Observation MEB des croûtes noires et semi quantification à la microsonde ionique de leurs compositions**



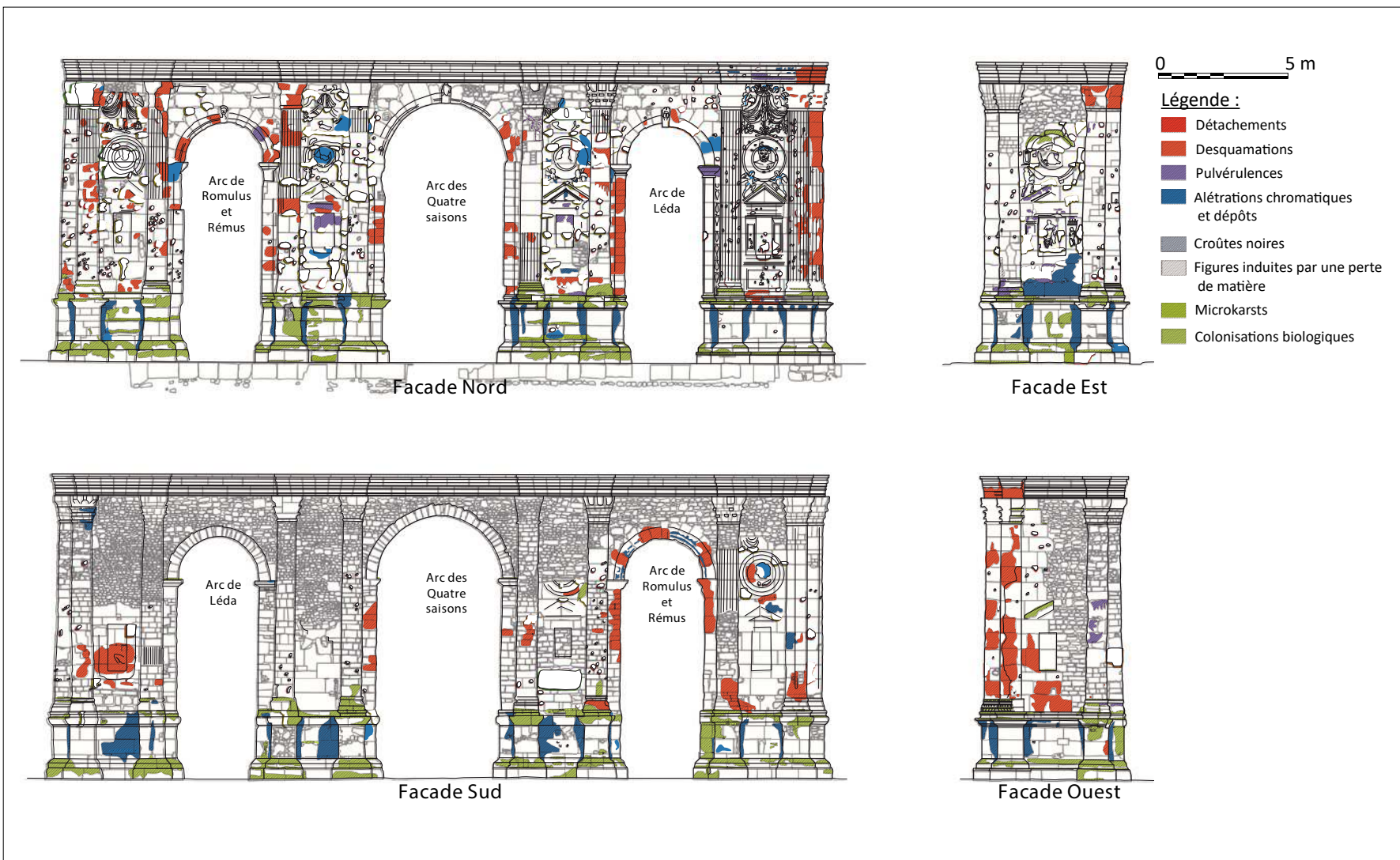


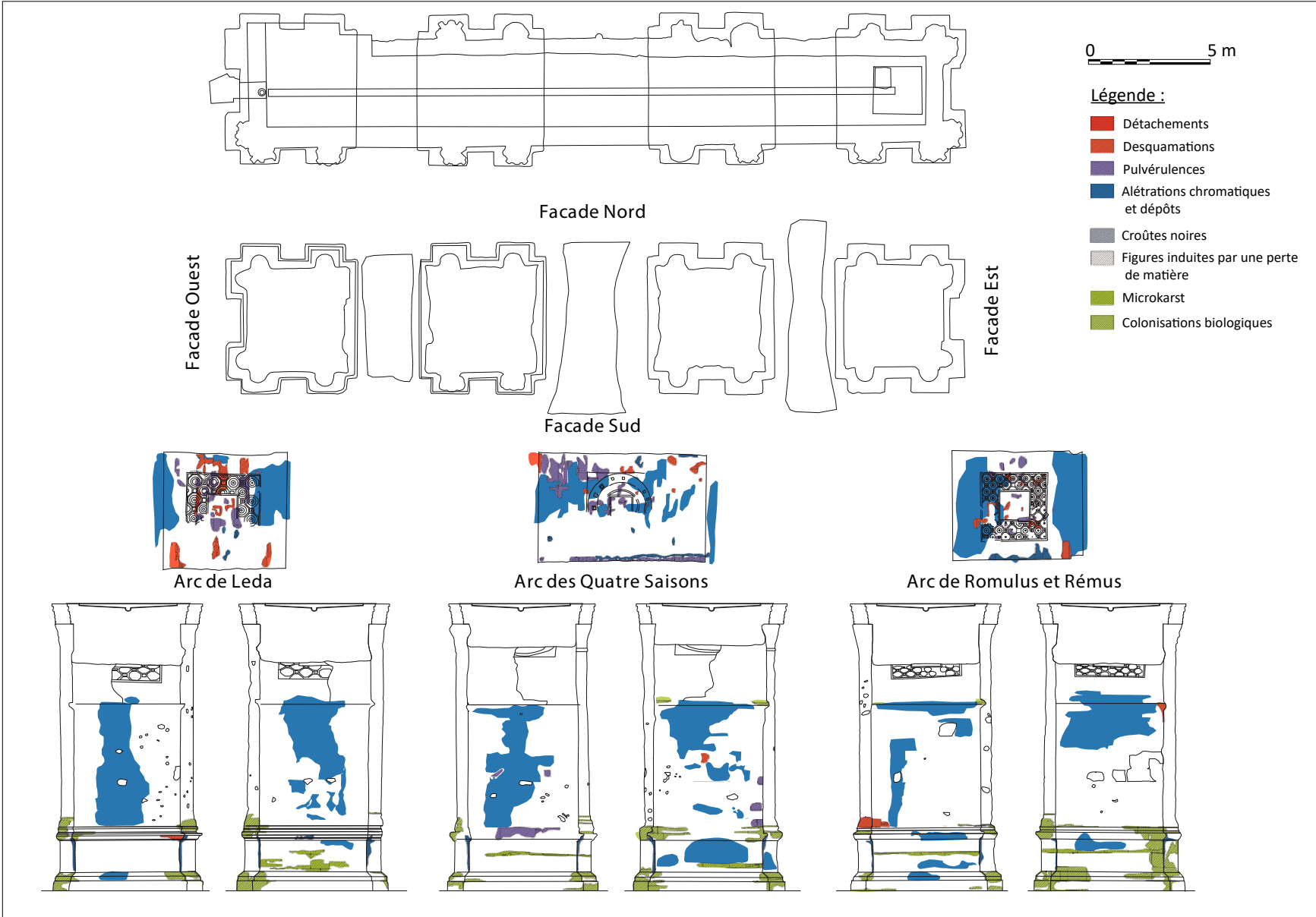
## Annexe 34. Altérations - Cartographie des altérations chromatiques et des dépôts





### Annexe 35. Altérations - Cartographie des altérations causées par la présence d'eau dans ou sur la pierre





**Annexe 36. Tableau de synthèse des altérations relevées sur les façades de la Porte de Mars (les surfaces mesurées sont exprimées en m<sup>2</sup>)**

		Abrasions	Rubéfiactions	Altérations chromatiques	Bûchages	Colonisations biologiques	Croûtes noires	Dépôts	Desquamations	Encrassements	Erosions	Erosions différentielles	Fissures	Graffitis	Incisions - Prédations	Microkarst	Parties manquantes	Perforation	Pulvéulence	Impacts	
<b>Entablement</b>							1,4		1,4										1,0	1,2	
<b>Elevations</b>	<b>Voûtes</b>	<b>Clé de voutes</b>							0,3	0,1											
		<b>Voussoirs</b>					3,2		8,9	12,0										13,5	1,5
		<b>Archivolte</b>	0,3			0,3	2,6	0,1	4,7						2,1			0,6	0,1	1,6	
	<b>Colonnes et piédroits</b>	<b>Piédroits</b>	2,5	0,4	4,8	14,4	4,4	7,6	18,9	21,1	1,6	2,1		0,2	52,1		0,4	0,8	9,7	39,2	
		<b>Impostes</b>	0,1		0,7	0,2	0,1	0,9	6,1					0,5					1,0		
		<b>Chapiteaux</b>		0,2		1,9	0,1	2,1	9,4		1,5				1,4						0,2
		<b>Tambours</b>		3,0		3,6	1,5	1,0	39,6		0,6	0,7	0,5		26,8		0,6	0,5	2,2	84,7	
		<b>Bases</b>				19,0	0,6		5,3	0,3					1,5	0,1				0,9	1,9
	<b>Socle</b>	<b>Couronnement</b>		0,4	8,1	6,6	2,5	2,4		0,2	0,7				1,0		0,6	0,4	0,6	0,5	
<b>Corps</b>		8,0	10,3		80,5	51,8		2,1	0,6					1,9	14,7	0,1		1,0	1,9		
<b>Crépis</b>			2,5		21,1	13,5		0,4	0,1						3,3	0,1		0,1	0,3		
<b>Dallage - Sol</b>		14,94																			

Nom	Description	Provenance / Origine	Position archi
BART b	Calcaire lacustre à Limnées (antique)	Bloc issu d'une fouille - Bezannes - contexte funéraire	Soubassement
BART a	Calcaire lacustre à Limnées (terrain)	Bloc collecté à Pargnan - Soissonnais (Aisne)	équivalent soubassement
LIM - Bez	Calcaires lacustre à Limnées	Bloc issu d'une fouille - Bezannes - contexte funéraire	Turmel, 2014
LIM - Poi	Calcaires lacustre à Limnées	Prélevé sur une maçonnerie effondrée à Poilly - Tardenois	Turmel, 2014
LIM - Par	Calcaires lacustre à Limnées	Bloc 'erratique' collecté à Verneuil - Tardenois	Turmel, 2014
LIM - Ver	Calcaires lacustre à Limnées	Bloc 'erratique' collecté à Verneuil - Tardenois	Turmel, 2014
CER - Gra	Calcaires à cérithes	Bloc issu d'une fouille mur gallo-romain - Rue Saint Symphorien	Thèse Turmel
Lut IV c	calcaires tendre à milioles (et rares lits de cérithes)	Carottage de la pile Ouest de la Porte de Mars	Restaurations
Lut IV b	Calcaire granulaire à Milioles	Carrière à ciel ouvert de Vendresse Baulne - Soissonnais (Aisne)	Restaurations
Lut IV a	Calcaire microgranulaire à Milioles (sommets pile ouest)	Fragment du sommet de l'attique restauré sous la direction de N. Brunnette	Restaurations
Lut III d	Calcaire massif à milioles et cérithes (Antique)	Soubassement antique de la porte de Mars	Soubassement
Lut III c	Calcaire fin et massif à rares milioles (carrière)	Entrée de carrière souterraine de Colligis - Soissonnais (Aisne)	Equivalent soubassement
Lut III b	Calcaire massif à milioles et cérithes (Carrière)	Entrée de carrière souterraine de Colligis - Soissonnais (Aisne)	Equivalent soubassement
Lut III a	Calcaire massif à milioles et cérithes (Carrière)	Carrière à ciel ouvert de Vendresse Baulne - Soissonnais (Aisne)	Equivalent soubassement
MIL - BraL	Calcaires à Milioles (carrière Saint-Thierry)	Carrière souterraine d'Hermonville au "Mont chatté"t - Massif de Saint-Thierry	Turmel, 2014
MIL - CouL	Calcaires à Milioles (Carrière Courville)	Carrière souterraine de courville - banc de Liais -	Turmel, 2014
MIL - HerL	Calcaires à Milioles (carrière Saint-Thierry)	Carrière souterraine d'Hermonville au "Mont chatté" - Massif de Saint-Thierry	Turmel, 2014
Lut II	Calcaire tendre à milioles	Carottage de la pile Ouest de la Porte de Mars	Restaurations
Lut I e(H)	Calcaire à milioles et Orbitolites	Carrière souterraine de courville	Thèse Huby
COUR (SE)		Carrière souterraine de courville	Eyssautier et al., soumis
Lut I d	calcaire lumachellique à Milioles Orbitolites et huitres	Carrière souterraine de Veslud - Banc à Vérins - Soissonnais (Aisne)	Equivalent élévations
Lut I c	Calcaire tendre à Huitres et mollusques	Carrière souterraine de Pargnan - Banc à Vérins - Soissonnais (Aisne)	Equivalent élévations
Lut I b	Calcaire tendre à Ditrupa et Orbitolites	Carrière souterraine de Veslud - Banc à Vérins - Soissonnais (Aisne)	Equivalent élévations
Lut I a	Calcaire tendre à Ditrupa et rares mollusques	Carrière souterraine de Pargnan - Banc à Vérins - Soissonnais (Aisne)	Equivalent élévations
DIT - Bra1	Clacaires à Ditrupa	Carrière à Ciel ouvert "Les boules" à Branscourt - Massif de Saint-Thierry	Turmel, 2014
DIT - Bra2	Clacaires à Ditrupa	Carrière à Ciel ouvert "Les boules" à Branscourt - Massif de Saint-Thierry	Turmel, 2014
DIT - Her1	Clacaires à Ditrupa	Carrière à Ciel ouvert "Le Mont Chatté" Hermonville - Massif de Saint-Thierry	Turmel, 2014
DIT - Her2	Clacaires à Ditrupa	Carrière à Ciel ouvert "Le Mont Chatté" Hermonville - Massif de Saint-Thierry	Turmel, 2014
DIT - Cou	Clacaires à Ditrupa	Carrière à ciel ouvert "Le Bois Balai" à Courville -	Turmel, 2014
DIT - Auy	Clacaires à Ditrupa	Bloc 'erratique' collecté en bord de champ à Aubigny	Turmel, 2014
DIT - Pro	Clacaires à Ditrupa	Carrière souterraine de Prouilly - "La Husse" - Banc à Vérins	Turmel, 2014
SAV	calcaire à oolithes vacuolaires	Carrières souterraine du secteur de Savonnière	Restaurations XIXe siècle
SAV (h)	calcaire à oolithes vacuolaires	Carrières souterraine du secteur de Savonnière	Huby, 2021
SAV (SE)	calcaire à oolithes vacuolaires	Carrières souterraine du secteur de Savonnière	Eyssautier et al., soumis

## Annexe 38. Synthèse des paramètres mesurés pour les calcaires de construction du pays rémois (Turmel, 2014)

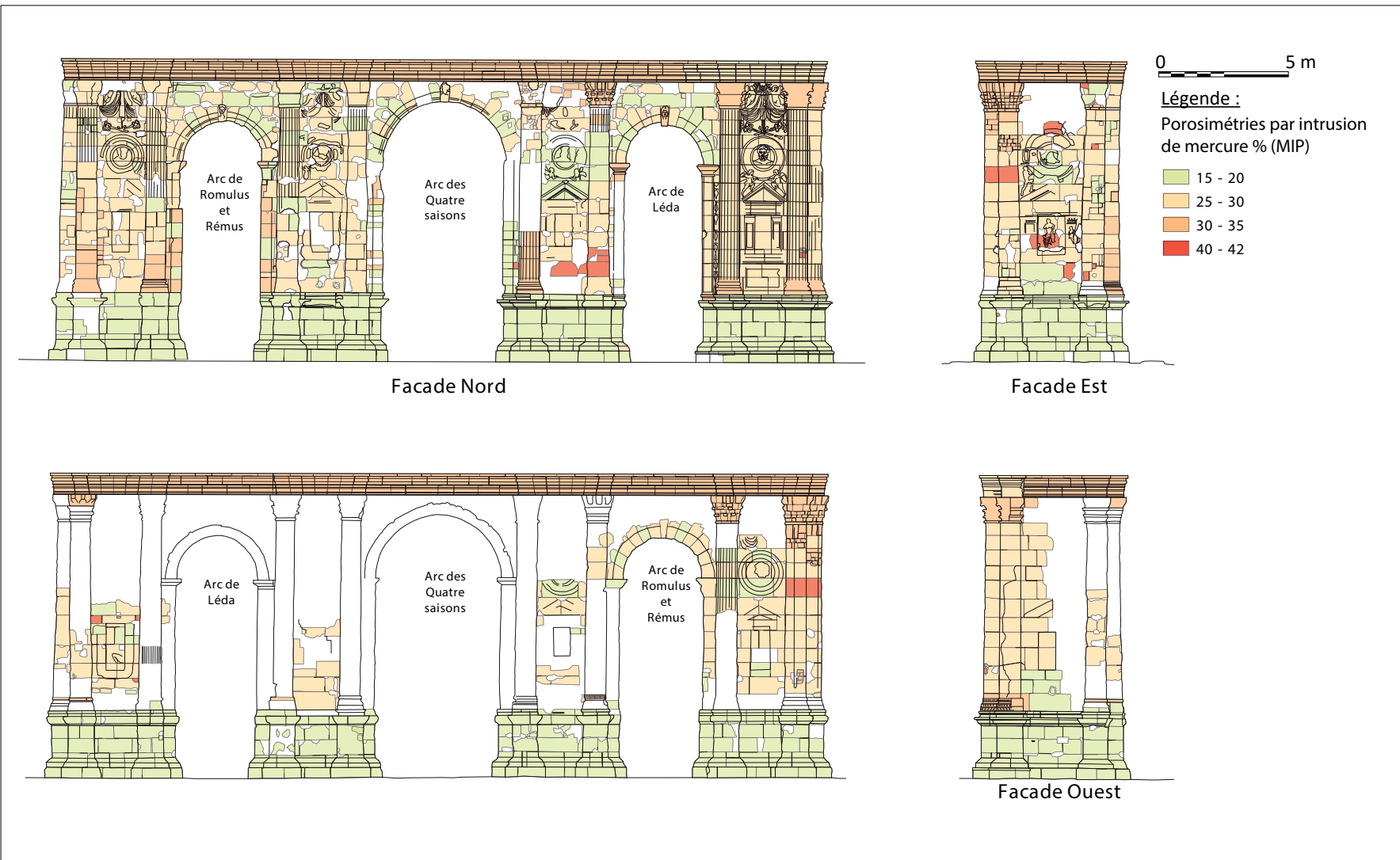
		Calcaires à Ditrupa							
		Bra2	Bra1	Her1	Cou	Auy	Her2	Pro	
Lames minces (porosité)	intergranulaire	micrite (<10 µm jusqu'à 500 µm)			Micritesparite(<10 µm)		Micriteet sparite(<10 µm à 250 µm)		
	intragranulaire	tubes de Ditrupa et loges de foraminifères souvent comblées (200 à 1000 µm)			tubes deDitrupaet loges de foraminifères souvent comblé (200 à 1000 µm)		tubes deDitrupaet loges de foraminifères souvent comblée (200 à 1000 µm)		
	moldique	bivalves (1000 µm) et foraminifères (< 10 µm)			bivalves (1000 µm) et foraminifères (< 10 µm)		bivalves (1000 µm) et foraminifères (< 10 µm)		
Porosité totale à l'eau	N <sub>t</sub> (%)	27,4 ± 4,8			23,3 ± 6		17,7 ± 6		
	S <sub>48</sub> (%)	67			67	80	67		
Porosimétrie au mercure	N <sub>Hg</sub> (%)	29,9 ± 6,5			26,7 ± 10,6	16,1 ± 2	16,6 ± 6		
	description réseau poreux	multimodal, mésoporeux et macroporeux				monomodal à bimodal, surtout mésoporeux et peu microporeux			
	R <sub>m</sub> (µm)	0,1 à 5 µm voire 10 µm				0,17	0,37	0,17	
Capillarité	C1 (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	141,5 ± 84			37 ± 14	27 ± 4,3	18 ± 12		
	C2 (m.s <sup>1/2</sup> )	0,0006 ± 2,8.10 <sup>-5</sup>			0,00025 ± 2,8.10 <sup>-5</sup>		0,00018 ± 7,8.10 <sup>-5</sup>	0,00025 ± 2,8.10 <sup>-5</sup>	
Evaporation	F (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	-0,02 ± 2.10 <sup>-3</sup>	-0,07 ± 2.10 <sup>-2</sup>	-0,0045 ± 2.10 <sup>-3</sup>	-0,014 ± 2.10 <sup>-3</sup>			-0,02 ± 2.10 <sup>-3</sup>	
	Sc (%)	34,6 ± 4,5	17,5 ± 3			34,6 ± 4,5			
	T <sub>Sc</sub> (h)	82 ± 7	170 ± 72	467 ± 35	170 ± 72	82 ± 7		47 ± 31	

		Calcaires à milioles			Calcaire à cérithes	Calcaires à Limnées			
		BraL	CouL	HerL	Gra	Poi	Par	Bez	Ver
Lames minces (porosité)	intergranulaire	+++ micrite (<10 µm)			+++ (50 à 1000 µm)	micrite (<10 µm)			
	intragranulaire	+ loges foraminifères (BraL uniquement 10 à 100 µm)			+ (loges milioles 50 µm)	500 µm dans hydrobies (surtout Poi) et oogones de Chara			
	moldique	bivalves (500 µm et plus)				Ostracodes (20 à 50 µm), hydrobies et limnées (500 µm)			
Porosité totale à l'eau	N <sub>t</sub> (%)	18,4 ± 1,3			33 ± 0,8	11,2 ± 1,3		16,6 ± 2,4	24 ± 3,7
	S <sub>4g</sub> (%)	87			71,5	63			
Porosimétrie au mercure	N <sub>Hg</sub> (%)	18,8 ± 2,4			30,8 ± 1,2	9,2 ± 0,7		14,9 ± 3,5	17,7 ± 4,2
	description réseau poreux	monomodal, limite entre microporeux et mésoporeux			monomodal, macroporeux	infraporeux et mésoporeux		bimodal, microporeux et infraporeux	
	R <sub>m</sub> (µm)	0,1			38,5	0,006 et 2,2 (et 43 pour Par)		0,03 (et 2,1 pour Bez, 40 pour Ver)	
Capillarité	C1 (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	25,0 ± 3,3			442 ± 232	7,4 ± 1,0			34 ± 1
	C2 (m.s-1/2)	0,00017 ± 1,7.10 <sup>-5</sup>			0,002 ± 7,10 <sup>-4</sup>	0,00004 ± 3,8.10 <sup>-5</sup>	0,00015 ± 1,3.10 <sup>-4</sup>	0,00004 ± 3,8.10 <sup>-5</sup>	0,0002
Evaporation	F (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	-0,02 ± 2.10 <sup>-3</sup>		-0,014 ± 2.10 <sup>-3</sup>	-0,002 ± 2.10 <sup>-3</sup>	-0,0045 ± 2.10 <sup>-3</sup>	-0,010 ± 2.10 <sup>-3</sup>	-0,07 ± 2.10 <sup>-2</sup>	
	Sc (%)	68,2 ± 4,8			17,3	30,2	52 ± 4,5		
	T <sub>Sd</sub> (h)	26,5 ± 1	40 ± 10	26,5 ± 1	168	290	25,6 ± 0,04	52 ± 4	

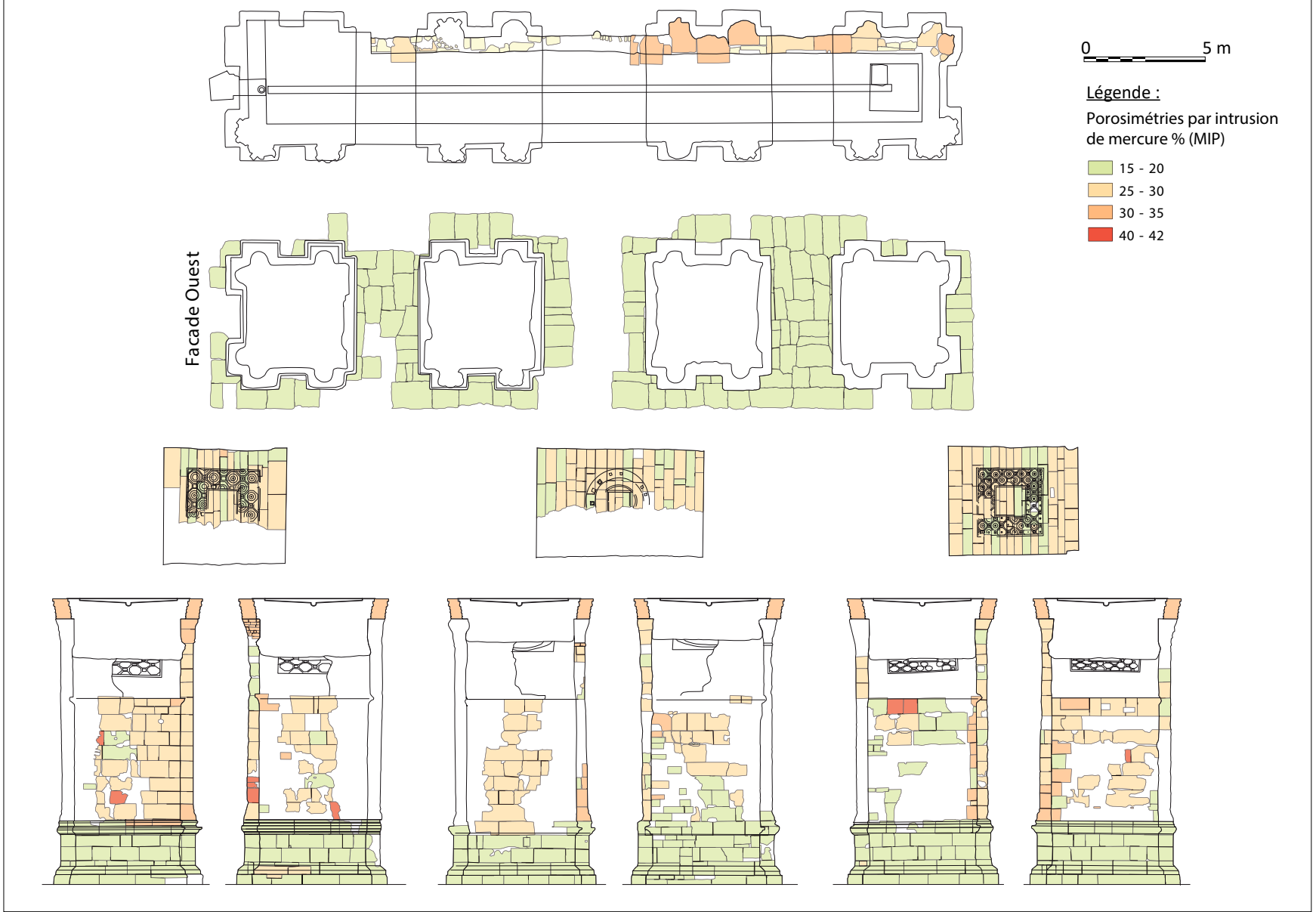
**Annexe 39. Tableau des valeurs de porosité totale à l'eau de ce travail et issus des études antérieures (Turmel, 2014)**

Nom	Porosité à l'eau					
	Nt		$\sigma$	N48 (%)	S48 (%)	Np (%)
BART b	26,3	±	8,1	13,72	64,0	12,6
BART a	10,4	±	1,3	6,85	64,0	3,6
LIM - Bez	16,6	±	2,4	9,9	59,7	6,7
LIM - Poi	9,9	±		6,1	61,8	3,8
LIM - Par	12,5	±	1,5	8,7	69,2	3,8
LIM - Ver	24,0	±	3,7	15	62,5	9,0
CER - Gra	33,0	±	0,8	23,6	71,5	9,4
Lut IV c	18,1	±	2,3	10,02	52,3	8,0
Lut IV b	26,7	±	0,6	11,46	41,9	15,2
Lut IV a	25,7	±	1,1	18,03	69,1	7,7
Lut III d	23,5	±	2,8	18,68	84,4	4,8
Lut III c	10,2	±	3,0	6,92	58,5	3,3
Lut III b	8,8	±	2,7	5,26	64,3	3,6
Lut III a	11,5	±	7,6	2,77	44,6	8,7
MIL - BraL	17,7	±	1,7	16	90,6	1,7
MIL - CouL	18,8	±	1,1	17,1	91,1	1,7
MIL - HerL	17,4	±	-	14	80,2	3,4
Lut II	26,7	±	1,1	16,95	36,8	9,7
Lut I e(H)	17,4	±	1,9	16,1	92,3	1,3
COUR (SE)	23,4	±	1,5	-	-	-
Lut I d	27,8	±	3,9	17,21	65,0	10,6
Lut I c	35,1	±	9,6	16,43	60,3	18,7
Lut I b	27,5	±	1,6	19,86	68,4	7,6
Lut I a	33,5	±	4,5	26,11	75,8	7,4
DIT - Bra1	26,8	±	7,6	19,2	71,6	7,6
DIT - Bra2	26,4	±	3,1	-	-	-
DIT - Her1	27,4	±	0,9	22,4	77,2	5,0
DIT - Her2	17,7	±	7,4	12	68,1	5,7
DIT - Cou	29,0	±		16,4	68,1	12,6
DIT - Auy	22,9	±	0,9	18,3	79,7	4,6
DIT - Pro	18,0	±	3,4	11,5	67,0	6,5
SAV	26,6	±	2,5	13,67	42,0	12,9
SAV (h)	29,1	±	0,1	21,50	73,7	7,6
SAV (SE)	33,9	±	1,1	-	-	-

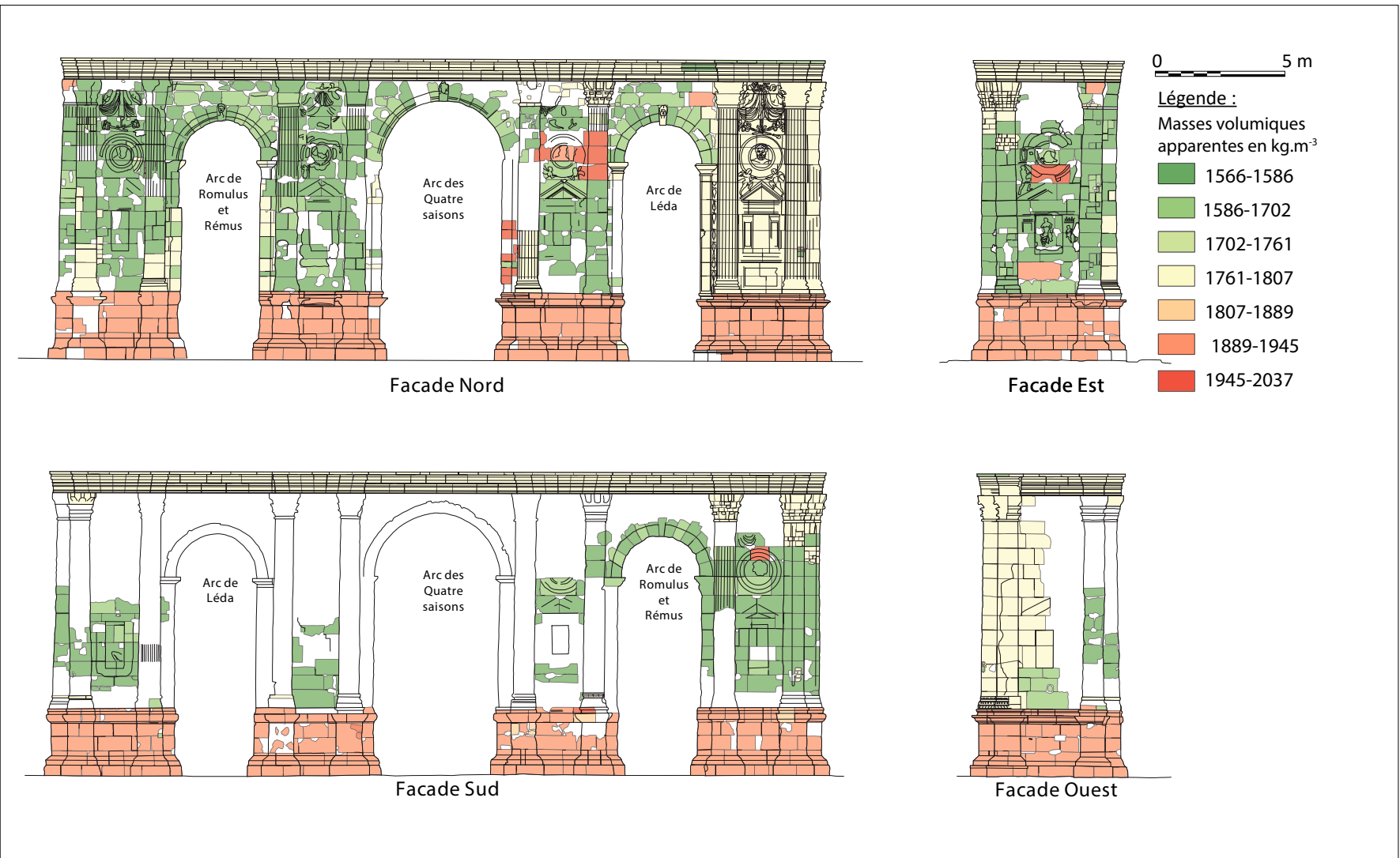
## Annexe 40. Carte des porosités des pierres du monument (MIP, exprimées en %)

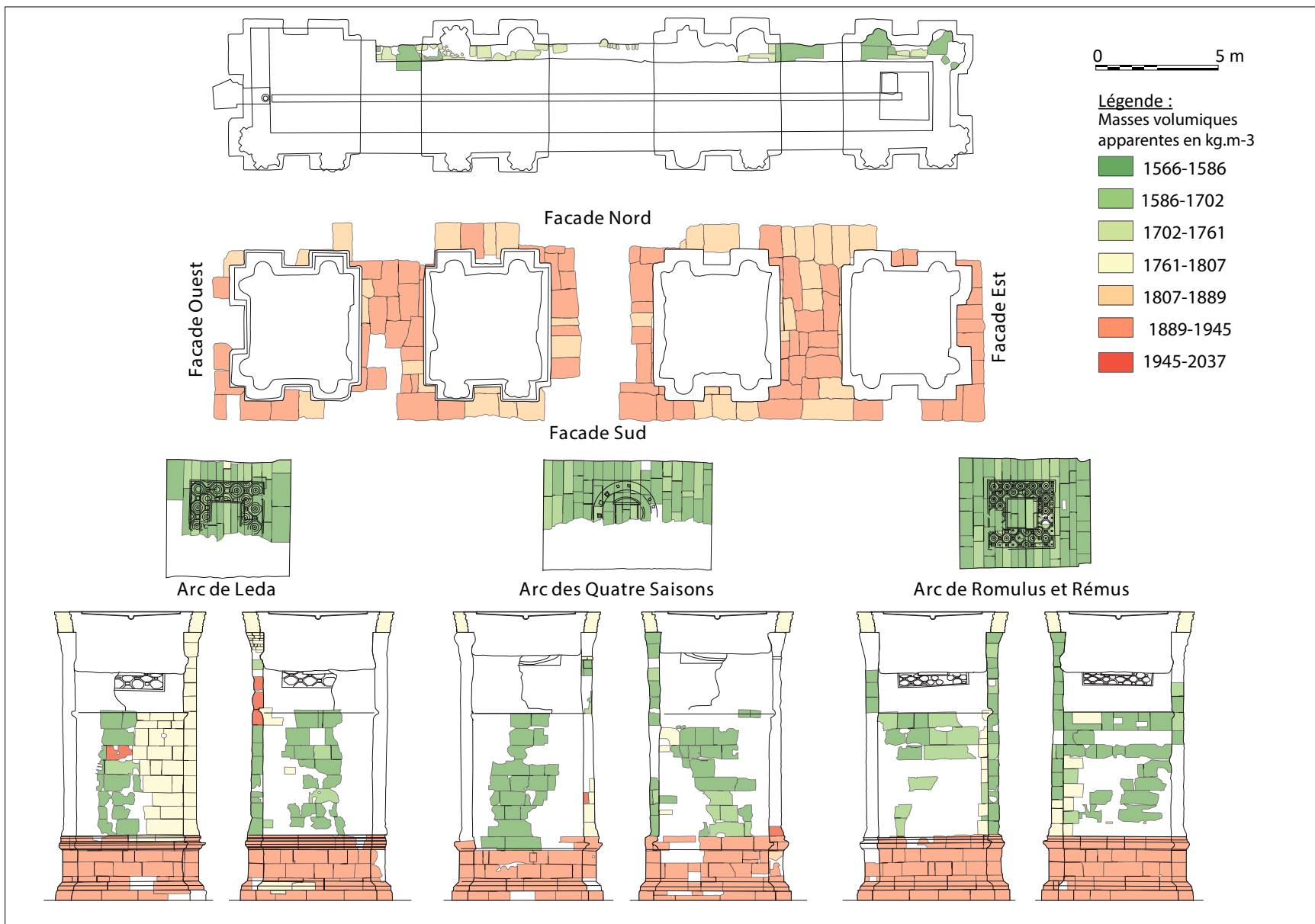






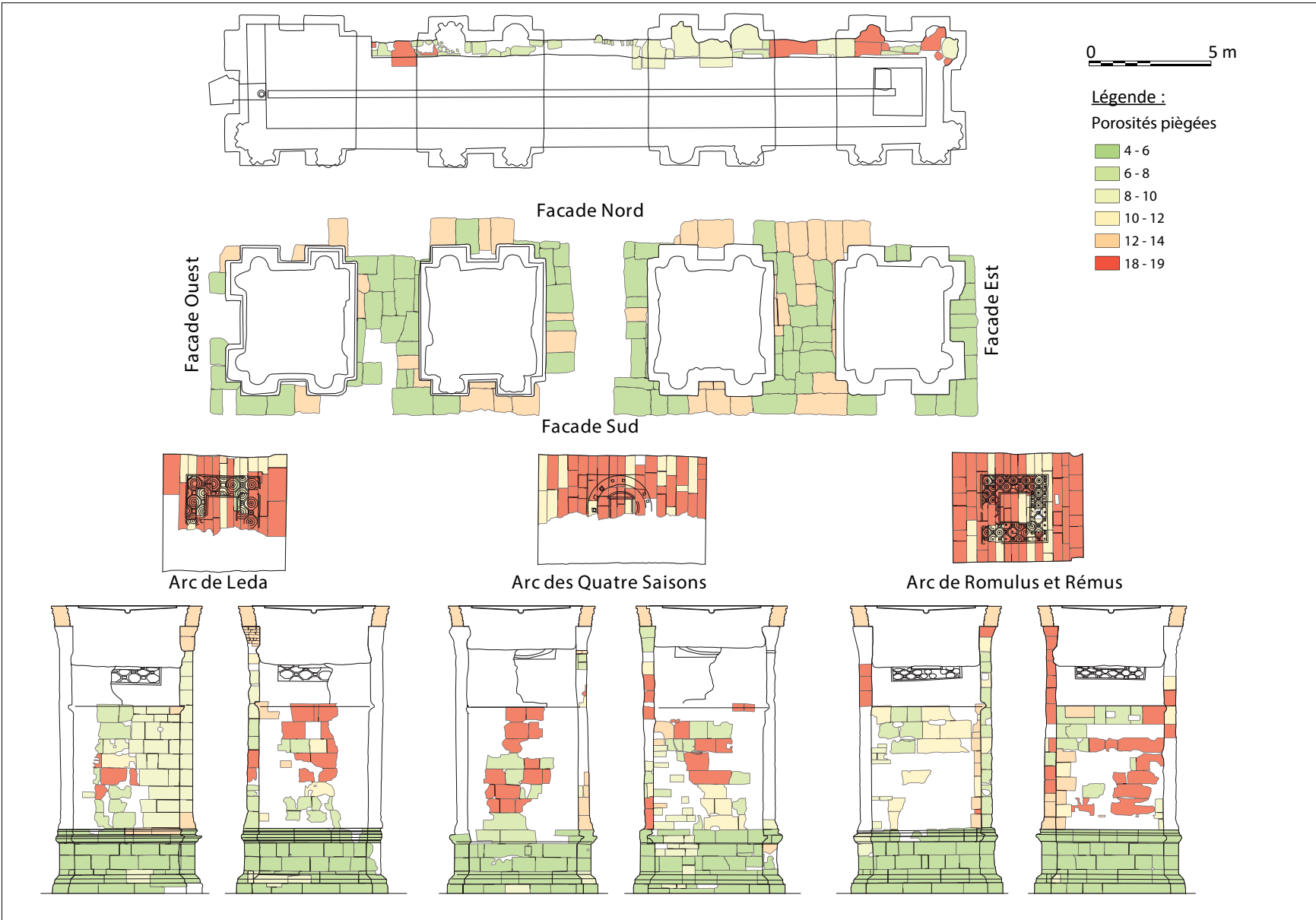
**Annexe 41. Carte des porosités totales (Nt, exprimées en %) des pierres de la Porte de Mars**





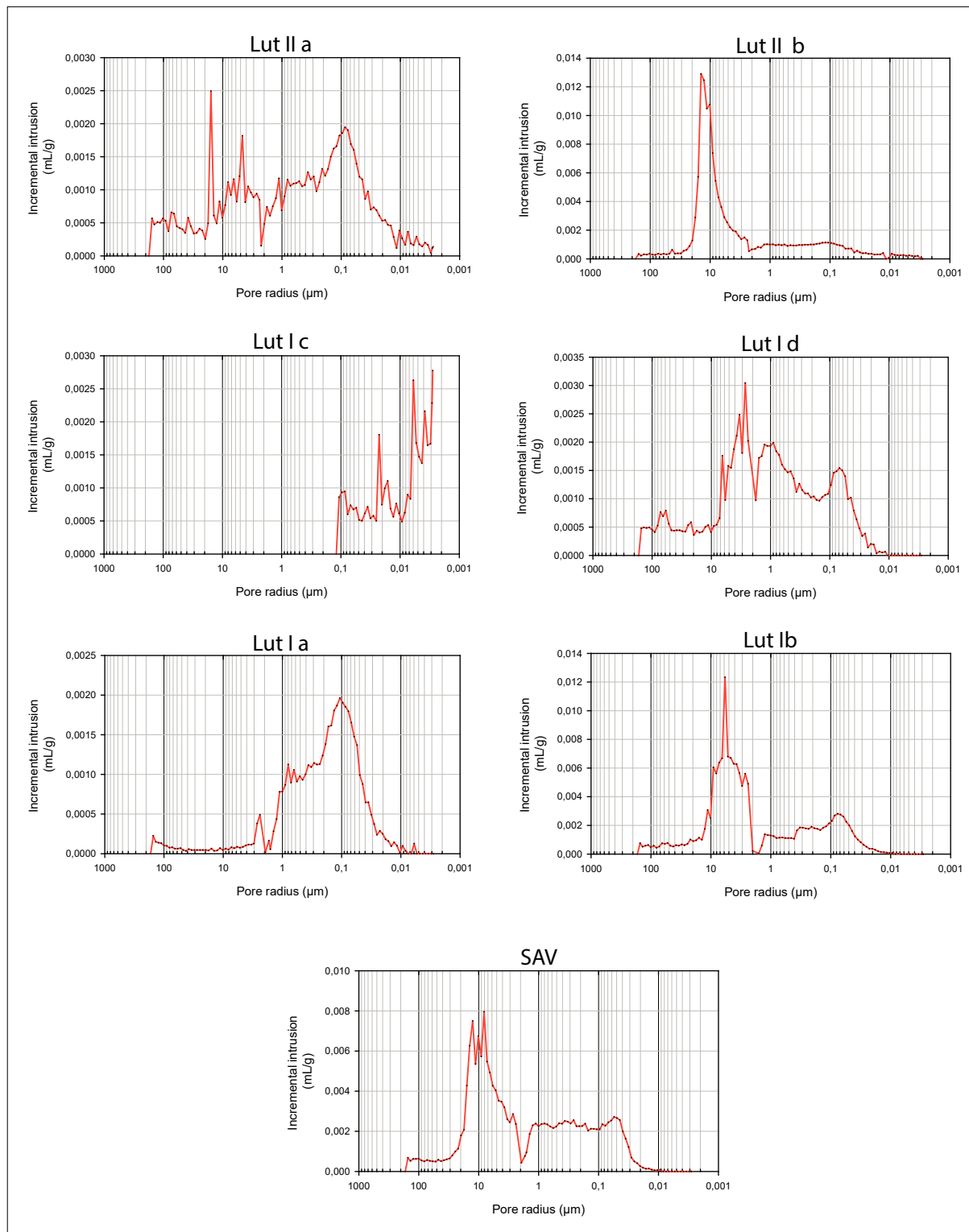
**Annexe 42. Carte des porosités piégées (Np, exprimées en %) des pierres de la Porte de Mars**

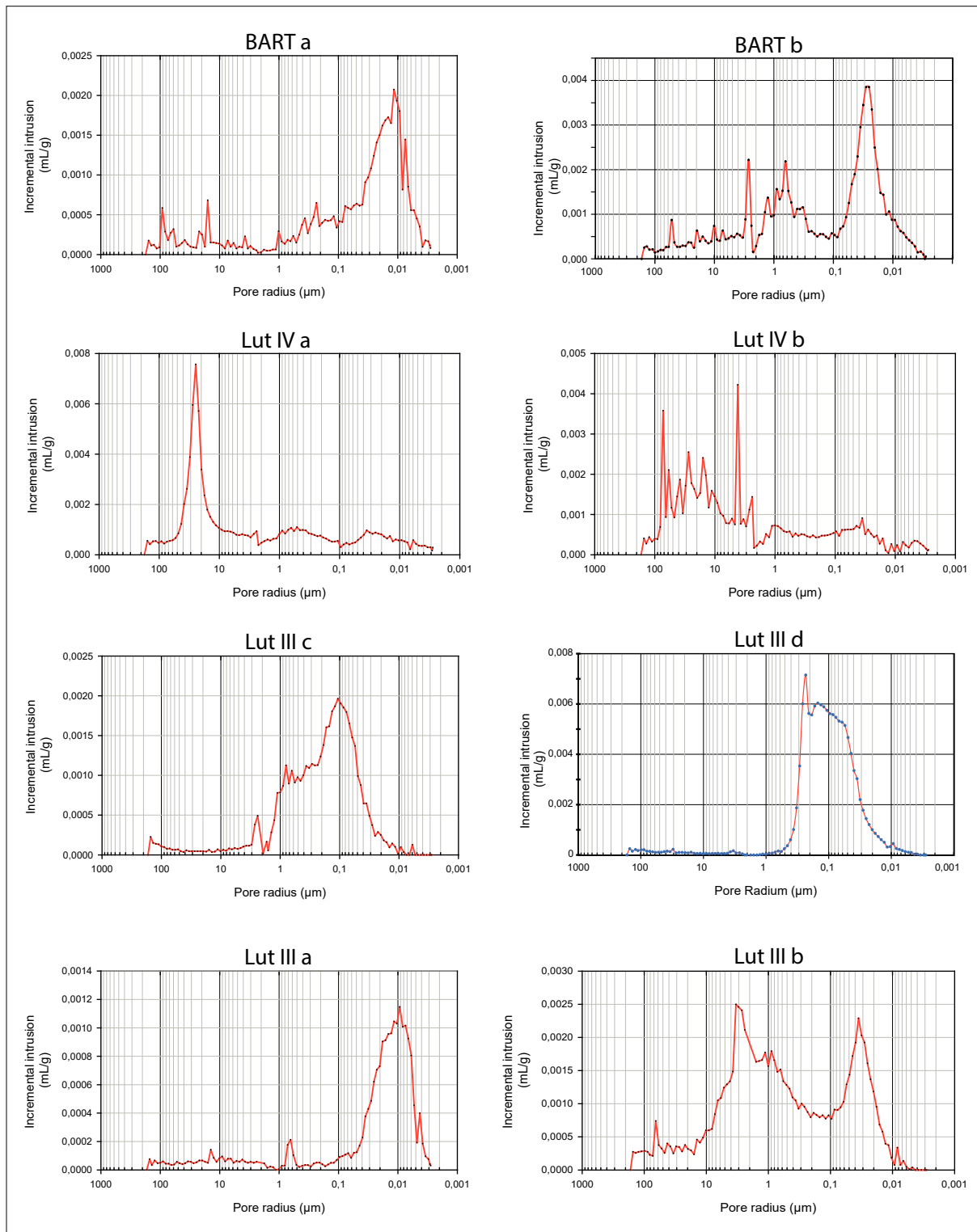




**Annexe 43. Tableau des valeurs de porosité au Mercure de ce travail et issus des études antérieures (Turmel, 2014)**

Nom	MIP						
	Ra1 (µm)	Ra2 (µm)	Ra3 (µm)	Rm	Cd	%	σ
BART b	0,03			0,02	4,19	18,57	
BART a	0,01			0,01	2,36	10,47	
LIM - Bez	2,10	0,02		0,01	22,20	14,90	3,50
LIM - Poi	2,90	0,01		0,00	30,30	8,50	1,20
LIM - Par	43,00	1,70	0,00	0,00	20,30	10,00	2,00
LIM - Ver	0,03			0,01	4,30	17,70	4,20
CER - Gra	38,50			14,10	21,10	30,80	1,20
Lut IV c	0,04			17,00	2,36	17,52	
Lut IV b	5,80			4,50	34,64	16,99	
Lut IV a	17,00	0,23	0,02	26,00	2,14	24,39	
Lut III d	0,04			0,23	1,69	18,57	
Lut III c	0,02			0,12	1,95	11,00	
Lut III b	0,51	0,21		2,10	16,09	18,00	
Lut III a	0,01			0,01	1,62	5,15	
MIL - BraL	0,09			0,02	1,80	18,90	3,00
MIL - CouL	0,09			0,03	1,10	19,90	1,20
MIL - HerL	0,08			0,03	1,50	16,40	0,20
Lut II	10,00	0,04		15,00	17,08	25,26	
Lut I e(H)	0,09					17,80	0,80
COUR (SE)							
Lut I d	2,10	0,04		2,80	8,24	17,91	
Lut I c	1,70			2,50	11,54	25,84	
Lut I b	4,00	0,05		4,00	21,88	29,99	
Lut I a	6,50	0,41	0,05	9,00	9,76	42,12	
DIT - Bra1	10,00	1,10	0,10	0,04	8,50	35,10	5,10
DIT - Bra2	3,00	0,09		0,04	11,30	28,80	7,90
DIT - Her1	1,20			0,04	6,00	26,00	1,80
DIT - Her2	0,20			0,03	1,50	17,10	7,30
DIT - Cou	5,80			0,05	8,70	26,70	10,80
DIT - Auy	0,20			0,04	2,20	16,10	2,00
DIT - Pro	0,40			0,04	5,40	16,20	2,90
SAV	6,00			7,00	17,60	32,73	
SAV (h)	0,11	8,50				34,90	1,30

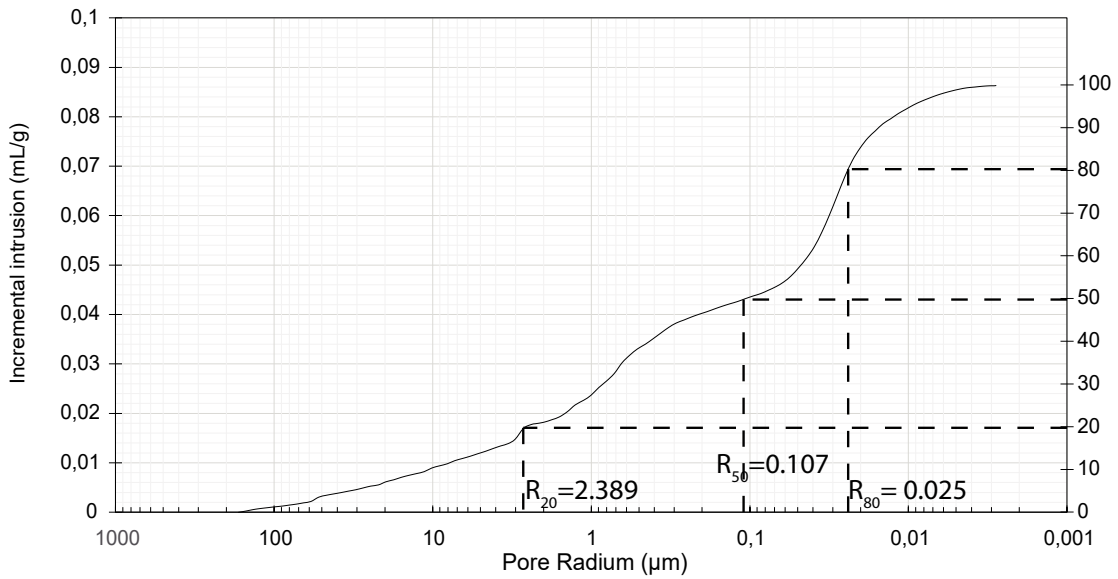
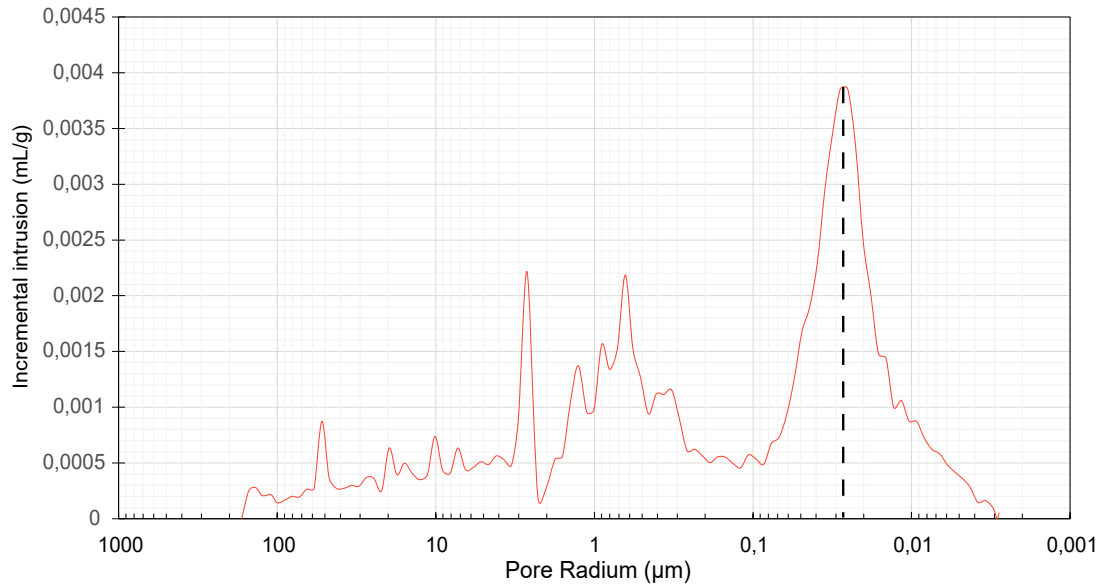
**Annexe 44. Courbes des intrusion différentielle de mercure (mL/g) des calcaires étudiés**



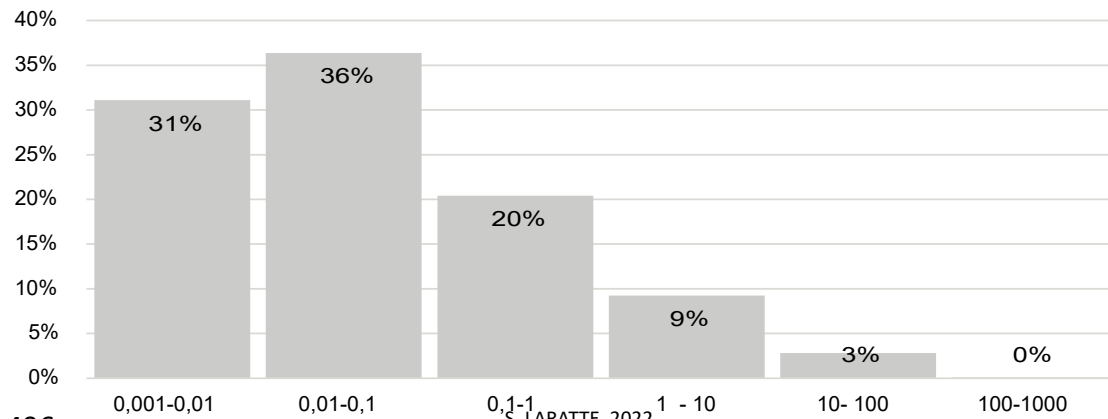


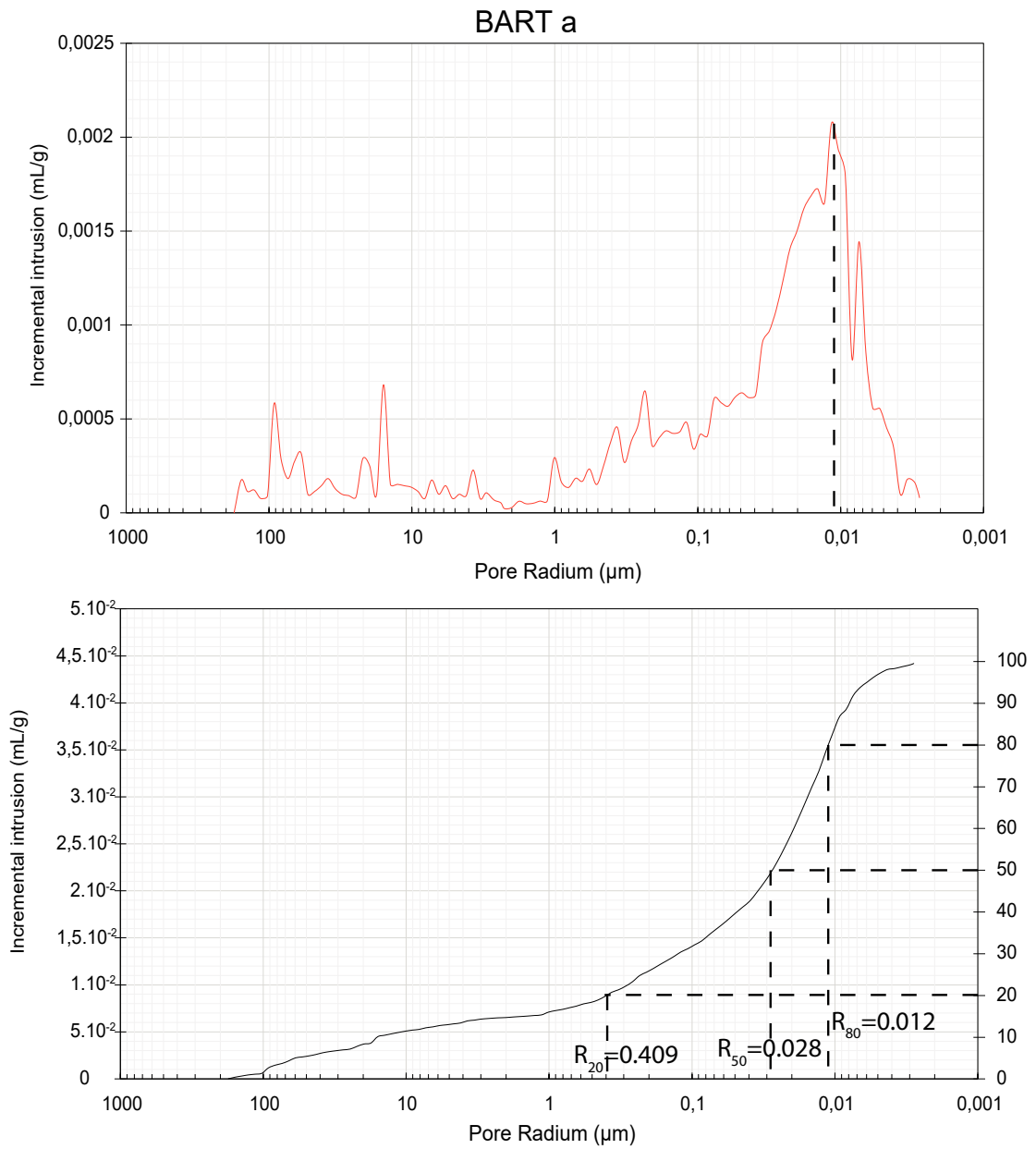
**Annexe 45. Caractérisations du réseau poreux des pierres par la méthode de porosimétrie par intrusion de mercure**

BART b

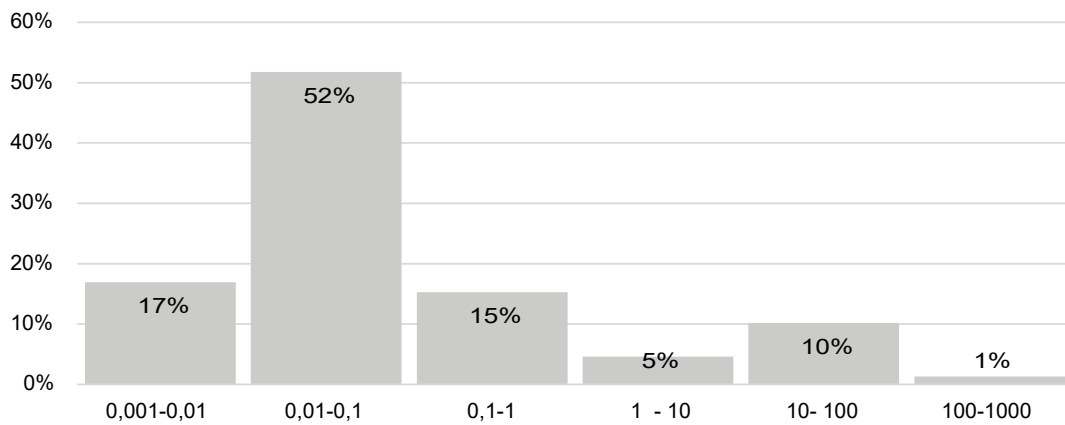


Classes de taille des pores

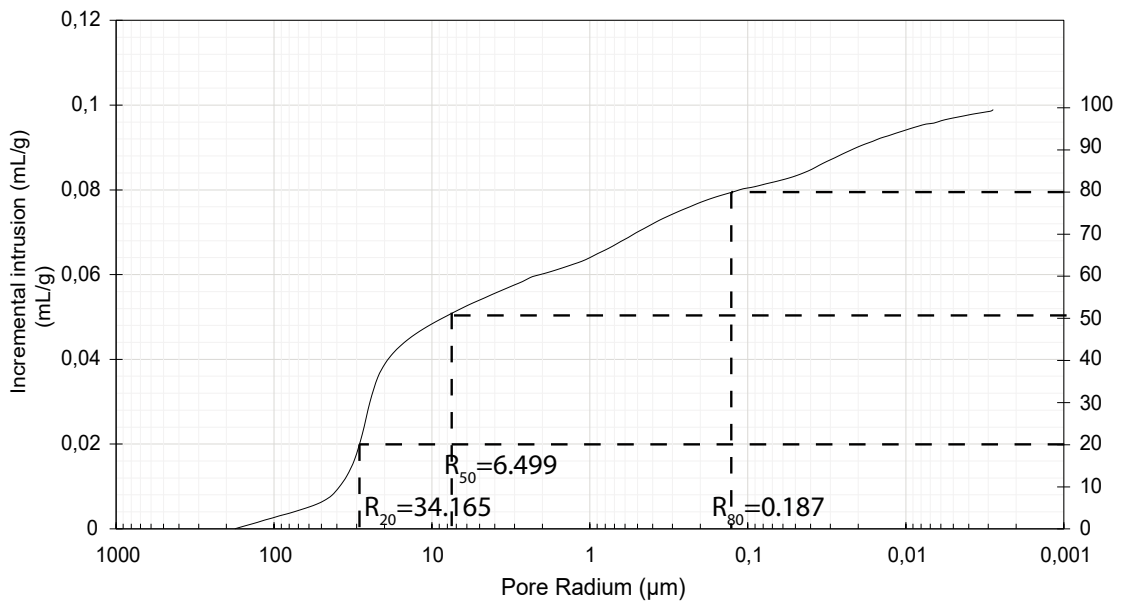
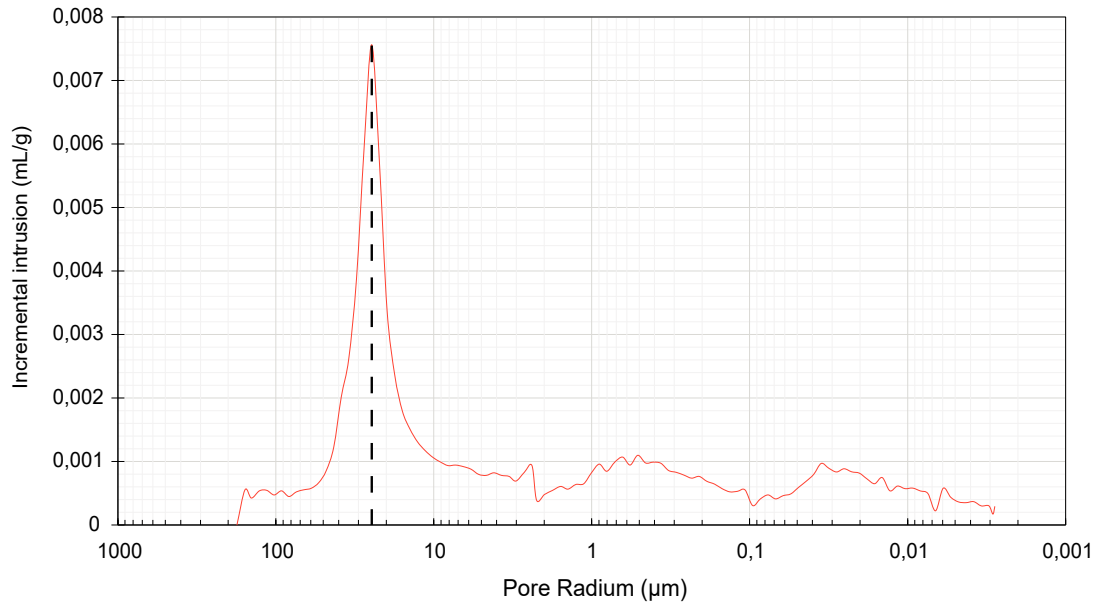




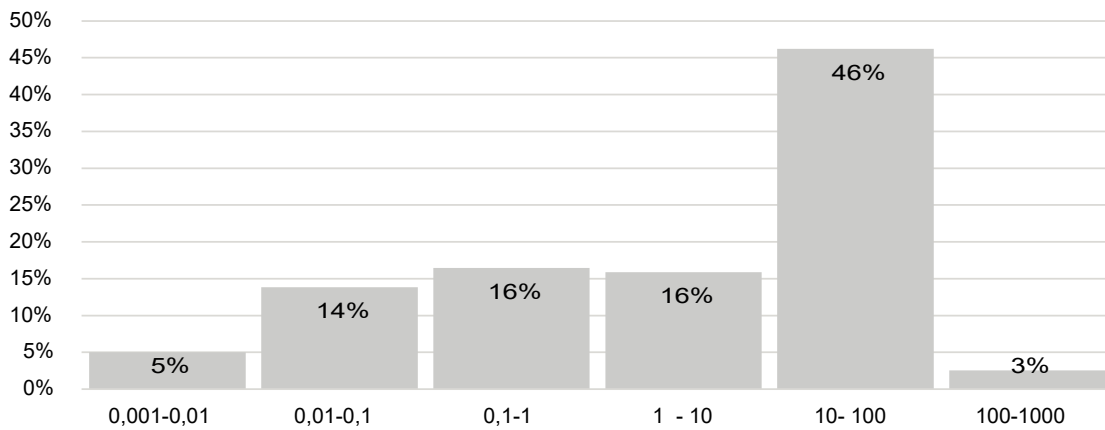
### Classes de taille des pores



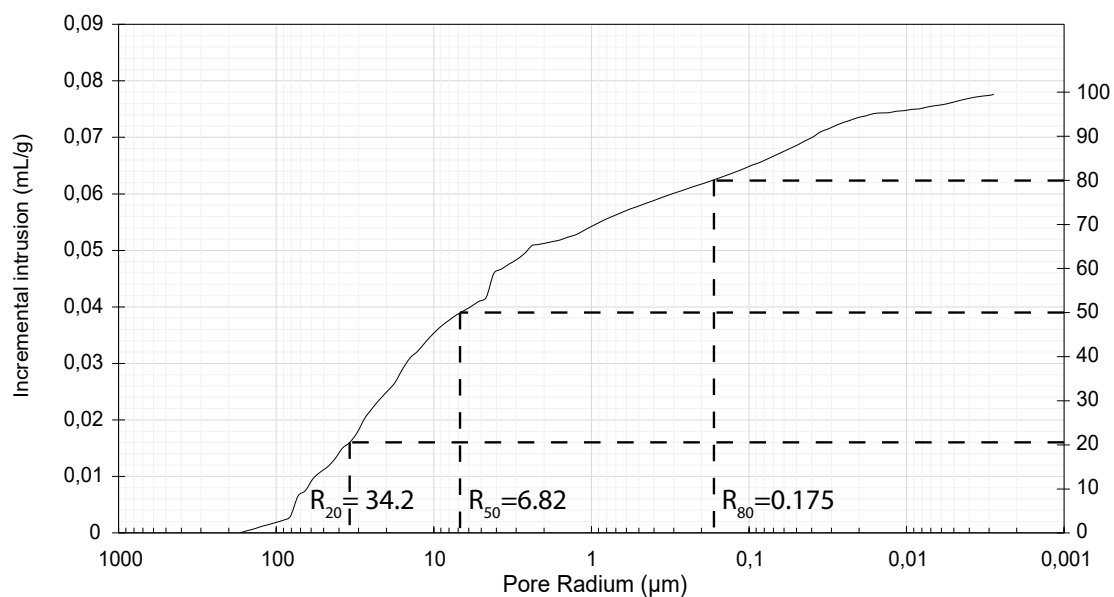
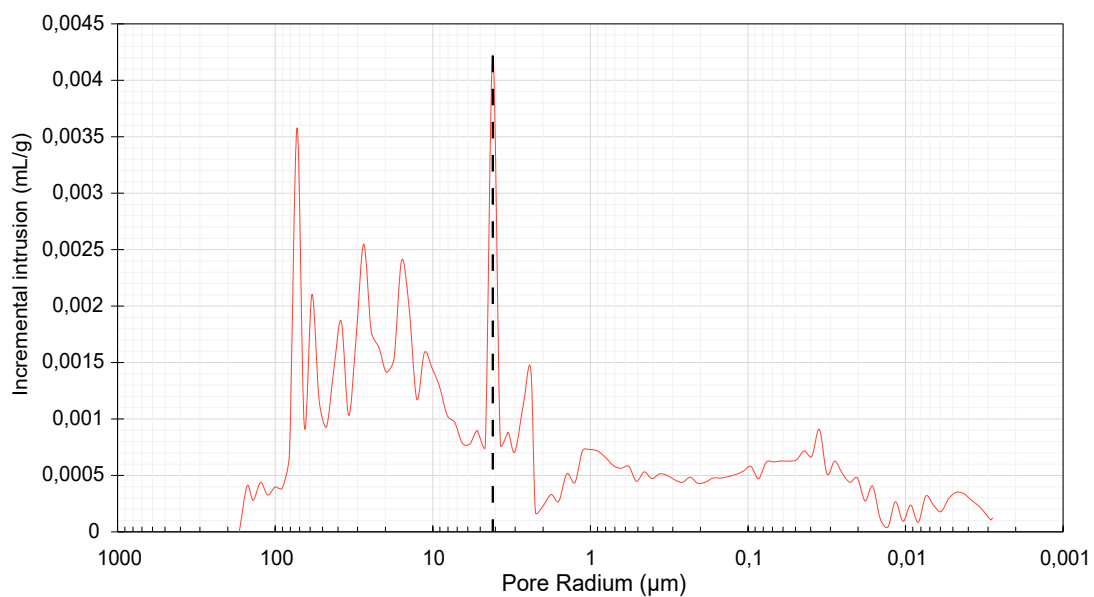
LUT IVa



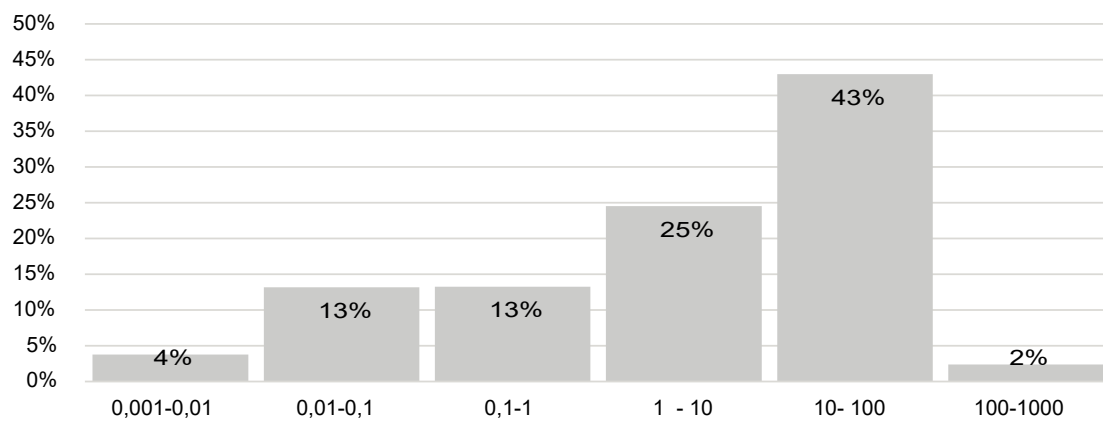
Classes de taille des pores



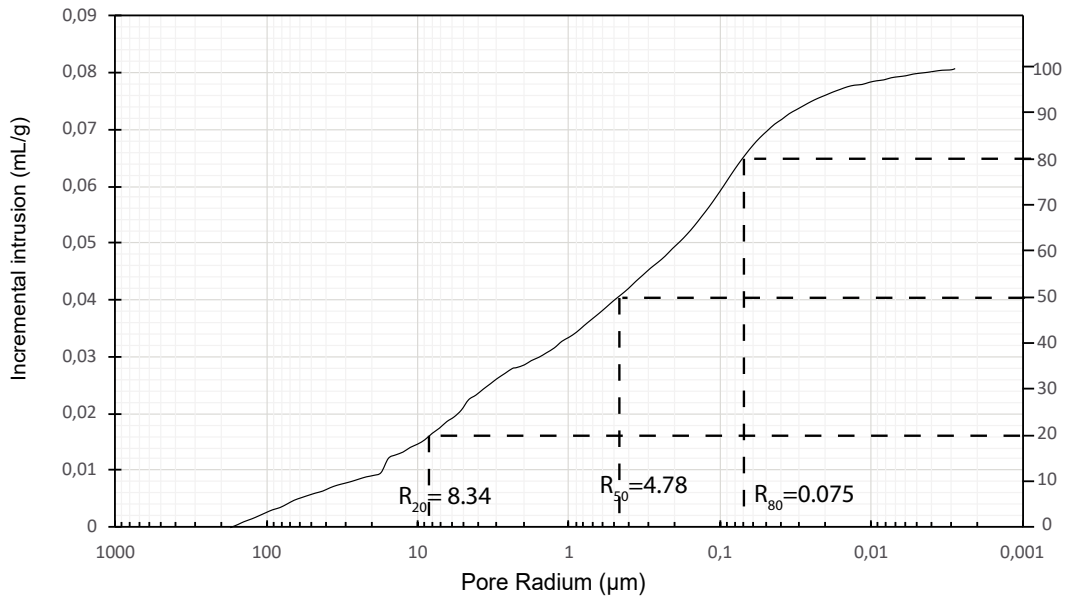
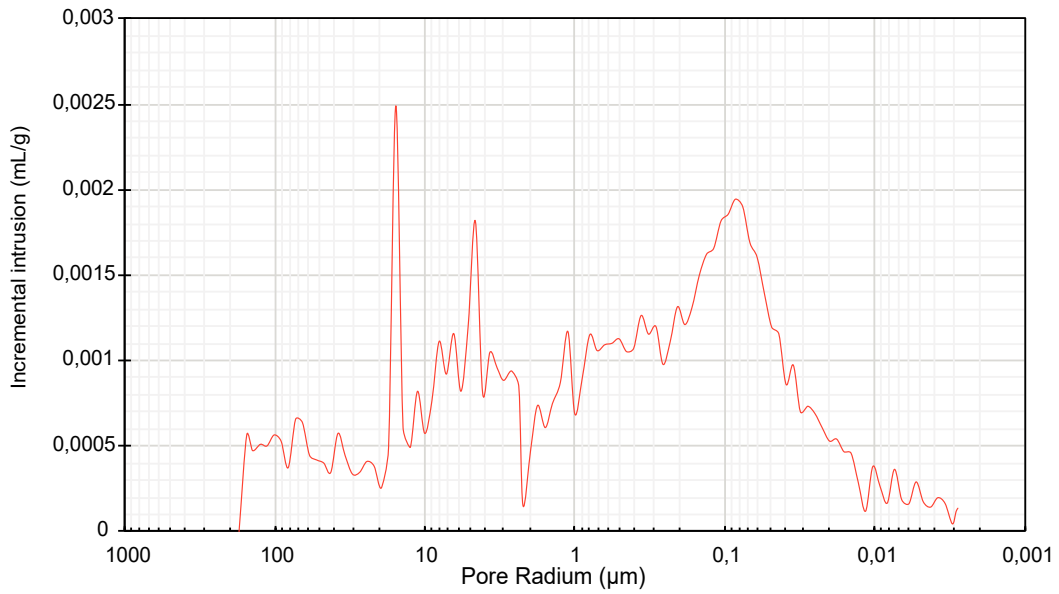
## LUT IVb



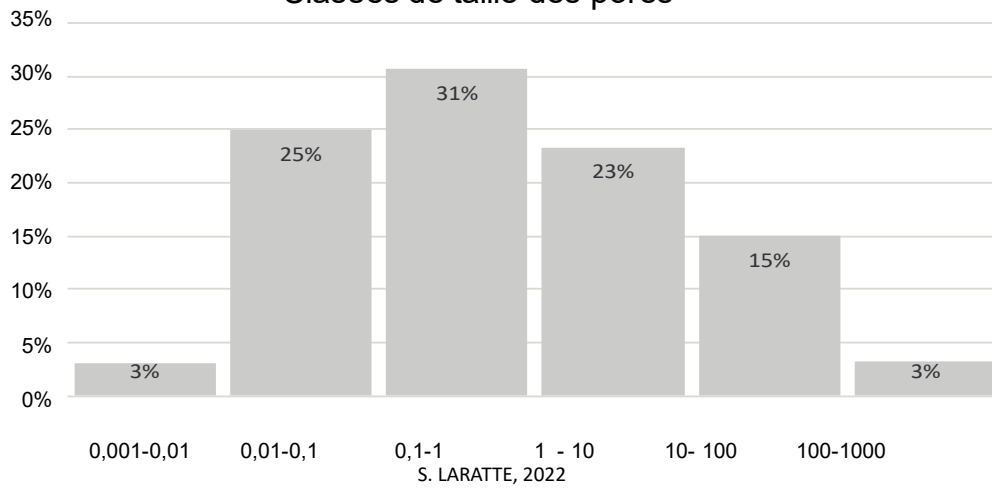
## Classes de taille des pores



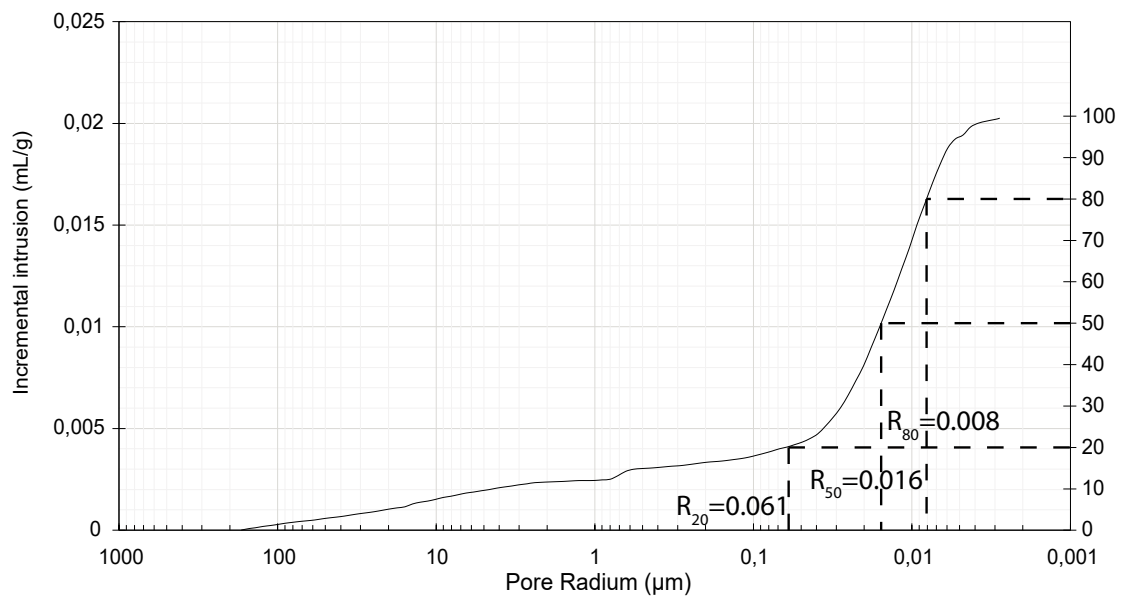
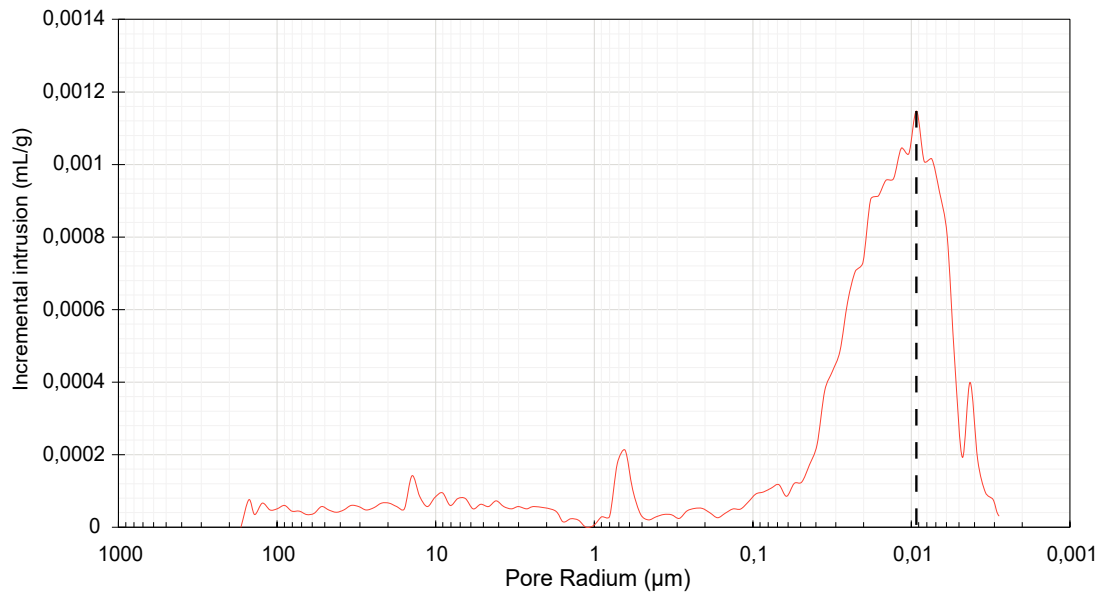
LUT IVc



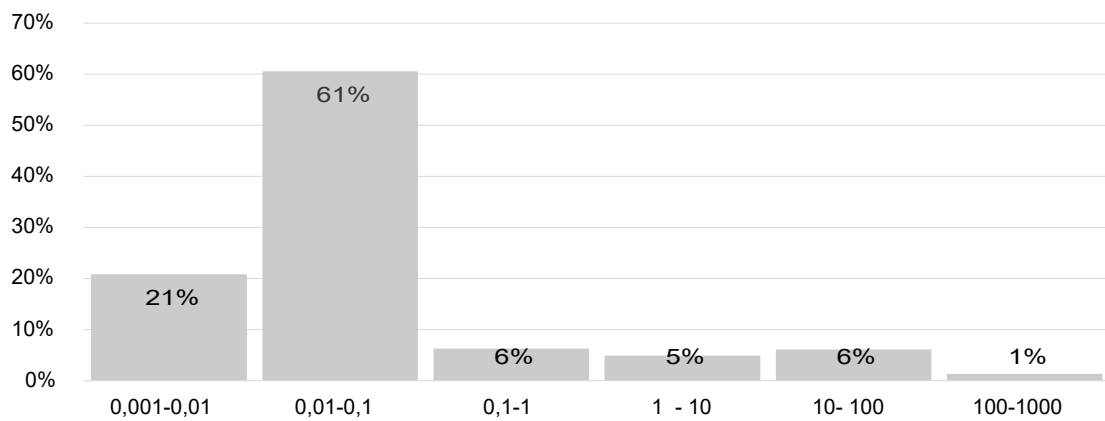
Classes de taille des pores



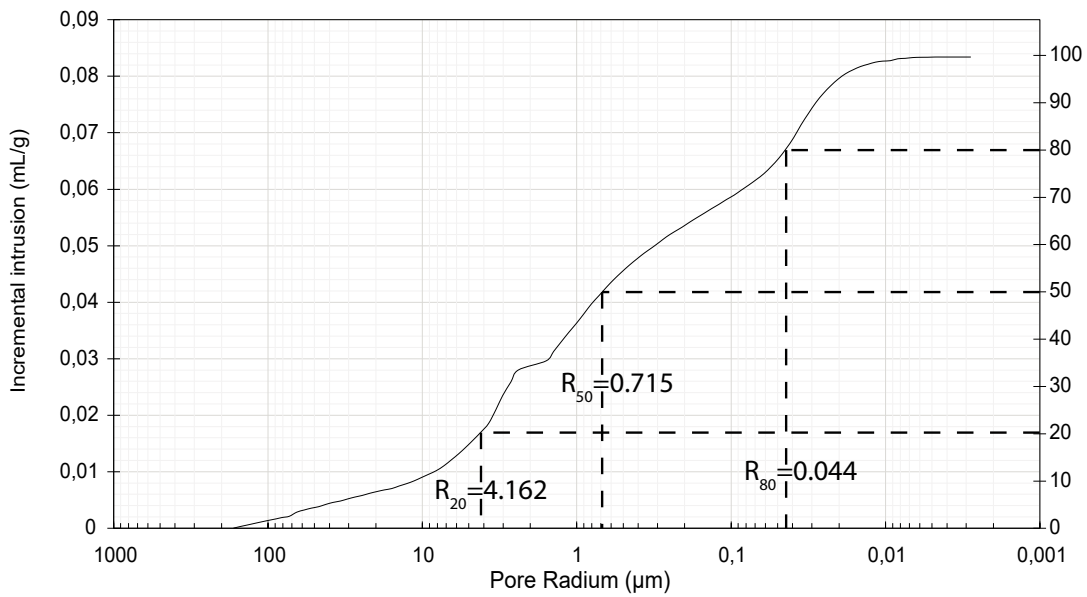
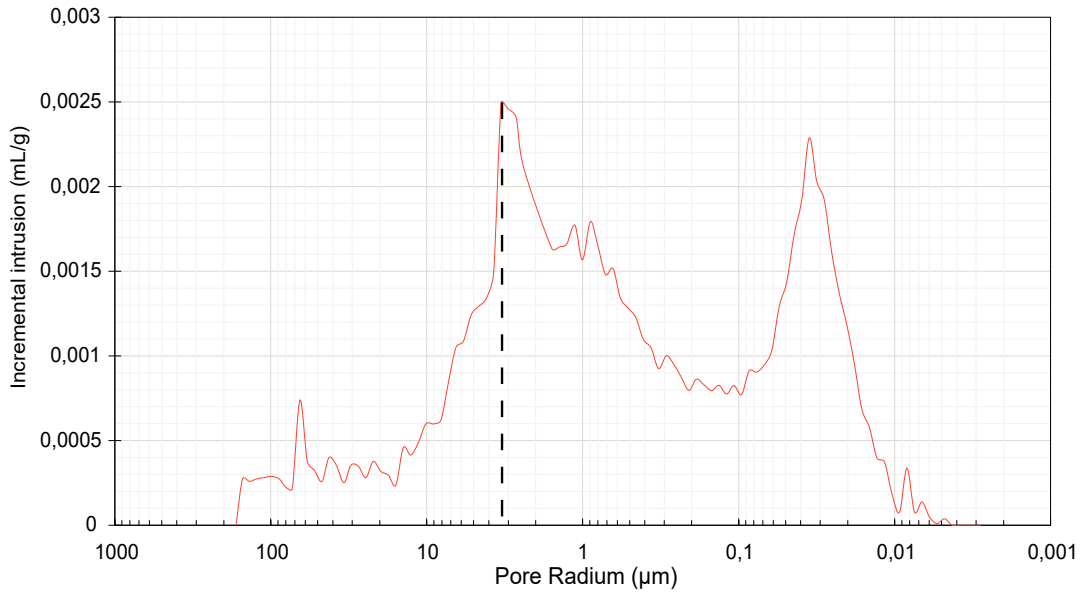
## LUT IIIa



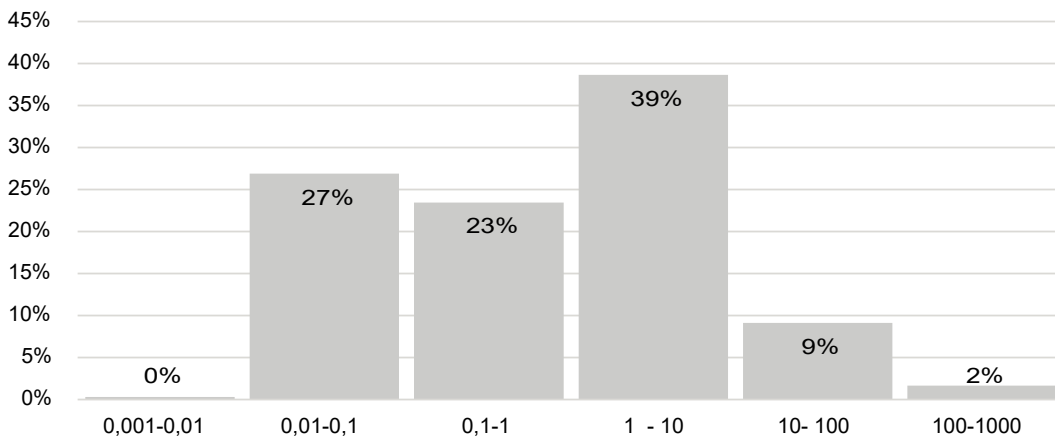
## Classes de taille des pores



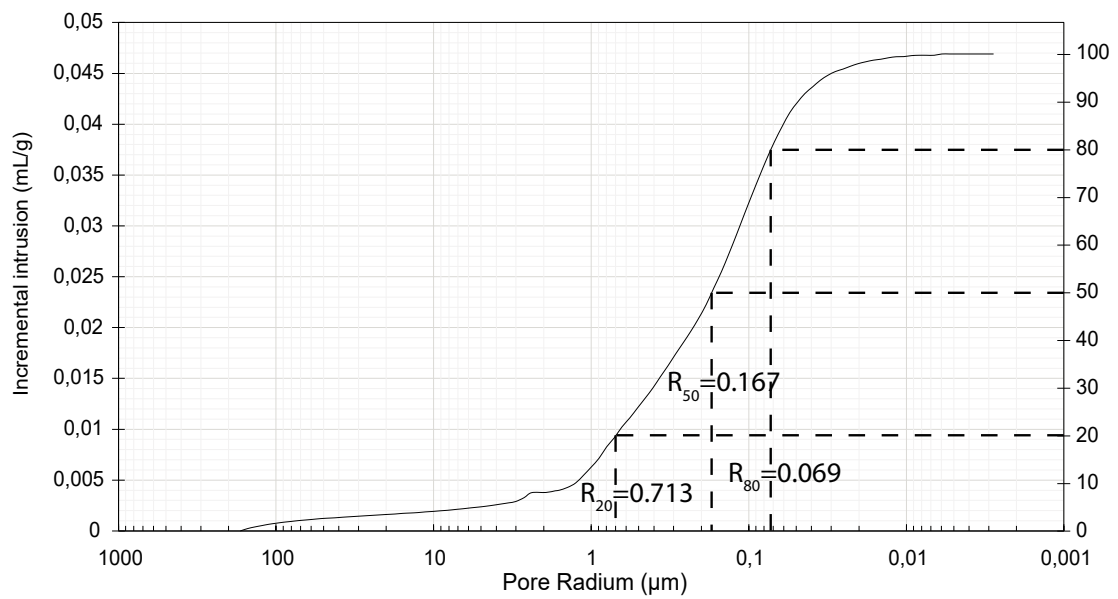
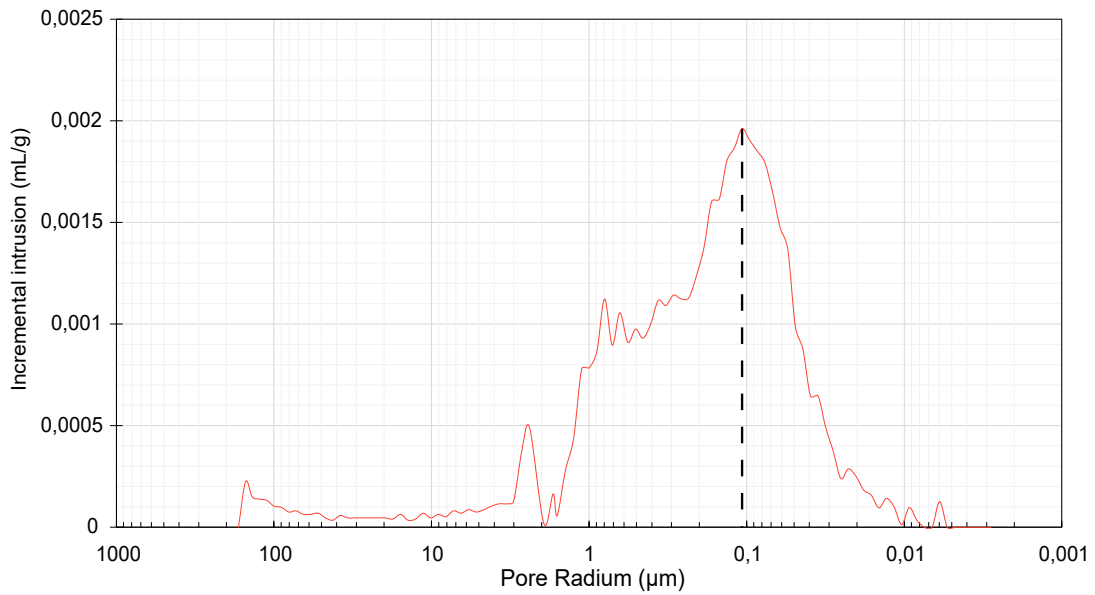
LUT IIIb



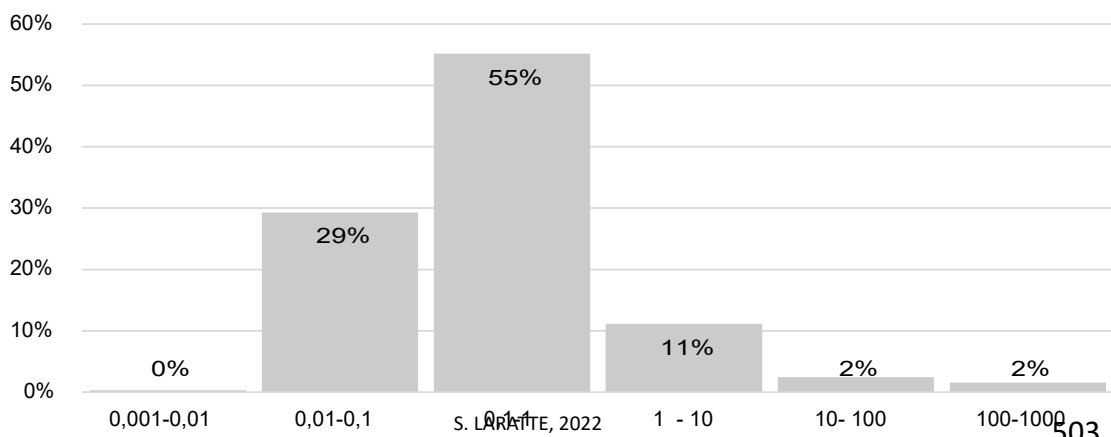
Classes de taille des pores



## LUT IIIc

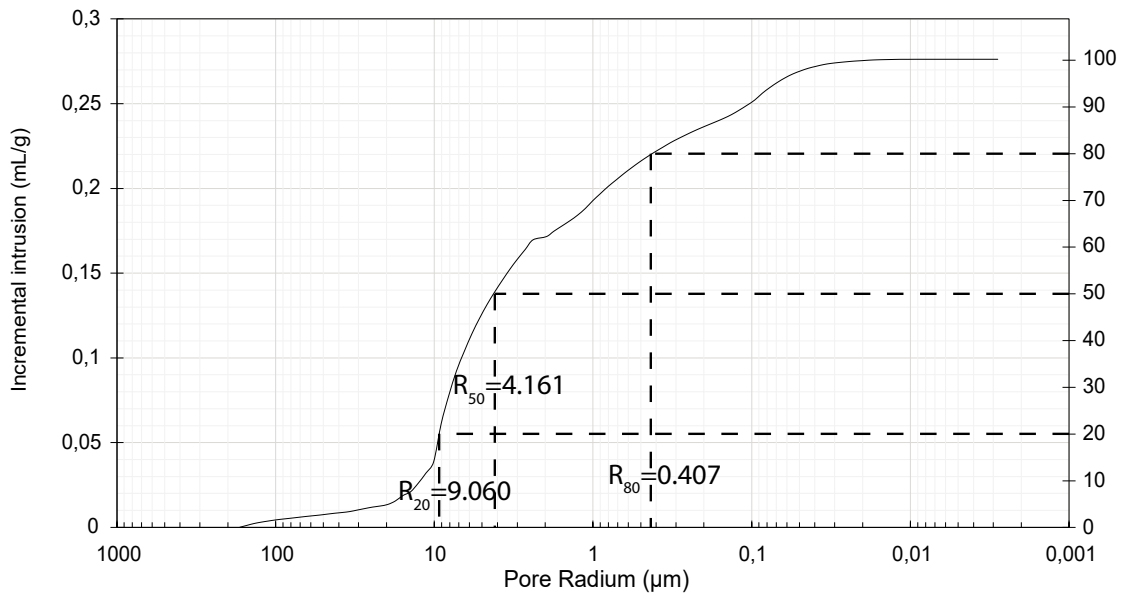
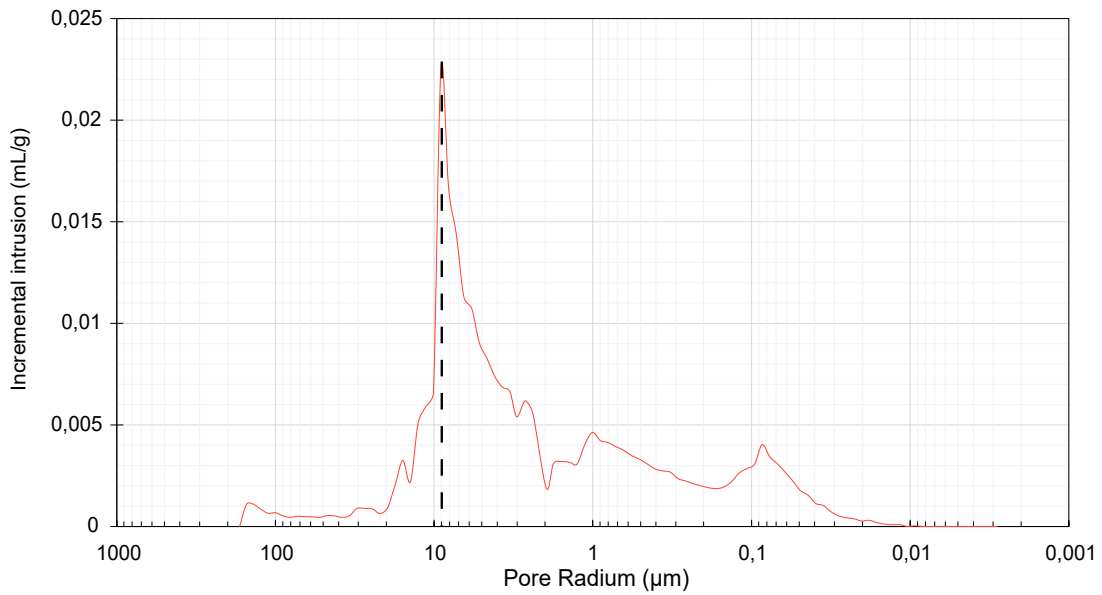


## Classes de taille des pores

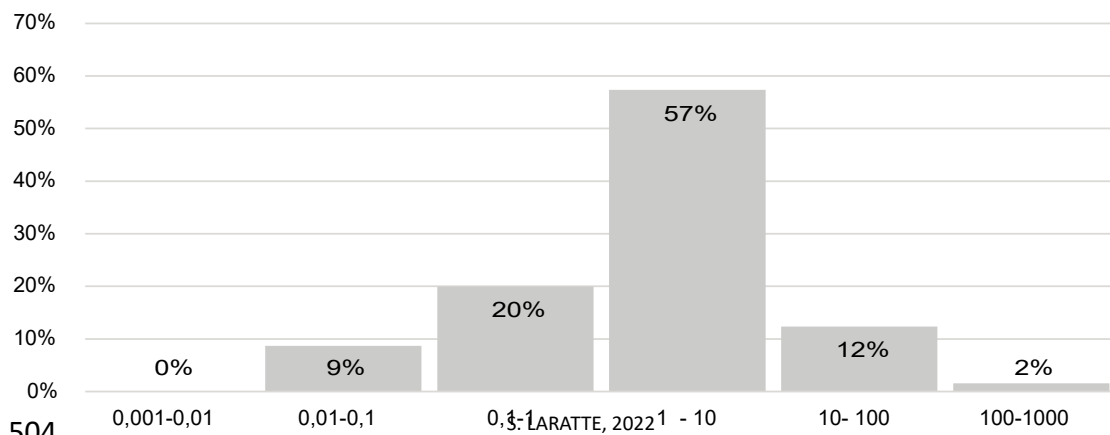




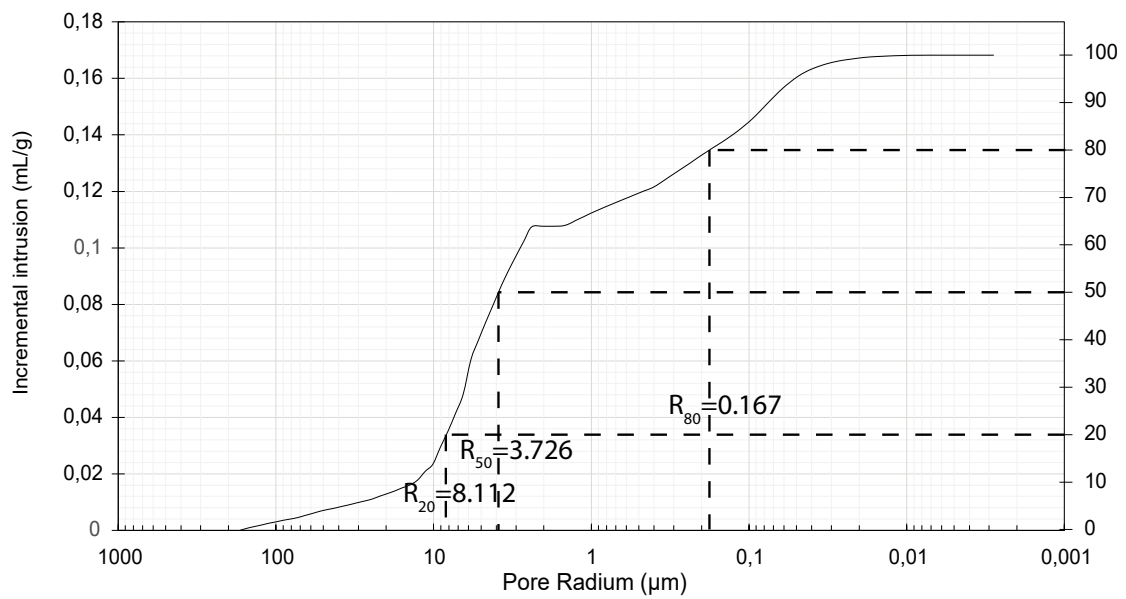
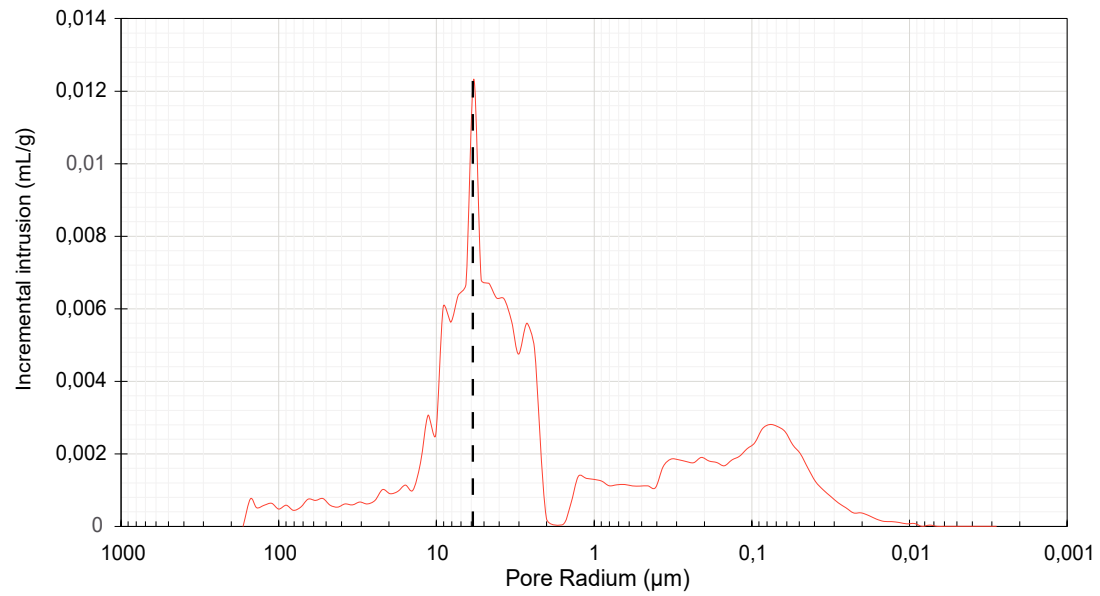
LUT Ia



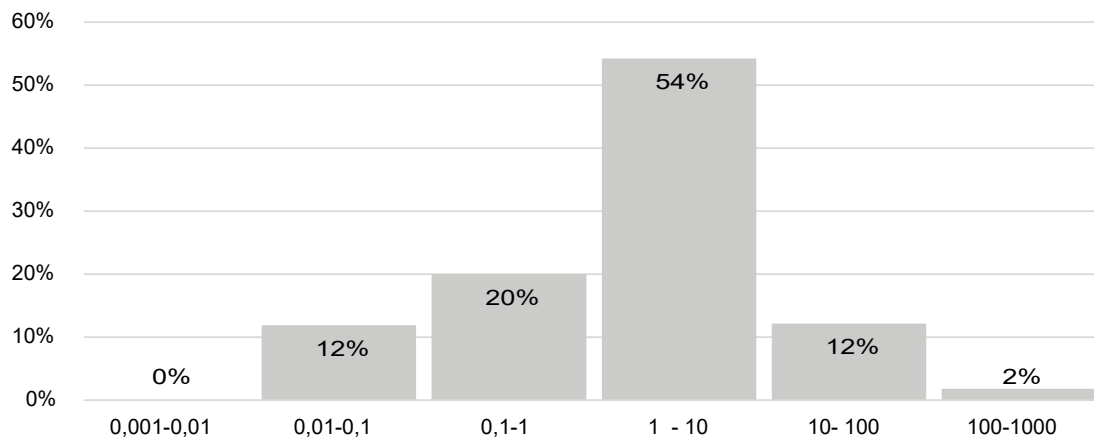
Classes de taille des pores



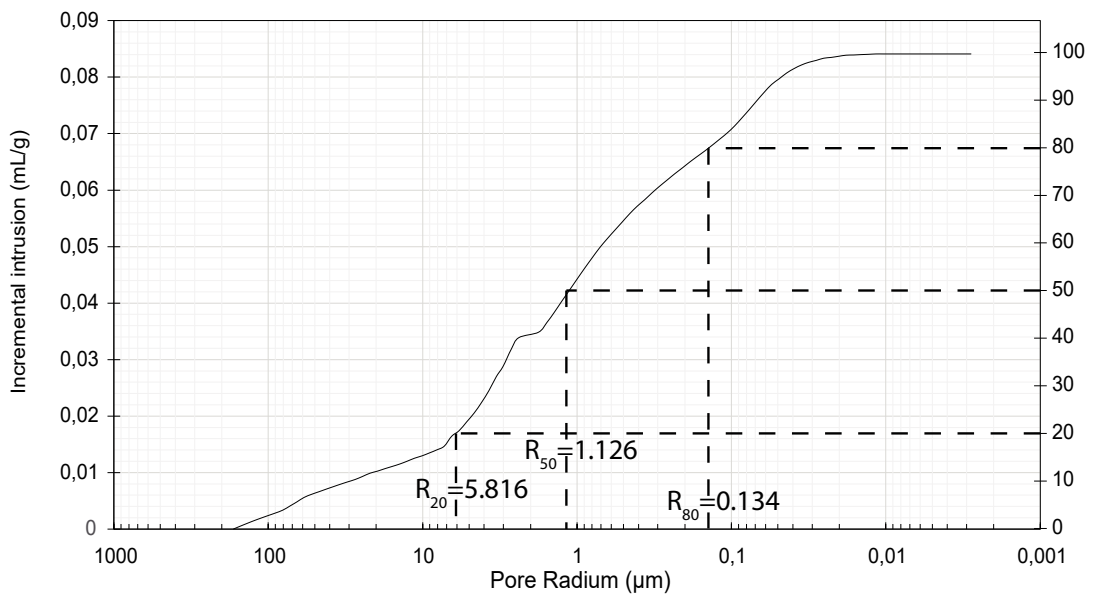
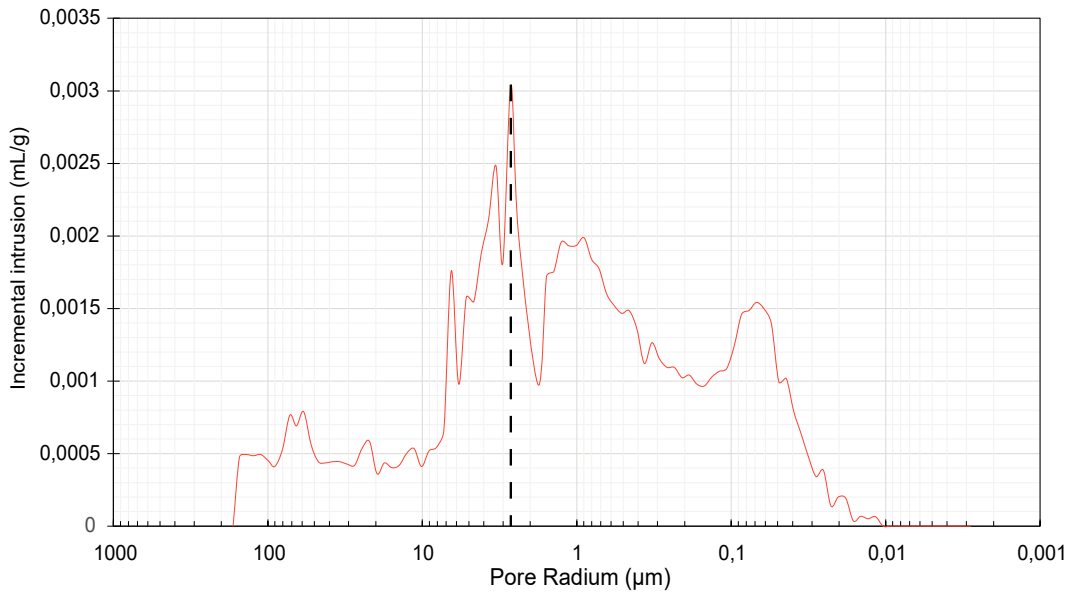
## LUT Ib



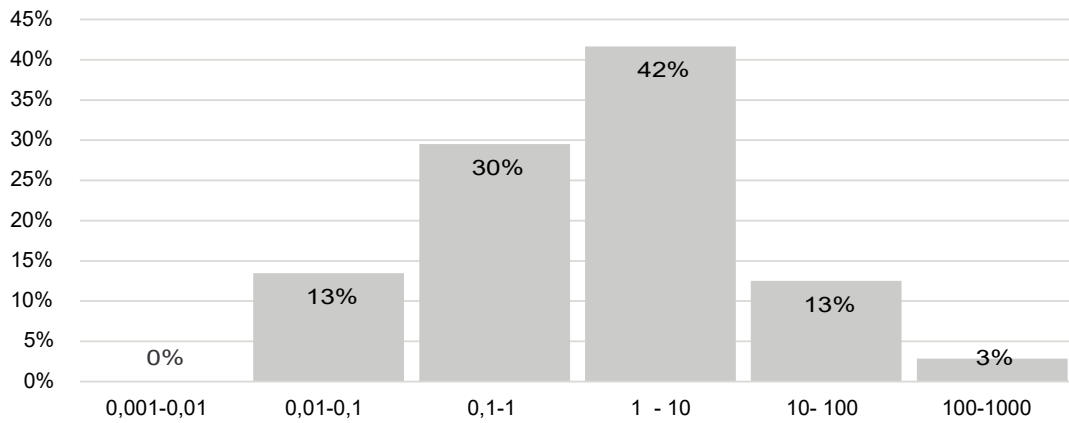
## Classes de taille des pores



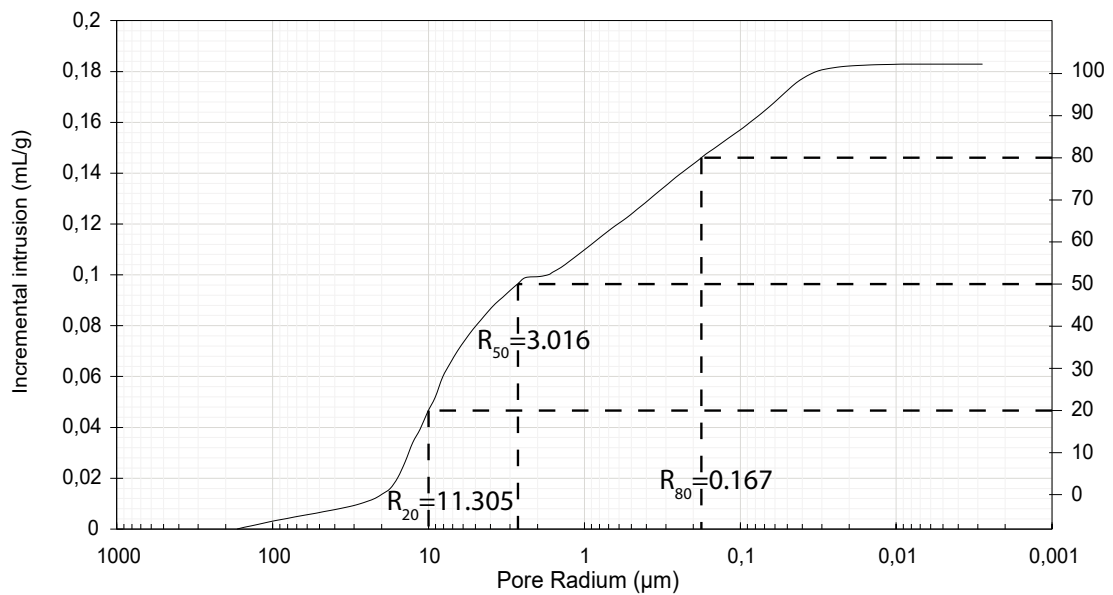
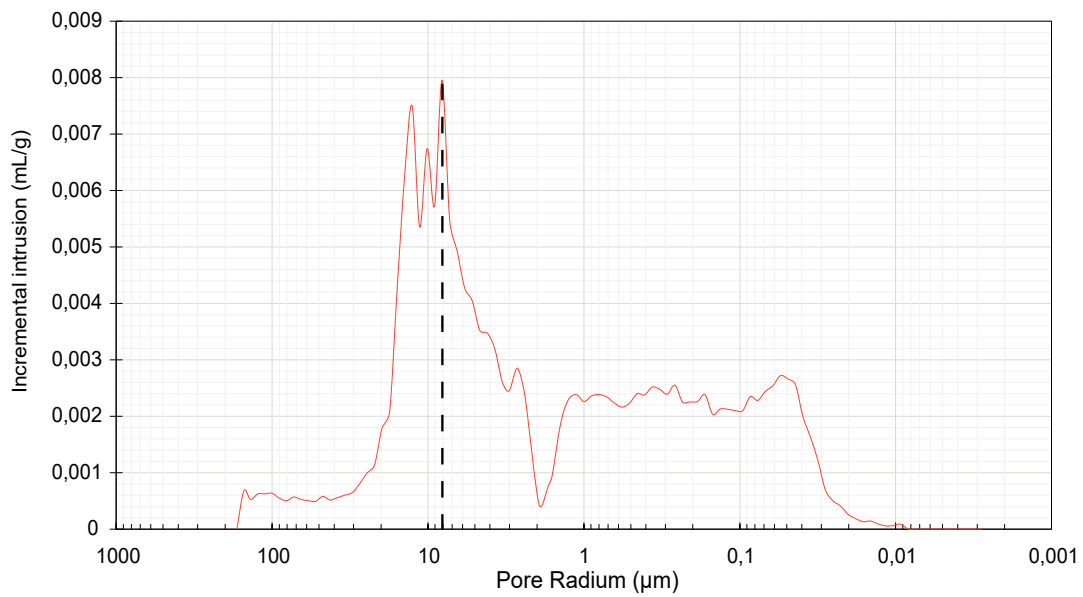
LUT Id



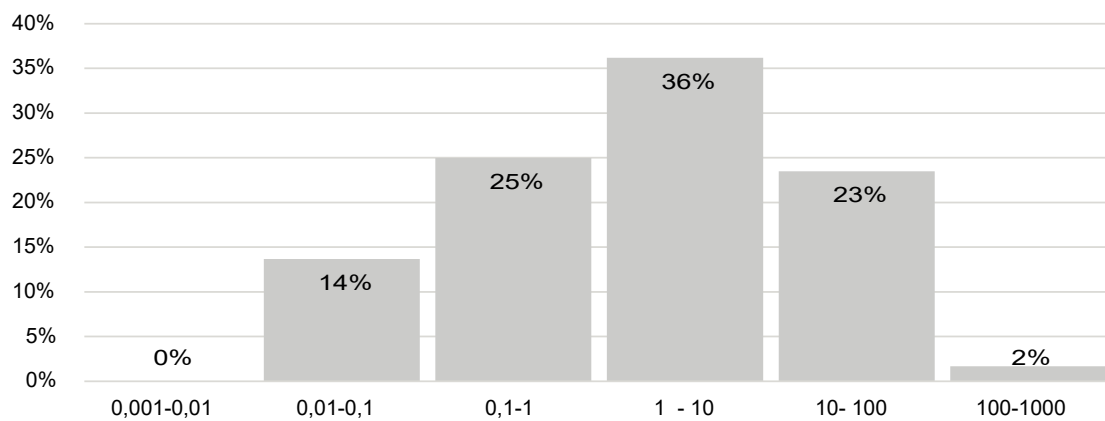
Classes de taille des pores



## SAV



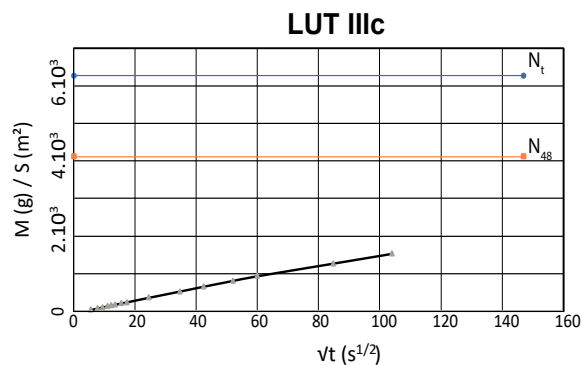
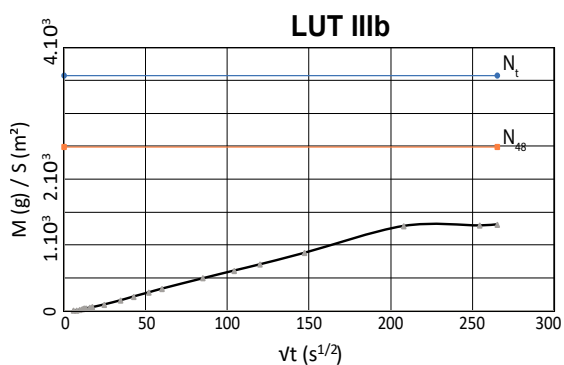
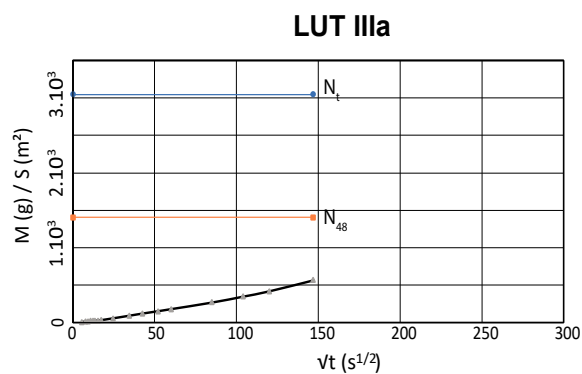
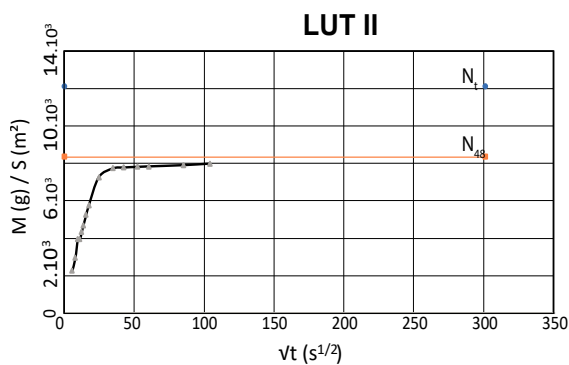
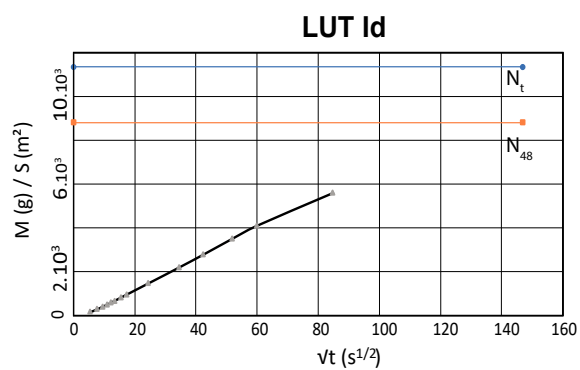
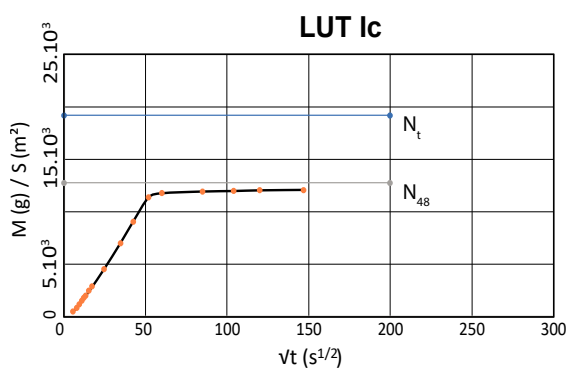
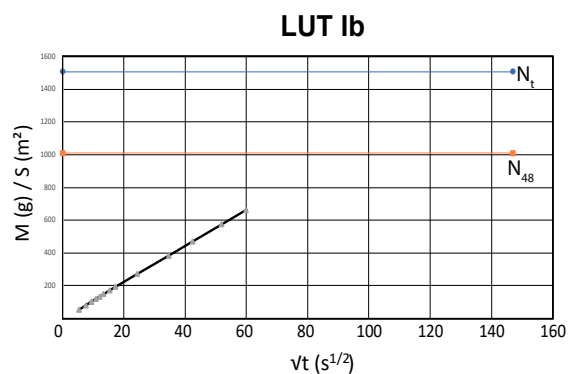
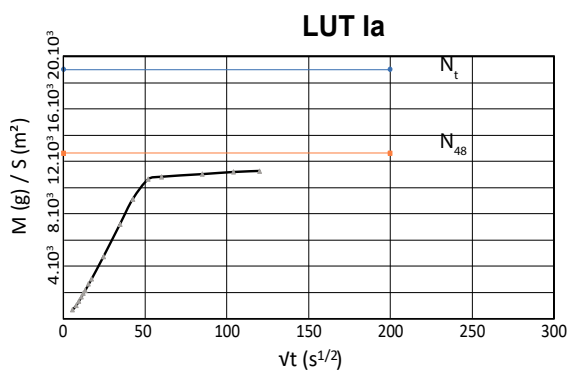
## Classes de taille des pores

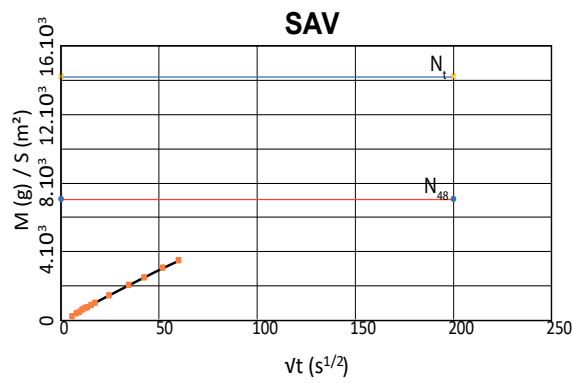
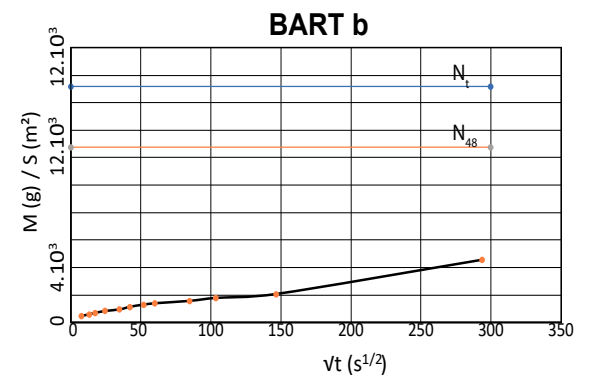
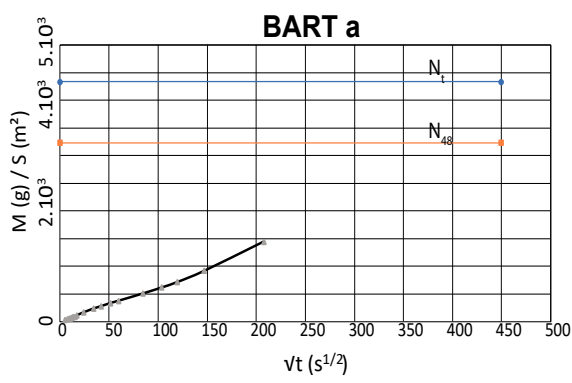
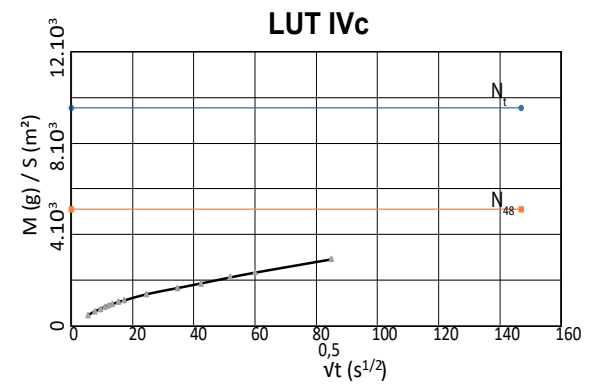
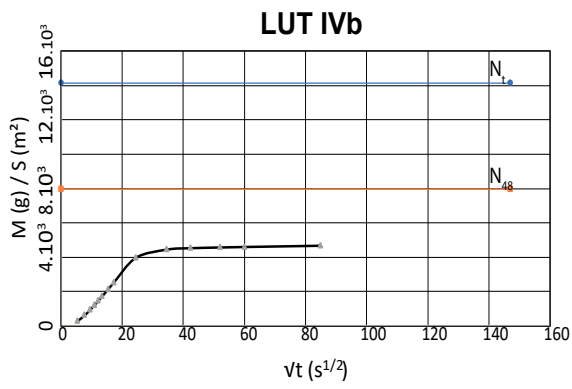
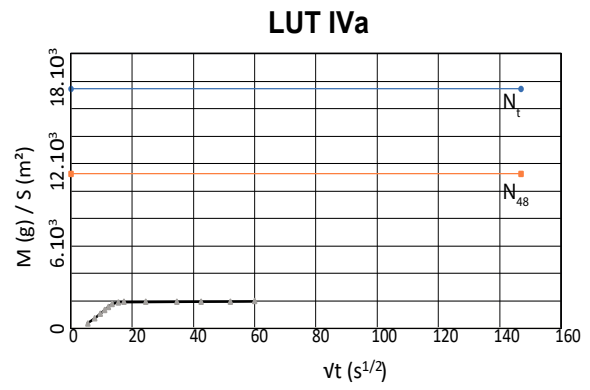
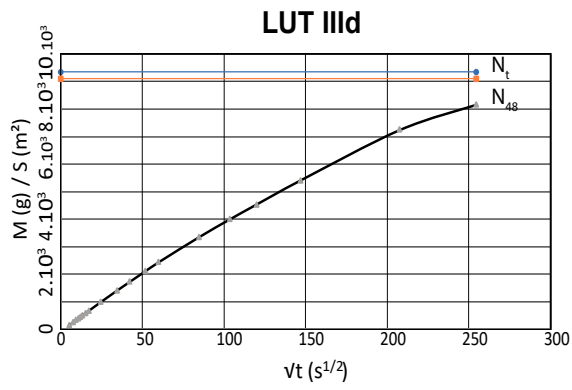


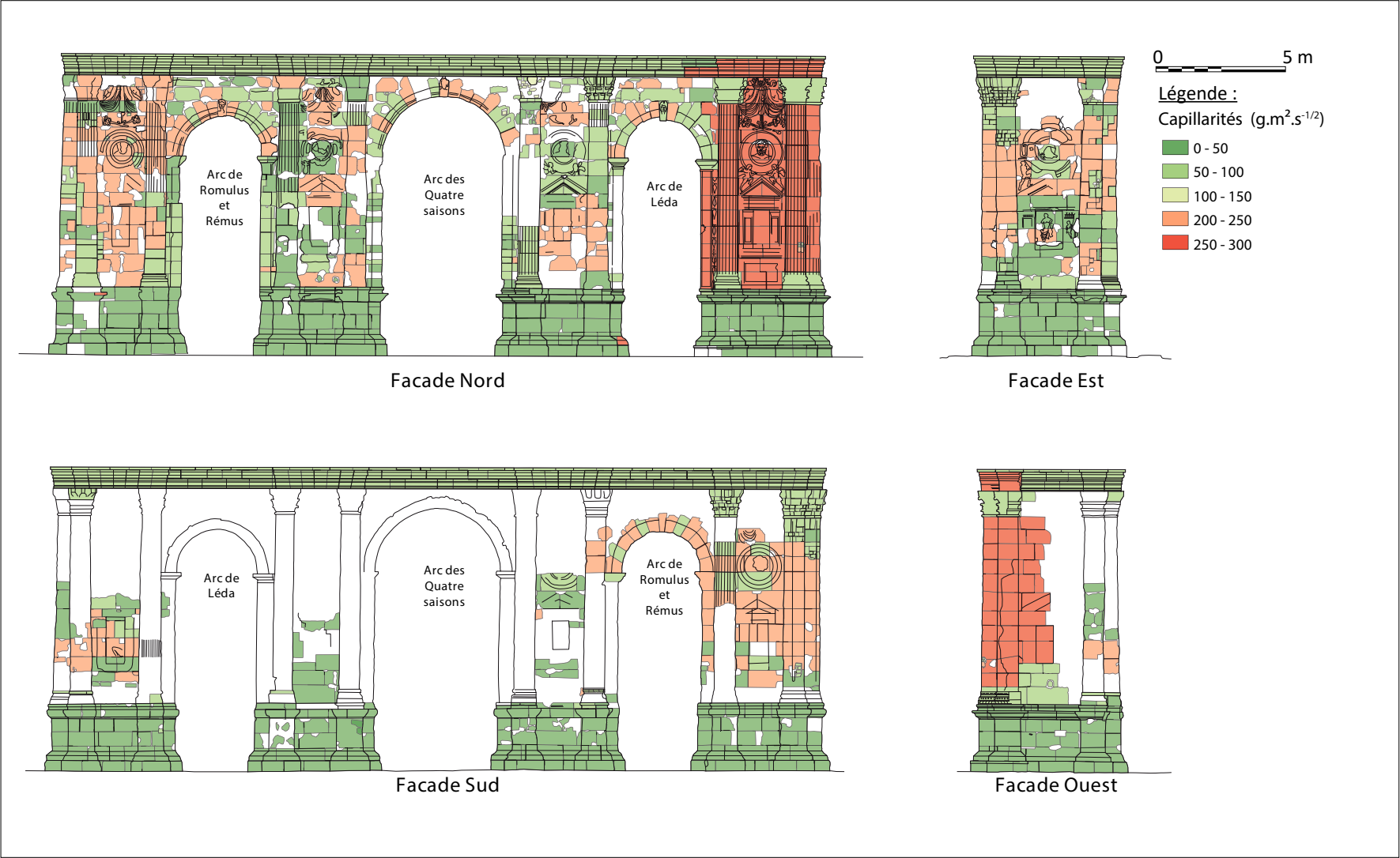
**Annexe 46. Capillarités mesurées et issus des études antérieures (Turmel, 2014)**

Nom	Capillarité (g.m <sup>2</sup> .s-1/2)	
	C1	Ncap
BART b	13,92	
BART a	7,16	
LIM - Bez	8,60	6,9
LIM - Poi	6,20	5,2
LIM - Par	7,40	7,6
LIM - Ver	34,00	12,2
CER - Gra	442,00	22
Lut IV c	30,15	
Lut IV b	201,68	
Lut IV a	251,87	
Lut III d	37,91	
Lut III c	15,49	
Lut III b	6,27	
Lut III a	3,80	
MIL - BraL	27,30	15,6
MIL - CouL	24,60	17,7
MIL - HerL	25,50	13,7
Lut II	266,19	
Lut I e(H)	0,17	
COUR (SE)	45,70	
Lut I d	70,61	
Lut I c	237,77	
Lut I b	1,15	
Lut I a	236,09	
DIT - Bra1	207,00	13,4
DIT - Bra2	74,00	14,30
DIT - Her1	144,00	19,7
DIT - Her2	18,40	10,5
DIT - Cou	37,00	12,1
DIT - Auy	27,00	13,3
DIT - Pro	17,70	9,7
SAV	59,61	
SAV (H)	81,67	
SAV (SE)	111,00	

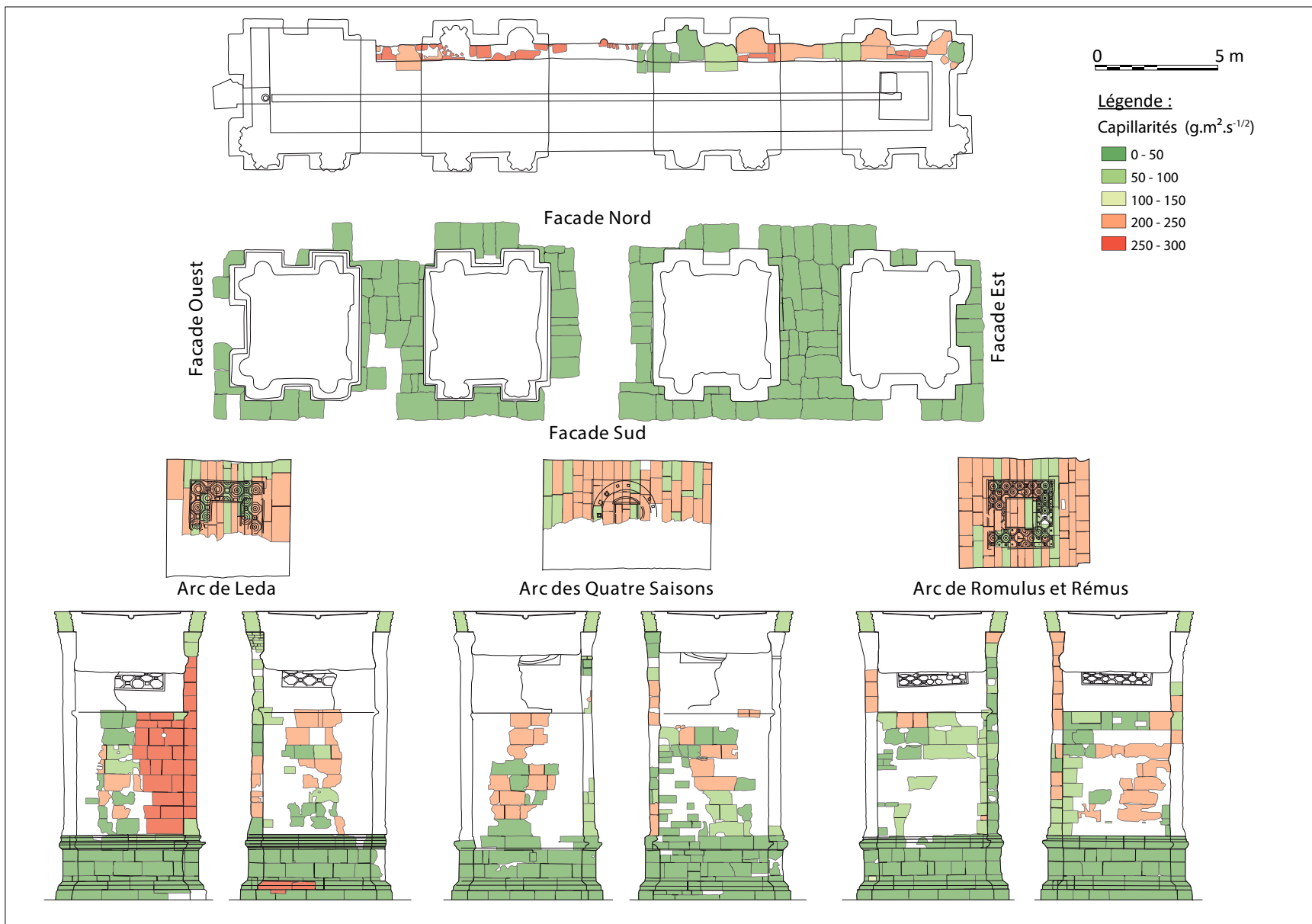
## Annexe 47. Courbes d'imbibition capillaire des échantillons caractérisés







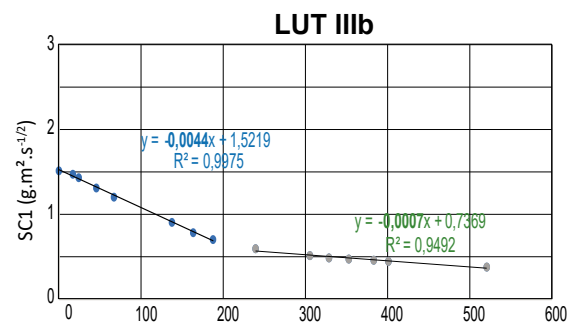
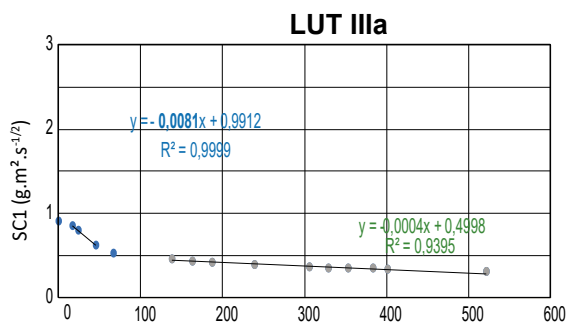
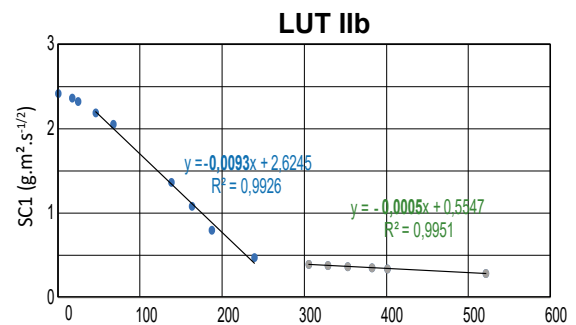
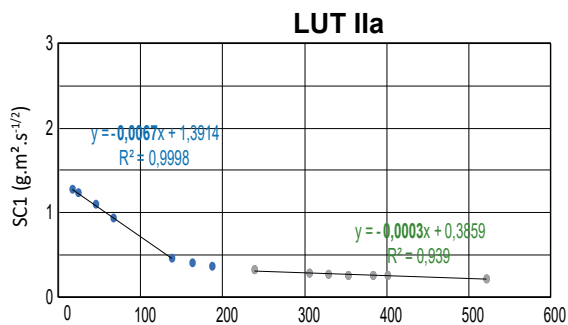
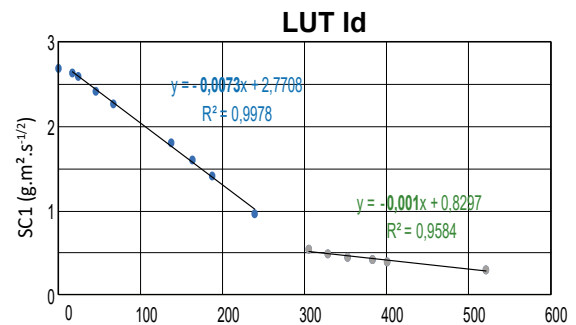
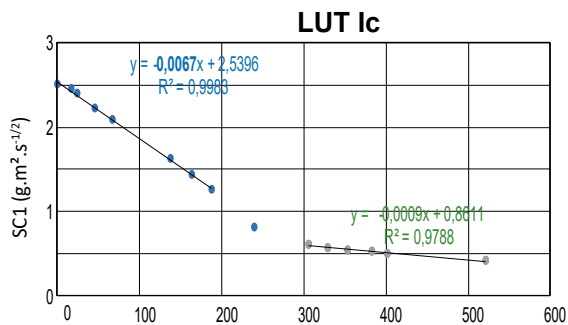
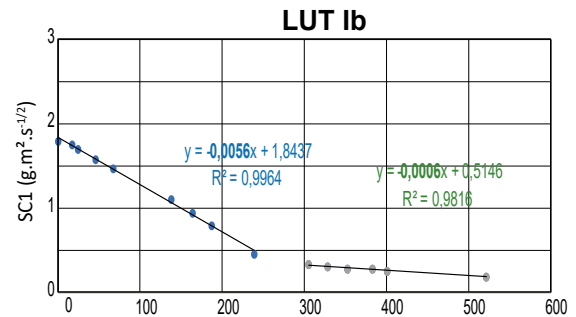
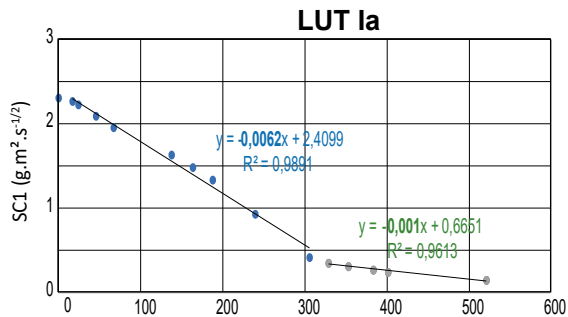


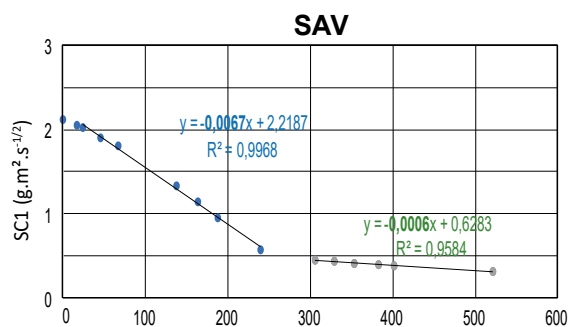
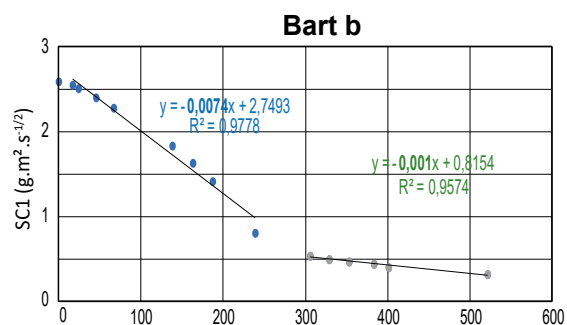
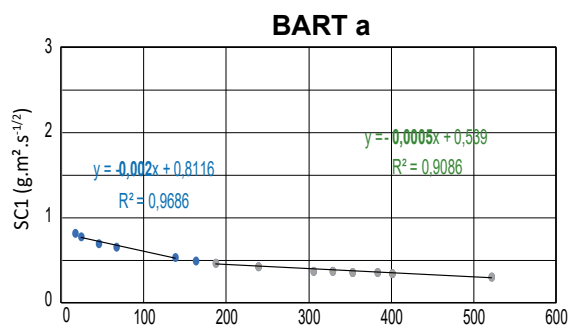
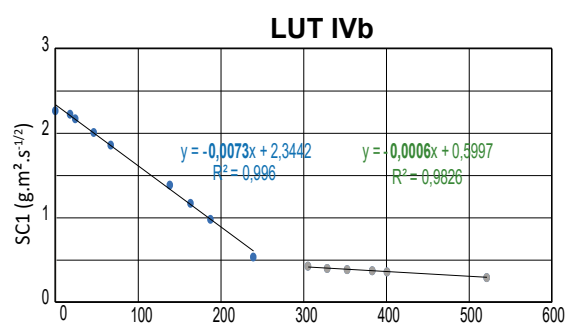
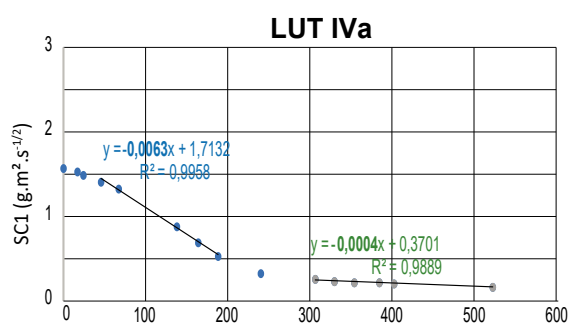
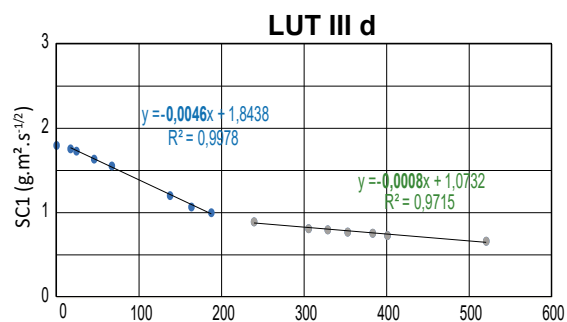
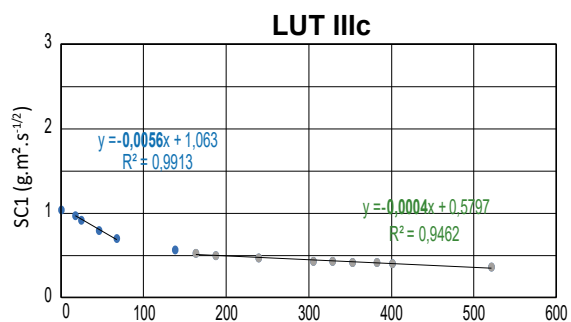


**Annexe 49. Valeurs des flux d'évaporations de ce travail et issus des études antérieures (Turmel, 2014)**

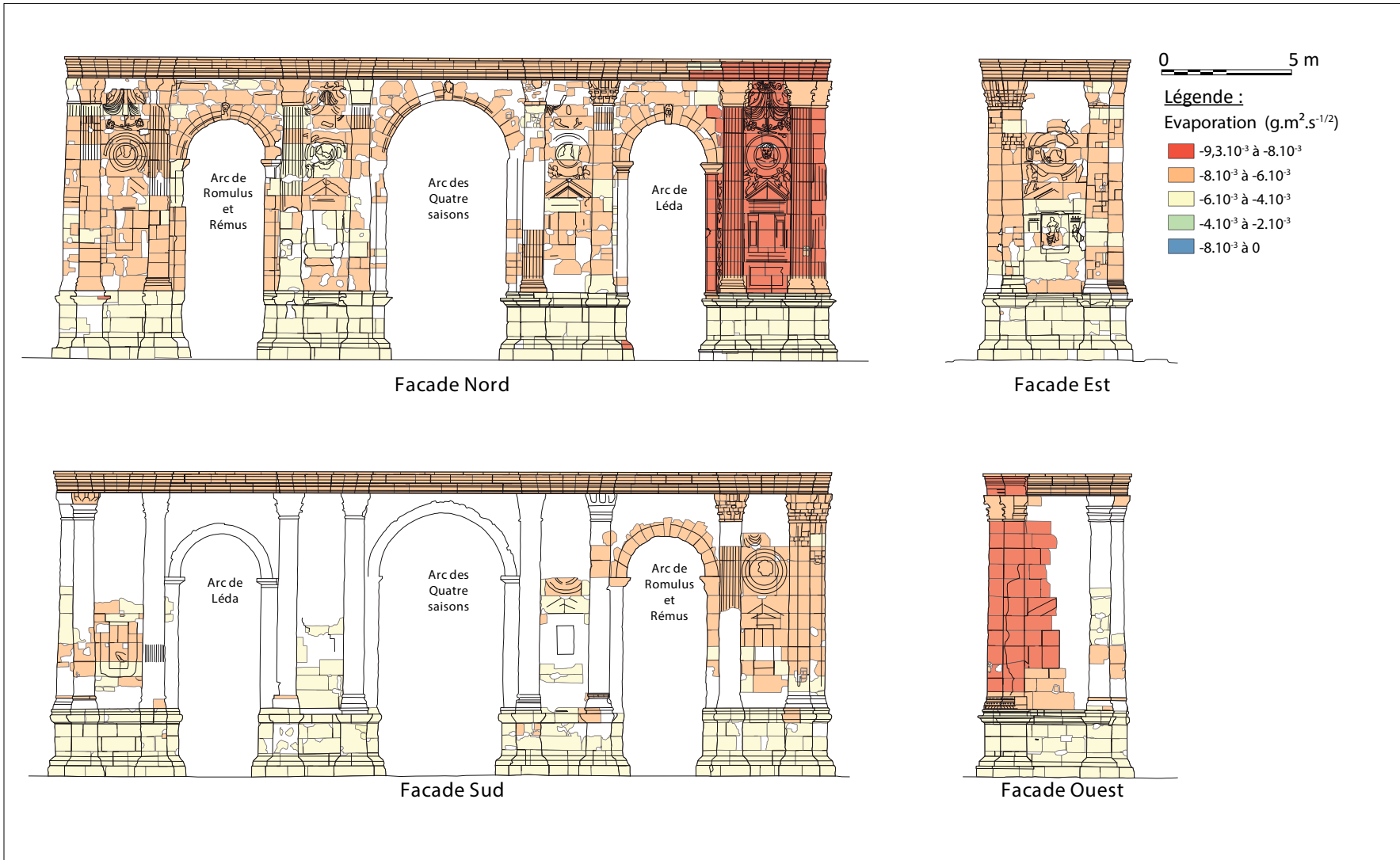
Nom	Evaporation (HR = 33%)					
	SC1 (g.m <sup>2</sup> .s-1/2)	SC2 (g.m <sup>2</sup> .s-1/2)	SC (%)	SC	TSc	c2
BART b	-0,01	0,00	54,45	1,00	187,50	
BART a	0,00	0,00	90,21	0,78	24,15	
LIM - Bez	-0,04		48,00		52,00	0,00008
LIM - Poi	0,00		30,20		290,00	0,000001
LIM - Par	-0,01		56,70		25,60	0,00015
LIM - Ver						0,002
CER - Gra	-0,02		17,30		168,00	0,002
Lut IV c	-0,01	0,00	35,53	0,47	138,00	4,14
Lut IV b	-0,01	0,00	51,84	1,31	164,00	3,67
Lut IV a	-0,01	0,00	33,48	0,53	187,50	19,55
Lut III d	0,00	0,00	55,53	1,42	187,50	
Lut III c	-0,01	0,00	68,35	0,62	45,75	0,34
Lut III b	-0,01	0,00	67,15	0,70	67,08	
Lut III a	0,00	0,00	52,24	0,79	164,00	0,0002
MIL - BraL	-0,02		70,70		28,00	0,00015
MIL - CouL	-0,02		61,50		40,00	0,0002
MIL - HerL	-0,02		72,50		25,80	3,42
Lut II	-0,01	0,00	32,72	0,79	187,50	
Lut I e(H)	-0,01		52,00			0,98
COUR (SE)						
Lut I d	-0,01	0,00	36,23	0,97	240,00	
Lut I c	-0,01	0,00	50,57	1,27	187,50	3,62
Lut I b	-0,01	0,00	44,38	0,80	187,50	
Lut I a	-0,01	0,00	40,27	0,93	240,00	3,59
DIT - Bra1	-0,09		16,00		113,00	0,0007
DIT - Bra2	-0,02		31,40		85,00	0,0005
DIT - Her1	-0,01		13,60		467,00	0,0008
DIT - Her2	-0,01		35,90		72,90	0,0002
DIT - Cou	-0,02		23,00		110,00	0,0003
DIT - Auy	-0,02		32,80		89,50	0,0002
DIT - Pro	-0,02		42,90		47,00	0,0002
SAV	-0,01	0,00	44,78	0,95	187,50	
SAV (h)	-0,02		28,00			2,70

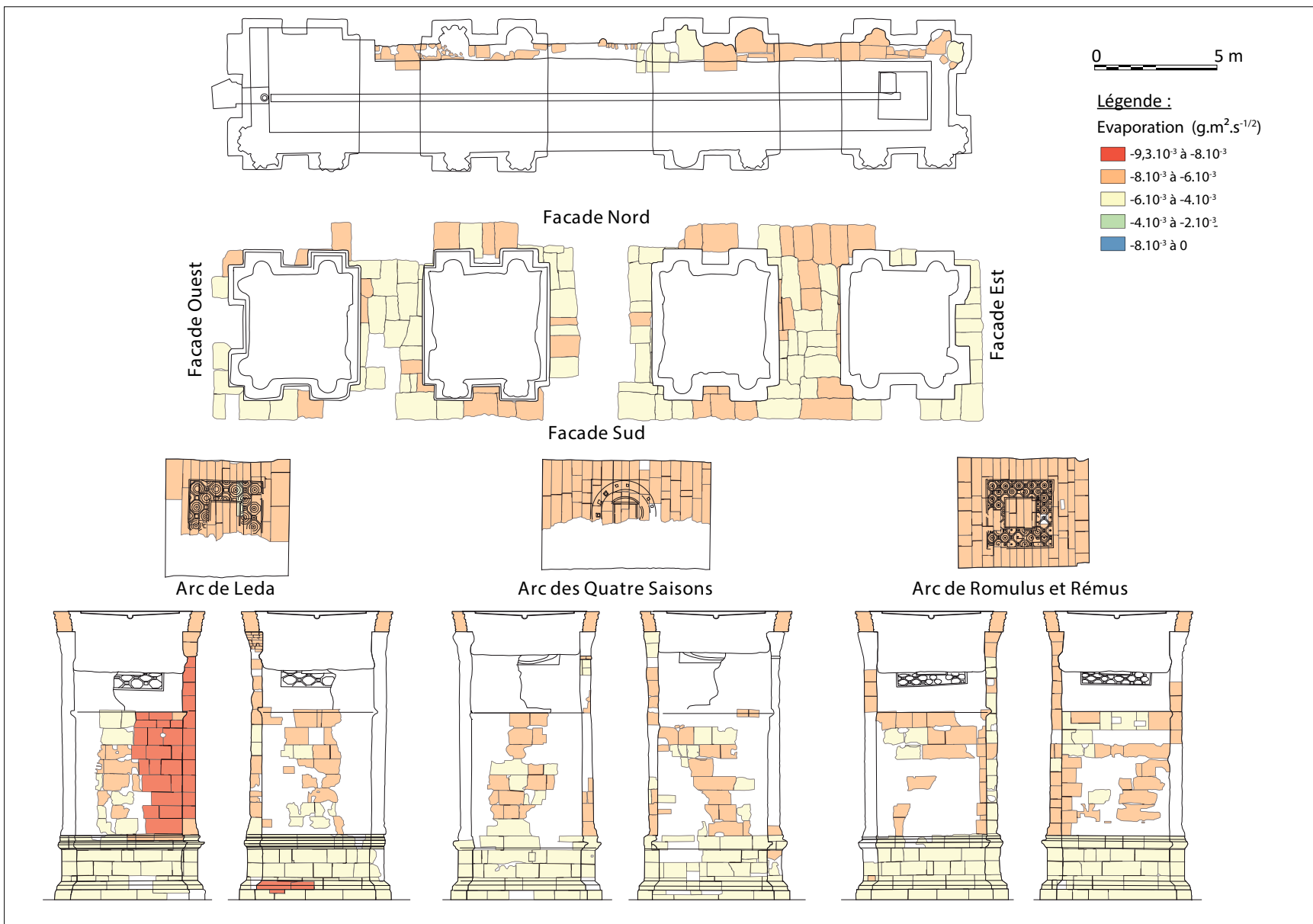
## Annexe 50. Courbes d'évaporation des échantillons caractérisés





## Annexe 51. Cartographie des cinétiques d'évaporation des pierres du monument





## Annexe 52. Indice de susceptibilité aux sels - Salt Susceptibility Index - SSI - Équation de calcul et tables

$$SSI = (I_{P_c} + I_{P_{m0.1}}) (P_{m5} / P_c)$$

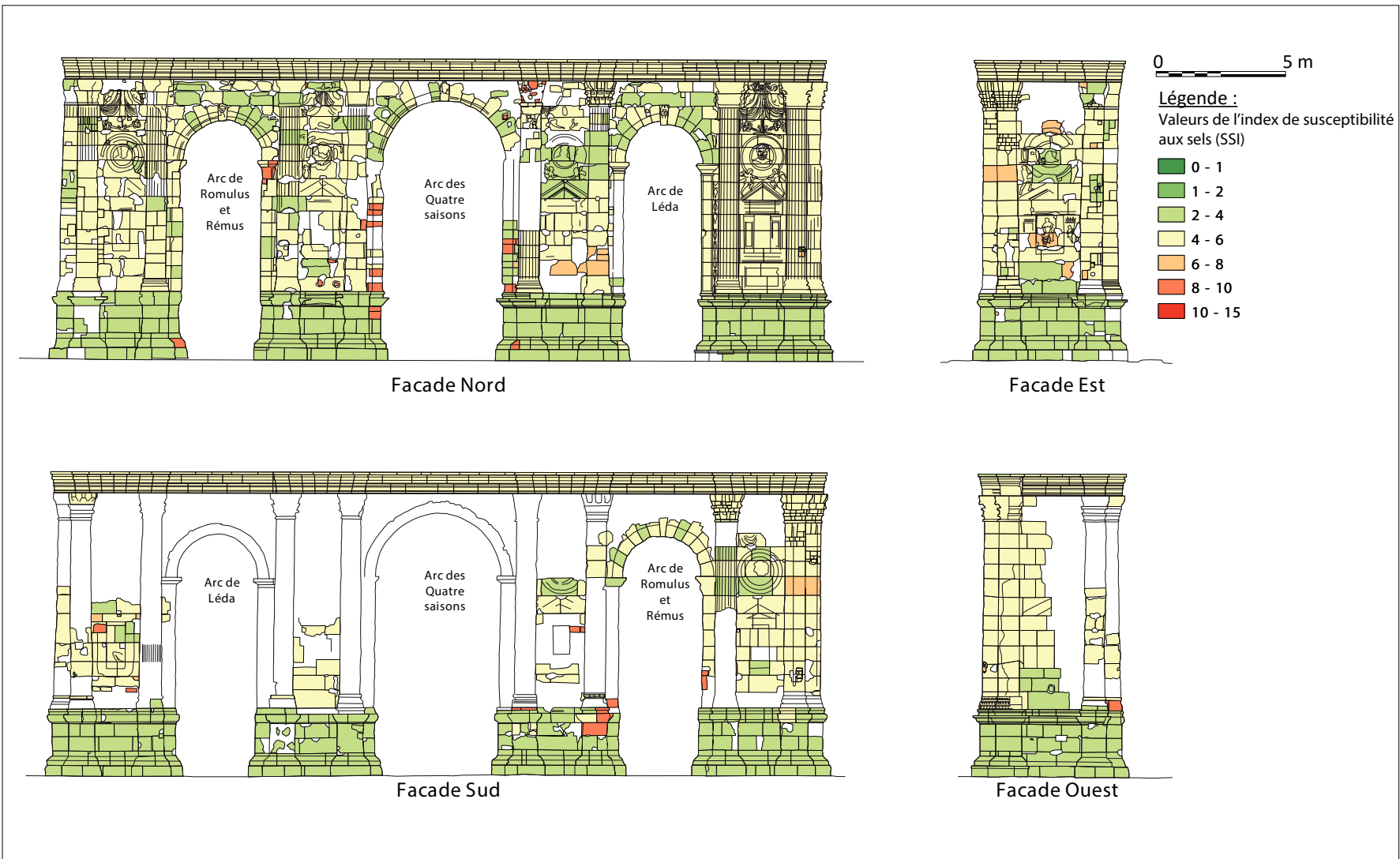
$P_c$ (%)	$I_{P_c}$	$P_{m0.1}$ (%)	$I_{P_{m0.1}}$
< 2	1	< 1.0	1
$2 \leq P_c < 5$	2	$1.0 \leq P_{m0.1} < 2.5$	2
$5 \leq P_c < 10$	3	$2.5 \leq P_{m0.1} < 5.0$	3
$10 \leq P_c < 15$	4	$5.0 \leq P_{m0.1} < 7.5$	4
$15 \leq P_c < 20$	5	$7.5 \leq P_{m0.1} < 10.0$	5
$20 \leq P_c < 25$	6	$10.0 \leq P_{m0.1} < 12.5$	6
$25 \leq P_c < 30$	7	$12.5 \leq P_{m0.1} < 15.0$	7
$30 \leq P_c < 35$	8	$15.0 \leq P_{m0.1} < 17.5$	8
$35 \leq P_c < 40$	9	$17.5 \leq P_{m0.1} < 20.0$	9
$\geq 40$	10	$\geq 20.0$	10

Indices pour des intervalles spécifiques de porosité et de microporosité

SSI	Interprétation
< 1	Exceptionnellement résistant au sel
$1 \leq SSI < 2$	Très résistant au sel
$2 \leq SSI < 4$	Résistant au sel
$4 \leq SSI < 10$	Sensible au sel
$10 \leq SSI < 15$	Très sensible au sel
$15 \leq SSI \leq 20$	Exceptionnellement sensible au sel

Classification de la susceptibilité au sel des roches par SSI

## Annexe 53. Carte de susceptibilité des pierres du monument aux sels (évaluée par les SSI)







---

## LES RESSOURCES EN PIERRES DE CONSTRUCTION DANS LE BÂTI ANTIQUE DE REIMS ET LEUR UTILISATION, APPLICATION À L'ÉTUDE DE LA PORTE DE MARS

---

La pierre est l'un des matériaux emblématiques dans la construction de l'Antiquité romaine, particulièrement en Champagne. Cette ressource fait partie des principaux enjeux dans la conservation et la restauration du patrimoine bâti. Fondée sur un site où les matériaux adaptés à la construction en pierre de bonne qualité sont rares, la ville de Reims s'est développée en utilisant judicieusement les ressources disponibles et en important celles qui lui manquaient. Le premier objectif de ce travail est l'établissement d'un inventaire des matériaux lithiques, la rationalisation de leurs usages et des critères qui ont présidé à leur choix par les constructeurs de l'antiquité. Cette démarche repose sur une intégration transversale des données géologiques et archéologiques disponibles pour la ville. La diversité des matériaux observés démontre leur utilisation raisonnée par les bâtisseurs, qui repose sur des réseaux d'approvisionnements développés à la logistique efficace. Le second objectif a consisté en une étude des pierres de la « Porte de Mars », réalisée à l'occasion de sa restauration débutée en 2016. Ce travail a été l'opportunité d'explorer les solutions d'enregistrement et de documentation d'un bâtiment en élévation pour en tirer un instrument pertinent. Cet outil a constitué un support aux données issues de la description des matériaux et de leurs altérations, complété par la caractérisation des matériaux du monument et de leurs équivalents en laboratoire. Ces informations ont été utilisées pour démontrer la rationalisation de leur positionnement architectural et pour la production de cartes du bâti à vocation prospective en particulier de susceptibilité aux altérations.

---

**Mots-clés :** Antiquité romaine, ressources lapidaires, SIG, photogrammétrie, patrimoine, pétrophysique, durabilité

---

---

## BUILDING STONE RESOURCES IN THE ANTIQUE CONSTRUCTIONS OF RHEIMS AND THEIR USE, APPLICATION TO THE PORTE DE MARS MATERIALS STUDY

---

Stone is one of the emblematic materials used in Roman construction, especially in Champagne. This resource is part of the main issues in the conservation and the built heritage restoration. Established on a site where high-quality stone building materials are rare, the city of Rheims grew by judiciously using the available resources and importing those that were lacking. The first objective of this work is the establishment of an inventory of lithic materials, the rationalization of their uses and the criteria which governed their choice by the ancient builders. This approach is based on a transversal integration of geological and archaeological data available for the city. Diversity of the materials observed demonstrates their rational use by builders, based on developed supply networks with efficient logistics. The second objective consists of a detailed study of the stone from the «Porte de Mars», carried out as part of its planned restoration. This work provided an opportunity to explore solutions for the registration and documentation of a building in its elevation and to produce a relevant tool. This instrument provided a support for the data derived from the materials description, their alterations, and complemented by the characterization of the monument's materials and their equivalents in the laboratory. This information is used for demonstrating the rationalization of their architectural positioning and to produce maps of the building for prospective purposes, for weathering susceptibility.

---

**Keywords:** Roman antiquity, lapidary resources, geoarchaeology, GIS, photogrammetry, heritage, petrophysics, durability

---

**Discipline :** SCIENCES DE L'UNIVERS

**Spécialité :** Géosciences

Université de Reims Champagne-Ardenne  
Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et les Environnements Naturels Anthropiques et  
Archéologiques (GEGENAA)  
UFR Sciences Exactes et Naturelles - Centre de Recherche en Environnement et Agronomie  
2, Esplanade Roland Garros  
51100 REIMS- FRANCE