

Université Paris X-Nanterre
1992-1993

Thèse de D.E.A.
Les Cultures de l'Antiquité Classique

Les Mortiers de pouzzolanes artificielles
chez Vitruve
évolution et historique architecturale

Frédéric Davidovits



- Directeur d'Etudes: **René Ginouvès**
- Jury: **René Ginouvès**
Agnès Rouveret
Jean-Pierre Adam

Les mortiers de pouzzolanes artificielles

CHEZ VITRUVÉ

ÉVOLUTION ET HISTORIQUE ARCHITECTURALE.

1. INTRODUCTION

1.1 LA PÉRENNITÉ DU MORTIER ANTIQUE

“Le béton Romain est l'invention la plus remarquable de l'histoire de l'ingénierie”¹; “Le Panthéon à Rome est le plus impressionnant ouvrage de génie civil de l'Antiquité”². Ces deux remarques admiratives sont les phrases introductives des chapitres: l'un *Eigenschaften von Römischem Beton*, l'autre *Bauwerke aus Römischem Beton*. Tous deux appartiennent au livre du Pr Heinz-Otto LAMPRECHT, *Opus Caementitium*.

“Bien qu'ils aient été soumis pendant des siècles à l'action de l'érosion climatique et écologique, ces mortiers et ces bétons ont très souvent survécu dans de meilleures conditions que les pierres naturelles ou les briques cuites trouvées dans les mêmes structures, et même parfois se comportent mieux que les bétons modernes soumis aux mêmes conditions.”³

Ainsi écrit R. MALINOWSKI, Professeur de génie civil à l'Université Chalmers (Göteborg, Suède), dans son article *Durable prehistoric ancient mortars and concretes*.

¹ H. P. LAMPRECHT, *Eigenschaften...*, p. 1: “Der Römische Beton ist eine der bedeutendsten Erfindungen der Baugeschichte.”

² H. P. LAMPRECHT, *Bauwerke...*, p. 1: “Eindrucksvollstes Ingenieurbauwerk der Antike ist das Pantheon im Rom.”

³ In *Geopolymer '88*, Vol. 2; p. 223, Université de Technologie de Compiègne, 1988. “Despite centuries of use and exposure to adverse environmental conditions, these mortars and concretes have often survived better than the natural stone or burnt brick found in the same structures and sometimes even better than modern concretes exposed to similar conditions.”

Ce sont donc deux ingénieurs du bâtiment et des ponts et chaussées qui traduisent ici leur étonnement et leur admiration face à l'exceptionnel résistance des mortiers antiques qui résistent beaucoup mieux au temps et aux intempéries que les bétons et ciments modernes. Nous n'avons pas besoin de rappeler les sentiments analogues qui animent depuis longtemps les archéologues quand ils décrivent, dans leurs rapports de fouilles, les maçonneries antiques.

Les mortiers antiques présentent un intérêt autre qu'archéologique: ils sont la preuve de l'existence de matériaux artificiels qui ont traversé les siècles. Ceci devient important dans notre civilisation postindustrielle confrontée avec le problème du stockage des déchets de toute nature. Quelle sera la durabilité dans le temps des sites de stockage? Comment s'assurer que les matériaux (béton par exemple) ne se détérioreront pas? Des études récentes ont montré qu'il était possible d'utiliser des matériaux équivalents aux mortiers romains, pour le stockage des déchets chimiques et radioactifs par exemple. Ainsi pour J. DAVIDOVITS⁴:

"Grâce aux recherches de la Chimie, on sait maintenant reproduire les anciens ciments, mortiers et bétons. Notre but, à l'Institute for Applied Archaeological Sciences, est d'utiliser cette connaissance ainsi que toutes les autres informations fournies par la science et la recherche archéologique, afin de réactualiser d'autres techniques anciennes, en ayant pour objectif de faire progresser la science moderne et la technologie contemporaine. Nous croyons être en mesure d'apporter un profit à la technologie actuelle en les comparant valablement avec les matériaux et ciments qui sont parvenus jusqu'à nous, depuis l'Antiquité."

La réputation des Anciens en matière d'architecture de coffrage et de pierre de taille n'est plus à faire. Les ruines de leurs monuments sont des exemples éloquents de leur savoir-faire. D'où la question qui vint infailliblement à l'esprit des générations suivantes: comment ont-ils fait? Les spéculations allèrent bon train: on imagina qu'il fallait ajouter des ingrédients secrets comme de l'oeuf, du sang, etc., au mortier pour que ce

⁴ Professeur et Directeur, Institute for Applied Archaeological Sciences, Barry University, Miami, Floride, USA (1983-1990). *Article Ancient and Modern Concretes: What is the real difference*, in *Concrete International*, 1987, Vol. 9, N° 12, p. 27. *"Chemical research has allowed us to replicate ancient cements, mortars and concretes. Our goal at the Institute for Applied Archaeological Sciences is to use this knowledge, combined with information gained through scientific and archaeological research, to revive and introduce other useful ancient technology for the purpose of enhancing modern science and technology. We believe we can advance technology by offering products that can be evaluated by comparing them with the surviving cementitious products of the antiquity."*

Voir aussi Joseph Davidovits and Douglas Comrie, *Long Term Durability of Hazardous Toxic and Nuclear Waste Disposal*, in *Geopolymer '88*, Vol. 1, p. 125, Université de Technologie de Compiègne, 1988.

dernier devienne exceptionnel. Ce mortier, fait de brique pilé et de chaux, reçut le nom de “ciment romain”.

Or J.P. ADAM⁵ est beaucoup plus réservé quant à la qualité de certains mortiers romains ceux qu'on employait le plus couramment:

"La préparation des mortiers romains a toujours fait l'objet d'une grande admiration, souvent teintée d'une grande réputation de secret technique jamais dévoilé. En réalité, les seules constructions en maçonnerie concrète (c'est-à-dire liées au mortier de chaux), qui nous sont parvenues en bon état sans jamais avoir été protégées par l'enfouissement, sont celles dont l'édification avait, à tous égards, été particulièrement soignée, faisant appel à une chaux de qualité (de cuisson homogène) entrant dans la composition de mortiers parfaitement dosés et mélangés en correspondance avec un monument statiquement équilibré. On ne saurait parler des constructions médiocres innombrables, puisque celles qui étaient demeurées à l'air libre ont disparu en raison même de leur vulnérabilité.[...] La ville de Pompéi, à cet égard, est remarquablement significative; la maçonnerie des maisons, sous les enduits de parement d'excellente qualité, est presque partout d'une extrême médiocrité et, même dans la dernière phase constructive, les mortiers demeurent terreux et mal préparés. Les prescriptions, cependant, existaient et Vitruve, qui demeure notre source principale, est extrêmement explicite. Ces précisions sont d'ailleurs le démenti à un secret jalousement conservé par les bâtisseurs romains, et les analyses ont amplement démontré que les recommandations de l'auteur des Dix Livres d'Architecture correspondaient à une réalité pratique amplement mise en application."

J. P. ADAM a raison: il y a les très bons mortiers et les autres. Les premiers se “voient” et permettent aux ruines de survivre aux assauts du temps et des hommes. Les seconds ont disparu et leur emploi explique l'extrême fragilité des multiples édifices dégagés de l'ensevelissement qui les avait protégés. De fait, à cause d'un médiocre mortier de chaux qui ne résiste pas au temps, la préservation de ces édifices pose problème. Pour conclure, disons que le mauvais mortier représente l'immense majorité disparue des constructions antiques et que celui qui dure constitue la petite minorité visible qui a survécu.

1.2 LES EXPLICATIONS DE CETTE PÉRENNITÉ.

Ces monuments ou ces ruines importants (tels que temples, palais, thermes, citernes, etc....) bénéficièrent d'un mortier de bonne qualité qui prouve leur pérennité. On les trouve à Rome, en Italie, dans le Midi de la France, à Trèves, en Grèce, etc.... Comment explique-t-on la solidité du “ciment” antique? C. GERMAIN DE MONTAUZAN⁶ qui résume l'opinion

⁵ In *La construction romaine...*, p. 77.

⁶ In *Les aqueducs antiques de Lyon. Etude comparée d'archéologie romaine*, p. 208, Paris, 1908.

archéologique, apporte une première réponse en insistant sur l'homogénéité remarquable des mortiers romains et sur le soin extrême apportée à leur préparation:

"Voilà où il faut chercher surtout la raison de la supériorité de ces mortiers, comparativement à nos mortiers communs, qui si souvent s'effritent et se cassent. Tous les architectes savent avec quelle difficulté on obtient des maçons qu'ils fassent des dosages exacts, qu'ils ménagent le volume d'eau versé sur la chaux, qu'ils y mêlent graduellement le sable et qu'ils emploient le temps nécessaire au corroyage. Le travail du maçon romain était donc très minutieusement surveillé et contrôlé."

Cet avis rejoint celui de J.B. RONDELET⁷, plus près des pratiques du XVIII^e siècle, et donc plus proche de la technique antique:

"Je ne pense pas, comme plusieurs auteurs, que les anciens Romains aient eu une méthode de faire le mortier, différente de celle que l'on pratique encore aujourd'hui à Rome et dans toute l'Italie, ainsi que dans plusieurs autres pays. (...) L'excellence qu'on attribue au mortier des anciens Romains, provient autant des bonnes qualités de la chaux et du sable qu'ils employaient, que de l'attention qu'ils avaient de le bien broyer (délayer, triturer), afin de faciliter l'union et le mélange exact de ces matières. Je me suis assuré, par plusieurs essais, que plus le mortier est broyé, plus il acquiert de consistance, plus il durcit promptement."

Ces remarques valent aussi bien pour certaines maçonneries grecques (à Délos, Théra, Delphes, etc.) dont nous parlerons dans cette étude.

1.3 LE RÔLE DU TUILEAU ET DE LA POUZZOLANE.

Or, la qualité professionnelle et le zèle du maçon à doser, mêler, les ingrédients de sa préparation n'explique pas tout. Cela ne suffit pas à dire pourquoi et comment la prise de la chaux aérienne, qui durcit grâce au gaz carbonique de l'air, pouvait s'accomplir dans les "bétons" épais de plusieurs mètres qui constituent les voûtes concrètes du Panthéon, des thermes de Caracalla, de la basilique de Maxence à Rome. En effet, ce gaz carbonique ne pouvait pas entrer en contact avec le "béton" des voûtes à cause des cintres de bois qui soutenaient ces dernières.

⁷ In *Traité* ..., pp. 140-141.

Les maçons ajoutaient donc quelque chose qui faisait durcir le mortier sans l'intervention du gaz carbonique de l'air, comme durcit de nos jours le ciment (appelé aussi "Portland"). Ce quelque chose détermine la solidité et la durabilité du produit. On ne le retrouve pas dans les constructions courantes qui, de ce fait, ont été détruites, lorsqu'elles ne furent pas protégées comme à Pompéi contre l'érosion climatique. Cet ingrédient, que nous indique Vitruve, était soit la pouzzolane soit le tuileau (*testa, ae, f*).

1.4 LES "RECETTES" DES ARCHITECTES.

Où trouvons-nous les recettes du bon "ciment", produit qui doit sa qualité à ce qu'il durcit sous l'eau et qu'il est imperméable? Vitruve est notre principale source d'informations. Il écrit le *De Architectura* antérieurement à 27 avant J.C. D'autres auteurs, comme Varron, Palladius, Columelle, et Faventinus, le reprennent dans des compilations; Plin apporte quelques éléments intéressants.

La première de ces recettes parle de la pouzzolane (Vit. 2, 6, 1), cette poudre d'origine volcanique qui, mêlée à la chaux et au sable, durcit sous l'eau. Lorsque ce mortier est analysée, on trouve trace de cette pouzzolane. Mais celle-ci est rare en Grèce et en Italie dans les autre régions de la Méditerranée.

1.5 *SIGNINVM*, *TESTA*, *TESTACEVM* : LES MOTS-CLEFS QUI DÉSIGNENT LE MORTIER HYDRAULIQUE.

Le second procédé consiste à ajouter de la *testa* pilée (sorte de brique ou de tuile d'argile kaolinite, cuite entre 600 et 900 C°) au mortier courant. Dans ce cas, ajoute Vitruve (2, 5, 1), on obtiendra [Perrault] "*la plus juste proportion de leur mélange, qui sera encore beaucoup meilleur si on ajoute au sable de mer et de rivière une troisième part de tuileaux pilés et sassés*"⁸.

Cette préparation (mortier à la chaux + *testa*), après avoir été battue, recevait le nom d'*opus signinum* qui désigne soit un enduit imperméable (Vit. 7,1,3), soit un béton de sol (7,4,3). Le pavement avec de la *testa* est qualifié de *pavimentum testaceum* (Vit. 7,4,5) où celui-ci sert de couche imperméable pour le pavement à la grecque. Chez Palladius (1,17,1) le

⁸ *Etiam in fluviatica aut marina si qui testam tunsam et succretam ex tertia parte adiecerit, efficiet materiae temperaturam ad usum meliorem.*

pavimentum testaceum désigne le plancher imperméable de la citerne. De plus, nous avons défini dans le mémoire de maîtrise l'*opus signinum* qui sert de mur pour cette citerne, (Vit. 8, 6, 14) en le rapprochant d'un texte du *De agricultura* de Caton (*De Agr.* 18, 7).

Plinie (*N. H.* 36,175) reprend les proportions de Vitruve (2,5,1):

"Si l'on adjoint encore au mélange [de sable fluvial ou marin] un tiers de brique pilée [*testae tusae tertia pars*], le produit sera meilleur."⁹

La note 2 du commentaire du paragraphe 175, indique que les tessons, ou briques, ajoutaient au ciment de la silice qui accroissait sa résistance et que le revêtement obtenu est l'*opus signinum*.

Ainsi la *testa*, cette argile kaolinite, cuite à basse température et réduite en poudre, renvoie à l'*opus signinum* et inversement. Le sens de *testa* se situe dans un contexte technique. De fait, toute interprétation d'un tel terme technique exige un minimum de précision dans la traduction; or, contrairement à ce qui précède, la plupart des traducteurs de Vitruve emploient de vagues locutions comme "tessons pilés", "briques broyées", "poterie cassée", "terre cuite écrasée"... Nous avons montré dans notre maîtrise que dans l'esprit de Vitruve *testa* désigne un type précis d'argile cuite dont nous avons donnée une définition, sommaire, mais précise dans le contexte technique et "maçonnerie" qui nous occupe. Hors de ce contexte, *testa* dans un sens littéraire peut se traduire par morceau de terre cuite, de brique, par "tuileau" ou "tesson", voire même par "coquille" et "coquillage".

Mais de quel genre d'argile cuite se sert-on pour faire ce qu'on appela au XIX^e siècle le "ciment romain"? De la brique? De la tuile? Des débris d'amphore? L'argile vient-elle d'un lieu précis? Telles sont les diverses questions que se posèrent les maçons et les architectes qui voulurent imiter les grandioses monuments romains. Mais les maîtres de l'art de bâtir n'avaient à leur disposition, comme documentation, que le *De Architectura* et ses plagiat. Or, ni Vitruve, ni ses compilateurs ne précisent quelque élément susceptible de les renseigner. Donc les maçons et les architectes en conclurent:

- 1) que les recettes de Vitruve ont une valeur universelle (c'est-à-dire qu'on pouvait les appliquer partout dans la Méditerranée),

⁹ *Si et testae tusae pars addatur, melior materia erit.*

2) qu'ils pouvaient utiliser n'importe quelle genre d'argile (car Vitruve ne fait aucune mention d'une argile spécifique à employer) pour faire du bon liant car cette matière première était abondante et infiniment plus facile à trouver que la pouzzolane dont Vitruve dit que la seule valable était celle qu'on trouvait à Baïa, près du Vésuve.

Mais voyant que l'argile illitique (celle qu'on rencontre le plus souvent en France) mêlée à la chaux ne donnait qu'un tas informe et inutile, les expérimentateurs imaginèrent que les maçons ajoutaient au liant un ingrédient secret connu des seuls Initiés, et ils conclurent une fois pour toute que le seul "ciment romain" était celui à base de pouzzolane.

Si les procédés de Vitruve ne fonctionnent pas dans nos régions, c'est parce que ses "recettes" n'ont point la portée universelle qu'on leur attribue: en d'autres termes, les expérimentateurs se trompèrent d'argile. On oublie que les lecteurs du *De architectura* sont soit des architectes soit des maîtres d'oeuvre italiens qui bâtiront dans la péninsule. Ce qui explique qu'il faudra employer, non point de l'illite, qui ne durcira qu'à 1300-1400 °C, mais de la kaolinite, qui cuira vers 600-900 °C et qui permettra une meilleure concrétion sous l'eau.

Quel est la différence entre la kaolinite et l'illite? La première se trouve surtout autour de la Méditerranée, la seconde se situe dans les régions tempérées et froides. Si ces deux argiles sont des silicates d'alumine, elles sont structurellement et chimiquement différentes. C'est pourquoi, la kaolinite, pour réagir chimiquement de manière complète avec la chaux, devra être cuite à des températures basses, c'est-à-dire de 600 °C à 800 °C. Au contraire, les argiles de nos contrées tempérées, comme l'illite, les argiles employées par Vicat (l'inventeur du ciment Portland, en France) et Apsdin (qui reprit les idées de Vicat et les breveta, contrairement à celui-ci) demandent une température élevée, de l'ordre de 1200 à 1400 °C, pour pouvoir fournir le ciment.

C'est pourquoi, Vitruve, en décrivant les différents procédés, il pense à la *testa* d'Italie (dont la meilleure vient de Signia, ville du Latium, d'où dérive le terme *signinum*). La *testa* est donc un parfait substitut artificiel à la pouzzolane. Seul le hasard géologique faisait que, parfois, les recettes fonctionnaient dans certaines régions (cf. Signia) où les argiles ont des propriétés pouzzolaniques comparables à celles d'Italie (à Trèves ou dans le Midi de la France par exemple).

Les recettes de Vitruve tiennent seulement compte des matériaux locaux de Rome. C'est ce que pense G. LUGLI dans son chapitre sur l'*opus caementicium* dans son ouvrage *La tecnica edilizia romana*. On use, pour celui-ci, d'un "tufo", comme l'écrit G. LUGLI. Ce tuf (d'origine volcanique) est employé comme agrégat. Or la région de Rome est connue pour posséder des tufs volcaniques. De même, G. LUGLI signale que quand Vitruve parle d'*harena*, celui-ci utilise le terme aussi bien pour désigner le sable quartzique que la pouzzolane. On trouve celle-ci également dans le Latium. Donc, lorsque Vitruve énumère différentes sortes d'agrégats, (toujours d'après G. LUGLI) il pense aux ressources de la région de Rome. De fait, le livre de Vitruve est destiné aux architectes et aux maîtres d'oeuvres italiens. Donc les recettes du mortier n'ont point la portée universelle qu'on voulut leur attribuer. Nous rappellerons de tout cela dans le prochain chapitre.

1.6 LES RAISONS DE CETTE ÉTUDE.

Si le mortier de pouzzolane est très bien connu, le liant à base de *testa* est à peine étudié. Vitruve est la source principale de nos connaissances en ce domaine. L'imprécision apparente des termes techniques, la mauvaise interprétation des textes à cause de la difficulté de la langue vitruvienne, tout cela amena une confusion et donna la légende du mortier antique. Ajoutons l'incapacité, compréhensible, des philologues à traduire correctement les termes de métier. De plus, alors qu'on connaît le mécanisme de fonctionnement du ciment Portland, l'étude et l'expérimentation des mortiers antiques s'arrêta au XIX^e siècle au moment même où le Portland apparut sur le marché.

On s'attendrait à ce que les articles techniques concernant la maçonnerie antique fournissent des explications, des analyses, mais ils laissent le lecteur sceptique. Ainsi des archéologues déclarent que les Romains employèrent exclusivement de la chaux aérienne. Par exemple, cette étude sur l'*opus signinum*, dont les auteurs soulignent que le *signinum* repose uniquement sur l'usage de chaux grasse et que les *testae* ne font office que d'agrégats¹⁰. Notre étude prouvera exactement l'inverse. De plus, ces conclusions vont à l'encontre des conseils de préparation du mortier que dispensent les auteurs anciens.

¹⁰ I.R. Fiorentini,, "*Opus Signinum*"..., pp. 341-350.

D'un autre côté, les archéomètres, qui, grâce à leurs instruments puissants, leur permettent d'accomplir des analyses poussées, détectent dans des échantillons de ciments romains, des *testae* pilées qui ont réagi avec la chaux suivant des réactions pouzzolaniques. L'ajout de *testa* transforme la préparation en un mortier hydraulique. Mais un trouble nous envahit lorsqu'ils se mettent à affirmer ceci:

"En fait, d'après les indications trouvées dans la littérature ancienne, les mortiers Romains étaient préparés en calcinant les roches calcaires."¹¹

En gros, aucun auteur ancien, même point Vitruve, ne mentionne l'emploi de tessons broyés dans leur traité pour améliorer le liant de chaux aérienne!

Nous le voyons, chaque communauté de spécialistes effectuent leurs travaux chacune de leur côté. Les uns affirment que les *structores* usèrent uniquement de chaux grasse, les autres accomplissent des analyses qui prouvent l'utilisation de *testa* dans les mortiers. Alors, les uns comme les autres négligent les recommandations précises des textes antiques, auxquels les uns comme les autres font référence.

Donc, il y a peu d'échanges d'informations entre les archéologues et les archéomètres. Si les hommes de l'art citent Vitruve, alors le profane entretient cet espoir qu'ils établissent une critique du *De architectura* avec l'oeil du spécialiste, et de fait qu'ils analysent de façon approfondie les descriptions du mortier. Or en lisant la "littérature" spécialisée, on s'aperçoit qu'il n'y a rien, que les articles techniques sont seulement descriptifs et qu'ils sont vaguement allusifs à propos de Vitruve.

C'est dans cette optique que, dans la maîtrise, nous avons fait le point sur ce que l'archéologie connaît en matière de technique de maçonnerie. Nous avons étudié et défini l'*opus signinum* sur le plan technique: c'est une maçonnerie à base de chaux et de *testa* qui est battue pour rendre le mélange homogène. Cette maçonnerie est employée pour les sols, les enduits, et, Vitruve en parle, pour des murs (Vit. 8, 6, 14). Puis nous avons étudié les occurrences du vocabulaire de l'*opus signinum* et les traductions de ces occurrences. Nous avons donc défini un type de mortier et nous avons proposé que les traductions (pour *testa* et *signinum*) conservent le nom latin. En effet, c'est pour éviter les confusions avec les locutions du

¹¹ F. Rassinoux, J.C. Petit et A. Meunier, *Ancient Analogues of Modern Cement...from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France*, in *Journal of the American Ceramic Society*, 72 (1989), pp. 1026-1032. "...In fact, the indications reported in the ancient literature indicate that the Roman mortars were prepared with the modern procedure, by calcinating carbonate rocks..."

type "mortier de tuileau" ou "mortier de brique pilée" que nous proposons "mortier de *testa*". Ainsi, par les détails techniques que donne Vitruve, nous voyons que le *signinum* est une maçonnerie exceptionnelle. Nous avons enfin étudié le site de Signia et nous avons montré que le site réunissait tous les ingrédients géologiques pour la fabrication et la cuisson de la meilleure tuile pour la chaux.

Vitruve fait donc le point des techniques architecturales de son temps. Cela est vrai aussi bien pour les matériaux de constructions, les techniques de levage, les maçonneries, et pour les bâtiments de grand appareil. Culturellement, la plupart sont d'origine grecque. L'héritage hellénique se manifeste évidemment par l'art monumental, et le grand appareil (les temples, les grands styles doriques, ioniques et corinthiens). Pour les maçonneries, il en est de même pour les techniques de mosaïque et les enduits. Mais pour les murs qui possèdent un liant: les Grecs les employaient systématiquement ou sont-ils l'exception? Il s'agira en fait, pour le domaine qui nous occupe à savoir l'historique des mortiers de *testa*, de déterminer quel est la part d' invention, d'amélioration des Grecs, des Romains ou d'un autre peuple, pour le mortier à pouzzolane artificielle.

Plan de l'étude:

Dans le chapitre deux, nous ferons le point sur les matériaux de construction du mortier: la cuisson de la chaux, le sable, la cuisson de l'argile. Puis, à partir des textes de Vitruve et du *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*, nous définirons l'*opus signinum*. Nous exposerons ses emplois: enduit, blocage de sol pour les pavements et les mosaïques. Nous évoquerons les techniques apparentées des sols comme le *rudus* imperméable et le *nucleus*.¹². Nous définirons le mystérieux *opus signinum* qui est un mur de citerne. Ensuite, nous montrerons la différence chimique concernant la concrétion de la chaux aérienne et de chaux hydraulique artificielle à base de *testa*. Enfin, nous exposerons les caractéristiques géologiques et minéralogiques de Signia. Celle-ci réunit toutes les conditions pour fabriquer la meilleure *testa*. C'est de ce site qu'est originaire l'*opus signinum*, et de fait, celui-ci devait la référence romaine en matière de mortier hydraulique.

¹² Ces deux techniques sont sans doute battues mais Vitruve le précise seulement pour le *rudus* simple.

Dans le chapitre trois, nous comparerons l'*opus caementicium* et l'*emplecton*. A partir du texte de Vitruve, nous verrons leurs différences et leurs similitudes: le premier est fait d'un blocage de chaux, d'agréats, de pouzzolane et pourquoi pas de *testa*. Les matériaux pour le réaliser dépendent des ressources locales: ainsi le *caementicium* de la région volcanique de Rome aura pour caractéristique d'avoir un mortier de chaux et de pouzzolane, ailleurs à Signia par exemple un mélange de chaux et de *testa*. Le second est un mur de terre le plus souvent avec deux parements en grand appareil. Mais tous deux restent des murs à trois parties distinctes avec chacun des emplois différents.

Dans le chapitre quatre, nous aborderons les enduits. Les enduits sont composés de chaux ou de plâtre, pour les plus courants, et les enduits hydrauliques dépendent des ressources locales. En effet dans la plupart des cas, on emploie la *testa*, mais pour les lieux où le volcanisme se trouve, on usera de la pouzzolane ou de la pierre ponce. L'emploi de cendres volcaniques est minoritaire dans l'utilisation des enduits imperméables. Nous critiquerons les analyses des enduits imperméables pour montrer qu'elles sont incomplètes et donc difficilement exploitables. nous terminerons ce chapitre par un exemple unique de confrontations des deux techniques (pouzzolane et *testa*) à Théra.

Le chapitre cinq fera le point sur les techniques de sol employées à Olynthe, Délos, etc: le béton de sol, le mortier de mosaïque et le pavement imperméable pour les conduits. Le mortier rose est partout présent.

Le chapitre six remontra aux sources grecques des liants: car c'est à Chypre qu'apparaît, hérité d'Asie, au VIII^e-VII^e siècle, le liant de chaux, de plâtre. C'est par cette île, avec Rhodes, qu'arriva de Phénicie, le mortier de *testa*.

2. L'OPVS SIGNINVM.

Grâce au *De Architectura*, nous pouvons nous faire une bonne idée sur la manière dont devait penser et agir un architecte de l'époque de Vitruve. Sa formation est classique et c'est la grande architecture grecque qu'il décrit pour les grands travaux comme la construction des temples, des théâtres, des places publiques.

La plupart des architectes de la Renaissance trouvaient enfin en Vitruve un manuel savant et précis pour bâtir comme les Grecs et les Romains. Ainsi, lorsque Cl. PERRAULT écrit sa traduction, il tenait à faire du *De Architectura* un traité pour les étudiants et n'avait, comme ses prédécesseurs du *Quattrocento*, nul objectif archéologique à l'esprit.

Le lecteur intéressé par le problème du mortier antique ne trouve rien dans les articles spécialisés qui puisse satisfaire sa légitime curiosité, car ceux-ci font de vagues allusions à Vitruve dans leurs introductions et n'approfondissent guère le sujet. Allons-nous ressentir de la déception en examinant les techniques de maçonnerie que mentionne le *De Architectura*? Alors que certaines données sur la grande architecture paraissent sujettes à caution, - c'est la tâche des historiens de l'art et des archéologues de savoir si ce que rapporte notre auteur a ou non des correspondances dans le domaine de l'art monumental - n'en doutons pas, les renseignements qu'il donne concernant les techniques de maçonnerie sont fiables.

Peu importe de savoir si le *De Architectura* était destiné aux architectes ou aux maîtres d'oeuvre (comme Auguste). Toujours est-il que dans ce chapitre nous ferons le point sur l'*opus signinum* cette technique-type de maçonnerie à base de chaux hydraulique artificielle explicitée par notre auteur. Décrit-il exhaustivement certaines pratiques et est-il allusif sur d'autres? Nous verrons bien. Même lorsqu'il reste vague quant à certaines techniques, les textes antiques nous apporteront de précieuses indications. Pour le cas qui nous intéresse, définit-t-il de façon complète le *signinum*? Nous verrons cela dans ce chapitre. Mais avant cela, il serait intéressant de narrer le comment et le pourquoi de l'invention du ciment portland à cause du *De Architectura*.

2.1 LE MORTIER À LA CHAUX, LE "CIMENT ROMAIN" ET LE CIMENT PORTLAND.

Les peuples de l'Antiquité ne connaissaient pas le ciment qui est d'un emploi courant de nos jours. Leurs matériaux de construction étaient le bois, la pierre taillée ou polie, la brique d'argile séchée au soleil. Les pierres de taille étaient le plus souvent posées les unes sur les autres sans mortier de liaison (murs cyclopéens de Mycènes). Les liants utilisés étaient l'argile, le plâtre, la chaux. Mais le liant, qui a été sans doute très employé aux époques les plus reculées comme enduit pour les murs, était la chaux grasse. Les Etrusques, les Phéniciens, puis les Grecs et les Romains s'en servirent pour leurs travaux de maçonnerie. La chaux est obtenue par cuisson de roches calcaires, puis par extinction de la chaux vive avec de l'eau, ce qui donne l'hydroxyde de chaux ou chaux grasse. Le durcissement de la chaux grasse ne peut s'effectuer que grâce au gaz carbonique de l'air, d'où le nom de chaux aérienne donnée à la chaux grasse.

On pense généralement que les Romains furent sans doute les premiers à confectionner un véritable liant hydraulique, c'est-à-dire capable non seulement de durcir à l'air mais aussi sous l'eau, sans action de gaz carbonique. Ils mêlaient ensemble de la chaux et de la pouzzolane, cette cendre volcanique riche en silice, qu'il trouvait au pied du Vésuve. Lorsque la pouzzolane naturelle faisait défaut, ils fabriquaient des liants à base de chaux et de *testa* pilée (tuile ou brique d'argile kaolinitique broyée). Au Moyen-Age, aucun progrès ne fut fait dans la recherche des mortiers et l'on recherchait en vain, en suivant à la lettre les instructions de Vitruve et de Plinie l'Ancien, le fameux secret du liant romain. En effet, nombreux furent les maçons qui tentèrent de mêler de la chaux et de la brique pilée et qui varièrent à l'infini les proportions de chaux et de brique dans leurs préparations. Mais à chaque fois, ils essayaient échec sur échec. Nous expliquerons les raisons de ces insuccès en abordant la partie consacrée à l'argile.

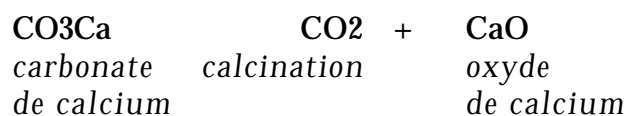
Voyant que ces mélanges chaux-argile cuite ne menaient à rien, les recherches aboutirent enfin à quelque découverte tangible grâce à Vicat au début du XIX^e siècle. Celui-ci savait qu'un Anglais, James Parker, avait cuit des calcaires marneux de l'île de Sheppey aux environs de 1000-1200°C. Ce

dernier déposa un brevet en juin 1796 pour la fabrication d'un "ciment romain" qui était un véritable ciment prompt. Vicat s'aperçut qu'on pouvait mélanger ensemble du calcaire et de l'argile et porter le tout à 1200°C. En 1818, Vicat publia ses recherches: il avait inventé le principe du ciment portland qui est une chaux hydraulique artificielle. Tout n'était donc qu'une question de température de cuisson: si les Romains faisaient un mélange de chaux et d'argile qui était cuite à basses températures, et s'ils étaient techniquement incapables d'obtenir les cuissons extrêmes que nous, savants du XVIII^e pouvons enfin obtenir grâce à l'acier, que se passe-t-il si nous cuissons très haut et ensemble un mélange de calcaire et d'argile quelconque? Ainsi, c'est en voulant recréer la chaux imperméable artificielle que décrit Vitruve, que les savants inventèrent tout à fait autre chose: le ciment ou Portland.

2.1.1 L'invention de la chaux

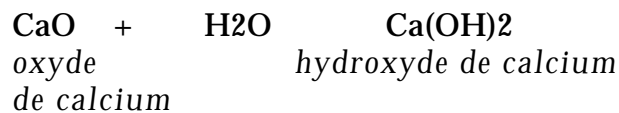
Les parois de la ville de çatal Höyük au sixième millénaire, reçurent des enduits de plâtre, mais c'est en Egypte, au III^e millénaire, qu'on trouve l'emploi d'un mortier de plâtre pour lier les pierres entre elles. L'Orient, durant de longs siècles, conservera les techniques à base de plâtre ou de chaux et il faut attendre l'époque hellénistique pour que cette technique s'introduise progressivement dans l'architecture grecque. Les Romains emploieront de façon systématique la chaux pour la confection de mortiers liant les maçonneries de moellons, ce qui va autoriser l'application du béton aux constructions les plus vastes. Le "béton" permettra notamment le développement et la construction de voûtes dont les portées demeurent encore des records.

La chaux est obtenue par cuisson de pierre calcaire vers entre 750 °C et 950°C, cuisson pendant laquelle elle abandonnera son gaz carbonique. Cuire le calcaire pour le transformer en chaux s'appelle calcination. La calcination du calcaire est exprimé par l'équation chimique:



Le produit obtenu est appelé chaux vive (oxyde de calcium). Cette chaux vive est plongée dans l'eau. Cette opération s'appelle extinction ou hydratation. On obtient alors de la chaux éteinte qui sera mélangé aux agrégats pour faire le mortier.

Cette seconde opération chimique s'exprime par l'équation suivante:



Puis l'hydroxyde de calcium grâce au gaz carbonique de l'air durcit et devient du carbonate de calcium autrement dit du calcaire. L'équation chimique s'exprime par:



Il faut noter que la présence d'autres corps comme l'argile cuite ou crue, comme la pouzzolane bouleverse le phénomène de prise en se substituant complètement au gaz carbonique de l'air. Les argiles crues ne réagissent pas lorsqu'elles sont additionnées à la chaux, et seules les argiles calcinées ont un effet sensible sur le durcissement, à l'exception des argiles de types illitiques, qui dans certaines régions sont justement les plus aptes à fabriquer des briques et des tuiles .

"L'extrême lenteur du phénomène de prise [du mortier], qui est la caractéristique des calcaires purs, était fort prisé des constructeurs antiques, car elle permettait, grâce à la plasticité des mortiers, un tassement lent et progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation et une excellente répartition des pressions."

Tels sont les avantages, dépeints par J. P. ADAM¹ de l'utilisation systématique de la chaux aérienne par les Romains.

2.1.2 Les différentes chaux

La présence d'argile dans le calcaire provoque de profondes modifications qui affectent la chaux aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant la quantité d'argile, on peut définir deux sortes de chaux:

1. Les chaux aériennes: la prise s'effectue seulement en présence du gaz carbonique de l'air (d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conservation de grandes quantités de chaux éteinte). Les chaux aériennes se distinguent elles-mêmes en deux catégories:
 - a) la chaux grasse, qui ou bien est du calcaire pur, ou bien contient 0,1 à 1 % d'argile.
 - b) la chaux maigre, qui contient 2 à 8 % d'argile.
2. Les chaux hydrauliques prennent sans l'aide du CO₂ de l'air. Un mortier fait avec de telles chaux peut durcir sous l'eau. Elles sont

¹ In *La construction romaine...*, p. 76.

obtenues avec des calcaires contenant entre 8 et 20 % d'argile. Il faut noter que les chaux hydrauliques naturelles sont calcinées comme les chaux aériennes aux mêmes conditions. On peut aussi ajouter à la chaux normale de l'argile cuite kaolinite, de la *testa*; sous forme de poudre, ou éventuellement de la cendre volcanique, on obtient alors de la chaux hydraulique artificielle qui fut la principale utilisation des Romains concernant le domaine architecturale. Toutes ces chaux hydrauliques naturelles ou non, après calcination et extinction, durcissent seules sans l'intervention du gaz carbonique.

2.1.3 Le rôle du gaz carbonique dans le phénomène de prise.

A la différence des chaux romaines où la prise est complète, les mortiers "modernes" (par opposition aux mortiers "antiques") sont encore mous longtemps après la finition des travaux dans certaines bâtisses. M. FRIZOT² le constate :

"le mortier de la Tour Saint Pierre à Berlin, démolie au bout de 80 ans n'était pas pris, de même que celui de la citadelle de Strasbourg, démolie après 150 ans. [...] Pour K. Biehl, la chaux d'un mortier de l'aqueduc de l'Eifel est complètement carbonatée tandis qu'un mortier du XIII^e siècle l'est à 80% seulement."

Et M. FRIZOT de conclure:

"Ces faits ne feront d'ailleurs que confirmer le rôle du dioxyde de carbone, car si les mortiers n'ont pas fait prise, c'est qu'ils étaient complètement isolés de l'air à l'intérieur du massif de maçonnerie. A notre connaissance, toutefois, on n'a jamais observé cette particularité dans des blocages antiques, eux aussi très épais."

Ainsi il était impossible d'employer seule de la chaux aérienne pour faire de la voûte concrète. En effet, le gaz carbonique ne pouvait point entrer en contact pour durcir la totalité du ciment de la voûte. Dans ce cas, celle-ci durcit seulement en surface et risque de s'écrouler, si les chefs de chantier n'introduisent pas dans le béton de la *testa* ou de la pouzzolane, pour la rendre hydraulique.

2.1.4 Les mortiers

C'est sous la forme du liant, que la chaux est utilisée en maçonnerie, c'est-à-dire mêlée à des proportions variables de matériaux divers appelés agrégats. Ces derniers jouent en fait le même rôle que les dégraissants dans la cuisson

² In *Mortiers et enduits...*, p. 310.

de l'argile. Sans ces agrégats, la chaux très épaisse se fissure en séchant à cause de la perte de volume. Elle perd par conséquent ses qualités essentielles de colle; de plus, ses caractéristiques de chaux grasse empêchent la prise dans le coeur de la masse en lui conservant une plasticité interne, provoquant des tassements et des glissements dangereux dans la maçonnerie.

2.1.5 La triste réalité archéologique

J. P. Adam³ fait l'analyse des légendes qui circulent sur le mortier antique:

"La préparation des mortiers romains a toujours fait l'objet d'une grande admiration, souvent teintée d'une grande réputation de secret technique jamais dévoilé."

Ainsi les maçons du Moyen Age et leurs successeurs au fil des siècles, imaginèrent toutes sortes de recettes secrètes de fabrication, sur la foi des textes mal interprétés aidés par les spéculations médiévales. Ils préconisèrent toutes sortes d'ingrédients organiques comme le lait, l'oeuf, le sang de boeuf pour en rester aux moins incongrues, qui seraient à l'origine de l'exceptionnelle solidité du mortier romain⁴.

"En réalité, les seules constructions en maçonnerie concrète (c'est-à-dire liées au mortier de chaux), qui nous sont parvenues en bon état sans jamais avoir été protégées par l'enfouissement, sont celles dont l'édification avait, à tous égards, été particulièrement soignée, faisant appel à une chaux de qualité (de cuisson homogène) entrant dans la composition de mortiers parfaitement dosés et mélanges en correspondance avec un monument statiquement équilibré. On ne saurait parler des constructions médiocres innombrables, puisque celles qui étaient demeurées à l'air libre ont disparu en raison même de leur vulnérabilité."

Songez aux maçonneries trouvés en fouille archéologique et que la terre avait protégées. L'exposition à l'air libre les fragilise à l'extrême et elles ne pourraient résister longtemps sans les restaurations adéquates⁵.

³ In *La construction romaine...* ,p. 77.

⁴ *Id.*

⁵ *Id.*

"La ville de Pompéi, à cet égard, est remarquablement significative; la maçonnerie des maisons, sous les enduits de parement d'excellente qualité, est presque partout d'une extrême médiocrité et, même dans la dernière phase constructive, les mortiers demeurent terreux et mal préparés. Les prescriptions, cependant, existaient et Vitruve, qui demeure notre source principale, est extrêmement explicite. Ces précisions sont d'ailleurs le démenti à un secret jalousement conservé par les bâtisseurs romains, et les analyses ont amplement démontré que les recommandations de l'auteur des Dix Livres d'Architecture correspondaient à une réalité pratique amplement mise en application."

M. FRIZOT remarque que si les textes antiques (et en particulier le *De Architectura*)⁶

"font preuve d'une certaine préciosité quand il s'agit de la théorie architecturale, on peut se fier davantage aux recettes qu'ils préconisent et à l'esprit du procédé, sinon à la lettre."

2.1.6 La composition du mortier

Les recettes de la préparations des mortiers sont les suivantes (2,5,1)⁷:

"Quand la chaux sera éteinte, il la faudra mêler avec le sable, en telle proportion qu'il y ait trois parties de sable de cave ou deux parties de sable de rivière ou de mer, contre une part de chaux. Telle est, en effet, la plus juste proportion de leur mélange, qui sera encore beaucoup meilleur si on ajoute au sable de mer et de rivière une troisième part de tuileaux pilés et sassés [*si quis testam tunsam et succretam ex tertia parte adjecerit*]."

Il s'agit ici de la première mention de l'usage de la *testa* par Vitruve pour améliorer le mortier.

Plus loin au chapitre 6 du livre 2, il parle de la pouzzolane, cette admirable poudre volcanique qu'on exploite principalement près du Vésuve, et qu'on ajoute au mortier pour le faire durcir sans le CO₂ de l'air. Le liant à base de pouzzolane (une part de chaux et deux parts de poudre) était employée pour la maçonnerie des installations portuaires.

⁶ In *Le mortier...*, p. 60.

⁷ Traduction de Cl. PERRAULT, p. 36; Vitruve 2, 5, 1: *Cum ea erit extincta, tunc materia ita misceatur, ut, si erit fossicia, tres harenae et una calcis infundatur; si autem fluviatica aut marina, duo harenae una calcis coiciatur. Ita enim erit iusta ratio mixtionibus temperaturae. Etiam in fluviatica aut marina si qui testam tunsam et succretam ex tertia parte adiecerit, efficiet materiae temperaturam ad usum meliorem.*

Abordons ce problème de l'usage de la chaux hydraulique. Celle-ci commença à être employée au XIX^e siècle au détriment des chaux aériennes⁸:

"Les Romains auraient-ils eu connaissance des propriétés de ces chaux, ce qui expliquerait la bonne tenue de leurs ouvrages, même sous l'eau (les chaux hydrauliques peuvent durcir sous l'eau)?"

Telle est la question que l'on s'est posé. De nombreux articles ont été écrits sur ce sujet, et la plupart concluent à des chaux aériennes grasses⁹.

"Et même si l'on pouvait conclure à l'utilisation de chaux hydraulique, il n'est pas prouvé que les Romains l'aient fabriqué en connaissance de cause [...]."

Il faut nuancer cette remarque: les Romains fabriquèrent de la chaux hydraulique artificielle avec soit de la *testa*, soit de la pouzzolane, comme l'écrit précisément Vitruve. Sinon comment expliquer la qualité incontestable d'un grand nombre d'ouvrages? Avec la chaux grasse, les bâtiments ne sont point éternels. C'est pourquoi, il faut conclure avec M. Frizot¹⁰:

"Pour résumer ces données éparses et nos propres mesures, disons que les chaux romaines sont très généralement des chaux aériennes, mais que l'excellence des mortiers tient souvent à l'agrégat [au sens d'additif] qui a été utilisé."

Résumons donc, selon J. P. ADAM¹¹, les principales compositions que donne Vitruve:

| liant | agrégat | eau |
|-----------------|---|----------|
| 1 part de chaux | 3 parts de sable de carrière | 15 à 20% |
| 1 part de chaux | 2 parts de sable fluvial ou marin | 15 à 20% |
| 1 part de chaux | 2 parts de sable fluvial ou marin + 1 part de <i>testa</i> pilée | 15 à 20% |
| 1 part de chaux | 2 parts de pouzzolane | 15 à 20% |

⁸ In *Le mortier...*, p. 63.

⁹ *Id.*

¹⁰ *Id.*

¹¹ In *La construction romaine...*, p. 78.

2.1.7 L'ancien et le moderne

Il existe une distinction entre le "béton" romain et le moderne, résidant dans la préparation: le premier est un mélange dans le mur du mortier et des cailloux, tandis que le béton moderne est un mélange identique préparé à l'avance que l'on met en oeuvre entre les coffrages sans y ajouter ensuite d'autres matériaux. On trouve l'homologue antique du béton¹²

"dans les revêtements de sol ou en chape sur les voûtes et dans lesquels se voient des éclats de céramique et des cailloux d'une certaine grosseur, qui avaient été mêlés à la chaux au moment du gâchage."

En cela ils soutiennent la comparaison aux bétons du XX^e siècle. Ils constituent des enduits d'une extrême solidité, comme le prouvent la résistance à l'usure des trottoirs pompéiens ainsi revêtus, et la toiture de nombreux édifices voûtes ou comprenant une coupole.

2.1.8 Le temps de prise et la *testa*

En fait, deux facteurs interviennent sur les qualités incontestables des mortiers: le temps et l'agrégat, en particulier la *testa*. Il est certain que la celle-ci a des propriétés proches de celles des pouzzolanes. D'autre part, l'ajout de la *testa* accélère très fortement le phénomène de prise. Ainsi le *signinum* ou le ciment Portland durcissent en deux ou trois jours au moins, alors que le mortier à la chaux aérienne mettra six mois pour durcir. En comparant le *signinum* et le Portland avec cette chaux aérienne, la prise est presque instantanée! Le temps qui s'est écoulé depuis la mise en oeuvre favorise la désagrégation chimique de la *testa*.

Bien que le processus de la prise de la chaux aérienne soit paradoxalement mal connu (car délaissé depuis le XIX^e par l'industrie pour l'étude des ciments), il semble que l'intérêt du mortier romain réside essentiellement dans le choix du matériau, de son influence chimique sur le phénomène de prise et dans l'ancienneté du matériau¹³.

M. FRIZOT¹⁴ conclut son article ainsi:

¹² In *La construction romaine...*, p. 82.

¹³ Il ne saurait être question d'évoquer dans ces conditions l'emploi de matières organiques, dont le rôle ne pourrait être déterminant qu'en grandes quantités.

¹⁴ In *Le mortier...*, p. 63.

"Ce n'est pas sans raison que les auteurs antiques insistent bien sur le mélange que l'on doit obtenir, sur le long temps pendant lequel il faut remuer le mortier, battre les sols s'il s'agit de tuileau. Pour nous, en termes modernes, ces opérations amènent une parfaite homogénéité du mélange et favorisent le contact des grains de l'agrégat avec la pâte du liant, donc les lents processus chimiques. L'architecte J.B. RONDELET, au XIX^e siècle, avait constaté ce rôle bénéfique de la trituration, encore bien appliquée en Italie. C'est peut-être là le secret principal de ce mélange simple auquel chaque année qui passe apporte sa bonification?"

2.1.9 L'utilisation de l'argile.

"Ce n'est pas sans raison que la Genèse fait de l'argile le matériau générateur de l'homme. Réputation justifiée par les étonnantes qualités mécaniques de cette matière, plastique et malléable lorsqu'elle est imbibée d'eau, conservant la forme que la main lui a donnée et devenant en séchant un corps solide."

C'est ainsi que J.P. ADAM¹⁵ qualifie l'un des plus vieux matériaux que l'humanité emploie depuis le néolithique.

Si l'argile séchée au soleil fut pendant longtemps un matériau efficace dans de nombreuses régions, on s'aperçut que sa cuisson faisait disparaître sa sensibilité aux intempéries. Mais, à part l'usage de l'argile pour la poterie, il fallut attendre bien longtemps avant que ce matériau imperméable ne devienne un matériau de construction. La nécessité du moment fit que l'argile fut cuite essentiellement sous forme de briques. Celles-ci furent longtemps réservées aux constructions étanches dans des régions chaudes et sèches, comme la Mésopotamie: aux bassins, canalisations, ou aux parties plus vulnérables, tels que les encadrements de baies ou le revêtement des grands monuments. Ainsi, l'usage des tuiles d'argile cuite n'était d'aucune utilité pour de telles régions.

A l'inverse, dans le monde grec et romain, la cuisson de l'argile fut beaucoup plus tardive et intéressa longtemps seulement (souvent jusqu'au I^{er} siècle av.J.C.) les tuiles et ornements de faitages des édifices, destinés à assurer une couverture étanche et la protection des extrémités des pièces de bois de la charpente. Dans un palais hellénistique de Nippur en Mésopotamie et dans la colonie de Vélia en Grande Grèce, se trouvent les premières bâtisses grecques employant les briques cuites. Ce sont donc vraisemblablement les Grecs qui introduisirent cet usage méridional de

¹⁵ *Op. Cit.* p. 61.

l'argile dans les villes de Campanie, longtemps avant que Rome n'adoptât une telle technique.

L'argile, utilisée pure et additionnée d'eau, et très avide de ce liquide, va en se desséchant se fissurer: on nomme ce matériau naturel *argile grasse*. Certaines argiles, dites *maigres*, sont naturellement mélangées à des sables, donc leur aspect est moins plastique et le phénomène de retrait à la dessiccation est plus faible. Cette observation conduisit les utilisateurs à introduire dans l'argile un dégraissant capable de combattre les effets de retrait et de fissuration dus au départ d'eau. *Dégraisser* l'argile signifie l'appauvrir par l'adjonction d'un corps qualifié alors de *dégraissant*.

L'usage des briques crues s'est longtemps maintenu à Rome. Vitruve (2, 3, 2) recommande de choisir l'automne ou le printemps en ce qui concerne le moulage des briques crues. Le soleil n'est pas trop ardent pendant ces deux saisons, car il faut éviter que les rayons ne provoquent un dessèchement trop rapide de l'épiderme et que cette dessiccation n'entraîne la fissuration du matériau.

2.1.9.1. Les briques crues et la *testa*

"C'est pourquoi le meilleur serait de les garder deux ans entiers; car, lorsqu'elles sont employées nouvellement faites, et avant d'être entièrement sèches, l'enduit que l'on met dessus s'étant séché promptement et ayant pris de la consistance elles s'affaissent, et en se resserrant, se sépare de cet enduit..."¹⁶

Vitruve nous révèle ainsi que les briques crues étaient employées au même titre que les moellons et que les murs ainsi élevés recevaient un enduit et donc un décor. Cette observation est importante d'autant plus que notre auteur, qui rédige son traité entre 40 et 32 av. J. C., ne mentionne aucune brique cuite pour la construction des murs; ce silence permet de croire que Rome et le Nord de la péninsule en ignoraient encore l'usage au I^{er} siècle avant notre ère.

2.1.9.2 La cuisson de la "*testa*"

La cuisson au four de l'argile détruisant les dégraissants végétaux, ce sont, comme pour la poterie, les dégraissants minéraux, dont le sable est le

¹⁶ Traduction de Cl. PERRAULT, p. 35; Vitruve 2, 3, 2: *Maxime autem utiliores erunt, si ante biennium fuerint ducti; namque non ante possunt penitus siccescere. Itaque cum recentes et non aridi sunt structi, tectorio inducto rigidoque obsolidati permanent; ipsi sidentes non possunt eandem altitudinem qua est tectorium, tenere, contractioneque moti non haerent cum eo, sed ab coniunctione eius disparantur;*

principal, qui sont employés. Les fours utilisés pour la cuisson des briques sont identiques à ceux du potier, mais seules les dimensions varient en raison du grand volume de matériaux à traiter au cours de chaque cuisson.

La partie supérieure du four recevant les briques ou les tuiles est appelé le laboratoire. Il est chargé par une porte d'accès qui sera totalement murée durant la cuisson. La température dans le laboratoire peut être estimée voisine de 800°C à proximité de la chambre de cuisson et de 550°C à la sortie supérieure. Cette dernière température constitue d'ailleurs le seuil inférieur en deçà duquel l'argile ne se solidifie pas et retourne à l'état pulvérulent à sec, ou pâteux en présence d'eau. Cette couche supérieure de briques est donc normalement éliminée, car impropre à la construction.

Nous en déduisons donc que, dans le four à brique, la cuisson se fait entre 600°C et 800°C et que les meilleures briques ou tuiles sont à cette dernière température. La *testa*, que des traducteurs de Vitruve traduiront par tuileau ou tuile mal cuite, a subi des températures proches de 600°C et 700°C. Il faut préciser que pour les fours à céramique, cette échelle de température n'est pas applicable pour une aussi grande quantité de matériaux. Effectivement, ces fours cuisent entre 800°C et 900°C pour les belles sigillées et aux environs de 1100 °C pour les autres produits de luxe. De telles températures pouvaient être atteintes par ces fours parce que le nombre d'objets à cuire était réduit.

M. FRIZOT dans sa thèse explique la grande efficacité chimique de la *testa* quand elle est mêlée à la chaux pour la confection du mortier; il aurait dû préciser que la réaction chimique, de type pouzzolanique, s'effectue facilement parce que la *testa* est fabriquée avec une argile kaolinitique, ce qui est une caractéristique géologique de l'Italie. Même si son analyse chimique est fautive, il conclue avec raison¹⁷:

"Les argiles cuites à une température assez basse sont les meilleures [...], alors qu'une argile qui aurait subi un début de vitrification serait inefficace dans cette réaction: l'intérêt du tuileau antique provient essentiellement de la médiocrité de sa fabrication et de sa cuisson; des céramiques sigillées bien cuites ne donnerait certainement pas satisfaction dans un mortier."

2.1.10 La *testa* : définition

¹⁷ In *Mortiers et enduits...*, p. 316.

Il s'agit maintenant de définir les caractéristiques de la *testa* et son action chimique lorsqu'elle entre en réaction avec la chaux. Voici un extrait de l'annexe de mon mémoire de maîtrise¹⁸ :

"Réactions Pouzzolaniques avec les argiles calcinées:

Les réactions pouzzolaniques entre la chaux et les argiles calcinées ont été étudiées depuis 50 ans dans plusieurs laboratoires internationaux. On peut affirmer:

- a). des argiles calcinées, seule l'argile kaolinitique donne de bons résultats, après calcination entre 650-800°C.
- b) Les autres argiles sont moins bonnes, les argiles illitiques calcinées étant médiocres ou sans effet à court terme.
- c) le critère de sélection est celui d'un durcissement rapide, permettant d'atteindre à 28 jours (selon la norme) une résistance à la compression de 100 bars (10 MPa). En général, ces mortiers atteignent au bout d'un an une résistance de 400-500 bars, ce qui est équivalent aux valeurs du ciment Portland.

1) Voici à titre d'exemple, une étude effectuée en France, récemment:

Etude entreprise à l'INSA de Lyon, Laboratoire de Chimie Physique, par l'équipe de M. MURAT (1981-1984).

objectif: adapter l'énergie solaire à la cuisson (ou activation thermique) des argiles, en vue du développement de ciments pouzzolaniques moyenne-température dans les pays du Tiers-Monde à fort ensoleillement, disposant de matières argileuses.

Parmi les argiles, seules les argiles kaolinitiques, après calcination à 700-800°C ont un rendement optimal, les argiles illitiques étant pratiquement inefficaces.

Les meilleures résistances des mortiers sont obtenues pour des mélanges dans lequel le rapport argile calcinée / chaux est supérieur à 1. Par exemple, la résistance à 28 Jours pour mélange contenant

1 partie d'argile calcinée (*testa*)
1 partie de chaux
est de 100 bars.

2 parties d'argile calcinée (*testa*)
1 partie de chaux
est de 145 bars.

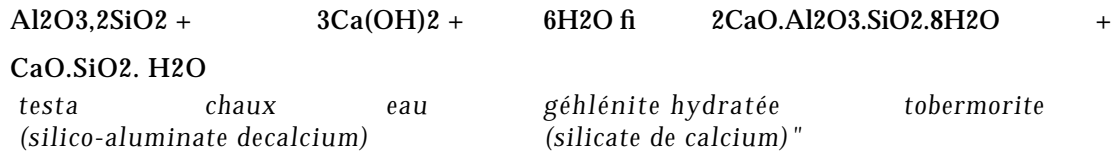
Publications en français:

M. MURAT et A. BACCHIORRINI, "Corrélation entre l'état d'amorphisation et l'hydraulicité du métakaolin", Bull. Minéral. 105, 543-355.

¹⁸F. Davidovits, *Vitruve...*, Faculté des Lettres, Amiens, 1992, pp. 111

M. MURAT, "Activation thermique des argiles et étude de l'hydraulicité du métakaolin, dans l'optique de l'emploi de réacteurs solaires aux fins de fabrication de ciments moyenne-température", Entropie n° 110 (1983), pp. 82-85

2) Réactions chimiques, chaux + *testa*:



Si l'on compare les formules de réactions de la chaux aérienne pure et celles de la chaux hydraulique artificielle, elles n'ont rien en commun. Le mélange chaux/*testa* se comporte comme une chaux hydraulique lorsque l'on ajoute l'eau au mortier. La *testa* est donc un parfait substitut pour la pouzzolane naturelle. C'est pourquoi après avoir défini la *testa* tant par la cuisson que par la composition, nous préférons remplacer le terme vague de "tuileau", qui désigne aussi l'illite, par celui plus précis de *testa*.

2.3 L'OPVS SIGNINVM: UN MODÈLE EN MAÇONNERIE.

"il est un autre agrégat [que le sable] que l'on trouve fréquemment dans les mortiers romains: il s'agit du tuileau [*testa*] auquel les Anciens attribuent également des vertus particulières pour l'étanchéité des sols et des bassins [*opus signinum*]. Très souvent, comme nous l'avons constaté, le tuileau entre dans le mélange constitutif des mortiers et cela est tout à fait en accord avec le texte de Vitruve qui le recommande pour obtenir un mortier plus solide."¹⁹

Cette citation de M. FRIZOT résume l'emploi de la *testa* chez Vitruve qui est liée à l'emploi de l'*opus signinum*. L'ajout de *testa* apporte à la préparation dureté et imperméabilité. Nous pouvons donc déjà dire que l'usage de la *testa* est une des caractéristiques du *signinum*. Nous allons définir, dans cette partie de notre étude, l'*opus signinum*.

L'*opus signinum*²⁰ est "un mortier fait d'un mélange de chaux, eau, sable, et poudre de tuileaux". Voici la composition des différents mortiers tels que les donne Vitruve (2, 5, 1). En ajoutant un quart de chaux à du sable

¹⁹ In *Le mortier...*, p. 62.

²⁰ In *Dictionnaire méthodique...*, p. 51.

fluvial ou marin on obtient le plus classique des mortiers; Pline²¹ indique en reprenant notre auteur:

"Si l'on adjoint encore au mélange [de sable de rivière ou de mer] un tiers de brique pilée (*testae tusae tertia pars*), le produit sera meilleur."

Le commentaire (note 2, § 175) indique:

"Les tessons, briques, ajoutaient au ciment de la silice qui accroissait sa résistance (Eichholz). Le revêtement obtenu est l'*opus signinum*."

Le *signinum* désigne un enduit imperméable (Vit. 7,1,3) ou un béton de sol (7,4,3). Dans ce dernier cas on peut l'appeler *pavimentum testaceum* (7,4,5) où celui-ci sert de couche étanche pour le pavement à la grecque. Palladius²² se sert de cette locution pour désigner le sol imperméable de la citerne.

M FRIZOT²³ indique:

"si l'on veut se pencher sur les raisons des qualités incontestables d'un grand nombre d'ouvrages, il faut faire appel tout d'abord à deux paramètres liés: le choix d'un agrégat avantageux, en particulier le tuileau, et le temps qui s'est écoulé depuis la mise en oeuvre. Il est certain que le tuileau a des vertus "pouzzolaniques" car il est constitué d'argile cuite, c'est-à-dire chimiquement désagrégée, dont les éléments pourront participer à la prise de la chaux, selon une réaction apparentée à la prise de la chaux hydraulique; ce caractère est accentué par le temps, qui favorise la désagrégation chimique du tuileau. Les meilleurs mortiers romains s'amélioreraient donc avec les siècles..."

On le voit, le *signinum* est un excellent mortier, qui résiste à tout: à l'eau, aux intempéries, au temps. C'est donc un produit d'une qualité exceptionnelle (le terme n'est point trop fort). Or nous savons que la *testa* n'est point de l'argile cuite du tout-venant. *Signinum* dérive du nom de la ville de Signia qui était réputée pour l'excellence de sa tuile. La bonne *testa* vient donc de Signia et c'est cette *testa* qui seulement donne cette exceptionnelle qualité au produit.

²¹ Pline N. H. 36, 175: *Si et testae tusae pars addatur, melior materia erit.*

²² Palladius 1, 17, 1: *Huius solum, alto rudere solidatum, relicto fusoriis loco testacei pavimenti superfusione leuigetur.*

²³ In *Le mortier...*, p.63.

2.3.1 L'usage général du *signinum*

Que savons-nous de son emploi? La synthèse de nos connaissances se trouvent dans le *Pauly's Realencyclopädie der Klassischen Altertumswissenschaft*²⁴, et le *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines*²⁵ et le *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*²⁶. Il est employé à Oudna et à Carthage en Afrique, dans le vieux Vimicanium sur les bords de la Morava en Serbie du nord, dans le Sud de la France à Vienne, Orange, Nîmes, à Rome et particulièrement à Pompéi.

Là,

"il se rencontre à chaque pas, surtout dans les thermes publics et privés, et dans les maisons particulières, où il recouvre le sol des vestibules, des cuisines, des salles à manger, des impluvia, le fond et les parois des piscines, des réservoirs, des fontaines: partout enfin où l'on a besoin d'un pavement facile à nettoyer et qui ne se laisse pas pénétrer ni par la poussière, ni par l'humidité, ni par les insectes."²⁷

Il possède de gros agrégats de *testa* ou autres mêlés au mortier: on parle alors d' "*opus signinum* à éclats". Mais il s'use vite. C'est pourquoi, pour augmenter sa résistance d'une part, et réhausser l'éclat trop terne de sa surface d'autre part, on incruste dans la masse encore molle du liant, des *lapilli* (en italien *sassolini*), de petites pierres brillantes et claires en compagnie desquelles le liant va durcir. Elles seront ensuite susceptibles de recevoir le même poli. Ce sont d'abord de petits cailloux, puis des dés de marbre blanc, tous semblables, que les ouvriers incrustent dans le liant. On obtient alors des figures en semis d'étoiles ou en files régulières qui forment des broderies. Cet *opus* reçoit le nom d' "*opus signinum* à tesselles".

On se servait de ce procédé pour indiquer les principales divisions des appartements, les seuils de la maison, de la cour, des chambres. il définissait aussi les limites de l'*impluvium*, l'emplacement des lits et de la table dans le *triclinium*, de l'alcôve dans le *cubiculum*²⁸. Mais peu à peu les dés de

²⁴ Article *Signinum*, p.2359.

²⁵ T. 3, article *opus signinum*, pp.2093 à 2094.

²⁶ pp. 51; 54; 94, n. 82; 146; 148; 149; 150; 151.

²⁷ *Op. Cit.* p.2093.

²⁸ *Id.*

marbre blanc recouvrent toute la surface rouge de l'opus signinum qui devient l'invisible support de la mosaïque classique.

Dans le vocabulaire archéologique, le signinum est associé à la terminologie de la mosaïque. Ainsi, on parlera d' "opus signinum à tesselles et éclats". Il y a aussi l' "opus signinum à crustae ". Les crustae sont plus grandes que les tesselles, lesquels ont moins de 2 cm. On devra tenir compte de l'arrangement des plaquettes pour toute publication.

2.3.2. L'Opus Signinum comme enduit étanche.

Nous reproduisons en partie le chapitre 4 du livre 7 de Vitruve (§§1-4) qui décrit les enduits dans les lieux humides. Traduction de J.B. RONDELET²⁹:

"Après avoir fait connaître les enduits doivent être faits dans les lieux secs, je vais enseigner la manière d'établir les mêmes ouvrages dans les lieux humides, afin qu'ils soient solides et durables.

- [exemple 1] Dans les salles situées au rez-de-chaussée, on préservera la partie inférieure des enduits des atteintes de l'humidité en recouvrant les murs, jusqu'à environ 3 pieds au-dessus du pavé, [pour le gobetage et l'enduit] de couches de ciment de tuileaux pilés, en place de mortier de sable.

- [exemple 2] Mais si l'on rencontre un mur chargé d'humidité dans toute sa hauteur, il faudra en ériger un autre plus léger à quelque distance du premier, autant que le lieu pourra le permettre; le fond de l'espace entre ces deux murs formera un canal, qu'on aura soin d'établir plus bas que le sol de la chambre, et auquel on ménagera des issues dans le mur à l'extérieur. De plus, en montant le second mur, il est essentiel de pratiquer plusieurs ventouses; car à moins d'ouvrir à l'humidité les voies nécessaires pour se dissiper, soit par l'écoulement, soit par l'évaporation, la nouvelle construction ne saurait être plus sèche que l'ancienne. Ces dispositions achevés, on revêtira le mur de plusieurs couches de ciments, et l'on terminera l'enduit comme à l'ordinaire.

²⁹ In *Traité théorique...*, t. 2, p.304-308. Vitruve 7, 4, 1-5: *Quibus rationibus siccis locis tectoria oporteat fieri, dixi; nunc, quemadmodum umidis locis politiones expediantur, ut permanere possint sine vitiis, exponam.*

1) *Et primum conclavibus, quae plano pede fuerint, in imo pavimento alte circiter pedibus tribus pro harenato testa trullissetur et dirigatur, uti eae partes tectoriorum ab umore ne vitientur.*

2) *Sin autem aliqui paries perpetuos habuerit umores, paululum ab eo recedatur et struatur alter tenuis distans ab eo, quantum res patietur, et inter duos parietes canalis ducatur inferior, quam libramentum conclavis fuerit, habens nares ad locum patentem. Item, cum in altitudinem perstrictus fuerit, relinquuntur spiramenta; si enim non per nares umor et in imo et in summo habuerit exitus, non minus in nova structura se dissipabit. His perfectis paries testa trullissetur et dirigatur et tunc tectorio poliatur.*

3) *Sin autem locus non patietur structuram fieri, canales fiant et nares exeant ad locum patentem. Deinde tegulae bipedales ex una parte supra marginem canalis inponantur, ex altera parte besalibus pilae substruantur, in quibus duarum tegularum anguli sedere possint, et ita a pariete eae distent, ut ne plus pateant palmum. Deinde insuper erectae hamatae tegulae ab imo ad summum ad parietem figantur, quarum interiores partes curiosius picentur, ut ab se respuant liquorem; item in imo et in summo supra camaram habeant spiramenta. Tum autem calce ex aqua liquida dealbentur, uti trullissatioem testaceam non respuant; namque propter ieiunitatem quae est a fornacibus excocta non possunt recipere nec sustinere, nisi calx subiecta utrasque res inter se conglutinet et cogat coire. Trullissatione inducta pro harenato testa dirigatur, et cetera omnia, uti supra scripta sunt in tectorii rationibus, perficiantur.*

- [exemple 3] S'il arrivait que le local, par son peu d'étendue, ne pût comporter une construction de ce genre, les dispositions pourraient cependant être les mêmes à l'égard du canal et de ses issues à l'extérieur: après l'avoir établi de la manière que nous avons indiquée, on le recouvrirait en grandes briques (de deux pieds carrés), posées d'un côté sur son bord, et de l'autre sur des supports formés de deux petites briques jointes ensemble, placées à distance pour recevoir les angles de deux grandes briques, en observant de laisser le long des murs un vide d'environ une palme de largeur. Sur le bord de ces briques on érigera, en forme de revêtement, un placage en tuiles à mamelons (ou à crochets), posées en liaison les unes sur les autres, et fixées au mur par des clous; ces tuiles devront être enduites de poix à l'intérieur, afin de que l'humidité s'écoule sans pouvoir les pénétrer. Enfin on ménagera plusieurs événements, tant dans le haut que dans le bas des mur, ainsi que nous l'avons conseillé, pour les raisons ci-devant exposées. La chambre une fois revêtue de ces tuiles, on commencera par la blanchir, au moyen d'une couche de chaux détrempée, afin que le ciment puisse adhérer à la terre cuite (des tuiles); car après avoir reçu le degré de cuisson convenable dans les fourneaux, l'aridité de la brique est telle qu'elle ne saurait retenir ni fixer aucun enduit, sans le secours de la chaux détrempée, qui, en abreuvant les pores, facilite l'agglutination du mortier, et les force ainsi d'adhérer l'un à l'autre. Après qu'on aura étendu les couches préparatoires, en ciment de tuileaux pilés, au lieu de mortier de sable, on terminera l'ouvrage de la même manière que nous l'avons expliqué pour les enduits ordinaires."

Les enduits imperméables des trois exemples que décrit Vitruve sont des mortiers de *testae*. Ils sont évidemment plus rares que les enduits secs, mais nous en avons vu à Rome, sur le Forum, exactement sur les murs nord de l'atrium de Vesta (Figure 1). Ce qui nous frappa, ce sont les épaisseurs des enduits. Cet enduit comprend quatre couches. La dernière qui couronne les trois strates est de l'*opus signinum*. Il est amusant de constater que seuls les murs possédant ce type d'enduits ont résisté aux intempéries et les ont conservés alors que les autres ont seulement droit à l'*opus testaceum*.

J. B. RONDELET³⁰ a d'ailleurs constaté la bonne conservation des enduits qui ont une strate de *testa*:

"Dans toutes les constructions antiques de ce genre, telles que les citernes, les réservoirs, les bassins, les aqueducs et autres que j'ai visitées et examinées avec la plus grande attention, j'ai remarqué que les enduits qui se sont le mieux conservés étaient fort épais. Ils sont ordinairement composés d'une première couche de mortier

³⁰ *Op. Cit.* p. 308.



de pierraille ou béton de 3 ou 4 pouces d'épaisseur; d'une seconde couche formée de tuileaux écrasés ou de pouzzolane, et quelquefois de ces deux matières mélangées, d'environ 1 pouce d'épaisseur; enfin d'une dernière couche de tuileaux pulvérisés et passés au tamis."

On pouvait couvrir la dernière couche de tuileaux d'une strate ou de plusieurs, comme dans le deuxième et troisième exemple de Vitruve; on trouve aussi une dernière strate de cette sorte qui est une concrétion calcaire de 3 mm. Celle-ci, battue pour en faire sortir l'eau et durcie par le CO₂ de l'air, résistera au contact de l'eau. Dans les thermes du forum à Ostie, après avoir posé les enduits de *testae*, on décore la piscine de plaques de marbre. On les fait adhérer au moyen d'un mortier de chaux grasse, puis elles sont jointes parfaitement les unes aux autres de sorte que l'eau de la piscine ne puisse pénétrer entre les plaques et les faire se détacher du mortier.

Toutes les couches des enduits étaient posées chacune d'un seul jet, ou sans interruption, afin d'éviter les soudures ou reprises. Elles étaient successivement bien égalisées et battues. On posait une nouvelle couche seulement lorsque la première était bien ressuyée. On prenait surtout un soin particulier de bien lisser la première couche, parce qu'on avait remarqué que cette opération rendait la superficie extrêmement dure et impénétrable à l'eau. Nous avons une des particularités de l'*opus signinum*: le mélange est bien battu pour en faire sortir l'eau, ceci fin de le rendre étanche et solide.

J. B. RONDELET³¹ conclue alors son commentaire:

"Tout le secret des anciens Romains pour faire de beaux enduits, solides, durables et imperméables à l'eau, ne consiste que dans les précautions que nous avons indiquées. On peut y employer également du bon sable, de la pouzzolane, de la poudre de tuileaux, (...)de la marne, de la terrasse de Hollande, de la cendrée de Tournay, du trass d'Andernach, du plâtre-ciment et autres matières; mais il faut se méfier de celles qui durcissent trop tôt, c'est-à-dire, avant qu'elles aient rejeté l'eau surabondante employée à leur préparation; parce que les mortiers ou cimens qui en proviennent sont sujets à se décomposer par la suite, en rejetant l'humidité superflue qu'ils contiennent à l'intérieur, et qui souvent n'a été retenue que par le durcissement prématuré de la surface. Les anciens obviaient à cet inconvénient en battant leurs enduits. Cette opération porte tout l'humide à la superficie qui ne sèche qu'après le milieu."

³¹ *Op. Cit.* p. 309.

Voilà donc la seconde particularité qui définit le *signinum* avec l'usage de la *testa*: il faut battre celui-ci pour en faire sortir l'eau et le rendre imperméable. Vitruve³² le signale (2,4,3) et J. B. RONDELET³³ le traduit ainsi:

"Les enduits faits en sable de rivière, qui est très aride, exigent d'être massivés à coups de battes; comme le *signinum*; alors ils acquièrent une grande dureté."

2.3.3 Le sol en *Opus Signinum*

Il constitue la deuxième application du *signinum*. Dans la construction, la réalisation du sol de maçonnerie était la même, qu'il y eût ou non de couverture sous forme de dalles ou de mosaïque, puisque c'est, nous l'avons dit plus haut, l'*opus signinum*. Vitruve y consacre tout le premier chapitre et le reste du quatrième chapitre du livre 7. Les conseils qu'il y donne sont vérifiables dans la plupart des sols de qualité.

On peut dégager un plan type des sols bétonnés. Les ouvriers mettent en place le *statumen*, un radier de fondation de cailloux posés à sec, si possible en hérisson, de façon à assurer l'écoulement des eaux d'infiltration. J.B.RONDELET³⁴ indique:

"Plusieurs auteurs ont prétendu que cette première couche était posée à sec. Cependant en visitant les ruines des anciens édifices de Rome, de Pompéïa et de la ville Adrienne, j'ai reconnu que cette première couche était formée de pierres irrégulières posées en mortier, comme la maçonnerie."

Ensuite on étend une première couche de chaux, de sable, de graviers ou cailloux, qui constituent un blocage épais: le *rudus*. Enfin, une dernière couche de blocage de *testae*, le *nucleus* (ou noyau). A vrai dire, celui-ci évoque par sa composition le *signinum*. Mais ils sont si proches qu'il est difficile en théorie de les distinguer. Disons pour simplifier que le *nucleus* est un sol en *signinum*, car rien n'empêche l'ouvrier de battre le noyau pour rendre encore meilleur³⁵.

³² Vitruve 2, 4, 3: *Fluviatica vero propter macritatem uti signinum liaculorum subactionibus in tectorio recipit soliditatem.*

³³ In *Traité théorique...*, t. 1, p. 130.

³⁴ In *Traité théorique...*, t. 2, p. 250.

³⁵ *Id.*

"Une troisième couche, désignée par le mot de *nucleus*, (..) était un mortier de ciment dont la moindre épaisseur devait être de six doigts du pied romain, répondant à 4 pouces 1/2 du pied de Paris ou 122 millimètres. C'est sur cette couche qu'on posait le pavé en terre cuite, en marbre, ou en mosaïque."

Ou bien le *nucleus* reçoit le revêtement ou bien il tient lui-même de sol de circulation. Dans ce dernier cas, de loin le plus fréquent, et le plus économique, le *nucleus* est mêlé de gros éclats de céramique ou de fragments de marbre, les *crustae*, répartis aléatoirement ou disposés géométriquement avec plus ou moins de recherche.

Nous donnons le chapitre 1 du livre VII. Pour les pavements intérieurs, on dispose un plancher de bois, puis on le recouvre d'un lit de paille ou de fougère pour les préserver de l'action corrosive de la chaux³⁶:

"Alors on étendra une couche de pierrailles, dont le volume ne sera pas moindre de celui que la main peut contenir. Le corps du massif qui doit recouvrir cette couche de pierres se prépare ainsi: si les débris qu'on y emploie proviennent de matière neuves, on en formera un mélange dans la proportion de trois parties, sur une de chaux, mais s'ils proviennent d'anciens matériaux, la proportion sera de deux parties de chaux sur cinq de matières. Après que ce mélange aura été bien également étendu sur toute la superficie, des manoeuvres, armés de leviers ou de battes de bois, seront employés à le massiver par des coups très rapprochés les uns des autres; l'opération sera terminée quand la masse sera réduite aux trois quarts de son épaisseur.

Ce massif est ensuite recouvert d'un ciment, composé d'une partie de chaux pour trois parties de tuileaux pilés, réparti sur une épaisseur dont la dimension ne saurait être moindre de six doigts."

Là-dessus, on établit une couverture de céramique ou de mosaïque.

Puis, Vitruve parle des pavements extérieurs qui doivent résister aux intempéries. Après avoir fait un double plancher, le *statumen* sera préparé avec

"un mélange composé de rocailles neuves et d'un tiers de tuileaux concassés, dont on formera un mortier en y joignant deux parties de chaux sur cinq de mélange.[Soit 1 part de *testae*, 2 parts de pierrailles, 2 parts de chaux]

³⁶ *Op. Cit.* t. 2, pp. 246-247. Vitruve 7, 1, 3: *Tunc insuper statuminetur ne minore saxo, quam qui possit manum implere. Statuminationibus inductis, rudus si novum erit, ad tres partes una calcis misceatur, si redivivum fuerit, quinque ad duum mixtionem habeant responsum. Deinde rudus inducatur et vectibus ligneis, decuriis inductis, crebiter pinsatione solidetur, et id non minus pinsum absolutum crassitudine sit dodrantis. Insuper ex testa nucleus inducatur mixtionem habens ad tres partes unam calcis, ne minore crassitudine pavimentum digitorum senum.*

Cette préparation achevée, on l'étendra sur le plancher; [on mettra le *rudus*], son épaisseur ne saurait être moindre d'un pied, après avoir été battue. Ensuite, après avoir recouvert ce massif d'une couche de ciment [*Tunc autem nucleo inducto*], tel que nous l'avons expliqué ci-dessus, on appliquera le pavé..."³⁷

Si on veut améliorer l'étanchéité, on posera sur le *rudus* des grandes briques dont les joints forment un canal. Dans ce canal, on versera un mastic d'huile et de chaux; de cette façon, rien ne pourra filtrer.

"Ensuite, après avoir terminé ce dallage on étendra dessus le ciment que l'on massivera en le frappant avec des bâtons flexibles."³⁸

Puis, on mettra le pavement de la manière dont on voudra.

Le *nucleus* de la première description est un mortier composé de deux parts de *testae* et d'une part de chaux. Dans l'édition de Vitruve de la Loeb Classical Library, F. GRANGER³⁹ note à propos du *nucleus* (7,1,3):

"*Opus signinum* made of potsherds and lime, used at Pompei for pavements."

D'après F. GRANGER, le *nucleus* est donc le *signinum*. Il est le cœur même du pavement.

La seconde description insiste plus sur la curieuse composition du *statumen* qu'on rend imperméable par l'adjonction d'un tiers de *testae* au volume de pierrailles. Nous avons alors une part de *testae* et deux parts de cailloux. On ajoute au mélange total, qui comporte cinq parts, deux parts de chaux. Le *nucleus*, s'il est composé de deux parts de *testae* pour une de chaux, est massivé à coups de battes pour en faire sortir l'eau et le rendre imperméable; voici comment traduit A. CHOISY⁴⁰:

"Et quand ce lit (de tuiles) aura été ainsi entièrement étalé: que l'on épande la gangue [de tuileaux], et qu'en la battant avec des verges, on la pétrisse."

³⁷ *Op. cit.* t. 2, p. 248. Vitruve 7, 1, 5-6: *Deinde ruderi novo tertia pars testae tunsae admisceatur, calcisque duae partes ad quinque mortarii mixtionibus praestent responsum. Statuminatione facta rudus inducatur, idque pistum absolutum ne minus pede sit crassum. Tunc autem nucleo inducto, uti supra scriptum est, pavementum [...] struatur [...].*

³⁸ *Id.* Vitruve 7, 1, 7: *Cum ergo fuerit hoc perstratum, supra nucleus inducatur et virgis caedendo subigatur.*

³⁹ In Granger, note 2, t. 2, p. 83.

⁴⁰ In *Traité théorique...*, t. 2, pp. 252-253. Vitruve 7, 4, 5: *Foditur enim intra libramentum triclini altitudo circiter pedum binum, et solo festucato inducitur aut rudus aut testaceum pavementum ita fastigatum, ut in canali habeat nares. Deinde congestis et spisse calcatis carbonibus inducitur et sabulone et calce et favilla mixta materies crassitudine semipedali. Ad regulam et libellam summo libramento cote despumato redditur species nigri pavimenti. Ita convivii eorum et, quod poculis et pytismatis effundetur, simul cadit siccescitque, quique versantur ibi ministrantes, etsi nudis pedibus fuerint, non recipiunt fraces ab eius modi genere pavimenti.*

2.3.4 L'Opus Signinum du Livre 8

Nous allons maintenant parler du mystérieux blocage employé pour les citernes dans le dernier chapitre du livre 8. En effet, on n'y parle nulle part d'ajout de *testae*, pourtant Vitruve (8,6,14) parle de *signinis operibus*, des ouvrages maçonnés à la manière de Signia. Voici la traduction de L. CALLEBAT⁴¹:

"Si cependant le terrain est dur ou si les veines sont trop profondes, il faudra alors que les provisions d'eau venue des toits ou d'autres endroits élevés soient recueillies dans des ouvrages maçonnés à la manière de Signia. Or, voici comment on doit procéder pour ces maçonneries de Signia: il faut, tout d'abord, avoir du sable très pur et très rude, puis fragmenter dans la pierre des éclats qui ne pèsent pas plus d'une livre, et faire le mortier en ajoutant la chaux la plus fusante possible dans la proportion de cinq parts de sable pour deux de chaux. Avec des pilons de bois armés de fer, on damera ce mortier dans la tranchée jusqu'au niveau de hauteur prévue. Un fois, les parois damées, on enlèvera la terre qu'il y aura au milieu jusqu'au niveau inférieur des parois. Après avoir ainsi aplani, on damera le fond jusqu'à ce qu'il ait l'épaisseur prévue."

L'opération est claire: on creuse quatre tranchées qui seront les quatre murs de la citerne. Ces tranchées auront la hauteur exacte des murs du réservoir. Puis on dépose au fond le "béton" de Signia, on le dame pour le rendre solide et pour en faire sortir l'eau. Nous avons vu que le pilonnage des mélanges fait partie des bonnes conditions pour faire un bon *signinum*. Les ouvriers enlèvent la terre qui est au milieu des quatre murs, ils dament le fond de la citerne, et ensuite ils recouvrent le sol du même blocage que les murs et battent ce blocage à la hie. (Figure 2)

R. CAGNAT et V. CHAPOT⁴² constatent à propos des citernes:

"De quelque façon que les citernes fussent alimentées, leur mode de construction était le même. Les murs [étaient] faits, la plupart du temps, de ce béton étanche qu'on appelait *opus signinum*, parfois en briques ou même en grand appareil, [ils] étaient

⁴¹ In *Livre VIII*, pp. 31-32: Vitruve 8, 6, 14: *Sin autem loca dura erunt aut nimium venae penitus fuerint, tunc signinis operibus ex tectis aut superioribus locis sunt copiae. In signinis autem operibus haec sunt facienda. Uti harena primum purissima asperrimaque paratur, caementum de silice frangatur ne gravius quam librarium, calce [aut calx] quam vehementissima mortario mixta, ita ut quinque partes harenae ad duas respondeant. Eorum fossa ad libramentum altitudinis quod est futurum calcetur vectibus ligneis ferratis. Parietibus calcatis, in medio quod erit terrenum exinaniatur ad libramentum infimum parietum. Hoc exaequato solum calcetur ad crassitudinem quae constituta fuerit.*

⁴² In *Manuel...*, t. 1, p.87.

revêtus d'un enduit imperméable, d'un ciment dans lequel entrain souvent de la poussière de tuileaux; cet enduit est caractéristique des réservoirs romains."

Le problème dans ce texte, c'est qu'il ne parle pas de *testae*; pourtant il parle de "*signinis operibus*". Vitruve a-t-il oublié de mentionner la présence de *testae*? Ou leur présence est-elle si implicite dans le blocage qu'il n'a guère besoin d'en parler? Dans cette description, nous avons un gros blocage qui possède les mêmes attributs que l'*opus caementicium* pour les murs et que le pavement pour le sol. Mais comment s'effectue la prise? Il n'est point ici question de chaux aérienne. Si la tranchée fait 3 mètres de haut, avec la chaux grasse, seule la partie superficielle du produit prendra, alors que la prise à coeur (à savoir la prise de la partie interne) ne se fera pas. De plus le fait de damer de la chaux aérienne fera de celle-ci un tas informe.

L'absence de *testa* trouve une explication lorsqu'on consulte Le De agricultura de Caton. C'est en cherchant des occurrences de "*testa*" chez cet auteur, que j'ai trouvé ce passage (18, 7) qui décrit la fabrication d'un sol de type *nucleus*⁴³:

"Faites le pavage de cette façon: quand vous aurez nivelé, faites un première couche de gravier et de chaux mêlée de sable, tassez-la à la hie; faites de même une seconde couche. Répandez dessus de la chaux passée au crible, sur une épaisseur de deux doigts; faites alors la chape[27] avec des tessons secs; [*ibi de testa arida pavementum struito*] quand elle aura été faite, battez et polissez pour obtenir un bon pavage.

Note 27: Pour la chape, les fragments de tuile (*testae aridae*) sont scellés dans une couche de chaux très fine; c'est le *pavimentum testaceum seu signinum* (cf. Pline, 35, 165); chez Pallad. 1, 17, 1, le fond d'une citerne est un *pavimentum testaceum*; cf. L. Maurin, *Etablissement vinicole à Allas-les-Mines*, in *Gallia*, 22, 1964, p. 218-221."

Le texte de Caton décrit la manière de faire un *pavimentum testaceum*, et la note 27 indique que celui-ci est le nom donné au sol en *signinum*. Pour le latiniste qui lit ce texte, celui-ci n'est pas obscur, et le fermier qui suit à la lettre les conseils de Caton pourrait faire ce genre d'ouvrage. Mais il y a un détail bizarre: que veut dire Caton en parlant de *testa arida*, de *testa sèche*? Pourquoi en fait-il mention? En donnant à lire ce texte à un spécialiste, celui-ci me fit remarquer que le fermier bat un pavement de poussière! Cela signifie qu'il fait la première couche de gravier et de chaux SECHE mêlée de sable, il la bat, il en fait une deuxième puis

⁴³ In *Caton...*, éd. R. Goujard, p. 28; *Caton Agr.*, 18,7: *Pavimenta ad hunc modum facito: ubi libaveris, de glarea et calce harenato primum corium facito, id pilis subigito; idem alterum corium facito. Eo calcem cibro subcretam indito alte digitos duo; ubi de testa arida pavementum struito; ubi strucutum erit, pavito fricatoque, uti pavementum bonum siet.*

réalise une chape (le *pavimentum testaceum*) de chaux SECHE mêlée de *testae* sèches également. Puis il bat le tout. Résultat, il bat un sol de poussière, qui se transformera en boue à la première occasion!

En fait, Caton sous-entend de la chaux éteinte déjà humide, à laquelle on mêle de la "testa" sèche qui réagira avec la chaux. C'est donc de la chaux hydraulique artificielle qui fera un pavé imperméable. Cette chaux hydraulique se tasse à la hie, alors que la chaux aérienne ne peut en aucun cas être tassée, sous peine de devenir un horrible tas informe sans utilité. En ajoutant de la poudre de *testa* à de la chaux aérienne, l'ouvrier pourra la damer.

En battant à la demoiselle, on fait sortir l'eau afin d'imperméabiliser, on donne de la densité au mélange, et on aide la *testa* à entrer afin de lui faire jouer son rôle d'agrégat et de réactif.

Appliquons maintenant ce principe à Vitruve 8,6,14. Les scoliastes de Vitruve se sont demandés, si celui-ci parle d'un *opus signinum*, pourquoi il ne mentionne nulle part de *testa*. On prend la chaux *vehementissima* "la plus fusante possible" (L. Callebat), "aussi énergique que possible" (A. Choisy), "la plus forte chaux qu'on pourra faire" (Cl. Perrault). Il s'agit littéralement de la chaux vive qui fera le plus de réaction lorsqu'on y ajoutera de l'eau. D'où le terme de "violent" qui évoque le bruit de la vapeur d'eau qui résulte du contact eau/chaux vive. Une chaux très vive est très fine et fera en sorte que l'on aura une crème de chaux onctueuse et homogène. Cette pâte sera excellente d'une part pour la qualité du produit fini, d'autre part pour permettre d'introduire la *testa* en poudre.

On procède comme pour de l'*opus caementicium*: on fait une couche du mélange homogène sable/silex/chaux humide. On saupoudre de poudre de *testa* sèche comme le conseille Caton, on dame, on resaupoudre, on redame et cela autant de fois qu'il le faudra jusqu'à ce que l'on ne puisse plus battre à la demoiselle pour introduire de la *testa*. Il faut donc, pour faire un mur de citerne en *opus signinum* comme pour un ouvrage en *caementicium*, des lits successifs de blocage.

On le voit, la comparaison des textes permet d'expliquer ce que Vitruve considère soit comme évident soit comme laissé à l'appréciation du maçon. Je m'explique: si Vitruve ne mentionne ni la présence ni la proportion de *testa* dans le mélange, c'est que la proportion de *testa* est difficilement quantifiable à l'avance pour réaliser ce mur de "béton". C'est donc au moment de bâtir ce mur, et uniquement sur place, que le maçon

pourra savoir quelle quantité de *testa* il pourra employer; avant cet instant, il est difficile de la prévoir. C'est pourquoi Vitruve est prolix sur les quantités de matériaux pour le mortier, car celles-ci sont aisément prévisibles.

2. 4 UNE ANALYSE DE L'OPVS SIGNINVM

Nous avons trouvé un article⁴⁴ qui donne une analyse et une composition de notre maçonnerie. Il se nomme "*Opus Signinum*": *composition, dégradation et conservation*. C'est une communication d'une équipe italienne qui a choisi 6 échantillons de sols en *signinum*:

- 1) Italie: Sicile, zone archéologique de "Morgantina"
- 2) Grèce: zone archéologique de Lamia
- 3) Italie: Montesecco di Pergola (Ancona)
- 4) Italie: La Spezia, zone archéologique de Porto Venere
- 5) Italie: La Spezia, (localité Arignano)
- 6) Allemagne: zone archéologique de Treviri

Avant de critiquer cet article, il faut savoir que si l'on veut faire une analyse complète d'un mortier, l'on doit faire une analyse chimique générale, minéralogique, un examen aux rayons X, et à la micro-sonde. Nous savons que la *testa* d'une manière générale se lie à la chaux en créant de nouveaux corps: le silico-aluminate de calcium (un composé d'argile et de calcium) et silicate de calcium. Ce sont donc ces deux corps qui forment, à partir de l'argile cuite et de la chaux, le liant.

Les auteurs ne firent que trois analyses: un compte rendu au microscope polarisant, une étude des constituants par l'acide chlorhydrique, et un examen aux rayons X. Ce qui leur permet de conclure⁴⁵:

"Il est donc évident que dans tous les cas examinés, c'est la chaux, qui s'est successivement transformée en carbonate de chaux, qui a été utilisé comme liant."

Ils qualifient le reste du mortier comme "inerte" c'est-à-dire tous les éléments qui n'ont pas participé au durcissement du mortier⁴⁶:

⁴⁴I. Roncozzi Fiorentini, "*Opus Signinum*"..., pp. 341-350.

⁴⁵ *Op. Cit.*, p. 342.

⁴⁶ *Op. Cit.*, p. 343.

"Par "inerte" nous entendons tous les matériaux, sauf les carbonatites, constituant le pavement massif: nous entendons donc aussi bien les gros fragments de terre cuite que la poudre de brique, sans oublier tout ce que pourrait être éventuellement dispersé dans le liant "carbonatique"."

Il y a donc le liant proprement dit et l'inerte, le carbonate de chaux et l'argile cuite. Dans celui-ci, on trouve du mica, des feldspaths, et d'autres infimes éléments. On peut voir à l'oeil nu et au microscope dans l'échantillon de signinum la présence d'argile. Or l'étude aux rayons X qui est supposée montrer les constituants mêmes du liant ne révèle que la présence de carbonate de chaux. Où est donc la *testa* qui a dû réagir avec la chaux? L'explication est la suivante: la kaolinite est cryto-cristalline, c'est-à-dire qu'elle est "transparente" aux rayons X. La présence du mica et des autres éléments "inertes" est bien visible et "éloquente" aux rayons. Ces éléments peuvent s'interpréter comme les dégraissants de l'argile. Ainsi celle-ci est invisible aux rayons X, tandis que les dégraissants y sont flagrants. Il est donc normal que les auteurs concluent avec ignorance que seul le carbonate de calcium est l'unique composant du liant dans la chaux hydraulique artificielle. Le principal défaut de l'analyse est d'avoir seulement employé les rayons X avec tous les défauts que cela suppose.

2. 5 SIGNIA: L'INVENTION DE LA POUZZOLANE ARTIFICIELLE.

Jusqu'à présent, nous avons vu la composition du *signinum*, la manière dont il est travaillé, de quelle argile est faite la *testa*, à quelle température elle est cuite. Mais à part ce que nous apprenne les auteurs anciens, c'est tout ce que nous savons de ce procédé, autrement dit presque rien, sauf qu'il est originaire de Signia, d'où le nom de *signinum*. Cela signifie donc que, si nous devons refaire du *signinum*, pour une expérimentation archéologique, en suivant les informations fournies par Vitruve, nous ne saurions pas quelle argile cuite et quel dégraissant employer. Au fait, est ce que la *testa* de Signia était la meilleure des *testae* romaines?

Il nous fallait répondre à la question suivante: qu'a donc cette cité volsque du Latium de particulière pour avoir donné naissance à cette technique et à ce mortier hydraulique? Une visite de Signia, aujourd'hui Segni, et de la région s'imposait pour expliquer les caractéristiques du *signinum*.

2. 5.1 Un peu d'histoire

Signia est une ville frontière située entre la Via Appia et la Via Latina, près duquel se trouve le fleuve Sacco (Figure 3). Lorsqu'on regarde une carte routière (Touring Club Italiano, Italia centrale, foglio 2), Segni est à 40 km au S-E de Rome, à vol d'oiseau.

Elle est située à 668 mètres d'altitude, et au sommet du mont se trouvait un temple (Figure 4). De nos jours, il reste le *podium* de ce temple, sur lequel on a construit l'église San Pietro (Figure 5). D'après Tite-Live (32, 2, 4), cet endroit était tellement sûr qu' on le transforma en prison d'Etat. Tite-Live (I, 56, 3) écrit que Signia fut fondée par Tarquin le Superbe (Av. J.C. 528-504; 534-510).

Le *podium* du temple et les blocs de pierres polygonaux des murailles datent de la fondation de Signia. Signia avaient deux spécialités: le vin et la poire. Déjà, Celse (4, 12, 8; 4, 26, 9) dans son traité médical recommande ce vin ou tout autre alcool astringent pour lutter contre les maux d'estomac et la diarrhée. Il en est de même pour Martial (13, 116), pour Pline l'Ancien (15, 36). Celse (4, 26, 5) recommande cette poire pour combattre la diarrhée, mais elle peut aussi être une poire de conserve (2, 24, 2).

Pline (15,55) donne, inconsciemment, une curieuse indication sur cette poire⁴⁷:

"Ont le nom de leur patrie d'origine [...] la Signine nommée par d'autres testacée d'après sa couleur (comme le sont l'onychine et la pourprée, et d'après l'odeur la myrapia, la laurée, la nardine; d'après l'époque, la poire d'orge; d'après la forme du col, l'ampullacée), et la Coriolane, la Brutienne; la cucurbitine tient son nom de sa ressemblance, l'acidulée de son suc."

J. ANDRE⁴⁸ indique:

"Il est difficile de suivre le fil des idées de Pline dans ce paragraphe et les raisons de son classement. Il faut comprendre ainsi: il débute par des dénominations tirées de toponymes (*Signina*), passe ensuite, par l'intermédiaire du synonyme de *p. Signinum* (*a colore testacea*), à des dénominations parallèles d'après la couleur (*onychina*, *purpurea*), l'odeur (*myrapia*, *laurea*, *nardina*), la date de maturité (*hordearia*), la forme du col (*ampullacea*). Après cette longue digression, il termine sa liste de noms

⁴⁷ *Patriae nomina habent [...] Signina, quae alii a colore testacea appellant (sicut onychina, purpurea, ab odore myrapia, laurea, nardina, tempore hordearia, collo ampullacea), et Coriolana, Brutia, gentilitatis cucurbitina, acidula suci.* (J. André, 1960).

⁴⁸ J. André p. 94, en note.

tirés de toponymes avec Coriolana et Bruttia. Il la clôt enfin par les derniers noms explicables avant de passer à ceux dont il ignore la raison. C'est pourquoi, dans la première phase, il reprend la construction initiale avec *gentilitatis* et *suci* (sc. *nomina habent*)."

Dans la note suivante, il écrit:

"*P. Signinum*: poire de conserve, Celse 2, 24, 2, etc.; Col. 5, 10, 18; Juv. 11, 73, etc.; de Signia dans la Latium; de couleur rouge brique (*testa*), d'où le surnom."

Lorsque Pline évoque des poires qui portent le nom de leur patrie d'origine, pour décrire ensuite d'autres désignant leur couleur, et que cela se produit justement avec *pirum Signinum*, c'est peut-être parce que la poire de Signia, qui est rouge brique (*testacea*), amènerait l'association d'idées: *testacea - testaceum pavementum - testa- opus signinum*. Columelle (5,10) écrit⁴⁹:

"Il faudrait avoir soin de planter dans les vergers les poires de la meilleure espèce c'est-à-dire celle de Crustumium, les poires royales, celles de Signia, de Tarente..."

Et dans les notes de l'édition Nizard, nous trouvons ceci qui nous confirme notre pensée⁵⁰:

"Pl. (15-55) dit que quelques personnes les appelaient "*Testacea*" à cause de leur couleur de terre cuite; en ce sens le nom de Signina ne leur viendraient point de ce qu'elles croissaient sur le territoire de cette ville, mais de ce qu'elles ressembleraient aux ouvrages qui s'y faisaient."

2.5.2 Segni aujourd'hui

La première chose que l'on remarque, c'est la couleur de la terre: c'est une terre très rouge foncé. Lorsqu'on monte sur la route étroite qui mène à Segni, la structure géologique se révèle: ce sont tout autour des collines calcaires avec des couches d'argile.

Arrivant par l'unique route qui serpente vers Segni, celle-ci nous apparaît. C'est un bourg perché sur cette colline (Figure 6) et l'on comprend tout de suite qu'elle fut utilisée comme place forte pour contrôler l'accès à la Campanie. En effet, de sa position, elle domine la Via Latina. L'église San Pietro, bâtie sur le podium du temple antique, attire l'attention. Ce *podium*

⁴⁹ *Curandum est autem, ut quam generosissimis piris pomaria conseramus. Ea sunt Crustumina, regia, Signina, Tarentina...*

⁵⁰ Nizard, p. 515, note 3.

est en pierres polygonales. C'est le soubassement du temple dit le "Capitole" qui est du Vè s. av. J.C. (Figure 7). L'église est construite avec des moellons de calcaire et de ce qu'on nomme du "tuffo" (sorte de pierre grise assez dure).

2.5.3 L'invention de la pouzzolane artificielle.

Nous avons brièvement mentionné l'environnement géologique de Segni. Mais il faut bien se rendre compte qu'il a suffi d'un hasard géologique pour réunir tous les ingrédients pour fabriquer le *signinum*. Si la nature les avaient disposés autrement, rien n'aurait été possible. Du haut de Segni, on peut observer les environs et on constate que les collines sont faites de calcaire.

A Colleferro, au pied de Segni, une des plus grandes cimenteries d'Italie exploite une colline de calcaire brun. Preuve que l'on tire de ce mont un ciment valable (Figure 8). Parfois, le calcaire est seul (Figure 9), parfois l'argile est très abondante entre les strates (Figure 10). L'argile est très foncée. Les habitants avaient donc tous les éléments pour faire de la chaux et des tuiles.

Mais quel dégraissant employaient-ils? Ils ne pouvaient utiliser qu'un matériau local. C'est le fameux "tuffo" (Figure 11). En effet contrairement au tuf de Naples qui est friable, cette pierre est employée en construction (cf. l'église San Pietro). En tentant d'en prélever au bord de la route, et en suivant le théorème qui veut que le tuf normal se raye facilement au canif, quelle ne fut pas notre surprise en constatant que la pierre était dure et ne se rayait que difficilement.

L'analyse de l'argile et du "tuffo" local a été faite à notre demande par la société cimentière italienne Cementir Spa. En voici les résultats qui sont extraits de l'annexe de mon mémoire de maîtrise⁵¹:

"Analyse faite au Laboratoire de Recherche de la Société cimentière italienne CEMENTIR Spa, le 20 Juin 1991.

a) argile:

spectre au Rayons X: argile kaolinique de type dickite, avec 10% oxyde de fer (couleur rouge)

⁵¹ F. Davidovits, *Vitrave...*, p. 112

b) dégraissant (tuf dur de Colleferro):

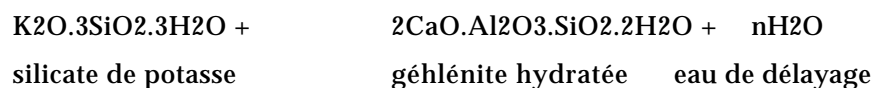
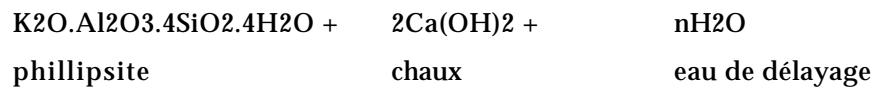
spectre aux Rayons X: matériau constitué d'un mélange de plusieurs zéolithes, phillipsite, Analcime, avec 8% à 10% d'alcali (surtout K₂O).

Réactions géopolymériques:

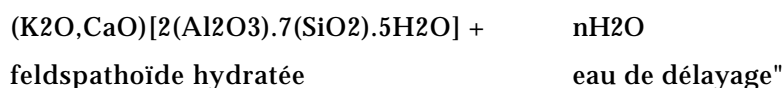
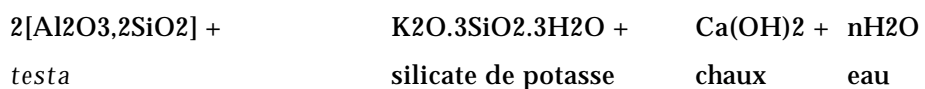
à la différence de la simple action pouzzolanique de la chaux, la présence d'alcali dans le milieu réactionnel transforme le résultat de la réaction chimique, c'est la réaction géopolymérique, dont les produits sont des corps silico-alumineux ayant une structure proche des feldspathoïdes et zéolithes naturelles. Ce sont ces réactions qui sont à la base du durcissement du mortier contenant les matériaux recueillis à SEGNI. Le durcissement du mortier est accéléré, et les résistances à 28 jours peuvent atteindre 200 bars à 300 bars (20-30 MPa)

La *testa* préparée avec les matériaux de SEGNI, argile + dégraissant, après cuisson à 700°C-800°C, réagit avec la chaux de la façon suivante, en deux phases:

1) alcalination: échange chaux-alcali en présence d'eau



2) géopolymérisation: réaction du silicate de potassium avec l'argile kaolinitique calcinée:



Donc, la tuile cuite avec de la zéolithe comme dégraissant donne la meilleure *testa*. le "tuffo", dégraissant, est une zéolithe (phillipsite et analcime) comparable à la pouzzolane de la région de Naples. C'est grâce à

cette zéolithe que le mélange chaux/*testa* atteint une excellente résistance à la compression (200 à 300 bars), qui est le double de celle qu'on trouve dans les habituels liants de *testa* .

C'est donc l'argile kaolinitique et cette zéolithe qui font la qualité exceptionnelle de la *testa* signienne. Le hasard géologique fait que tous les éléments, permettant une réaction chimique optimale entre la chaux et les silicates d'alumine, sont à disposition dans la région.

Signia avait la réputation de faire les meilleures tuiles. Ainsi R. CAGNAT et V.CHAPOT⁵² écrivent:

"Une localité du Latium, Signia, possédait des fabriques de tuiles renommées. On utilisait des déchets, on conservait les pièces cassées, on les pilait soigneusement et, de la poussière ainsi obtenue, mêlée à de la chaux on faisait, un ciment rougeâtre, facile à modeler et imperméable, propre à fournir un excellent pavage intérieur."

Les maçons réutilisèrent les déchets (des tuiles mal cuites, qui ne pouvaient donc pas être employés pour couvrir un toit) pour en faire des agrégats. Mais très vite ils s'aperçurent que la *testa* mêlée à de la chaux faisait le "ciment" par excellence.

La *testa* allait faire la réputation des maçons de Signia dans la péninsule.

Au terme de ce chapitre, nous avons vu qu'effectivement Vitruve s'il est très disert sur les mortiers, les enduits, les pavements, il est allusif concernant l'*opus signinum*. Ce que nous savons de ce dernier dérive, outre des maigres références du *De Architectura*, des recherches archéologiques. Malgré tout nous avons pu établir qu'à l'aide des vestiges archéologiques, le concept de *signinum*, désigne un liant à base de chaux, d'eau, de sable éventuellement et de *testa*, que l'on utilise pour les pavements, et les revêtements étanches, alors que Vitruve restreint le nom de *signinum* aux murs-fondations et aux sols. Néanmoins, il décrit quand même des enduits imperméables à base de *testa* qui sont bien évidemment du *signinum*, bien qu'il n'écrive à aucun moment le terme *signinum*.

De même, notre auteur décrit prolixement les raisons de l'efficacité de la chaux et de la pouzzolane, sans décrire et expliquer les particularités de cuisson de la *testa*, argile cuite kaolinitique. Soit qu'il était ignare à ce sujet, soit que cela ne l'intéressait pas. Nous avons donc dû combler cette lacune en recherchant les textes techniques autres que ceux de Vitruve. Ces textes

⁵² in *Manuel d'archéologie romaine*, Paris, 1920, t.2, p.35.

permettent d'expliquer des procédés que notre auteur omet de mentionner. De plus, pour comprendre pourquoi ce nom de *signinum* existe comme tel, il fallait nous rendre à Segni.

C'est pourquoi, nous pouvons compléter la traditionnelle définition de l'*opus signinum*; celui-ci est un mortier que l'on peut employer comme simple mortier (Vit. 2, 4, 5), il sert d'enduit imperméable (Vit. 7, 4, § 1-4), et comme béton de sol (Vit. 7, 1, § 3-6) et comme sol imperméable (Vit. 7, 4, 5). C'est pourquoi, l'*opus signinum* est associé en archéologie avec les techniques de mosaïque, puisqu'il en est la plus primitive expression. C'est un mélange de chaux, de *testa* en poudre, et d'agrégats divers (comme du béton de tuileaux, du silex, etc...) qu'on bat pour homogénéiser l'ensemble. Le fruit de toutes ces actions est une maçonnerie qu'on nomme *opus signinum* (le terme *opus* désigne le résultat fini, la maçonnerie achevée).

Tout cela est la définition traditionnelle. Voici notre complément à celle-ci: l'*opus signinum* est aussi un mur que l'on fabrique comme l'*opus caementicium*, mais on y ajoute de la *testa* en poudre pour faire la concrétion au coeur de la maçonnerie. La *testa* est une poudre d'argile kaolinite cuite entre 600 et 800°C, mais rien ne vaut celle qu'on fait à Signia. Ce site fournit outre l'argile pour la tuile, le dégraissant qui est une zéolithe; C'est pourquoi, c'est à Signia que se prenaient les meilleures "tuileaux" pour faire le meilleur mortier. La réputation des maçons de Segni était établie dans la péninsule, et la *testa signina* devint donc la référence technique.

Voilà pour le *signinum*, il nous reste à déterminer l'origine des techniques à base de mortier hydraulique: celles-ci sont-elles issues de Grèce ou d'ailleurs? Ce sera le thème des autres chapitres de cette étude.

3. L'EMPLECTON ET L'OPVS CAEMENTICIVM

Dans le précédent chapitre, nous avons émis l'hypothèse que le *opus signinum* du livre 8 recevait une quantité de *testa* laissée à l'estimation du maçon. Cette *testa* permet la prise à coeur du "béton". Le mur est ensuite battu à la hie comme il se doit pour un *signinum* et aussi comme la technique du "blocage damé" pour le *caementicium*. Nous ne pouvons donc plus distinguer les techniques des unes des autres: avons-nous un mur en *opus caementicium* maçonné selon la technique de l'*opus signinum* ou un mur en *opus signinum* bâti sous la forme d'un *opus caementicium*? Cette constatation montre à quel point les maçonneries sont très proches les unes des autres et qu'elles sont issues des mêmes techniques de construction.

On peut donc supposer que les murs en *opus caementicium* et en *emplecton* utilisent principes et des techniques de bâtiment similaires... jusqu'à un certain point. De plus pour notre étude de l'emploi de la *testa* dans le monde romain, il faudrait savoir si son usage est systématique dans les murs en *caementicium* ou si elle est remplacée le plus souvent par la pouzzolane. Nous ferons aussi une comparaison entre le *caementicium* et l'*emplecton* qui montrera les points communs et les différences entre ces deux structures.

3.1 LE TEXTE DE VITRUVÉ

Pour définir ce que sont ces deux maçonneries, il faut revenir au texte de Vitruve. Après avoir décrit les murs *isodome* et *pseudo-isodome*, il décrit un mur qu'il appelle *emplecton*. Ce mur est en fait divisé en trois: deux parements extérieurs, et au milieu de ces deux murs, un remplissage. Nous donnons la traduction de J. B. RONDELET¹ qui nous semble la plus claire. Vitruve (2, 8, 7) parle ainsi de ce mur:

¹In *Traité...*, pp.261-262; Vitruve 2, 8, 7: *Altera est quam "emplecton" appellant, qua etiam nostri rustici utuntur. Quorum frontes poliuntur, reliqua ita, uti sunt nata, cum materia conlocata alternis alligant coagmentis. Sed nostri celeritati studentes, erecta conlocantes frontibus serviunt et in medio faciunt fractis separatim cum materia caementis. Ita tres suscitantur in ea structura crustae, duae frontium et una media farturae. Graeci vero non ita, sed plana conlocantes et longitudines eorum alternis in crassitudinem instruunt, non media farciunt, sed e suis frontatis perpetuam et unam crassitudinem parietum consolidant. Prae caetera interponunt singulos crassitudine. perpetua utraque parte frontatos quos "diatonous" appellant, qui maxime religando confirmant parietum soliditatem.*

"Il y a une autre espèce de maçonnerie qu'ils [les Grecs] nomment *emplecton* (*entremêlée*), et dont on fait usage dans nos campagnes: dans celle-ci les faces seules des pierres sont régulièrement taillées, le reste demeure comme il se trouve, et dans l'espace qui reste entre elles est garni en mortier: mais nos constructeurs, pour aller plus vite en besogne, élèvent les deux faces du mur en forme de revêtements, et se contentent de remplir ensuite l'intervalle en maçonnerie de blocage; il en résulte des murs formés de trois placages, savoir, les deux parements et le remplissage. Ce n'est pas ainsi qu'on opère en Grèce; mais en alignant les parements, on a soin de disposer les assises de manière que les queues de moellons se recroisent dans l'épaisseur de la maçonnerie ensuite, au lieu de ne remplir le vide le vide qu'après coup, on affleure le milieu du mur au niveau du mur au niveau de chaque assise.

Outre cela, les Grecs distribuent de distance en distance des morceaux débités d'égal épaisseur et parementés à leurs extrémités auxquels ils donnent le nom de *diatonous* (*parpaings*), qui ajoutent encore à la solidité du mur, en le reliant fortement sur son épaisseur."

Mais si les murs sont mal faits, les parements s'écartent et tombent. Vitruve (2, 8, 4) recommande²:

"Que celui qui voudra prévenir des conséquences aussi graves, après avoir fixé à 2 pieds l'espace que doit occuper le mur entre les deux revêtements, érige ce mur en pierres taillées, en briques ou en moellons ordinaires, et qu'il y rattache ensuite les placages avec des crampons de fer scellés en plomb. Un mur ainsi établi, au lieu d'être formé avec des matériaux entassés sans ordre, pourra se conserver longtemps intact, parce que les lits et les joints procurant aux morceaux qui entrent dans sa composition, une assise et une liaison naturelles, aucun d'eux ne peut être repoussé au dehors; et les pièces du revêtement aussi reliées entre elles (*ainsi qu'au mur*), ne peuvent pourront plus être renversées."

L'*emplecton* grec et romain se compose d'un noyau central et de deux parements qui servent de coffrage permanent à ce noyau. Vitruve ajoute un commentaire curieux sur la mentalité des Grecs et des Romains: ceux-ci veulent l'efficacité; ils veulent bâtir vite et bien, et non pas perdre leur temps en vaines finitions. C'est pourquoi Vitruve insiste sur le "stackanovisme" cimentier des Romains. Ils bâtissent rapidement les deux parements et jettent le blocage au milieu de ceux-ci. On obtiendra un mur rapidement bâti mais rien n'indique qu'il durera longtemps. Par contre, les Grecs construisent assises par assises et prennent ainsi le temps de donner une belle finition à leur mur. Il semble que Vitruve insinue que les Romains édifient des maçonneries moins belles et moins durables que les Grecs.

On met à l'intérieur du mur, à intervalles réguliers, pour renforcer la cohésion, un *parpaing* en *boutisse*, c'est-à-dire une longue pierre qui

² Op. Cit. p. 260; Vitruve 2, 8, 4: *Quodsi qui noluerit in id vitium incidere, medio cavo servato secundum orthostatas intrinsecus ex rubro saxo quadrato aut ex testa aut ex silicibus ordinariis struat bipedales parietes, et cum his ansis ferreis et plumbo frontes vincitae sint. Ita enim non acervatim, sed ordine structum opus poterit esse sine vitio sempiternum, quod cubilia et coagmenta eorum inter se sedentia et iuncturis alligata non protudent opus neque orthostatas inter se religatos labi patiuntur.*

traverse toute l'épaisseur de la maçonnerie: elle perce le premier parement, puis le noyau, et enfin le second parement. Ces boutisses sont appelées *diatonous*. Notons que cette précaution, qui consiste à éviter que les parements s'écarte du noyau central, signifie que le mortier (en général de la chaux terreuse ou de la terre plus simplement) est médiocre. Pliny l'Ancien (N. H. 36, 172) reprend la description de Vitruve. Celui-ci décrit la disposition des moellons des parements pour que la maçonnerie ait une cohésion. Chaque moellon de parements est taillé avec une forme triangulaire. Une ligne de moellons est appelé assise; chaque parement a une assise se fait face. Il faut que la queue du moellon (c'est-à-dire le bout le plus pointue du triangle du moellon) ne soit pas en face de son semblable, mais qu'elle soit décalée en sorte que l'espace entre chaque moellon fait face à la queue de son homologue.

Ni Vitruve ni Pliny ne précisent quel mortier utiliser. L'*emplecton* grec est fait d'un noyau de terre, le *caementicium* est fait d'un "béton".

3.2 L'OPVS CAEMENTICIVM

Si les parements peuvent recevoir un motif varié de moellons ou de briques (*opus incertum*, *opus reticulatum*, *opus testaceum*), le *caementicium*, le coeur du mur, est une maçonnerie concrète, un véritable *béton*. Sa composition est la suivante: de la chaux, de l'eau, du "sable" et des moellons qui donneront la cohésion de l'ensemble.

G. LUGLI³ fait la liste des composants du *caementicium* et son analyse est fort pertinente. Prenons d'abord le mortier. Vitruve (2, 5, 1) donne les recettes pour faire un bon mortier. Nous avons ainsi les éléments suivants: la chaux (*calx*), la pouzzolane (*harena fossicia* ou *pulvis*), le sable de rivière ou de mer (*harena fluvatica* aut *marina*) et la *testa*. Lugli ajoute qu'à cause de multiples variables, il est très difficile de dater les mortiers avec des critères précis (la couleur par exemple).

Passons à la question du sable. Celui-ci est défini par R. GINOUVES et R. MARTIN⁴ comme un

³ In *La tecnica...*, pp.390-402.

⁴ In *Dictionnaire méthodique...*, p. 44.

"minéral sous forme poudreuse, au grain plus ou moins fin (entre 1/16è de mm et 2 mm), provenant de la décomposition des matières divers surtout du quartz: le sable est donc souvent siliceux mais il peut être aussi calcaire, etc."

L'article énumère ensuite les différentes sortes de sable qu'on distingue d'après leur lieu d'origine: le sable de rivière et de mer, et enfin le sable de carrière qu'on appelle en latin *harena fossicia*.

"C'est dans cette dernière catégorie que se place une sorte sable aux caractéristiques pétrographiques bien définis, la pouzzolane, forme meuble d'un tuf volcanique."

3.3 LES DIFFERENTES SORTES D'HARENA "SABLE" et le CARBVNCVLVS

On le voit, le sable, contrairement à l'opinion courante, ne désigne pas de minuscules morceaux de silice, mais toutes sortes d'éléments minéraux de petites dimensions. Donc la poudre de *testa* ou de pouzzolane entre dans cette définition et remplacent parfaitement la silice. G. LUGLI⁵ analyse le sens de *harena*. Ainsi il rapporte que ce terme est employé par Sénèque (*Nat. Quaest.* 2, 30) pour désigner la cendre d'une éruption volcanique, de la même manière que *pulvis*, et dans Pline l'Ancien (*N. H.* 35, 167) où la poudre pouzzolanique (*pulvis puteolanus*) est comparée au sable du Nil (*harena e Nilo*). Il rappelle en outre que les Romains appellent *harenariae* les carrières de pouzzolane ou de tuf granulaire dans lesquelles les chrétiens bâtiront leurs catacombes.

C'est pourquoi dans ses traductions des textes vitruviens, concernant le terme *harena*, G. LUGLI⁶, parle de *sabbia*, *arena*, ou *rena* en se limitant au sable fluvial ou marin; pour *pulvis (puteolanus)*, il emploie le terme de *pozzolana*, traduction qui comprend l'*harena fossicia*, ce sable qu'on extrait du sol, par opposition aux autres sables qu'on peut ramasser tel quel. G. LUGLI⁷ utilise le terme *pozzolana* (pour traduire *harena*) lorsque Vitruve (2, 8, 2) parle de la composition du mortier à utiliser comme liant pour les différents *opera* (à savoir, *opus incertum* ou *reticulatum* pour les parements extérieurs et *opus caementicium* pour le noyau central). Il est donc clair que c'est de la pouzzolane qu'on emploie pour les maçonneries.

Résumons donc les traductions de G. LUGLI. Il y trois sortes d'*harena*:

- 1) Les sables fluviaux (quartziques): *harena fluviatica*.
- 2) Les sables marins (calcaires): *harena marina*.
- 3) Les pouzzolanes qu'on extrait du sol et qu'on distingue les unes des autres par la couleur (Cf. § suivant).

La pouzzolane employée pour l'*opus caementicium* (Vit. 2, 8, 2) est désignée simplement par *harena*.

Vitruve (2, 4, 1) distingue ces sables de carrière (donc pouzzolaniques) par la couleur: rouge, grise, noire, et une variété qu'il appelle *carbunculus*.

⁵ In *La tecnica...*, pp. 397-398.

⁶ *Op. Cit.*, p. 398.

⁷ In *L'Opus...*, p. 99.

Notre auteur révèle (livre 2, chapitre 6) qu'il y a deux très bonnes pouzzolanes: celle de Baïa, et le *carbunculus* qu'on trouve en Etrurie. G. LUGLI⁸ rappelle le "mystère" du *carbunculus*: on a supposé qu'il s'agissait de tout sauf d'un sable pouzzolanique. Mais il rapporte que le *Liber Coloniarius* (Lib. Col. p. 227, 15 e 243) indique que le *carbunculus* est une pierre avec laquelle on construit les bornes de frontières et des terrains assignés. C'est une pierre qu'on taille. Mais l'élément déterminant est donné par Columelle (*De re rust.* 3, 11, 7). Il donne des conseils pour la culture de la vigne. Et parlant du *carbunculus*, Columelle⁹ écrit:

"En effet, bien qu'il soit tout sauf un fermier ordinaire, un fermier ne sait-il pas que même le tuf très dur ou *carbunculus*, une fois réduit en morceau et semé en surface, se ramollit et se relâche du fait des intempéries, du froid et aussi bien de la chaleur de l'été; et que même par temps chaud, il est très efficace pour rafraîchir les racines et pour conserver l'humidité- conditions les meilleures pour l'alimentation du jeune plant?"

Ainsi, cette pierre, débité en petits morceaux, est semée sur les racines. Elle absorbe l'humidité le jour, et la restitue la nuit, ainsi, elle rafraîchit les racines. Cette caractéristique, de retenir et de restituer l'eau est celle des pierres volcaniques qu'on appelle "zéolithes". La zéolithe est un silicate d'alumine qui après dégradation donnera de l'argile. Il faut rappeler que la région de Rome et le Latium sont géologiquement issu du volcanisme. Le *carbunculus* est d'après le mot latin une pierre noire (qui évoque le charbon) ou rouge. Il existe justement à Segni un gisement de zéolithe noire qui est employée comme pierre de construction. Elle fut aussi utilisée comme dégraissant pour la fabrication des tuiles, puisque Signia était réputée pour la fabrique de ses tuiles. Si l'on ajoute à cela, le fait que la région de Signia produisait du vin astringeant recommandé par Celse, nous avons là un argument de plus pour que la zéolithe de Segni ait donc toutes les caractéristiques d'un *carbubunlus*.

A vrai dire, la zéolithe noire est rare à Segni, mais on la trouve. La zéolithe grise est plus courante. Mais cela n'enlève en rien ses qualités zéolitiques et donc pouzzolaniques.

En règle générale, les tufs volcaniques d'Italie sont des tufs zéolitiques. Donc on devrait avoir du *carbunculus* un peu partout en Italie.

⁸ In *La tecnica...*, pp. 398-399.

⁹ Columelle 3, 11, 7: *Quis enim vel mediocris agricola nesciat etiam durissimum tofum vel carbunculum, simul atque sit confractus et in summo regestus, tempestatibus et gelu nec minus aestivis putrescere caloribus ac resolvi; eumque pulcherrime radices vitium per aestatem refrigerare, succumque retinere; quae res alendo surculo sunt accommodatissimae?*

Mais Vitruve (2, 6 6) parle du *carbunculus* de d'Etrurie qui est le meilleur. G. LUGLI¹⁰ émet l'hypothèse que le *carbunculus* d'Etrurie est un tuf volcanique qu'on appelle "nenfro" et qui est de couleur brune. Mais parce qu'il est tendre quand on le débite, il faut le faire vieillir pendant un an. Il durcit quand on l'expose aux intempéries, comme beaucoup de tufs légers. Il est brun et non pas noire comme son nom pourrait le faire croire, malgré la présence de noyaux de carbone noir. Son hypothèse demanderait une confirmation et seule la géologie peut répondre à cette question. En tout cas, elles irait dans le sens d'un *carbunculus* rouge.

De quelle couleur est le *carbunculus*? La plupart des traductions en font un minéral noir mais on trouve aussi une couleur rouge. Quelle est alors la différence entre une pouzzolane noire ou rouge à l'état naturelle et le *carbunculus* noir ou rouge? De fait, au niveau du vocabulaire, comment Vitruve distingue-t-il *harena fossicia* noire ou rouge de *carbunculus*? J'ai demandé au spécialiste cité en annexe quelle pouvait être la relation entre le *carbunculus* noire et le *carbunculus* rouge. Ce qu'il m'apprit me permet d'émettre l'hypothèse suivante. Elle explique cette distinction.

On ajoute dans les ciments Portland des zéolithes cuites à 400 °C. Cette calcination améliore leurs vertus pouzzolaniques et augmente la qualité du ciment. Si l'on applique cette méthode à l'Antiquité, on peut énoncer cette proposition: la pouzzolane noire ou le déchet noir des carrières de tufs volcaniques sont cuits au-dessus de 400 °C afin de rendre meilleurs leurs caractères pouzzolaniques. Cette cuisson transforme la couleur de la zéolithe: de noire, elle devient rouge. Ainsi peut s'expliquer le caractère du *carbunculus* par rapport aux autres pouzzolanes: il faut cuire une zéolithe noire pour en faire une pouzzolane rouge propice à la maçonnerie pour obtenir un produit équivalent à celui de Baïa. Le *carbunculus* est donc à l'origine une pouzzolane de qualité moindre qu'on perfectionne pour la rendre aussi bonne que les autres. Au *carbunculus* cuit, donc de nature artificielle, s'oppose les pouzzolanes colorées et naturelles. A la Villa Hadriana, dans les parements en *opus reticulatum*, on trouve un mortier de zéolithe noire et un liant de zéolithe rouge (Figures 12, 13). Dans mon mémoire de maîtrise, j'avais signalé¹¹ que le passage du mortier noir au rouge pouvait s'expliquer par la cuisson de la zéolithe noire.

¹⁰ *Op. Cit.* p. 399.

¹¹ In *Vitruve...*, p. 42.

Pour conclure cette question sur le *carbunculus*, le texte de Columelle indique que cette pierre, qui est généralement noire ou de couleur sombre, débitée en petits morceaux est une zéolithe et non du charbon. Le *carbunculus* que décrit Vitruve est aussi un sable de tuf zéolitique.

G. LUGLI¹² aborde le problème de la provenance de la pouzzolane. Vitruve ne parle pas de la pouzzolane romaine qui est pourtant aussi efficace que celle de Baïa. Donc il conclut que les Romains de l'époque de Vitruve et même leurs ancêtres n'exploitaient pas systématiquement les gisements actuels de Rome et que la pouzzolane provenait pour l'essentiel des Champs Phlégréens, près de Baïa.

Pourquoi importer de si loin la pouzzolane de Naples? Peut-être par habitude (c'était le modèle de la pouzzolane d'après Vitruve). Mais rien n'empêche de supposer que celle de Rome était non pas comme à Baïa exploitée industriellement, mais utilisée de temps en temps selon les besoins. De plus, l'on sait que les tufs volcaniques locaux étaient taillés pour les besoins de l'architecture. Les carrières de tufs se situaient le long du Tibre et de l'Arnio. Que faisait-on des déchets de taille dans les carrières comme sur les chantiers? Il est raisonnable de supposer qu'on récupérait ces déchets comme pouzzolane pour les mortiers, car les Romains pratiquaient ce qu'on appelle aujourd'hui le recyclage des déchets.

Finissons avec les agrégats. G. LUGLI¹³, dans son article sur l'*opus caementicium* chez Vitruve, nous commente le texte de Vitruve (2, 8, 4). Il précise les agrégats que Vitruve énumère pour le *caementicium*. Il y en a trois sortes: 1° *ex rubro saxo quadrato* = les blocs de tufs rouges, provenant de la carrière de Grotta Rossa; 2° *ex testa* = les morceaux de tuiles qu'on récupère et qu'on mêle au mortier; 3° *ex silicibus ordinariis* = des grands éclats de pierres dures habituellement du calcaire ou du marbre. G. LUGLI précise que ce dernier cas est assez rare en Italie centrale et qu'on le trouve plutôt dans le nord du pays, en Grèce ou en Orient.

3.4 L'EMPLECTON GREC

L'*emplecton* est une "maçonnerie" grecque et n'est pas une structure homogène. La structure correspond à la définition de Vitruve: deux

¹² *Op. Cit.* p. 399.

¹³ In *L'opus...*, p. 100.

parements extérieurs avec un noyau central. Mais chez les Grecs, l'*emplecton*, contrairement aux Romains n'emploie pas de liant, ni chaux, ni plâtre. D'une manière générale, le noyau central est fait d'un mélange de pierres cassées, de débris de carrières, et de terre. Les deux parements sont des pierres taillées dont les joints sont posés à vif sans mortier. Les parements peuvent être polygonaux, isodomes ou pseudo-isodomes.

Il existe une technique proche de l'*emplecton*, il s'agit de l'*analemma*¹⁴. Ce mur de soutènement est destiné à soutenir la poussée des terres d'une terrasse. Un parement de gros blocs est élevé en avant de la terrasse qui, en général, a été entaillée et un remplissage de moellons et de terre vient combler l'espace laissé vide. L'*analemma* se rapproche aussi de l'*emplecton* par les boutisses qui pénètrent profondément dans le remplissage. A Eleusis, ces boutisses brisent ces forces de poussée.

L'application la plus courante de l'*emplecton*, est le mur d'enceinte ou *temnion*. L'épaisseur du mur est variable; les dimensions les plus répandues oscillent entre 2,5 m. et 3,5 m. Ainsi à Messène, on trouve 2,5 m.; à Athènes, on a entre 2,5 m. à 3,5 m.; à Olynthe, l'épaisseur est de 3,25 m. Elle descend rarement au dessous de 2 mètres. La forteresse réduite de Gorthys d'Arcadie¹⁵ varie entre 1,25 m. et 1,30 m. Mais elle peut atteindre 5 mètres à Corinthe, et à Mégalopolis (4,5 m.).

Ce procédé de construction apparaît avec les enceintes les plus anciennes que nous connaissions, vers le milieu du VI^e s. ou peut-être dans la deuxième moitié du VII^e siècle, et fait preuve d'une vitalité séculaire puisque le mur d'Hadrien à Athènes révèle la même structure. Mais ce système présente quelques inconvénients par manque de cohésion entre les deux parements. Ce problème est accru lorsque se développe au IV^e siècle, l'emploi des machines de guerre. Comme l'explique J. P. ADAM¹⁶:

"Le parement extérieur un fois détruit ou simplement ébréché, le massif de remplissage s'effondrait par la brèche entraînant la ruine d'une importante section du mur."

Quelques essais furent tentés qui devaient permettre d'accroître la résistance aux machines de guerre. C'est pourquoi Vitruve dans sa description de l'*emplecton* indique qu'il faut mettre des parpaings en

¹⁴ R. Martin, *Manuel...*, p. 374.

¹⁵ BCH, 71-72, 1947-1948, pp. 116-117.

¹⁶ In *L'architecture...*, p. 25.

boutisses, comme dans les murs de terrasse. Ces boutisses sont attestées à Phylé, à Messène, à Mégalopolis, à Mantinée, au cap Sounion, à Héraklée du Latmos¹⁷. Elles sont inspirées des pièces de bois transversales à l'intérieur d'un mur de briques. A Gortys d'Arcadie, la liaison est établie par des murettes qui, de place en place, compartimentent l'intérieur de l'*emplecton*¹⁸.

R. A. TOMLINSON¹⁹ parle de l'origine du mot *emplecton*. Pour lui, le terme vient d'un motif de parement, qu'on appelle en Anglais "Flemish bond" (appareil flamand). Il consiste en assises constituées respectivement de parpaings en boutisse et de parpaings en carreau. Ainsi le parement rappelle la trame d'un tissu (Figure 14). Il cite comme exemple le mur extérieur de la *stoa* à trois étages à Aegae, et les murs de l'Hekatomnide (IV^e siècle) à Labraunda. F. WINTER²⁰ indique que ce type de motif est d'époque hellénistique et qu'il a servi de modèle pour l'*emplecton* de Vitruve.

L'exemple le plus remarquable de murs à carreaux et boutisses (qui ressemblent le plus au "Flemish bond") se trouve dans les tours à Héraklée du Latmos²¹. La forteresse d'Héraklée du Latmos est un exemple remarquable d'emploi régulier des boutisses et des carreaux, comme l'explique J. P. ADAM²²:

"En élévation, les courtines comme les murs des tours, sont parementés en grand appareil rectangulaire à assises réglées, où alternent soigneusement carreaux et boutisses. Dans le rempart, trop larges pour que les pierres traversent les murs, les boutisses pénètrent profondément dans l'*emplecton*, tandis que dans les tours, les boutisses sont des parpaings et elles alternent avec un double cours de carreaux."

J'ai trouvé dans le livre de J. P. ADAM²³, un exemple de rempart qui est un mur de remplissage entre deux parements. Ce parement du rempart présente une alternance de carreaux et boutisses qui rappelle l'«appareil flamand» sans être pour autant régulier. Il s'agit du rempart de Sélinonte.

¹⁷ *Op. Cit.* p. 34, photos n°53 et 56.

¹⁸ *BCH*, 71-72, 1947-1948, pp. 120-121.

¹⁹ In *Emplecton...*, p. 135.

²⁰ In *Greek...*, pp. 135-137.

²¹ In *L'architecture...*, p. 236 et photo n°271.

²² *Op. Cit.*, pp. 235-236.

²³ *Op. Cit.*, photo n°57, p. 35.

Voilà donc un cas qui pourrait correspondre à la définition de R. A. TOMLINSON.

Mais il faut relativiser sa définition: s'il rapporte un exemple du IV^e siècle (les murs de l'Hékatomnide à Labraunda), cet "appareil flamand" implique des murs en grand appareil rectangulaire pour les murailles. Or la technique de l'*emplecton* apparaît non pas avec les murs rectangulaires, mais avec les remparts polygonaux, qui sont plus anciens. C'est ce qu'explique J. P. ADAM²⁴:

"Vu en coupe, un mur en appareil polygonal présente trois parties distinctes, que l'on retrouve dans presque tous les types de remparts quelle que soit la nature de leur appareil: deux parements fondés et soigneusement assemblés et entre eux un massif de remplissage constitué de pierres de rebut et d'éclats de taille avec parfois un liant argileux pour combler les intervalles. L'inconvénient de ce procédé connu sous le nom d'*emplecton*, apparaît lorsque se développe au IV^e siècle avant J. -C. l'usage des puissantes machines de siège."

Si la technique de l'*emplecton* est utilisée avec l'appareil polygonal, cela signifie que la définition de R. A. TOMLINSON ne peut pas s'appliquer à un mur qui ne rappelle en rien la trame d'un tissu, mais au contraire à un mur de grand appareil rectangulaire. Il appelle *emplecton* tout mur en trois parties avec un parement de grand appareil. Si la définition de R. A. TOMLINSON est exacte et si le terme d'*emplecton* désigne un motif en grand appareil rectangulaire, l'*emplecton* n'est point le nom d'origine donné à une technique de construction en trois parties, mais celui qu'on lui appliqua avec le développement et l'emploi des carreaux et des boutisses dans l'appareil rectangulaire. Et l'on peut toujours supposer que le mot "emplecton" fut employé de manière systématique à l'époque hellénistique, époque de l'usage de l'appareil flamand" pour les fortifications.

Comme nous l'avons vu, les *emplectona* qu'ils soient grecs ou romains n'ont en commun que le principe d'un mur en trois parties. Le *caementicium* de chaux n'a pas d'équivalent dans le monde grec, puisque les Grecs n'usaient pas de liant. Le *caementicium* est une maçonnerie de chaux, de pouzzolane et de moellons. G. LUGLI définit en une pertinente analyse les différentes sortes de sable que décrit Vitruve dans le quatrième chapitre du livre deux. G.LUGLI montre que le sable utilisé n'est pas calcaire ou quartzique mais pouzzolanique. Et d'après lui, c'est ce sable qu'on emploie le plus pour cimenter l'*opus caementicium*. Les Romains faisaient

²⁴ Op. Cit., pp. 24-25.

venir cette pouzzolane de très loin, c'est-à-dire de la région de Naples. Ils pouvaient aussi récupérer les déchets des carrières de tufs volcaniques du Latium. C'est cette pouzzolane qui explique la pérennité des ruines en *opus caementicium* de l'époque républicaine. Vitruve (2, 4, 3) précise que le sable fluvial ou marin doit être utilisé pour les enduits, et non pas pour le *caementicium*. Et si l'on ne dispose pas de pouzzolane, le *structor* usera de *testa*.

Nous pouvons conclure aussi que, si à Rome et dans le Latium, on employait la pouzzolane, à Signia, on utilisait de la *testa*, car cette localité récupérait systématiquement les déchets de ses tuiles qui faisait sa réputation, pour les ajouter aux mortiers. Donc si partout ailleurs la pouzzolane prédominait, à Signia, la *testa* régnait et c'est ce qui a permis aux maçons de cette cité de concevoir des ouvrages originaux qui duraient grâce ces tuiles et à leur composition si particulière. Bref, l'*opus signinum* créé à Signia devint une référence technique. D'où vient la technique de maçonnerie à base de *testa*? Ce ne sont pas les Romains qui l'ont inventé, bien qu'ils l'aient utilisé à l'époque impériale avec le succès qu'on sait. Ce sont les Grecs qui la leur transmirent en Campanie par exemple. Mais il est curieux de constater que si les Grecs connaissaient la chaux et la *testa*, ils n'employèrent point en règle générale de liant pour leur maçonnerie. C'est pourquoi l'*emplecton* grec aboutit, pour notre étude à une impasse. Seul, l'examen des enduits et des sol en usage chez les Grecs peut nous apprendre la manière dont ils utilisaient ces mortiers imperméables.

4. LES ENDUITS IMPERMÉABLES

Si les constructeurs grecs n'ont employé qu'exceptionnellement les mortiers à l'intérieur des maçonneries, ce n'est point parce qu'ils ne connaissaient pas des liants de qualité. Mais ils les ont réservés aux enduits et aux revêtements des murs. Les maçons se servaient d'eux pour dissimuler le médiocre aspect de certains matériaux (tufs et calcaires) et les appareils grossiers en moellons. La qualité des enduits se révèle dans les installations hydrauliques, telles que citernes, bassins, protection des pieds de murs. On se sert d'eux comme support des peintures et des décors. Dès le IV^e siècle, les architectes de Priène, puis ceux de Délos, de Théra, de Macédoine eurent recours aux stucs pour orner les grandes salles des maisons, les intérieurs des monuments funéraires pour suppléer aux placages de marbre qui coûtaient très cher.

4.1 LES ENDUITS DE *TESTA* EN GRÈCE

D'une façon générale, on distingue chez les Grecs (comme plus tard chez les Romains) trois sortes d'enduits:

- 1) les enduits courants à base de sable quartzique ou calcaire et de chaux.
- 2) les stucs à base de chaux ou de plâtre et de poudre de marbre.
- 3) les enduits hydrauliques à base de *testa* ou de pouzzolane, de sable et de chaux.

Si l'on en croit les conseils de Vitruve (7, 3, 5-10), les maçons devaient appliquer sept couches d'enduits: une première couche rudimentaire, trois couches de mortier de chaux et de sable, et enfin trois couches de mortier de chaux et de poudre de marbre. Avec de tels dosages et lorsque l'application est faite avec soin et que les couches successives sont lisses, les enduits doivent présenter une surface brillante et lumineuse comparable à celle d'un miroir bien travaillé et bien poli (7, 3, 9). Comment obtient-on un tel miroir? Les maçons doivent talocher et battre les enduits, d'une part pour le mélange de l'enduit homogène, puis pour en faire sortir l'eau. Les plâtriers grecs, ajoute Vitruve (7, 3, 10), appliquent de tels enduits, mais en plus ils les dressent avec des palettes de bois. Ceux-ci pressent l'enduit et en

augmentent la solidité, si bien que des panneaux entiers peuvent être détachés des murs en ruines et être employés comme tables ou miroirs, et même comme de vrais tableaux, pour la plus grande joie des archéologues du XIX^e siècle!

En fait, les maçons appliquaient entre deux au minimum et quatre couches au maximum. Citons ce passage où J. CHAMONARD¹ résume ses observations sur les enduits de Délos:

"Les enduits sur lesquels est peints le décor mural sont traités avec le plus grand soin. En raison de l'irrégularité de l'appareil, ils devaient être assez épais. Aussi étaient-ils constitués par plusieurs couches de mortier: deux dans des décors ordinaires, comme les revêtements unis; trois dans la plupart des autres; quatre dans les décors à bossages. Le plus ordinairement, on trouve sur le mur une première couche à laquelle la brique pilée qui y est mêlée a donné un ton rosâtre; très dure, elle est, à dessein, assez inégalement répartie, quelquefois mêlée de tessons de poterie (procédé encore employé aujourd'hui pour donner plus de consistance aux revêtements de mortier ou de ciment) et striée de longues incisions irrégulières, soit obliques et parallèles, soit divergentes et opposées (feuilles de fougère). Ces incisions sont destinées à assurer l'adhérence de la couche suivante. Celle-ci, faite de stuc blanc à gros grains un peu rugueux, est soigneusement aplanie. C'est elle qui recevait la troisième couche de stuc fin et poli, sur laquelle était modelé et peint le décor."

M. BULARD² signale aussi que l'enduit de *testa* forme parfois la première des trois, quatre, voire même cinq couches d'enduits.

La première couche fait entre 1 et 3 cm., la deuxième entre 1 et 1,5 cm., la troisième est inférieure à 1 cm. La même technique a été observée dans les maisons de Priène. La première couche d'enduit fait 3 cm., la deuxième 5 mm. C'est sur cette couche que venait ensuite le stuc qui porte la décoration peinte ou moulurée. Ce stuc fait 1,5 cm.

Les enduits hydrauliques sont fait de *testa*. Vitruve consacre une partie du chapitre 4 du livre 7 à leur utilisation³. Les techniques de pose sont identiques à celles des autres enduits. Ils sont eux aussi battus pour les faire durcir. De par leur composition et leur battage, ils sont l'ancêtre du *signinum*. Ils peuvent aussi être de pouzzolane. Mais ils sont plus rares car la matière première est disponible dans certains lieux volcaniques seulement (par exemple à Santorin). Dès le VI^e s., Corinthe présente quelques autres bassins⁴; l'enduit de *testa* apparaît à peu près vers la même

¹ In *Exploration...*, p. 388.

² In *Peintures...*, pp. 181-182.

³ Cf. le *signinum* comme enduit au chapitre 1.

⁴ In *Corinth...*, pp. 12-13 et *American Journal of Archeology*, n°27, p. 424, 1953.

époque. A Olympie, on trouve des bains qui doivent dater du milieu du V^es. Des cuves de calcaire sont enrobées par un enduit de *testa* . Plus tard, vers-300, les cuves sont bâties en fragments de briques, noyés dans un mortier: la construction était ensuite revêtue d'un enduit solide⁵. R. GINOUVES⁶ cite un cas remarquable d'une cuve de bain:

"Dans une salle de bains de Delphes, on a pu montrer qu'une baignoire avait comporté deux états: c'était, dans le premier, une cuve en terre cuite, du type ancien, c'est-à-dire à fond plat et horizontal sans siège, et probablement sans cuvette antérieure; dans le second, qui a été réutilisé les fragments, d'une part on a rendu le fond oblique au moyen d'une dalle de béton de tuileaux plus haute à l'arrière qu'à l'avant (...): toute cette transformation aboutit à ce résultat que le corps du baigneur était maintenu hors de l'eau."

A Syracuse, R. GINOUVES⁷ signale qu'on y a trouvé sur le plateau de l'Achradine, une vaste piscine (29 m. 75 x 21 m. 8) "*aux parois cimentées, dont on a supposé qu'elle appartenait à un gymnase.*"

R. GINOUVES⁸ fait le point sur l'usage de l'enduit imperméable à Gortys d'Arcadie:

"On rencontre aussi dans l'établissement thermal un enduit hydraulique, partout où la maçonnerie devait être fréquemment en contact avec l'eau: ainsi, pour la bordure et les bancs des cuves de G, pour le fond de la cuve , etc. L'enduit, un béton de tuileaux, contient une assez grande quantité de terre cuite, qui lui donne une couleur rosâtre et en augmente l'imperméabilité. Il n'y a pas de coupure brusque entre ces parties spécialement protégées et le stucage normal, passage insensible de l'une et l'autre technique: leur emploi se faisait donc pratiquement en même temps, alors que les enduits étaient encore humides. L'enduit de l'ancienne piscine Y et celui du réservoir X, spécialement, épais (ils atteignent jusqu'à 3 centimètres) présentent les mêmes caractères que le mortier des parois, avec en plus la poussière de terre cuite."

On le voit, par cette énumération sommaire, que l'usage des enduits de *testa* depuis le V^e siècle s'est accru avec le développement des établissements thermaux et des gymnases. Cela est flagrant à l'époque hellénistique où ces derniers se multiplie de façon spectaculaire.

De même, la salle de bains devient à l'époque hellénistique une pièce normale dans l'architecture de la maison. Ainsi à Olynthe⁹, on trouve une salle de bains au sol de *testa* . Il y a une conduite qui part de cette salle de

⁵ In IV. Bericht..., pp. 33-36, 46, 96.

⁶ In Balaneutikè..., p. 41.

⁷ Op. Cit. p. 134.

⁸ In L'établissement... p. 106.

⁹ In Excavations 8..., p.120.

bains et rejoint dans la cuisine, un bassin circulaire aux parois enduites. Ainsi, depuis plusieurs siècles, l'on assista à la démocratisation des techniques de bains, qui implique un usage impressionnant de l'enduit de *testa*, pour les murs des bassins, des canaux de raccordement, etc.

A Délos, J. CHAMONARD¹⁰ décrit un revêtement extérieur qui se retrouve en plusieurs endroits de l'île: il se compose d'un enduit de chaux et au dessus de celui-ci un enduit de *testa*.

"C'est un véritable mortier hydraulique, confectionné avec une chaux hydraulique très analogue à celle du mortier qui sert d'enduit aux citernes et renfermant, comme elle, beaucoup d'alumine et peu de silice. Son rôle était évidemment le même que celui de cet enduit: il protégeait contre toute infiltration le bas des murs des habitations lors des pluies abondantes, dont les eaux, ne pouvant s'écouler par les égouts, devaient ruisseler sur le sol de ces rues étroites."

Nous retrouverons ce revêtement mural dans la partie de ce chapitre consacrée aux analyses des enduits.

L'argile cuite était un matériau facile à exploiter et à se procurer et permettait seule de répondre à ce développement spectaculaire des bains publics ou privés. La pouzzolane par opposition était plus cher à importer donc à utiliser.

4.2 LES ANALYSES DES ENDUITS

Les enduits de *testa* ont fait l'objet d'analyse autant que les enduits normaux. Ces examens publiés dans des revues scientifiques sont malheureusement incomplets pour pouvoir en tirer des conclusions et sont donc inexploitable: soit il manque des éléments essentiels, soit le vocabulaire est mal utilisé.

4.2.1. Les enduits de Délos

Nous allons citer celui que nous considérons comme étant le meilleur article: "Analyses de quelques mortiers et revêtements provenant des fouilles de Délos"¹¹ qui date de 1910.

L'article commence ainsi:

"Nous devons à l'obligeance de M. Chamonard, secrétaire de l'Ecole Française d'Athènes, quelques échantillons provenant de maçonneries mises à jour dans les

¹⁰ In *Exploration...*, p. 87.

¹¹ MM. Cavalier et Barbeau, *Analyses de quelques mortiers et revêtements provenant des fouilles de Délos*, in *Bulletin de la Société Scientifique et Médicale de l'Ouest*, pp. 173-180, Tome 19, n°2, 1910, Rennes.

fouilles de Délos. On nous les a adressés sous les dénominations que l'on trouvera plus loin. (...) Les différents échantillons examinés, sauf le dernier, datent du II^e siècle de notre ère."

Le système d'analyse est chimique au moyen de l'acide chlorhydrique, et est connue sous le nom "méthode analytique des oxydes". Cette méthode est approximative pour découvrir les composants chimiques d'un corps, mais pour la fin du XIX^e s. et le début du XX^e s., elle était la seule et la meilleure pour l'époque.

En 1993, nous disposons de systèmes d'analyse plus performants, tels que les rayons X, la micro-sonde électronique, etc. Chacun de ses instruments d'investigations ne doit pas être employé seul, parce que chacun a ses limites. Ainsi, il y a des éléments que l'on ne verra pas aux rayons X, mais qui seront visibles à la microsonde électronique et inversement (Voir annexe). C'est l'erreur qu'on commise les auteurs de l'article sur l'opus *signinum*¹² que nous avons indiqué au Chapitre deux. Ils avaient effectué une analyse chimique aux oxydes et au diffractogramme aux rayons X, si bien que ce dernier instrument ne pouvait détecter les éléments kryptocristallins, c'est-à-dire invisibles aux X. Néanmoins, et d'un point de vue épistémologique, l'analyse des oxydes donne une première estimation des composants d'un corps.

Voici un exemple de la composition d'un calcaire pure trouvé à Délos. Sous la dénomination d'échantillon V", il s'agit d'une "concrétion calcaire recouvrant les murs d'une salle, et probablement de formation postérieure à la ruine de la maison."¹³ Voici quelques éléments caractéristiques de l'examen:

| | |
|--|--------|
| CaO (oxyde de calcium) | 53 % |
| Perte au feu (eau, CO ² , sel de mer) | 42,3 % |
| SiO ² (quartz) insoluble | 1,25 % |
| Fe ² O ³ (fer) | 0,3 % |
| Al ² O ³ (alumine) | 0,3 % |
| MgO (Magnésium) | 0,95 % |

L'oxyde de calcium fait 53% du calcaire, mais le calcaire se compose aussi de gaz carbonique (plus de 40%) et de quelques impuretés argileuses (silicate d'alumine autrement dit: fer + alumine + silice insoluble) qui font 1,85%. Ce produit est formé de carbonate de calcium à peu près pure. Le calcaire pur donnerait en effet: CaO = 56%, CO² (perte au feu) = 44%. Après calcination,

¹² I. Ronconzzi Fiorentini..., *Opus Signinum*...

¹³ MM. Cavalier et Barbeau, *Analyses*..., p. 179.

on obtient une chaux grasse qui foisonne par extinction. Il s'agit sans doute d'une concrétion calcaire, produite lentement par des infiltrations d'eau.

Prenons le premier échantillon; il s'agit d'un mortier servant de support aux cubes d'une mosaïque dans la cour d'une maison. Les auteurs indiquent que "c'est une masse assez dure très homogène, à grains fins."¹⁴ L'analyse donne:

| | |
|--------------------------------|---------|
| Sable insoluble | 40,54 % |
| Fe ₂ O ₃ | 4,05 % |
| Al ₂ O ₃ | 17,5 % |
| CaO | 17,95 % |
| MgO | 0,15 % |
| Perte au feu | 20,21 % |

Puisqu'il y a beaucoup de "sable" insoluble et une quantité égale de carbonate de calcium et d'alumine, nous sommes donc en présence d'un mortier hydraulique. S'agit-il d'un mortier de *testa* ou de pouzzolane? Le *sable* insoluble donne la réponse¹⁵ :

"Le *sable*, insoluble dans les acides dilués, est formé de petits grains polyédriques ayant tous des dimensions très voisines (environ 1 millimètre de côté). Il est probable qu'il a été obtenu par concassage et il a été très soigneusement criblé. Ces grains sont de deux espèces: les uns sont blancs, c'est du quartz. Les autres sont rouges, ils s'écrasent facilement; après calcination au rouge, ils deviennent plus durs."

Analysés après pulvérisation, ils ont donné:

| | |
|---|--------|
| SiO ₂ | 75 % |
| Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | 20,1 % |

Ces grains renferment un peu de chaux. Les chimistes définissent la nature de ces grains¹⁶:

"Ces grains rouges sont ainsi constitués par de l'argile peu cuite. Ils se rapprochent des pouzzolanes et ils en jouent le rôle."

Pour résumer, nous avons deux sorte de sable: le quartzique et l'argile peu cuite. D'après le vocabulaire des auteurs "sable" répond à la définition suivante: "tout morceau minéral dont la taille varie entre 1/16^e mm. et 2 mm." Cette définition est celle des minéralogistes du XIX^e s. qui établirent la classification des minéraux. Elle prévaut encore aujourd'hui dans l'enseignement des sciences de la terre. Or, il existe à l'heure actuelle une

¹⁴ *Op. Cit.* p. 173.

¹⁵ *Op. Cit.* p. 174.

¹⁶ *Op. Cit.*, p. 175.

dérive en archéologie et archéométrie qui fait que le "sable" est associé au terme "quartz" et uniquement cela. Ainsi, dans l'esprit collectif "sable" désigne seulement les grains de quartz (du Sahara par exemple) et ceux de la plage du bord de mer.

Ils concluent¹⁷:

"En résumé, l'échantillon I est un mortier d'excellente qualité, particulièrement bien préparé. Le sable employé a été composé avec du quartz et de l'argile peu cuite [*testa*] jouant le rôle de matière pouzzolanique. Ces deux espèces de substances ont été sans doute concassées au préalable et, en tout cas, soigneusement tamisées."

Nous finirons cette analyse par une comparaison entre deux enduits, l'un de chaux aérienne et de *testa*. L'échantillon IV est un revêtement de mur qui est formé en réalité de deux parties accolées et se séparant facilement. La première (IV₁) est blanche et épaisse de quelques millimètres. La seconde (IV₂) est de couleur rouge. La composition est nettement différente, ainsi qu'il résulte des analyses suivantes:

¹⁷ *Id.*

| | IV ₁ | IV ₂ |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| | Enduit blanc | Enduit rouge |
| Sable insoluble | 10,75 % | 53,70 % |
| FO ² O ³ | 0,09 % | 0,40 % |
| Al ₂ O ₃ | 1,70 % | 3,80 % |
| CaO | 46,50 % | 14,85 % |
| MgO | 0,83 % | 0,30 % |
| Perte au feu | 39,40 % | 27,30 % |

L'enduit IV₂ est "un véritable mortier, confectionné avec une chaux hydraulique très voisine de celle du mortier II." ¹⁸.

Le sable qui a servi à le fabriquer est encore formé de grains de quartz, "et de grains rouges en plus grande quantité." ¹⁹ L'enduit blanc est presque uniquement composé de chaux aérienne mélangée à très peu de sable (10 %). Ce sable est fait seulement de grains de quartz. Les auteurs signalent un cas unique à Délos de mortier²⁰ qui sert de liaison entre les assises des murs sur la rue. Il s'agit de chaux aérienne. Dans la conclusion de leur article, ils écrivent²¹:

"Dans tous les mortiers [sauf l'enduit blanc IV₁], le sable est *composé* de deux espèces de grains (quartz et argile peu cuite généralement bien tamisés), l'argile joue le rôle de la matière pouzzolanique, ce qui ferait présumer une faible hydraulicité des chaux employées".

Nous le voyons, cette étude, bien que datant de 1910, est remarquable par la distinction des différents "sables" et elle souligne bien le rôle pouzzolanique de la *testa*. Cette distinction et ce rôle pouzzolanique de la *testa* devrait se retrouver dans toutes les analyses des enduits de brique pilée; mais les analyses plus récentes considèrent le sable de *testa*, non comme un réactif pouzzolanique, mais comme un agrégat, une charge inerte pour le mortier²².

4.2.2. Les enduits de Laurion

¹⁸ *Op. Cit.*, p. 178. Le mortier II s'appelle échantillon II: c'est un enduit de citerne. Le sable est encore formé de grains de quartz et de grains d'argile peu cuite.

| | |
|--------------------------------|---------|
| Sable insoluble | 46,96 % |
| FeO ₂ | 0,33 % |
| Al ₂ O ₃ | 5,98 % |
| CaO | 19,93 % |
| MgO | 0,20 % |
| Perte au feu | 24,55 % |

¹⁹ *Id.*

²⁰ *Op. Cit.* p. 177.

²¹ *Op. Cit.*, p. 180.

²² Cf. I. Ronconzzi Fiorentini..., *Opus Signinum...*

Voici justement une autre analyse publiée à l'origine en 1881, mais reprise par E. ARDAILLON²³, qui décrit des enduits hydrauliques d'une laverie de minerai, qu'on trouve sur le site des mines du Laurion.

E. ARDAILLON²⁴ indique la nature du sable qu'on mêlait dans le mortier:

"La pâte est composée de chaux dans laquelle on a noyé une forte proportion de gravier fin, dont la nature varie suivant les lieux. Dans la vallée Botzaris, par exemple, on se servait du spath fluor, qui forme la gangue principale des galènes dans les gisements voisins de Souréza et d'Agriléza. Ailleurs on employait le schiste micacé, ou le marbre, ou le quartz."

En note il donne l'analyse d'un enduit imperméable du IV^e siècle qui contient ce "quartz". Il contient 26,4 % de chaux, 24,7 % de silice (SiO₂), 6,16 % d'alumine, et 2,75 % d'oxyde de fer. Or, à première vue, cette composition est celle d'un enduit imperméable comme celles données par MM. Cavalier et Barbeau.

Mais dans cette analyse, rien n'indique quel est l'élément pouzzolanique, qui a donné 24,7 % de silice et 6,16 % d'alumine. Il y a donc un autre "sable" autre que celui de quartz. S'agit-il d'une pouzzolane ou de petits grains de tuf zéolitique, ou de *testa*? Il serait logique de supposer qu'il s'agit du dernier élément. En effet, après avoir posé deux couches de cet enduit analysé,

"on appliquait encore une couche très mince de ciment, dont l'épaisseur ne dépasse presque jamais trois millimètres, et se réduit souvent à une simple pellicule. De couleur brun foncé, et taché de points rouges, cet enduit a une dureté remarquable. sur de vastes surfaces, on n'observe pas la moindre inégalité ni la plus petite boursoufflure. De là, la conservation presque parfaite d'un très grand nombre de laveries du Laurion, que l'on retrouve intactes et prêtes encore à servir."²⁵

En fait, les analyses modernes (cf. annexe) indiquent que, dans les laveries du Laurion, les enduits imperméables sont fabriqués avec une zéolithe, une phillipsite, comme celle qu'on trouve à Signia. Elle a été peut-être cuite entre 300 et 400 °C en sorte que la phillipsite, de noir ou grise, devient rouge, comme la *testa*. Ce qui expliquerait que la dernière couche d'enduit rouge serait faite avec cette zéolithe calcinée.

²³ In *Les mines...*, p. 65.

²⁴ *Id.*

²⁵ *Id.*

Si l'on lit l'analyse seule, c'est le sable de quartz qui constituerait l'élément pouzzolanique. Elle est inexploitable pour savoir quelle serait la nature de cette pouzzolane, artificielle ou non. Il aurait fallu analyser en fait le dernier enduit rouge et donc refaire l'analyse unique de Phocion Negris.

Il en est de même pour des analyses publiées²⁶ portant sur des enduits normaux ou imperméables. Nous ne pouvons rien en conclure. En général, toutes ces analyses sont incomplètes car elles reposent le plus souvent sur une seule méthode d'investigation. Il faut recourir à toutes les méthodes possibles (oxydes, rayons X, microsonde électronique, etc...) sur un échantillon pour établir la composition exacte.

Terminons par les analyses que donne A. ORLANDOS²⁷. Elles datent des années 50 et elles ont été effectués par Constantin Zisis, chimiste du Musée National d'Athènes, et par l'American School of Classical d'Athènes. Il reprend l'analyse de Ph. NEGRIS de l'enduit imperméable des laveries du Laurion. Comparons les données que nous connaissons déjà: il réunit en une seule colonne l'oxyde de fer et l'alumine: 8,91 %²⁸ et il fait de même en créant la rubrique "perte au feu" avec "acide carbonique" et "eau": 27,12 %²⁹. Heureusement que nous connaissons le détail de l'analyse de Ph. NEGRIS, sinon comment interpréter les résultats que donne A. ORLANDOS. Il mélange des données ensemble, ce qui ne permet pas de les exploiter! L'exemple que nous donnons est représentatif: comment interpréter les chiffres des autres analyses quand les différents éléments sont rassemblés pêle-mêle? Il est bien évident que cela sera très difficile.

4.3 UN EXEMPLE UNIQUE: THÉRA-SANTORIN

Théra est une petite île volcanique de l'archipel des Cyclades au nord de la Crète. Elle a connue à l'époque minoenne une violente éruption qui l'a détruite en partie. C'est même d'après une théorie récente cette catastrophe

²⁶ M. Bulard, *Peintures...*, p. 180, n. 1. V. Micov, Le tombeau antique près de Kazanlak, p. 33, n. 6, Sofia, 1954. J. Chamonard, *Exploration...*, p. 87. Phocion Negris, *Annales des Mines*, pp. 3-7, Paris, 1881. G. H. Stevens, J. M. Paton, *The Erechtheum*, pp. 225-226, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1927. A. Conze, Nieman, Hauser, *Untersuchungen auf Samotrake*, I, p. 69, n. 2, Vienne, 1875.

²⁷ In *Les matériaux...*, pp. 149-150.

²⁸ Oxyde de fer: 2,75 %, alumine: 6,16 %; A. ORLANDOS ne les indique pas.

²⁹ Acide carbonique: 25,6 %, eau: 1,52 %; A. ORLANDOS ne les indique pas.

qui amena la destruction de la brillante civilisation crétoise minoenne et la naissance du mythe de l'Atlantide.

Outre cela, elle est connue pour un produit volcanique recherché pour les maçonneries: la pouzzolane ou "terre de Santorin". De plus Santorin est citée comme référence dans les manuels archéologiques grecs concernant la pouzzolane. Elle est donc un équivalent grec pour le Vésuve campanien. Les recherches archéologiques allemandes qui se tinrent entre 1895 et 1902, donnent une bonne idée de l'emploi des mortiers sur une île qui fournit de la terre volcanique en quantité.

P. WILSKI³⁰ étudia l'emploi et la composition des mortiers de Santorin. Il en énumère 3 sortes: le mortier de sable marin, celui de *testa*, et celui de pierre ponce. Dans chaque cas, la pouzzolane (qualifiée par les allemands de "terre de Santorin", *Santorinerde*) est ajoutée en petite quantité. Voici leur composition:

1) mortier de sable marin:

- 47 % de sable de mer
- 43 % de carbonate de calcium
- 10 % de terre de Santorin

2) mortier de *testa*:

- 40 % de *testa*
- 51 % de carbonate de calcium
- 9 % de terre de Santorin

3) mortier de pierre ponce:

- 39 % de pierre ponce
- 48 % de carbonate de calcium
- 13 % de terre de Santorin

L'enduit de sable sert dans les revêtements à l'intérieur des citernes et comme enduit. Il n'y a pas assez de pouzzolane pour la faire une excellente prise hydraulique avec la chaux. Il s'agit en fait d'un mortier de chaux aérienne. Cet enduit se retrouve depuis les époques anciennes jusqu'à la période romaine, mais on ne le retrouve plus à l'époque byzantine. Il est bien travaillé et résiste au temps. P. WILSKI remarque qu'on ne l'emploie jamais comme liant entre les pierres. Par contre, il insiste sur la qualité de cet enduit: il scintille comme un miroir et il est tellement solide qu'il est à peine possible d'en arracher un petit morceau avec les mains nues. On

³⁰ In *Thera...*, pp. 115-118.

retrouve donc les descriptions de Vitruve (7, 3, 5-10) concernant les enduits brillants et leur solidité

L'emploi de *testa* est toujours attestée à l'époque romaine et ne se retrouve à aucune autre période ni avant, ni après. Elle est employée comme enduit imperméable et comme pavement dans le bain de la Stoa et sur la terrasse Karneios. Les citernes romaines l'utilisent systématiquement. D'après P. WILSKI, la *testa* était importée et de fait revenait chère à l'emploi. De fait, l'utilisation de la *testa* comme enduit et comme pavement est réduite au strict minimum mais dure autant que le mortier de sable marin. P. WILSKI donne l'exemple d'une citerne où les enduits sont au nombre de deux. La première couche est un mortier de sable marin de 12 cm., et la seconde d'enduit de *testa* de 2 cm.

En visitant le village de Skaros, P. WILSKI préleva ce qu'il prit pour d'autres mortiers de *testa*, mais les analyses montrèrent qu'il s'agissait de tuf rouge de Skaros. Mais en fait il résiste peu à l'air libre, bien que sa conservation sous terre soit bonne. Il était utilisé comme liant entre les pierres, comme on le voit dans l'Heroon d'Evangelismos et dans l'Echindra qui se trouve dans les bains romains à mi-chemin de la terrasse du Karneios. On ne le trouve pas comme enduit parce que le tuf est trop poreux et qu'il ne lui permet pas de durcir.

Tels sont les vestiges archéologiques que découvrit P. WILSKI. Il s'est intéressé aussi aux recettes des habitants de Santorin. Concernant les murs des citernes, ils emploient 80 % de pouzzolane et 20 % de chaux. Pour les enduits imperméables, ils mêlent ensemble 45 % de chaux, 33 % de pouzzolane et 22 % de sable marin tamisé. Ces recettes furent peut-être testées par les Romains quand ils colonisèrent l'île, si l'on suppose une certaine continuité dans les techniques de maçonnerie depuis l'Antiquité. Une question vient naturellement à l'esprit: pourquoi n'ont-ils point utilisé pour les enduits imperméables la pouzzolane locale qu'on trouve à foison sur l'île au lieu d'importer de la *testa* à prix d'or? La réponse est peut-être la suivante: ils savaient par expérience que la *testa* est meilleure à l'usage que la pouzzolane naturelle, ajoutons à cela qu'ils se servaient d'un produit qu'ils avaient utilisé des centaines de fois dans le passé et qu'ils connaissaient bien, bref il n'avaient confiance qu'en lui. Théra est donc un lieu où les deux techniques, *testa* et pouzzolane, cohabitent pour les mêmes emplois: la première symbolise le savoir-faire des Romains, la seconde incarne la continuité des techniques grecques.

En conclusion de ce chapitre, nous avons vu que l'emploi de la chaux s'il est très rare en tant que liant entre les pierres, se trouve quand même à Délos ou à Santorin. Par contre, les enduits de chaux ou de *testa* sont courants en Grèce. Par contre, les mortiers de pouzzolane sont plus rares car limités à leurs lieux d'extraction à Corinthe ou à Santorin. Mais parfois il est difficile de les distinguer d'avec ceux de *testa*. En effet, on peut les trouver sur le site du Laurion ou à Santorin: il s'agit soit de pouzzolane rouge soit de petit grains de tuf cuit ayant l'aspect de *testa* . En tout cas, les prescriptions de Vitruve concernant les enduits sont confirmées par l'archéologie, à propos des brillants enduits de chaux et les revêtements imperméables. Ces techniques que décrit Vitruve sont grecques avant d'être romaines. Les revêtements de *testa* sont battus, comme les autres enduits, pour en faire sortir l'eau. Ce sont donc des *opera signina* avant la lettre.

5 LES PAVEMENTS DE TESTA

Le chapitre précédent parlait des enduits imperméables. Les Grecs les employaient abondamment et c'est pourquoi Vitruve les décrit précisément en bon disciple de la grande architecture grecque qu'il se prétend être. De même, il dépeint les pavements qu'ils soient imperméables ou non. Vitruve y dédie tout le premier chapitre et une partie du chapitre 1 et le reste du chapitre 4 du livre 7.

Vitruve expose les différents types de sols maçonnés. Après avoir égalisé le sol naturel avec un rouleau ou avec un plancher, les ouvriers mettent une couche de gros cailloux faisant radier de fondation dite *statumen*. J. B. RONDELET¹ rapporte, dans certains édifices à Rome, Pompéi, et à la Villa Hadriana, la présence d'un mortier mêlé aux pierres. Les maçons étendent une couche de chaux, de sable, de graviers ou de cailloux appelé *rudus* ou *ruderatio* qui peut servir de sol par elle-même. Enfin, vient la dernière couche faite de *testa*, le *nucleus*, dont la composition rappelle le *signinum* et rien n'empêche de la battre pour la rendre meilleure. En effet Vitruve (7, 1, 3) conseille de battre les sols jusqu'à ce que la couche de blocage soit réduite au trois quarts de son épaisseur.

Pour les sols imperméables, la fabrication sera légèrement différente. Après avoir fait un double plancher, les ouvriers font le *statumen*, qui est composé de 1 part de *testa*, 2 parts de pierrailles et de 2 parts de chaux. Une fois le *rudus* maçonné, on pose des briques, dont les joints forment un canal. Dans celui-ci, on verse un mastic d'huile et de chaux. Puis on étendra le *nucleus*, "que l'on massivera en le frappant avec des bâtons flexibles."² Telle est la théorie que propose Vitruve. Voyons ce que l'archéologie trouve dans la pratique.

5.1 LES GYMNASES ET LES THERMES

¹ In *Traité...*, t. 2, p. 250.

² *Op. Cit.*, t. 2, p. 248; Vitruve 7, 1, 7: *Cum ergo fuerit hoc ita perstratum, supra nucleus inducatur et virgis caedendo subigatur.*

Vers la fin du V^e siècle, les gymnases abandonnent les bains extérieurs pour se doter de lieux d'ablutions couverts. On ne se lave plus en plein air après l'effort, mais dans une pièce bien isolée. R. GINOUVES³ ajoute:

"Le gymnase de Delphes présente encore, vers le dernier tiers du IV^e siècle, un dernier exemple peut-être d'installation avec les cuves en plein air; ailleurs, les salles de bains donnent directement sur le portique, comme à Pergame et à Priène, mais avec des portes qu'on pouvait fermer."

Le sol des bains peut être recouvert de diverses manières: une mosaïque de petits cailloux à Erétrie ou des plaques de calcaire comme à Pergame. Mais on peut trouver plus austère:

"A Némée, on s'est contenté de stuquer le sol avec un béton hydraulique."⁴

A Gortys d'Arcadie, on trouve deux types de pavements: les sols en mosaïque de galets (salles A, B, H, I) et ceux en fragments de *testa* (salles C, D, F, G). R. GINOUVES⁵ signale:

"Pour les salles C, D, F, G, on a utilisé des enduits de tuileaux de forme irrégulière, triangulaire ou trapézoïdale, enfoncés côte à côte dans un mortier rose, fait de chaux, de sable, et d'une forte proportion de poudre de briques. Les dimensions de ces éléments sont variables: les plus gros se trouvent en D et surtout en F, avec des longueurs atteignant 0 m. 055. Ceux de C et G ne dépassent guère 0 m. 04 dans leur plus grande dimension. Le fond des cuves de G est pavé selon la même technique, avec des éléments qui n'ont guère plus de 0 m. 02 de côté."

Le principe qui a présidé à la répartition des deux types de pavements se dégage:

"la mosaïque de tuileaux, plus imperméable, était utilisée dans tous les cas où l'eau ruisselait avec abondance sur le sol; on réservait la mosaïque de galets pour les salles où ce ruissellement était limité à un caniveau courant le long d'une paroi."⁶

Le fond du réservoir X est fait d'une mosaïque de fragments de terre cuite, se présentant comme de petits bâtonnets rectangulaires, longs de 5 à 9 cm., larges de 1 à 2 cm.

"Il s'agit encore de tuileaux, mais enfoncés par la tranche dans le mortier, qui comporte une très forte proportion de terre cuite: la surface avait été reprise avec une mince couche de mortier rose, qui en atténuait les inégalités. L'épaisseur totale, avec

³ In *Banaleutikè*..., p. 129.

⁴ *Id.*

⁵ In *L'établissement*..., p. 107.

⁶ *Id.*

sous les tuileaux (0 m. 045) une couche de mortier blanc (0 m. 02) puis la couche de gros galets, atteignait environ 0 m. 15-0 m. 17."⁷

Cette description d'un pavement de réservoir correspond à peu près à la description des sols imperméables par Vitruve.

Dans les gymnases, on pouvait avoir des piscines pour le bain en immersion. On trouve à Delphes un des meilleurs exemples de ce genre d'installation. En avant des cuves et à ciel ouvert, on avait bâti une piscine ronde, d'un diamètre de plus de dix mètres au niveau du sol, avec cinq gradins peu débordants, escaliers et sièges à la fois, sur une hauteur de 1m90 au total. La construction est entièrement stuquée et "cimentée". L'alimentation en eau se faisait depuis des vasques et l'évacuation par un trou de vidange vers un ravin. On peut supposer que la piscine permettait, outre un bain complet, quelques mouvements de brasse. R. GINOUVES⁸ ajoute:

"La présence de la piscine n'est pas obligatoire dans les gymnases. Sauf dans des cas privilégiés, comme celui de Delphes, l'alimentation en eau d'un bassin tant soit peu important posait des problèmes difficiles."

En tout cas, avec le développement des bains à l'époque hellénistique, on peut croire que les Grecs avaient résolu les problèmes de la maîtrise de l'eau.

La démocratisation des bains est illustrée de manière frappante à Olynthe, non plus au niveau des bains publics, mais à celui de la salle de bains. En effet, elle était surajoutée à une maison déjà existante. R. GINOUVES⁹ l'explique:

"Car ces installations d'Olynthe présentaient cette particularité majeure de n'être pas surajoutées aux maisons (Athènes, Délos), mais de faire partie de leur plan initial, d'avoir été prévues parmi les arrangements indispensables, au même titre que la cour ou le vestibule: la différence est d'importance, car elle fait passer de la maison aux salles à peu près indifférenciées, également commodes et incommodes, à la maison "machine à habiter" [Le Corbusier "L'esprit nouveau", 1920], dont tous les éléments sont prévus à l'origine en vue d'une fonction précise dans la vie journalière."

Les salles de bains sont de petites pièces rectangulaires (1,5 m.-1,8 m. X 2,25 m.-2,5 m.) pavés avec de la terre cuite, battue, ou de la mosaïque. On trouve aussi des sols de *testa*: D. M. ROBINSON et J. W. GRAHAM¹⁰ ont

⁷ *Id.*

⁸ *In Balaneutikè...*, p. 134.

⁹ *Op. Cit.*, p. 176.

¹⁰ *In Excavation 8...*, p. 204.

établi un tableau récapitulatif d'enregistrements des diverses salles de bains olynthienne lors des campagnes de fouilles en 1928, 1931, 1934. Ils indiquent quelques éléments comme la dimension de la pièce, la position de la baignoire, le type de revêtement du sol et des murs et la position dans la maison. Sur les 23 salles de bains indiquées, 10 ont un sol de "ciment"¹¹ et sur ces 10 salles, seulement 5 sont enduites d'un enduit imperméable. En tout cas, cela prouve que les "bétons" et enduits hydrauliques sont répandus à Olynthe.

L'alimentation se faisait soit à partir d'une citerne, soit en utilisant l'eau de pluie venant du toit; l'évacuation des eaux usées étaient faites de la baignoire vers le mur. Mais comme l'indique R. GINOUVES¹² on trouve aussi des cuisines à côtés des salles de bains,

"d'abord parce que les deux pièces utilisent également l'eau (principe du "bloc d'eau" moderne qu'on trouvera pratiqué habituellement dans les maisons romaines), mais aussi et surtout pour que la salle de bains puisse bénéficier indirectement de la chaleur du feu allumé dans la cuisine, et directement de l'eau chaude qu'il était facile d'y préparer."

A Délos, on trouve des sols de tuileaux faits d'un solide mortier. J. CHAMONARD¹³ rapporte:

"Cette mosaïque économique, et qui se prêtait mal à l'effet décoratif, ne paraît pas avoir été d'un usage très répandu en dehors de petites salles des communs, comme les latrines (III E, N, - VI H, J) et les cuisines (IV A c -, maison de l'*Inopos e*). On la rencontre pourtant dans deux cours (II D, -VI F) et dans une salle, dont la décoration exclut l'identification avec une salle de service (II E l). Elle peut être, comme dans ce dernier cas, recouverte d'un sorte d'enduit, probablement hydraulique, mélangé sans doute d'argile cuite, qui lui donne un ton rougeâtre."

M. BULARD¹⁴ indique:

"L'*opus signinum* sous sa forme la plus ancienne, c'est-à-dire se présentant comme un ciment où entrent dans des proportions définies la brique pilée et la chaux mélangées, de manière à constituer un pavement d'une extrême dureté, ne se trouve pas à Délos. Toutefois peut-être faut-il en rapprocher l'enduit moins consistant, mais de composition analogue, qui recouvre le sol d'une petite salle dans une maison du quartier du Théâtre [Quartier du Théâtre, Insula II, maison E, salle l.]. L'*opus signinum* prend le plus souvent, à Pompéi et ailleurs, un aspect un peu différent. Afin de le rendre à la fois plus élégant et plus résistant, on y insère, au moment où le ciment est encore frais, des fragments de matière dure qui font corps avec lui, et que l'on dispose en sorte que la surface du pavement demeure parfaitement unie. Ce procédé se

¹¹ *Id.*: A4, e; A6, b; Av5, c; A vi 7, o; A vi 9, a'; A vii 4, c; A vii 6, m; B vi 2, c; E. S. H. 4, d; E. S. H. 6, a.

¹² In *Balaneutikè*..., p. 176.

¹³ In *Exploration*..., pp. 394-395.

¹⁴ In *Peintures*..., pp. 185-186.

retrouve fréquemment à Délos, où il produit des effets différents suivant la matière employée."

Sous cette forme, les sols de *testa* peuvent servir de base et de liant aux mosaïques décoratives. J. CHAMONARD¹⁵ signale, dans l'habitation C du Quartier de l'Inopos, l'emploi non pas de tessons mais "des anses d'amphores découpées en rondelles, dont la juxtaposition forme une mosaïque d'un type plus régulier et original."

Nous terminerons cet examen archéologique par un exemple de citerne. Celle-ci, à Délos, est faite souvent d'un revêtement de maçonnerie:

"L'appareil [de maçonnerie], plus soigné que celui des habitations, est cimenté dans les joints: il est, par surcroît, recouvert d'un enduit de ciment hydraulique soigneusement lissé, qui garnit non seulement le radier et les paroi, ainsi que toutes les aspérités du rocher, (II C, maison l'Inopos) si la citerne est creusée dans le roc, mais encore, dans les citernes à arcs appareillés, les voussoirs."¹⁶

La citerne (Figure 15) est faite d'arcs et recouverte d'enduit de *testa*. Mais celui-ci n'a pas été représenté sur la figure afin de laisser l'appareil de la construction visible. Mais il garni les voussoirs, les murs et le sol de la citerne. Sur des traverses horizontales, maçonnées sur l'extrados des arcs, étaient posés d'un arc à l'autre de larges dalles de gneiss, dont l'épaisseur atteint 10 à 12 cm¹⁷.

"Une couche de béton (mortier rouge et tuileaux) les recouvre, servant lui-même de support à un pavement de mosaïque, dont la beauté varie selon la richesse de l'habitation."

L'épaisseur totale de la couverture de la citerne, dallage, mortier, mortier et mosaïque est d'environ 30 cm. La figure est faite d'après la citerne de la maison du Trident.

5.2 LES PAVÉS À LA GRECQUE.

Nous terminerons ce chapitre par les pavements à la grecque. Vitruve et plus tard Pline, donnent un exemple d'utilisation double de mortier de

¹⁵ In *Exploration...*, p. 394.

¹⁶ In *Exploration...*, p. 331.

¹⁷ In *Exploration...*, p. 338.

testae et de chaux aérienne. Le pavement à la grecque est décrit au chapitre 4 du livre 7. La traduction est de J. B. RONDELET¹⁸:

"Pour l'établir, on commence par creuser le sol de la salle d'environ 2 pieds de profondeur, et après pilonné le terrain, on le recouvre d'une couche de blocage [rudus] ou d'un pavé de briques [*testaceum pavementum*] [on étend une couche de mortier de *testa*], en observant (au milieu) un bombement qui forme autour une espèce de canal. Ce massif est recouvert ensuite d'un lit de charbon qu'on foule avec les pieds et sur lequel on étend, sur une épaisseur d'un demi-pied, un mortier de chaux et de sable mêlé de cendre, en formant une surface droite et bien nivelée; on finit ensuite avec la pierre à user le dessus de ce pavé, qui présente une teinte noirâtre. Cette aire préparée a l'avantage d'emboire à l'instant même tout ce qui peut se répandre des coupes et des vases pendant le festin, et si les serviteurs qui se tiennent dans la salle n'ont pas de chaussures, ils n'éprouveront pas aucun froid sur pavé de cette espèce."

J. B. RONDELET¹⁹ commente:

"Des pavés ou aires établis de cette manière pourraient être employés avec avantage pour des salles à manger, des appartemens de bains, ou des laboratoires de chimie."

Le mortier de *testae* constitue donc la base étanche pour ce pavement. Il a alors en son centre un caniveau pour évacuer les liquides vers une ouverture d'égout. La couche supérieure est un mortier de chaux aérienne auquel on ajoute de la cendre pour accélérer la carbonatation, tandis que celui de *testae* n'a pas besoin du CO² de l'air pour durcir. J. B. RONDELET²⁰ ajoute dans son commentaire des détails techniques dont ne parle point Vitruve:

"Les nombreux ouvrages d'architecture publiés à Venise par divers commentateurs de Vitruve, et plus encore la nature des localités, auront pu contribuer, sans doute, à introduire et à propager l'usage des aires et de pavés à la manière des anciens, devenu presque général dans cette ville. Les renseignements que nous avons recueillis, dans le pays même, sur la confection de ces ouvrages, forment à notre avis, le meilleur commentaire du texte de cet auteur, et servent à faire connaître certains détails purement pratiques, que l'exécution seule pouvait révéler.

Ces aires sont formées d'une couche de ciment d'environ 4 pouces d'épaisseur (10 à 11 cm), composée d'un mélange de tuileaux et de briques bien cuites, grossièrement écrasés et broyés avec de bonne chaux. On met ordinairement une partie de chaux éteinte sur trois parties et demie de tuileaux et briques mélangées. Il faut que cette couche soit mise, en une seule fois, dans toute l'étendue qu'elle doit avoir; on l'étend avec des pointes de fer. Ceux qui veulent faire un ouvrage plus solide, n'emploient que du tuileau: d'autres, par économie, forment cette couche d'un tiers d'éclats de pierre, un tiers de gravats et un tiers de chaux éteinte broyés ensemble; mais ce procédé ne

¹⁸ In *Traité théorique...*, t. 2, pp. 252-253. Vitruve 7, 4, 5: *Foditur enim intra libramentum triclini altitudo circiter pedum binum, et solo festucato inducitur aut rudus aut testaceum pavementum ita fastigatum, ut in canali habeat nares. Deinde congestis et spisse calcatis carbonibus inducitur et sabulone et calce et favilla mixta materies crassitudine semipedali. Ad regulam et libellam summo libramento cote despumato redditur species nigri pavimenti. Ita conviviis eorum et, quod poculis et pyismatis effundetur, simul cadit siccescitque, quique versantur ibi ministrantes, etsi nudis pedibus fuerint, non recipiunt fraces ab eius modi genere pavimenti.*

¹⁹ *Op. Cit.*, t. 2, p. 253.

²⁰ *Op. Cit.*, t. 2, pp. 253-254.

produit pas un ouvrage solide. La première couche étant bien étendue et dressée de niveau, on la laisse reposer pendant un jour ou deux, selon la saison. Au bout de ce temps on la bat avec une batte de fer coudée. [...] La partie qui frappe est méplate, un peu arrondie en forme de langue. On commence à battre le long d'un des murs, et on continue en se reculant parallèlement jusqu'au mur opposé. On met un jour de distance entre cette battue et la suivante, que l'on commence d'un des murs en retour, afin de croiser les coups de la première. On continue cette opération par intervalles jusqu'à ce qu'on sente, par la réaction de la batte, que la couche a acquis la consistance et la fermeté convenables, ce qui se reconnaît lorsque les coups ne laissent presque plus de trace.

Après l'avoir laissée ressuyer pendant un jour, on étend une seconde couche d'environ 4 centimètres, composée de tuileau pulvérisé, broyé avec un quantité à peu près égale de chaux éteinte. On se sert, pour étendre cette couche, de truelles longues et étroites, dont le manche est fort haut. Sur cette couche, encore fraîche, on sème de petits morceaux de marbre de différentes couleurs qu'on fait entrer dans la couche en roulant dessus un cylindre d'environ 80 cm sur 30. Pour faire cette opération, les ouvriers marchent sur des planches ou des nattes. On bat ensuite cette seconde couche, comme la première, avec le même instrument, mais avec moins de force et plus de précautions, jusqu'à ce que les petits morceaux de marbre soient tout à fait enfoncés et recouverts par la partie fine qui monte à la surface: cette opération se fait par intervalles, c'est-à-dire, de deux jours l'un.

Ce n'est ordinairement qu'au bout de dix à douze jours qu'on commence à travailler la surface, c'est-à-dire, à la dégrossir avec un grès emmanché dans un morceau de bois à long manche, où il est retenu par des coins, afin de pouvoir le changer lorsque la superficie commence à se dresser, pour en substituer d'autres dont le grain soit plus fin, et enfin de la pierre ponce. Cette opération exige de laver de temps en temps pour ôter la boue, afin de juger si le marbre est assez découvert, en sorte qu'elle dégrade un peu les joints; c'est pourquoi on fait avec des terres colorées et de la chaux une pâte ou ciment fin qui tient de la teinte générale qui résulte du mélange des marbres. On se sert, pour l'appliquer, d'une pierre tendre qui sert de molette. On donne le lustre à ce ciment avec une espèce de truelle polie, un peu arrondie en dessous. On termine enfin ce pavé par une ou deux couches d'huile de lin très chaude, qui, en le pénétrant jusqu'à une certaine profondeur, lui donne une consistance qui facilite le poli et le rend très brillant."

Les commentaires de J. B. RONDELET donnent des indications précieuses que le traité de Vitruve, généraliste, n'indique pas. Ce sont donc des "trucs de métier" qui datent de la fin du XVIII^e siècle et qui peuvent être proches de la technique antique. Aussi peut-on supposer qu'ils sont valables aussi bien chez les Romains que chez les Grecs. Nous avons vu que les sols de *testa* de même que les enduits de *testa* sont courants en Grèce, dans tous les lieux qui doivent ou stocker ou employer de l'eau ou être en contact avec elle, dès le V^e siècle. Les sols employant un *nucleus* de *testa* sont faits selon ce que dit Vitruve, à savoir un radier de fondation, un *rudus*, et un *nucleus* qui recevait soit une mosaïque, soit qui était elle-même la couche imperméable d'un lieu en contact avec l'eau. Ce modèle théorique est plus ou moins suivi et quelquefois simplifié. Si Vitruve conseille de battre le sol pour le rendre meilleur, il est vraisemblable que les Grecs le faisait aussi. Ces

techniques sont employées par les Grecs, qui ne les ont pas inventées. Elles sont originaires d'Orient. C'est pourquoi dans le chapitre suivant, nous allons examiner le cas de Chypre, qui est une île en contact avec l'Orient et avec la Grèce.

6. L'INFLUENCE ORIENTALE.

Le mortier comme matière de liaison fut employé en Grèce à la fin du II^e siècle ou la fin du I^{er} siècle avant J. C. aux maisons de Délos¹ et de Théra². Par contre toutes les constructions helléniques et hellénistiques de Délos³ et de Théra⁴ emploient de l'argile sans chaux pour lier les pierres communes des murs. Seules les constructions en contact avec l'eau utilisent un mortier de liaison de chaux de *testa* ou de pouzzolane⁵. A part un usage exceptionnel dans les laveries du Laurion⁶, il est utilisé dans les îles comme Délos, Théra, Chypre...

6.1 LE GYPSE

Il faudra attendre l'époque hellénistique pour voir s'étendre le liant entre les pierres en Grèce. La plus ancienne référence du mortier de liaison apparaît chez Théophraste dans son *De lapidibus* (64-67). Il parle de l'usage du gypse, qui se confond presque avec la chaux. En effet les deux pierres (calcaire et gypse) sont de même couleur blanche, se calcinent de la même manière, et s'emploient identiquement. Le gypse est versé sur les pierres ou tout autre matière qu'on désire lier ensemble⁷. Théophraste attribue cette technique particulièrement à Chypre et la Phénicie. R. A. TOMLINSON⁸

¹ In *Dictionnaire...*, p. 336, n. 8.

² In *Thera...*, pp. 116-118.

³ In *BCH*, n°29, p. 15, Paris, 1905.

⁴ In *Thera...*, p. 116.

⁵ Cf. chapitre 3.

⁶ In *Laveries...*, p. 65.

⁷ Théophraste, *De lapi.* 65:

μ μ

⁸ In *Emplecton...*, p. 138.

ajoute que Théophraste considère cette usage (mortier de liaison) comme sortant de l'ordinaire et donc non pratiqué en Grèce. Cela, ajoute R. A. TOMLINSON⁹ serait suffisant pour expliquer l'apparente réticence à adopter un telle technique: c'était quelque chose qui n'appartenait pas à leur propre tradition, comme la voûte-tonnelle macédonienne.

Les Grecs rencontrèrent de manière spectaculaire cette technique du gypse, comme mortier de liaison. Arrien (Anab. 24, 4) raconte la difficulté qu'eut Alexandre à faire le siège de la ville de Tyr. En effet, les murailles de la ville sont décrites ainsi:

"Les murailles qui se trouvaient en face de la jetée faisaient 150 pieds en hauteur comme en largeur, vigoureusement bâties en blocs de pierre liés avec du mortier."¹⁰

Lorsque les machines de guerre d'Alexandre entrèrent en action, les murailles résistèrent efficacement. En comparaison, celles de d'Halikarnasse tombèrent facilement, bien qu'elles représentassent le *nec plus ultra* en matière de technique de fortifications. Les machines testèrent tous les côtés de la forteresse, puis attaquèrent le côté sud qui regarde vers l'Egypte, c'est-à-dire depuis le large, car semble-t-il, ce côté n'était pas bâti avec du gypse.

Il est naturel de supposer qu'une fois Tyr prise, les ingénieurs militaires d'Alexandre étudièrent soigneusement les murailles qui leur avaient résisté de manière exceptionnelle. La description d'Arrien peut être comme une preuve de l'intérêt qu'ils prirent à les examiner. R. A. TOMLINSON¹¹ constate:

"Il n'est donc pas étonnant que, quelques années après, les murailles grecs de Doura-Europos était (probablement) construite avec la technique tyrienne qui consiste en de grands blocs liés avec du gypse."

Les carrières de gypse sont nombreuses dans l'Antiquité: les plus renommées se trouvaient à Chypre, où les gisements sont à fleur de terre, en Phénicie, en Syrie, à Thourioi en Sicile, en Perrhébie (Thessalie du Nord) et à Tymphée en Etolie. La préparation du gypse est tout à fait comparable à celle de la chaux: on calcine les pierres à plâtre dans des fours. Après cuisson et refroidissement, elles sont réduites en petits morceaux et ensuite en

⁹Id.: "This, I think, would be sufficient to explain the apparent reluctance of the Greeks to adopt this technique: it was something outside of their own tradition, like the Macedonian barrel vault."

¹⁰ Arrien *Anab.* 21, 4:

μ μ μ μ μ μ .

¹¹ In *Emplecton...*, p. 138: "It is not in the least suprising that a few years later afterwards the Greek fortifications of Doura-Europos were built in (presumably the Tyrian technique, large stones cemented together with gypsum".

poussière. A cause de son avidité pour l'eau et de la rapidité avec laquelle le plâtre se prend en masse compacte, les maçons ne le mouillaient qu'au moment de s'en servir. C'est pourquoi la chaux et le plâtre pouvaient s'appeler par le même nom:

Le gypse naturel cristallin fut extrait en grandes dalles et utilisé depuis l'époque minoenne pour des sols, des seuil des montants de portes, des piliers, etc... A partir des temps historiques et notamment à l'époque hellénistique, le plâtre fut largement employé comme enduit, comme mortier de liaison, et même pour des moulures et des corniches de la décoration intérieure. A. ORLANDOS¹² indique:

"Vitruve (3, 3, 3) sous-entend sans doute les corniches et les moulures extérieures lorsqu'il conseille de ne pas employer le plâtre pour les corniches (*coronae*) et les moulures (*sigilla aedificiorum*); leur exécution en plâtre est contre-indiquée à cause de son avidité pour l'eau qui fait qu'il se désagrège (s'effrite) lorsqu'il est exposé à la pluie et à l'humidité."

Faisons pour terminer une mise au point importante. Le plâtre de Chypre n'est aucunement comparable au plâtre dit de Paris. Le premier donne un mortier très dur et résistant, alors que le second est très tendre et s'effrite au contact de l'eau.

6.2. LE MORTIER DE CHAUX À CHYPRE

La chaux, comme le gypse, est employée à Chypre comme mortier de liaison. R. GINOUVES¹³ décrit les restes d'un bâtiment appelé "édifice classique" trouvé à Soloi, en Chypre. Il y a

"la base d'un mur, faite de deux cours de dalles à plat, soigneusement taillées dans un calcaire fin, et liées par un mortier blanc très gras, presque de la chaux pure."

R. GINOUVES¹⁴ conclue sur cet "édifice classique":

"Ainsi, on le voit, les *terminus post et ante quem* donnés par la stratigraphie ne permettent pour le moment, en ce qui concerne la datation de l'édifice classique, qu'une approximation sommaire, entre la fin du VI^e siècle et l'époque hellénistique; la couche d'occupation invite à penser au V^e siècle, et c'est la date que suggère aussi la très belle technique de construction, d'esprit hellénique malgré l'emploi, proprement chypriote, du mortier de chaux grasse comme moyen de liaison entre des pierres de tailles, dans un appareil qui semble avoir été isidome; peut-être faudrait-il penser, plus précisément à la seconde moitié de ce V^e siècle, - et donc la présence

¹² In *Matériaux...*, p. 148.

¹³ In *Soloi...*, pp. 29-31.

¹⁴ *Op. Cit.* pp. 31-32.

après les destructions des Perses, lorsque le site voisin de Vouni reçoit lui aussi des influences helléniques bien caractérisées."

Ainsi, la chaux comme mortier de liaison est attestée à l'époque classique à Chypre, alors qu'on l'utilise sur le continent, comme enduit. Soloi a connu aussi des installations hellénistiques, c'est pourquoi il est normal qu'on y trouve un sol de *testa*.. Il s'agit

"du fond d'un bassin B 1, fermé par des parois elles aussi revêtues d'un mortier hydraulique et reliées au fond par un petit bourrelet convexe, destiné à la fois à prévenir les infiltrations et à faciliter le nettoyage."¹⁵

De même l'occupation romaine imprima sa marque par la présence d'équipements imperméables au nymphée. Ainsi, on retrouve au fond d'un bassin enduit et pavé de *testa*, ce "bourrelet convexe" qui permet un nettoyage des installations. Ce bourrelet prouve la continuité des techniques à Soloi¹⁶. Aux faces intérieures est et sud du bassin central, l'étanchéité était assurée par un petit mur de briques liées par un mortier de *testa*, ce mur est épais de 12 cm¹⁷. Signalons que la zone de puisage subit de nombreux dommages à cause de l'usage journalier et du passage constant de l'eau:

"les dalles du fond furent remplacées par endroits par une couche de fragments de terre cuite noyés dans du mortier ou par des éléments de pierre de dimension assez réduite."¹⁸

On le voit, Chypre a subit toutes les influences: orientales, grecques, romaines. En effet, outre les gisements de plâtre, Chypre était réputé pour ses mines de cuivre et ses objets de bronze. Chypre et ses environs étaient un bon passage pour le commerce (donc pour toutes les inventions techniques importantes) entre les pays d'Orient et la Grèce. Ces pays d'Orient sont la Mésopotamie, la Perse, l'Egypte.

Nous savons que les techniques de maçonneries de *testa* viennent de la région phénicienne et israélienne, c'est ce que rappelle V. FURLAN et P. BISSEGER dans leur article "*Les mortiers anciens, histoire et essais d'analyse scientifique*". Après avoir dit quel usage les Grecs firent des mortiers de chaux, de pouzzolane et de *testa*, ils précisent l'origine de cette dernière technique:

¹⁵ Op. Cit. p. 33.

¹⁶ Op. Cit. p. 84.

¹⁷ Op. Cit. p. 86.

¹⁸ Op. Cit. p. 87.

"Ailleurs, à défaut de roche volcanique, on utilisait de la tuile ou brique pilée, ainsi qu'en témoigne la coloration rose de certains enduits extérieurs. Le premier emploi connu de tuileau remonte à l'époque de la construction des citernes de Jérusalem (sous Salomon, au X^e siècle av. J. -C.). Cet usage semble avoir été introduit par des ouvriers phéniciens qui connaissaient donc empiriquement les propriétés des matériaux qu'on appelle aujourd'hui pouzzolanes artificielles."¹⁹

Mais, à notre connaissance aucun enduit de *testa* datant de l'époque classique ou antérieure n'a été découvert à Chypre.

¹⁹ In *Les mortiers anciens...*, p. 167.

7 CONCLUSION

V. FURLAN et P. BISSEGER¹ rappelle les qualités qui font les mortiers romains:

"En effet, les Romains ont pratiqué à grande échelle l'adjonction à la chaux d'argile cuite et surtout de pouzzolane (roche volcanique provenant des gisements découverts à Pozzuoli près de Naples) qui confère au mortier des propriétés hydrauliques. Mais outre ces caractéristiques de composition, le mortier romain doit aussi son exceptionnelle qualité au soin avec lequel on choisissait et mélangeait ses éléments constitutifs. Ce mortier était utilisé massivement pour noyer un blocage de galets de toutes dimensions au coeur des murs, formant ainsi un béton compact entre les parements appareillés. Toute cette masse était tassée avec des pilons, de manière à remplir absolument tous les interstices, à chasser la moindre bulle d'air. Par la suite, l'exceptionnelle qualité des mortiers romains a fait naître une sorte de légende. On a prétendu, en effet, que cette qualité était liée à des secrets de fabrication et notamment à des adjonctions très spéciales.

Il est possible que, pour des usages particuliers (sertissage de mosaïques, enduits soumis à l'action de l'eau, etc...), les constructeurs romains aient fait usage d'additifs tels que l'albumine et la caséine. L'utilisation d'urée et d'huiles n'est pas non plus exclue. Cependant la plupart des auteurs, Granges, par exemple, pensent qu'il n'y a jamais eu d'autres secrets. Car si de tels secrets existaient, ils auraient été sans doute été transmis par la tradition. Tout porte donc à croire que la qualité des mortiers romains tient essentiellement à la parfaite cuisson et extinction de la chaux, à l'homogénéité de mélanges et à la mise en oeuvre particulièrement soignée."

Donc, d'après nos auteurs, la parfaite qualité des mortiers tient de la parfaite cuisson et extinction de la chaux. Ils rappellent la condition essentielle pour que la chaux aérienne durcisse:

"Il va de soi que cette carbonatation [durcissement du mortier] ne peut se faire qu'au contact de l'air. Ainsi, on a constaté que certains mortiers romains ne se sont jamais carbonatés, du fait qu'ils se trouvaient à l'intérieur d'un «béton» très compact et peu perméable."²

Nous constatons, d'un côté la chaux aérienne, qui durcit grâce au gaz carbonique de l'air, et de l'autre "certains" mortiers qui n'ont pas durci parce qu'ils se trouvaient dans la partie la plus profonde du mur, celle justement que ne peut atteindre le gaz carbonique! Les spécialistes concluent que puisque un petit nombre de mortiers ne s'est pas carbonaté, cela démontre

¹ In *Les mortiers anciens...* p. 167.

² In *Les mortiers. anciens...*, p. 169.

que tous les mortiers, même ceux composant les voûtes concrètes, sont faits exclusivement de chaux aérienne. D'un exemple de mortier mal préparé, ils font le modèle d'un liant de qualité. Les spécialistes font d'une exception une généralité. Les analyses devraient leur donner raison. Mais, comme nous l'avons vu dans ce mémoire, la plupart sont soit mal faites soit sont obsolètes.

Actuellement la situation peut se résumer à ceci:

- d'un côté les archéologues affirment que seule la chaux aérienne explique la pérennité du mortier romain;
- de l'autre, nous avons les spécialistes de la science des matériaux qui trouvent, dans leurs analyses des mortiers, des éléments de silicate d'alumine indicatif de la présence d'une réaction de type pouzzolanique. Et ces mêmes spécialistes³ s'étonnent que les archéologues continuent de propager l'idée que seule la chaux grasse aérienne, bien cuite et bien éteinte, et la bonne préparation des liants, expliquaient cette pérennité.

Il faut cependant nuancer notre propos et rappeler un fait: l'immense majorité des mortiers utilisés dans l'Antiquité est faite à base de chaux seule. Ils sont employés pour les maçonneries courantes et sont le lot commun des archéologues. C'est ce genre de produit qu'on retrouve à Pompéi et dans les fouilles, qui ne résiste pas aux intempéries et au temps. En fait, les seuls mortiers qui posent problèmes, sont ceux dont nous avons parlé: *les mortiers à réactions pouzzolaniques*, dont l'hydraulicité provient de l'adjonction de l'un de ces trois sables:

- "*harena fossicia*", régulièrement traduit par "sable de cave" ou "sable de carrière", mais que G. LUGLI interprète judicieusement par "pouzzolane". L'*harena fossicia* en réalité est un sable de tuf zéolitique en général recueilli dans les carrières d'extraction des pierres de tuf de la région du Latium. Le "*carbunculus*" appartient également à cette catégorie.
- "*testa*", poudre de tuileau obtenu par cuisson d'une argile kaolinique. C'est le prototype de la pouzzolane artificielle.
- "*pulvis Baianus*", poudre volcanique de la région du Vésuve, de Pozzuoli, d'où le nom de pouzzolane.

³ Cf. annexe.

Ces mortiers de qualité, employés dans les grands ouvrages et les enduits étanches, intéressent la technologie moderne car ils ont traversé le temps sans destruction, et représentent des modèles pour les chercheurs à la recherche de matériaux capables de confiner certains des déchets les plus toxiques.

Le simple mortier de chaux aérienne, celui ne contenant que du sable de silice comme ajout, ne les intéresse pas. En cela ils rejoignent l'opinion de Vitruve qui ne le recommande que pour la confection des enduits blancs de décoration. Le sable de silice, sable de rivière ou sable de mer, "*harena fluviatica*" et "*harena marina*" n'engendre que des défauts de construction, pour les murs et les voûtes en *Opus Caementicium*. Après avoir lu G. LUGLI, l'interprétation du chapitre 4 du livre 2 (*De harena*) devient claire. Après avoir présenté les différents sables pouzzolaniques qui seront employés en maçonnerie, Vitruve reconnaît que l'on ne retrouve pas ce type de sable partout. C'est pourquoi il écrit: "Mais s'il n'y a pas de carrière d'où on puisse tirer le sable pouzzolanique, il faudra tamiser du sable provenant du lit de rivière ou du gravier, au besoin même du bord de la mer."⁴ Mais le sable marin ou fluvial a de grands défauts:

"*Sed ea in structuris haec habet vitia: difficulter siccescit, neque onerari se continenter recipit; paries patitur, nisi intermissionibus requiescat, neque concamerationes recipit.*"

-*difficulter siccescit*: "le sable de mer ou de rivière ne durcit que difficilement"; littéralement: "il sèche difficilement"; ceci correspond au langage traditionnel des maçons qui emploient le terme sécher même pour le durcissement des liants hydrauliques.

-*neque onerari se continenter recipit; paries patitur, nisi intermissionibus requiescat*: "ce sable ne permet pas au mur de monter en continu celui-ci ne supportant pas sa propre charge; le parement du *caementicium* pâteux souffre et risque de s'éventrer sous les pressions, à moins qu'il ne se repose régulièrement."; la carbonatation, donc le durcissement ne pouvant se faire à l'intérieur, le mortier reste pâteux et les parois du murs ne peuvent supporter, sans s'effondrer, l'élévation de la maçonnerie; pour éviter cela il faut interrompre le travail, après chaque assise, pour laisser le temps à la carbonatation de la chaux d'avoir lieu.

⁴ Vitruve 2, 4, 2: *Sin autem non erunt harenaria, unde fodiatur, tum de fluminibus aut e glarea erit excernenda non minus etiam de litore marino..*

-neque concamerationes recipit: "et il ne permet pas l'édification des voûtes concrètes." Ce type de mortier de sable de silice, donc de chaux aérienne, ne permet pas la construction des voûtes concrètes.

Le seul moyen efficace pour transformer ce type de mortier d'essence "chaux aérienne" en un mortier au qualité hydraulique, est d'ajouter une pouzzolane artificielle, la *testa*, dans le rapport de deux parts de sable de rivière pour une part de *testa*, comme indiqué dans Vitruve 2, 5, 1⁵.

Le mortier de *testa* a bien des avantages: si l'on dispose d'argile kaolinite, la moindre chaux grasse se transformera en chaux hydraulique et permet avantageusement de remplacer la pouzzolane qui fait défaut. La technique, nous l'avons vu, remonte au X^e siècle avant notre ère et est fort ancienne. Elle prit naissance au Moyen Orient⁶ et fut employée abondamment par les Grecs pour tous les lieux qui devaient entrer en contact avec l'eau. Elle accompagne le développement des gymnases et des thermes à partir du V^e siècle et plus particulièrement à l'époque hellénistique et elle permet l'urbanisme étonnant d'Olynthe⁷ et devient le support de l'art de la mosaïque.

Mais ce sont les Romains qui en firent un usage industriel sous le nom d'*opus signinum* ⁸. Le *signinum* est un mortier de *testa*, de chaux et de sable qu'on emploie comme les Grecs, comme enduit et comme sol imperméables. Nous avons proposé une explication pour les murs de citernes en *opus signinum* chez Vitruve 8, 6, 14. En se fondant sur un texte de Caton (*Agr.* 18,7), les maçons creusent une tranchée qui fera le coffrage du mur de citerne. Après avoir jeté le mortier de chaux, de sable et de moellons dans la tranchée, on saupoudre ce mortier de *testae* sèches et on dame jusqu'à ce que le mélange ne puisse plus être battue. Les maçons recommencent cette opération jusqu'à la hauteur désirée du mur⁹.

⁵ *Etiam in fluviatica aut marina si qui testam tunsam et succretam ex tertia parte adiecerit, efficiet materiae temperaturam ad usum meliorem.*

⁶ Cf. chapitre 6.

⁷ Cf. chapitres 4 et 5.

⁸ Cf. chapitre 2.

⁹ *Id.*

Nous avons défini la *testa* comme une argile kaolinite ayant la forme d'une tuile et cuite entre 700 et 800 °C. Puisque les réactions chimiques complexes entre la chaux et la *testa* sont connues, nous nous sommes intéressés au lieu d'origine du *signinum*: le site de Signia. Cette localité du Latium était réputée pour la fabrication des tuiles. Les analyses chimiques¹⁰ ont établi que le dégraissant local¹¹ utilisé pour la cuisson de la tuile est une zéolithe qui, mêlée à la kaolinite calcinée et à la chaux, donne un mortier qui équivaut par ses qualités au ciment Portland. On le voit, le *signinum* de Signia est issu d'une longue tradition architecturale. Les Romains ont amélioré la technique au point que le produit n'a rien à envier à nos meilleurs ciments.

Nous pouvons établir trois axes de recherche pour la thèse:

1) Traduction:

Les principaux termes techniques sont désormais connus, à savoir *signinum*, *testa*, *testaceum*, *harena fossicia*. Mais le dernier, *carbunculus*, reste à l'état d'hypothèse. La retraduction des passages suivants, ainsi que les commentaires linguistiques, géologiques, archéologiques et technologiques, est maintenant possible:

Vitruve, *De Architectura* Livre 2, Chapitre 4, Chapitre 5, Chapitre 6, Chapitre 8

Vitruve, *De Architectura* Livre 5, Chapitre 10, Chapitre 11, Vitruve, *De Architectura* Livre 7, Chapitre 1, Chapitre 4,

Vitruve, *De Architectura* Livre 8, Chapitre 6, § 14.

2) Les confrontations de l'archéologie aux textes de Vitruve.

Nous donnons deux exemples pour illustrer le type de recherche:

Vitruve en 8, 6, 14 décrit des citernes faites en *opus signinum*. Il serait intéressant de savoir si l'on a retrouvé des citernes romaines à Segni. C'est le cas, puisque R. DELBRÜCK¹² rapporte qu'au nord de l'église San-Pietro, il

¹⁰ Cf. chapitre 2.

¹¹ R. Delbrück rapporte que ce dégraissant qu'on retrouve dans les tuiles du Capitole de Signia est un sable d'origine volcanique: in *Das Capitolium...*, p. 7.

¹² In *Das Capitolium...*, p. 5.

y a une citerne ronde datant de l'Antiquité. Dans ce cas, elle serait faite avec le *signinum* du livre 8.

Ensuite, en nous basant sur les travaux de G. LUGLI, nous avons émis l'hypothèse que le *carbunculus* est une zéolithe noire qu'on cuit entre 300 et 400 °C pour améliorer ses propriétés pouzzolaniques et qui devient rouge du fait de cette cuisson. Elle se fonde sur les mortiers contenant des agrégats soit noirs soit rouges employés à la Villa Hadriana¹³. Puisque Vitruve affirme que le meilleur *carbunculus* vient d'Etrurie, il pourrait exister des textes ou des devis qui décrivent les matériaux provenant de telle région destinés à tel bâtiment. Ainsi, nous trouverions des cargaisons de tufs noirs issus d'Etrurie pour l'édification d'un monument célèbre.

3) Archivage des analyses sur les mortiers et confrontation avec les descriptions de provenance chez Vitruve

Puisqu'il existe une méthode complète d'analyse des matériaux, nous collecterons les analyses publiés sur des sites intéressants et nous proposerons aux laboratoires intéressés de nous aider à en faire d'autres, si elles n'existent pas.



¹³ Cf. chapitre 3.

ANNEXE 1

Remarques sur les Analyses des Mortiers, Enduits et Ciments antiques.

Les discussions que nous avons eues à l'occasion du Chapitre 4 de ce mémoire, montrent clairement que les analyses, mêmes récentes, trouvées dans la littérature archéologique, ne sont pas suffisamment explicites et leurs interprétations erronées. Il semble évident que la majorité des matériaux archéologiques devraient faire l'objet d'analyses complètes. Il s'agit là d'une tâche de longue haleine nécessitant une collaboration interdisciplinaire, voire même internationale, avec les grands laboratoires spécialisés. Les deux exemples suivants montrent d'une part que ces laboratoires sont intéressés par ce genre d'analyse, et que d'autre part certaines ont déjà été faites, et publiées.

Les deux études ont été faites dans le but de trouver des données permettant de prévoir le comportement à long terme des ciments devant être utilisés pour le confinement et le stockage des déchets nucléaires. Les matériaux archéologiques permettent une simulation à l'échelle des 2000-3000 ans.

1) Étude Américaine; 1983

Analyses des mortiers et enduits de LAURION, Grèce; par

- D.M. Roy et C.A. Langton, Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, USA.

Rapport publié par N.T.I.S., USA, accessible en France par le serveur QUESTEL, banque de données CEDOCAR. "Characterization of Cement-Based Ancient Building Materials in Support of Repository Seal Materials Studies", Report BMI/ONWI-523.

C. Langton a étudié 18 échantillons provenant du site minier de Laurion, à l'aide des techniques suivantes:

- analyse pétrographique (microscopie optique)
- Microscopie électronique à balayage
- Diffraction aux Rayons X
- Analyse Thermique Différentielle, Analyse Thermique Gravimétrique
- Analyse chimique quantitative
- Analyse chimique structurale (minéralogique)

- Microsonde électronique

Résultats: le liant, ou matrice, contient de la chaux carbonatée et une composition semi-amorphe à base de silicate d'alumine provenant d'une réaction de type pouzzolanique (ou géopolymérique). Le réactif pouzzolanique a pu être caractérisé dans le cas des enduits des citernes de décantation et de lavage des minerais (voir en parallèle l'analyse archéologique du Chapitre 4). Il s'agit d'un ingrédient de couleur jaune-brune, constitué de zéolithe, en particulier de la phillipsite comme dans les tufs italiens, en particulier à Segni.

2) Étude Française; 1989

Analyse d'Opus Signinum, mortier et enduit contenant de la brique pilée (testa), thermes gallo-romains; par:

- F. Rassinoux et A. Meunier, Laboratoire de Pétrologie des Altérations Hydrothermales, Poitiers, France.
- JC Petit, Laboratoire d'Etudes des Comportements à Long Terme, Commissariat à l'Energie Atomique, Centre d'Etudes Nucléaires, Fontenays aux Roses, France.

Recherche publiée: "Ancient Analogues of Modern Cement: Calcium Hydrosilicates in Mortars and Concretes from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 72 [6], pp 1026-1032 (1989).

Après s'être étonnés que les principaux auteurs d'analyses archéologiques continuent de propager l'idée que les mortiers contenant de la brique pilée (testa) ne sont composés que de calcite (carbonate de calcium résultant du seul durcissement de la chaux aérienne)(en particulier M. Frizot, Fiorentini et al. cités également dans le Chapitre 1 de ce mémoire), les auteurs ont analysés ces mortiers et enduits à l'aides des techniques suivantes:

- microscopie optique
- microscopie électronique à balayage
- microsonde électronique
- analyse chimique quantitative
- diffraction aux Rayons X
- absorption aux Infrarouges.

Le liant contient, en plus de la calcite, des silicates d'alumines hydratés provenant de la réaction pouzzolanique entre la brique pilée (testa) et la chaux.

Fait à Saint-Quentin, le 31 Mai 1993.

A valoir pour le mémoire de DEA de Frédéric Davidovits

A handwritten signature in black ink, reading "J. Davidovits". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping initial "J" and a long, horizontal stroke for the "Davidovits" part.

Joseph Davidovits
Professeur des Universités
Pennsylvania State University (1989-1991)
Barry University, Miami, Floride (1983-1990).

Bibliographie technique et archéologique.

- J. P. Adam, *L'architecture militaire grecque*, Paris, 1982.
idem, *La construction romaine: matériaux et techniques*, 2^e édition, Paris, 1989.
- E. Ardaillon, *Les mines du Laurion dans l'Antiquité*, Paris, 1897.
- M. Bulard, *Peintures murales et mosaïques de Délos*, Monuments et mémoires de la Fondation Eugène Piot, T. 14, Paris, 1908.
Bulletin de Correspondance Hellénique, (BCH en abrégé) publié par l'Ecole Française d'Athènes, Diffusion de Boccard, Paris.
- A. Choisy, *L'art de bâtir chez les Romains*, Paris, 1873.
idem, *Vitruve, Analyse*, t.1, Paris, 1909.
- R. Cagnat et V. Chapot, *Manuel d'Archéologie romaine*, 2 T., Editions Picard, Paris, 1920.
- J. Chamonard, *Exploration archéologique de Délos*, VIII, Le quartier du Théâtre, Paris, 1924.
- Ch. Daremberg, E. Saglio, *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines*, t.3, article *opus signinum*, pp. 2093 à 2094, Paris, 1877-1919.
- F. Davidovits, *Vitruve et le mortier romain, étude archéologique et linguistique*, mémoire de maîtrise de lettres classiques, Faculté des Lettres, Amiens, 1992.
- J. Davidovits et J. Orlinski, *Geopolymer '88*, Vol.1-2, Geopolymer Institute et Université de Technologie, Compiègne, 1988.
- R. Delbrück, *Das Capitolium von Signia, Der Apollotempel auf dem Marsfelde in Rom*, Rome, 1903.
- M. Frizot, *Mortiers et enduits peints antiques: étude technique et archéologique*, centre de recherches sur les techniques gréco-romaines, Dijon, 1975.
idem, *Le mortier romain mystère ou savoir-faire?*, in *Dossiers de l'archéologie*, n°25, nov/déc 1977, pp.61 à 64, Paris.
- V. Furlan, P. Bisseger, *Les mortiers anciens, histoire et essais d'analyse scientifique*, in *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte*, Volume 32, pp. 166-178, Zurich, 1975.
- A. Gaudio, *Comment bâtissaient les Romains*, in *Archéologia*, n°114, pp. 50-59, 1978, Paris.
- R. Ginouvès, R. Martin, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*, tome 1, Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor, Ecoles Françaises d'Athènes et de Rome, 1985.
- R. Ginouvès, *Balaneutikè, Recherches sur le bain dans l'Antiquité Grecque*, Paris, 1962.
- R. Ginouvès, *L'établissement thermal de Gortys d'Acadie*, Paris, 1959.
- R. Ginouvès, *Soloi, Dix campagnes de fouilles (1964-1974)*, vol. 2, La "Ville Basse", Les Presses de l'Université de Laval, Sainte-Foy, 1989.

- E. Kunze, H. Schleif, *IV. Bericht über die Ausgrabungen in Olympia*, Berlin, 1944.
- H. O. Lamprecht, *Eigenschaften von Römischer Beton, Untersuchungen antiker Bauwerke*, Beton-Verlag, GmbH, Düsseldorf, 1987.
- H. O. Lamprecht, *Bauwerke aus Römischem Beton*, Beton-Verlag, GmbH, Düsseldorf, 1987.
- G. Lugli, *L'opus caementicium in Vitruvio*, in *Classica et Mediaevalia*, Vol. 17, Copenhagen, 1956.
- G. Lugli, *La tecnica edilizia Romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*, Vol. 1, Rome, 1957.
- R. Martin, *Manuel d'architecture grecque, I, Matériaux et techniques*, Paris, 1965.
- A. Orlandos, *Les matériaux de constructions et la technique des anciens grecs*, I, 1966; II, 1968, Paris.
- David M. Robinson, J. Walter Graham, *Excavations at Olynthus, Vol. 8, The hellenic house*, Baltimore, 1938.
- David M. Robinson, *Excavations at Olynthus, Vol. 12, Domestic and public architecture*, Baltimore, 1946.
- C. Roebuck, *Corinth, Vol. 14, The Asklepeion and Lerna, Results of the excavations conducted by the American School of Classical Studies at Athens*, Princeton, 1951.
- J. B. Rondelet, *Traité théorique de l'art de bâtir*, Paris, 1842.
- I Roncozzi Fiorentini, R. Mambelli, B. Fabbri, F. Donati, "OPVS SIGNINVM": composition, dégradation et conservation, pp. 341-350, in *Vème congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1990.
- R. A. Tomlinson, *Emplecton masonry and "greek structura"*, in *Journal of Hellenic Studies*, pp. 133-140, 1961.
- P Wilski, *Thera, Untersuchungen, Vermessungen und Ausgrabungen in der Jahren 1895-1902;: Klimatologische Beobachtungen aus Thera*, t.4 Berlin, 1902-1903.
- F. Winter, *Greek fortifications*, Toronto, 1971.
- G. Wissowa, *Pauly's Realencyclopädie der classischen Altertumswissenschaft*, Article *Signia*, p. 2347, Article *Signinum*, p.2359, Stuttgart, 1963.

Bibliographie des auteurs anciens.

1) les auteurs latins.

- Caton, *De l'Agriculture*, édit. R. Goujard, coll. des Univ. de France, Paris, 1975.
- Columella, *De Re Rustica*, édit. H.B. Ash, E.S. Forster, E.H. Heffner, Loeb, Classical Library, 1948-1955.
- Columella, *De Re Rustica*, édit. H. B. Ash, livres I à IV, Loeb, Classical, Library, 1960.
- Columelle, *De l'Agriculture*, édit. S. de la Bonnetterie, Coll. Nizard, Paris, 1851.
- Pline, *Histoire Naturelle*, livres 15, édit. J. André, Coll. des Univ. de France, Paris, 1958.

Pline, *Histoire Naturelle*, livre 36, texte établi par J. André, traduit par R. Bloch, commenté par A. Rouveret, Coll. des Univ. de France, Paris, 1984.

2) Traductions et commentaires du "De Architectura"

Vitruve, *De l'architecture*, édit. Perrault, Coll. Nizard, Paris, 1852.

Vitruvius, *On architecture*, édit. F. Granger, Loeb, Classical Library, 1985.

Vitruve, *De l'architecture*, livre I, édit. Ph. Fleury, Coll. des Univ. de France, Paris, 1990.

Vitruve, *De l'architecture*, livre III, édit. P. Gros, Coll. des Univ. de France, Paris, 1990.

Vitruve, *De l'architecture*, livre IV, édit. P. Gros, Coll. des Univ. de France, Paris, 1992.

Vitruve, *De l'architecture*, livre VIII, édit. L. Callebat, Coll. des Univ. de France, Paris, 1973.

Vitruve, *De l'architecture*, livre X, édit. L. Callebat et Ph. Fleury, Coll. des Univ. de France, Paris, 1986.

A. Choisy, *Vitruve*, Paris, 1909.

3) Les auteurs grecs.

Arrian, *Anabasis Alexandri*, édit. E. I. Robson, Loeb Classical Library, 1961.

Theophrastus, *De lapidibus*, édit. D. E. Eichholz, At the Clarendon Press, Oxford, 1965.