Zeitschrift: Zeitschrift für schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte = Revue suisse d'art et d'archéologie = Rivista svizzera d'arte e d'archeologia = Journal of Swiss archeology and art history

Herausgeber: Schweizerisches Nationalmuseum

Band: 32 (1975)

Heft: 2

Artikel: Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique

Autor: Furlan, Vinicio / Bissegger, Paul

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-166356

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les mortiers anciens
Histoire et essais d'analyse scientifique

par Vinicio Furlan et Paul Bissegger

1. Introduction

L'étude et la comparaison des mortiers à base de chaux hydratée préoccupent depuis longtemps archéologues et historiens des monuments, car ces examens peuvent fournir de précieux renseignements pour l'interprétation archéologique et la datation relative d'un édifice.

Bien sûr, les échantillons montrent très souvent des différences considérables de coloration et de texture, liées à la pureté du liant, la nature, la grosseur et la répartition des grains de sable ainsi qu'à d'éventuelles interactions avec le milieu environnant. Toutefois ces différents éléments sont difficiles à chiffrer et à interpréter.

Une approche plus technique et plus scientifique que le simple examen visuel auquel se limite le plus souvent l'archéologue, et qui ferait appel à la chimie, à la physique et à la minéralogie, peut donner des indications plus précises. Pourtant, les chercheurs qui étudient ce genre de problèmes en laboratoire sont encore rares et il semble qu'une méthodologie d'investigation rationnelle reste à préciser.

Dans ce rapport, nous nous proposons d'aborder les différents aspects de la question et de condenser les résultats de recherches actuellement dispersés dans diverses publications, dans le but de soumettre au lecteur un «état des connaissances» bien plus qu'une étude exhaustive du problème.

L'étude qui suit n'a donc pas la prétention de suggérer une méthode d'investigation nouvelle, mais s'adresse avant tout aux praticiens de l'archéologie et des monuments historiques qui surestiment parfois les moyens et les possibilités réelles de l'homme de laboratoire.

2. Évolution et historique du mortier

2.1 *Préhistoire*

Il ne peut être question dans ce contexte d'étudier à l'échelle mondiale tous les types de constructions, ni même d'échafauder des hypothèses quant à l'origine du mortier de chaux. Nous nous bornerons à une rapide esquisse en citant tout d'abord les résultats des fouilles effectuées dans l'une des plus anciennes agglomérations urbaines actuellement connues, puis nous reviendrons à des limites plus régionales.

Ainsi, en Turquie, dans l'étonnante ville néolithique de Çatal Hüyük (environ 6000 av. J.-C.), le «plâtre» qui recouvre tous les sols, murs et plafonds et qui sert de support aux peintures et aux animaux modelés des temples, n'est en fait que de l'argile blanche trouvée sur place et appliquée telle quelle; quant au mortier de terre utilisé pour la construction des murs, il est noir et riche en cendres et débris d'ossements, mais un véritable liant y est encore inexistant[1].

Dans notre contrée, les constructeurs préhistoriques se servaient également d'argile crue, dont ils enduisaient les sols et les parois de leurs maisons faites de planches et de clayonnages. Les murets découverts lors de fouilles sont toujours faits de pierres sèches et les pavages datant de l'époque de la Tène (environ 450 av. J.-C.) sont uniquement recouverts de terre battue[2].

Cependant, des campagnes de fouilles ont mis à jour, non seulement dans le Nord de l'Europe[3], mais également à Auvernier NE, des vases de céramique dont les décors incisés étaient remplis d'une matière blanche et dure. Celle-ci, à l'analyse, s'est révélée être du calcaire, parfois mêlé de poudre d'ossements brûlés, de plâtre ou d'argile. Il n'a cependant pas été possible de déterminer si cette pâte blanche a été appliquée à l'origine sous forme de chaux (parfois mêlée à d'autres éléments) qui se serait régulièrement carbonatée, ou s'il s'agissait simplement de calcaire finement pilé et rendu pâteux par l'adjonction de corps gras ou d'autres matières organiques qui auraient pu servir de «colle». Pourtant, en ce qui concerne la construction, nous pouvons affirmer qu'en Europe centrale et septentrionale, aucun exemple d'utilisation de chaux ne nous est actuellement connu pour l'époque préhistorique.

2.2 *Mortiers grecs*

Histoire

Les Egyptiens[4] furent parmi les premiers à utiliser le plâtre (sulfate de calcium demi-hydrate obtenu par la cuisson du gypse à environ 120 °C) pour le jointoiement des blocs de la pyramide de Chéops (vers 2600 av. J.-C.). Mais c'est par les civilisations grecque et romaine que le mortier de chaux nous est parvenu.

En effet, des fouilles ont attesté que les constructeurs grecs connaissaient les liants artificiels depuis une époque très reculée.

Dès le VIIe siècle av. J.-C. les architectes grecs eurent généralement recours à la technique des stucs et revêtements pour dissimuler l'aspect rude de certains matériaux comme le tuf et le calcaire. Mais le mortier de chaux n'a été utilisé en Grèce pour la construction des murs qu'à partir de la fin du IIe ou du début du Ier siècle av. J.-C. (maisons de Délos et de Théra). Dans les constructions antérieures, les pierres étaient liées par un mortier simplement fait de terre et d'argile[5].

Composition

De façon générale, les mortiers helléniques sont à base de chaux et de sable fin; les stucs à base de chaux, de plâtre et de poudre de marbre. Mais, selon les nécessités du moment, des adjuvants ont parfois été additionnés pour rendre le mortier plus dur et plus stable. A Théra, l'on introduisait dans le mélange chaux-sable de la poudre volcanique ou de la «terre de Santorin» exploitée sur l'île. On obtenait ainsi des mortiers stables à l'eau et dont les propriétés ont une certaine analogie avec les mortiers modernes à base de liants hydrauliques. Ce procédé était également connu hors de l'île, puisqu'on a trouvé de cette «Terre de Santorin» dans les stucs qui ornaient l'Héphaïstéion d'Athènes. 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 Xe siècle av. J.-C.)[6]. 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.

2.3 *Les mortiers romains*

La civilisation romaine a amélioré les procédés de fabrication de la chaux et les techniques de mise en œuvre du mortier; elle a su exploiter toutes les possibilités de ce matériau, et elle a surtout, en la vulgarisant, répandu cette nouvelle technique dans tout l'Empire.

Histoire

Une des plus anciennes mentions de l'«opus caementicum» se trouve chez Caton (IIe siècle av. J.-C.) qui décrit déjà une construction «ex calce et caementis»[7]. La date exacte de l'introduction du mortier de chaux à Rome n'est pas connue, mais on sait que cette technique a été utilisée dès les deux derniers siècles de la République (IIe et Ier siècle av. J.-C.), qu'elle se développa et se généralisa rapidement, supplantant les systèmes précédemment utilisés, tels que l'«opus quadratum» (gros blocs ajustés sans mortier) et l'«opus latericium» primitif, en «later crudus» ou briques séchées[8].

Composition

Vitruve est la source la plus complète pour l'étude des éléments constitutifs du mortier de chaux romain (Ier siècle après J.-C.).

Par lui nous savons que le mélange des matériaux se faisait dans la proportion de: une unité de chaux pour trois de sable, ou de deux pour cinq, selon la qualité du sable[9].

Mais outre ces éléments de base, il mentionne aussi l'emploi d'adjuvants déjà utilisés par les Grecs tels que la cendre volcanique ou la tuile pilée (tuileau).

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 cœur des murs, formant ainsi un béton compact entre les deux 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[10]. Par la suite, l'exceptionnelle qualité des mortiers romains à 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 (certissage 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[11] par exemple, pensent qu'il n'y a jamais eu d'autres secrets. Car si de tels secrets existaient, ils auraient 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 des mélanges et à la mise en œuvre particulièrement soignée.

2.4 *Mortiers médiévaux*

Bien que les mortiers médiévaux soient encore très mal connus, il semble qu'aucun progrès technique remarquable n'ait été réalisé pendant cette période. Après l'éclatement de l'Empire romain, il est difficile de conserver une vue d'ensemble de cette évolution, car à la suite des grandes invasions, chaque pays, chaque région a désormais suivi sa propre voie. Dès lors les mortiers varient eux aussi beaucoup de lieu en lieu, d'époque en époque, voire même entre des édifices contemporains. Ils sont très souvent de qualité médiocre, friables, peu homogènes et ap-

pliqués sans le tassement caractéristique des constructions romaines; à l'intérieur des murs, il reste souvent de nombreuses cavités.

Evolution

Viollet-Le-Duc a tenté d'établir pour la France une classification chronologique sommaire[12]. Nous la donnons ici pour ce qu'elle vaut: c'est une approche grossière et incertaine, mais offrant peut-être tout de même des points de repère qui peuvent être de quelque utilité.

Pour les IXe, Xe et XIe siècles Viollet-Le-Duc trouve des mortiers généralement de qualité très médiocre, malgré parfois la présence de tuileau. (Il est à noter que le tuileau peut avoir deux fonctions bien distinctes. Par leur nature poreuse, les petits fragments de terre cuite rendent les mortiers plus perméables à l'air et permettent ainsi une meilleure carbonatation de la chaux. D'autre part, certaines argiles cuites peuvent avoir une activité pouzzolanique. Cependant, la «réactivité» est souvent très faible ou nulle, car elle dépend de la nature de l'argile et de la température de cuisson. Les meilleurs résultats sont obtenus généralement par des températures en dessous de la température de cuisson des tuiles et des briques. Par conséquent, l'adjonction de tuileau n'améliore pas forcément la qualité d'un mortier.)

Viollet-Le-Duc attribue la baisse de qualité surtout à la perte des procédés romains de fabrication de la chaux (ce faisant, il sous-estime certainement l'importance d'une mise en œuvre très soignée du mortier); mais dès le XIIe siècle, les mélanges sont plus homogènes et la qualité des liants s'améliore à nouveau. Souvent les mortiers de blocage sont corroyés avec de très gros graviers et de la chaux mêlée de charbon de bois. (Vu la forte teneur en charbon, on peut admettre qu'il ne s'agit pas d'une impureté, mais que cet élément poreux joue le même rôle que les morceaux de terre cuite.) Pour les lits et les joints, les maçons utilisaient du sable fin et de la chaux bien blanche.

Au début du XIIIe siècle, des raisons d'économie ont imposé parfois des restrictions aux constructeurs: ils étaient contraints à n'utiliser que très peu de chaux et du sable parfois mêlé de terre. Ainsi les mortiers des cathédrales de Laon, Troyes, Chalons-sur-Marne et Sées sont très mauvais. Par contre, au XIVe et XVe siècle, les gros graviers étaient rarement employés; on utilisait surtout le sable de plaine qui semble même avoir été parfois lavé pour le débarrasser de toute trace d'argile et de terre. Naturellement ces soins apportés au corroyage permettaient la fabrication d'un mortier de bien meilleure qualité.

Composition

En Allemagne, les recherches de E. Hennig et R.D. Bleck[13] ont permis d'établir le non-fondé de certaines croyances persistantes, au sujet de protéines animales qui auraient été incorporées aux mortiers médiévaux. En effet, l'adjonction de substances telles que blanc d'œufs, lait, caséine ou sang n'est pas attestée dans la littérature historique; d'autre part, ces chercheurs ont examiné des échantillons de mortier datés du XIe au XVIIe siècle. Jamais ils n'ont pu établir la présence de matières organiques. Par contre, l'adjonction de plâtre ou de tuileau a été prouvée, car ce sont là, nous l'avons vu, des additifs classiques.

A. Naef, premier archéologue cantonal vaudois, a relevé que les maçons d'autrefois ont utilisé très souvent, dans notre région, un liant à base de plâtre. «A Chillon, l'usage en remonte à une très haute antiquité et fut très fréquent, presque général, jusqu'au milieu du XIIIe siècle, non seulement pour les enduits, mais encore pour les encadrements et les sièges de baies...[14].»

Il s'agit d'un béton coulé, mélangé de quartiers de tuf et de cailloux de diverses grosseurs, très petits pour les sols, assez gros pour les supports mais toujours noyés dans la masse et non pas appareillés, ni régulièrement maçonnés. Selon A. Naef, ce système de construction coulée est peut-être une réminiscence des procédés romains. Au XIIIe et au XIVe siècle, le plâtre employé à Chillon provient toujours des carrières de gypse de Villeneuve. «Ce curieux mode de construction fut jadis très répandu dans notre pays. Le Valais, où il s'est conservé plus longtemps, jusqu'en pleine époque moderne, possède encore des exemples aussi nombreux que remarquables: qu'il suffise de citer le jubé de Notre-Dame de Valère à Sion[15].»

Emploi généralisé

Ce n'est qu'à la fin du Moyen Age que la construction en pierre a commencé à se généraliser dans notre région. En effet, pour des raisons économiques autant que par tradition, ce mode de bâtir était pratiquement réservé, pendant des siècles, aux édifices religieux et militaires. La population construisait ses habitations essentiellement en matières inflammables, aussi les agglomérations étaient-elles fréquemment ravagées par de catastrophiques incendies. C'est pour lutter contre ce péril, que dès la fin du XIVe siècle les autorités promulguèrent de nombreuses ordonnances pour imposer la construction en pierre. Il est évident qu'il fallut passablement de temps pour réaliser en profondeur un tel changement dans les habitudes des constructeurs; aussi n'est-ce qu'au XVIIe siècle, à Lausanne par exemple, que ces nouvelles méthodes paraissent d'un emploi généralisé[16].

Mécanisme du durcissement

Ainsi, en faisant abstraction de plus ou moins grandes variations en ce qui concerne la qualité, nous n'assistons encore à aucun progrès notable dans la fabrication du mortier. La chaux grasse provient toujours de la cuisson du calcaire très pur, composé presque exclusivement de carbonate de calcium ($CaCO_3$). Sous l'influence de la chaleur, le carbonate de calcium se dissocie, l'anhydride

carbonique se dégage et il reste la chaux vive ou oxyde de calcium (CaO). Les morceaux de chaux vive, sous l'action de l'eau, s'hydratent et se pulvérisent: on obtient alors la chaux éteinte ou chaux hydratée ($Ca[OH]_2$). Celle-ci, gâchée avec du sable et de l'eau, donne un mortier aérien, dont la prise s'effectue en deux temps. Dans un premier temps, la prise résulte exclusivement de la dessiccation, phénomène analogue à celui du durcissement de l'argile; dans un second temps, il y a carbonatation de la chaux qui se combine au gaz carbonique de l'air et redevient du calcaire ($CaCO_3$). Cette réaction confère au mortier sa résistance définitive et l'empêche de ramollir s'il vient à être mouillé ultérieurement[17]. Il va de soi que cette carbonatation 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.

2.5 *Liants modernes*

Antécédents classiques

Ce n'est qu'à partir du XVIIIe siècle que l'on produit des liants hydrauliques, c'est-à-dire des liants susceptibles de durcir sous l'eau. Les Grecs, nous l'avons vu, ont su créer des mortiers stables à l'eau au moyen d'adjuvants tels que terre de Santorin et tuileau.

Les Romains, eux, ont généralisé l'usage des mortiers de chaux et pouzzolane. La plus grande stabilité à l'eau des masses ainsi obtenues est due à une réaction plus ou moins lente entre la chaux et la silice colloïdale et l'alumine contenues dans les produits mentionnés, avec formation d'hydrosilicates et d'hydroaluminates dont la nature est comparable à celle des produits qu'on obtient par hydratation des liants hydrauliques modernes.

Liants hydrauliques

La découverte de ces derniers remonte à 1756. Smeaton appelé à diriger la construction du phare d'Eddyston (Plymouth) se propose de trouver une chaux qui puisse résister à l'action de l'eau de mer. Les essais effectués avec un calcaire d'Aberthan[18] donnent des résultats positifs.

Des analyses chimiques ayant démontré la présence d'argile, il en conclut que «la présence d'argile dans le calcaire doit être l'un des facteurs principaux sinon le seul qui détermine l'hydraulicité».

L'influence de la tradition romaine a probablement retardé la découverte des liants hydrauliques, car dans la littérature romaine on insiste sur le fait que pour obtenir une bonne chaux il faut partir d'un calcaire très pur. Par conséquent les calcaires argileux étaient systématiquement bannis.

Vers 1812, Vicat étudie des mélanges de calcaires purs et d'argiles et démontre définitivement que les propriétés hydrauliques dépendent des composés qui se forment pendant la cuisson entre la chaux et les constituants de l'argile. En effet, sous l'action de la chaleur, il y a tout d'abord déshydratation de l'argile puis décomposition du calcaire et enfin combinaison entre la chaux, la silice et les oxydes de fer et d'alumine. Suivant la teneur en argile, la température et la durée de cuisson, la réaction est plus ou moins complète et les produits obtenus plus ou moins hydrauliques.

Les premiers liants ainsi crées avaient le plus souvent les caractéristiques des ciments prompts actuels. Ils étaient généralement riches en aluminates et de ce fait caractérisés par une prise très rapide. Cette dernière n'est plus due à la dessiccation du mortier et à la carbonatation de la chaux, mais à la réaction des aluminates et des silicates avec l'eau. Elle peut donc très bien avoir lieu à l'abri de l'air. Les travaux de Vicat, en s'écartant de l'empirisme de ses prédécesseurs, constituent les véritables bases scientifiques qui fixent les règles de fabrication et d'emploi des chaux hydrauliques[19]. Celles-ci peuvent être considérées comme des produits intermédiaires entre la chaux hydratée et le ciment Portland actuel. En effet, avec les constituants hydrauliques, elles présentent toujours une teneur élevée en chaux libre et de ce fait doivent être soumises à extinction.

Cette opération, qui consiste à hydrater l'oxyde de calcium libre, doit être faite avec une quantité modérée d'eau, pour éviter l'hydratation de constituants hydrauliques. Il s'agit là d'un processus qui était mal maîtrisé par les précurseurs de Vicat.

Ciments

Joseph Aspdin, un maçon de Wakefield, prend en 1824 un brevet pour le ciment qu'il produit, ciment qu'il affirme être «aussi dur que la pierre de Portland». (Ce sera là l'origine de l'appellation «ciment Portland», actuellement donnée au ciment courant, bien que la nature et les caractéristiques de ce dernier soient très différentes.) L. C. Johnson découvre que le «clinker», obtenu par fusion partielle des éléments constitutifs de la matière première surchauffée et que jusqu'alors on avait toujours jeté comme déchet inutilisable, donne des résultats bien meilleurs que le ciment usuel, à condition d'être finement broyé. C'est le produit provenant de la mouture de clinker obtenu par calcination à environ 1450 °C, et additionné d'une faible quantité de gypse, que nous appelons aujourd'hui ciment Portland.

L'Exposition universelle de 1851, en permettant une démonstration du nouveau produit, lui a donné une grande publicité. Dès ce moment, la plupart des fabricants de liants pratiquent la calcination à haute température, et la chaux, de plus en plus, sera remplacée par le ciment[20].

Depuis la fin du XIXe siècle, les principes généraux de fabrication du ciment Portland n'ont guère changé. Cependant, on a assisté à une évolution technique et scientifique très importante. Cette évolution, en élargissant les

connaissances scientifiques de base, a notamment permis la découverte de toute une gamme de liants dérivés du Portland (Portland spéciaux), de liants de mélange (ciments pouzzolaniques, métallurgiques, etc...) et de liants tout à fait spéciaux (alumineux). Ceci d'une part pour pallier à certaines insuffisances du ciment Portland et, d'autre part, pour mieux satisfaire à d'autres exigences.

D'une manière générale, on peut aisément faire la distinction entre un mortier à la chaux hydratée et un mortier à base d'un liant hydraulique. L'examen microscopique permet notamment de reconnaître le type de liant hydraulique utilisé. Toutefois, cette distinction très nette n'est que rarement utile à l'archéologue et à l'historien, la découverte des liants hydrauliques étant toute récente.

Etant donné l'intérêt croissant que les historiens d'art portent à l'architecture du XIXe siècle, ces distinctions très nettes pourront certainement rendre de grands services pour cette période et permettront de préciser les méthodes de datation.

3. Étude des mortiers

Considérons maintenant quelles sont les diverses possibilités d'étude technique et scientifique d'un fragment de mortier. En laboratoire de nombreux échantillons provenant de divers monuments historiques ont déjà été étudiés. Ces examens, menés parallèlement dans divers pays, n'ont fait que souligner la difficulté et la complexité des problèmes rencontrés, puisque l'homme de science cherche à découvrir des constantes, à déterminer des éléments susceptibles d'être comparés. Cependant, il faut partir d'échantillons de mortier qui justement n'ont rien de constant, mais sont le fruit d'un mélange de composantes hétérogènes, dosées au hasard d'un coup de pelle par un maçon plus ou moins habile ou consciencieux.

3.1 *Analyse chimique*

Recherches

On pense généralement que l'analyse chimique doit fournir des résultats et des renseignements très précis et fort utiles. En Pologne, Hanna Jedrzejewska[21] a défini, il y a quelques années, une méthode d'examen des mortiers basée sur une analyse chimique rapide, peu coûteuse et permettant, selon elle, de classer les divers échantillons étudiés en catégories distinctes.

Or, selon cet auteur, il est même possible de faire correspondre à ces catégories des époques bien déterminées. Voici quelle est cette méthode: en simplifiant un peu les choses, H. Jedrzejewska a considéré qu'un mortier est formé de trois composantes essentielles, dont on peut déterminer le pourcentage au moyen d'une seule opération. En plongeant l'échantillon de mortier dans une solution d'acide chlorhydrique, il est possible de calculer sa teneur en carbonate de calcium en mesurant la quantité de gaz carbonique dégagée au cours de la réaction. D'autre part, le sable – ou du moins la partie siliceuse de celui-ci – est insoluble dans l'acide.

Le pourcentage de sable est donc donné par le poids du résidu insoluble par rapport au poids total de l'échantillon. Enfin, la solution, en plus du calcium provenant de la chaux carbonatée et du calcaire, contient d'autres éléments solubles qui, selon l'auteur, sont constitués essentiellement de silicates conférant au mortier ses propriétés hydrauliques.

Nous nous devons d'apporter quelques critiques à cette méthode d'investigation: en effet, en ne considérant comme «sable» que les résidus non solubles dans l'acide chlorhydrique, on obtient des pourcentages peu significatifs, car il est impossible de distinguer la chaux carbonatée du mortier ($CaCO_3$ liant) d'avec la partie calcaire ($CaCO_3$) du sable. Dans ces conditions, la teneur en sable ou en chaux d'un échantillon de mortier n'est pas calculable par l'analyse chimique.

La même remarque s'impose pour les autres éléments solubles qui peuvent appartenir soit à la chaux (impuretés du calcaire d'origine), soit à des éléments à caractère pouzzolanique (pouzzolane, trass, tuileau, etc...), soit au sable. Ces éléments sont généralement constitués de SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3. Quant au MgO, toujours présent en quantité plus ou moins grande, il peut provenir indifféremment, lui aussi, de chacun des constituants fondamentaux.

Enfin, la classification en groupes historiques établie par l'auteur nous paraît trop simplifiée, puisqu'elle englobe (mais pas systématiquement) des notions aussi différentes que: pourcentage, grosseur des grains de sable, coloration, état de conservation et dureté. C'est certainement le pourcentage des diverses composantes qui fut le facteur déterminant pour la classification de H. Jedrzejewska, puisqu'une telle analyse est l'objet même de son article. Mais quelle est l'importance des autres qualificatifs et pourquoi leur emploi n'est-il pas systématique? Qu'adviendrait-il si, au lieu des pourcentages, on utilisait comme critère de classement la dureté du mortier ou sa coloration?

Obtiendrait-on les mêmes répartitions dans le temps? Une approche plus rigoureuse de ces questions nous paraît souhaitable. En ce sens, l'étude de Ciach et Osler[22], autres chercheurs polonais, nous paraît exemplaire, beaucoup plus systématique et permettant d'obtenir des résultats plus convaincants. En effet, ils englobent dans leur investigation un grand nombre d'examens et d'analyses diverses. Il s'agit là d'une méthodologie aboutissant à un réel progrès, car elle est basée sur la plupart des techniques d'investigation envisageables de nos jours. Elle peut donc constituer une véritable source d'inspiration.

Recherches en Suisse romande

Dans notre pays, des recherches parallèles sont en cours: l'analyse chimique de nombreux échantillons de mortier provenant de divers monuments de Suisse romande est un premier pas vers la réalisation d'une méthode d'investigation rationnelle. Cependant, le chimiste se heurte toujours au même problème; l'analyse chimique donne des résultats dont l'interprétation est malaisée. Il est illusoire aussi de vouloir rechercher, faute de mieux, une caractéristique globale d'un mortier, sans faire une nette distinction entre liant et matériaux de remplissage: en effet, tous deux peuvent varier considérablement, puisque les textes d'archives nous apprennent souvent que l'on a utilisé, au cours d'une seule phase de construction, des chaux et des sables provenant de sources différentes. De plus, l'interprétation des données d'analyse chimique est extrêmement difficile, sans l'appui d'autres recherches.

Russin

Ainsi, par exemple, 37 échantillons de mortier provenant de l'église de Russin ont fait l'objet d'une analyse[23]. Bien qu'ils se répartissent chronologiquement entre le Xe et le XIXe siècle, on est surpris dès l'abord par la ressemblance de tous les résultats. En effet, à l'exception de 2 échantillons contenant un fort pourcentage de plâtre, ces mortiers ne présentent pas d'anomalies frappantes, ni par la nature très différente des divers granulats, ni par des variations importantes de la composition chimique. On remarque, bien sûr, des variations, mais que signifient-elles? Sont-elles dues simplement à des inégalités de mélange ou impliquent-elles des variations dans la qualité du mortier? D'autre part, dans les exceptions citées ci-dessus, les différences notables de composition chimique ne s'accompagnent pas forcément de modifications importantes de l'aspect macroscopique.

Les échantillons n°s 11, 24 et 30, dont les résultats de l'analyse sont reportés sur le tableau I ci-dessous, montrent l'aspect macroscopique visible sur les photos n°s 1, 2 et 3.

N° d'échantillon	11	24	30
Perte au feu	24,95	22,96	20,13
Résidu insoluble	42,60	47,87	32,36
SiO_2 soluble	0,38	0,42	0,45
Fe_2O_3	0,44	0,41	0,38
Al_2O_3	1,08	0,96	0,67
CaO	30,61	26,73	31,31
MgO	0,04	0,85	0,81
SO_3	0,07	0,04	13,55
Na_2O	0,05	0,06	0,07
K_2O	0,06	0,12	0,08

Tableau I *Analyse chimique d'échantillons de mortiers anciens, Russin GE*

En coupe, la similitude entre les 3 échantillons est assez marquée, c'est pourquoi les remarques suivantes s'imposent:

- La comparaison des analyses des échantillons n°s 11 et 24 par rapport au n° 30 ne suggère aucune identité possible.
- La bonne corrélation entre les n°s 11 et 24 (le n° 11 contenant un peu plus de liant) prouverait qu'il y a identité. Cependant le pourcentage de MgO de l'échantillon n° 24 pourrait aussi signifier que pour ces deux mortiers il a été utilisé deux liants différents. Ceci porterait donc à croire qu'il n'y a pas d'identité.
- D'autre part, la teneur élevée en MgO de l'échantillon n° 30 pourrait suggérer que pour ce mortier, contenant un fort pourcentage de plâtre, on a utilisé la même chaux que pour l'échantillon n° 24, d'où une éventuelle relation, qui de prime abord eût été rejetée.

Fig. 1 Coupe polie d'un mortier ancien. Echantillon n° 11, Russin GE, 5 ×

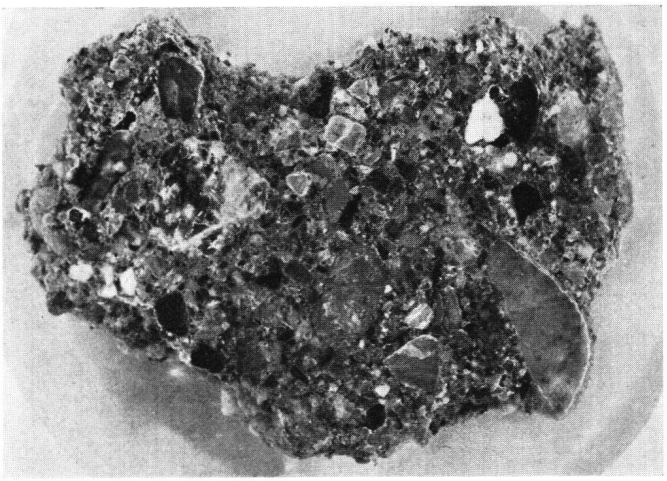
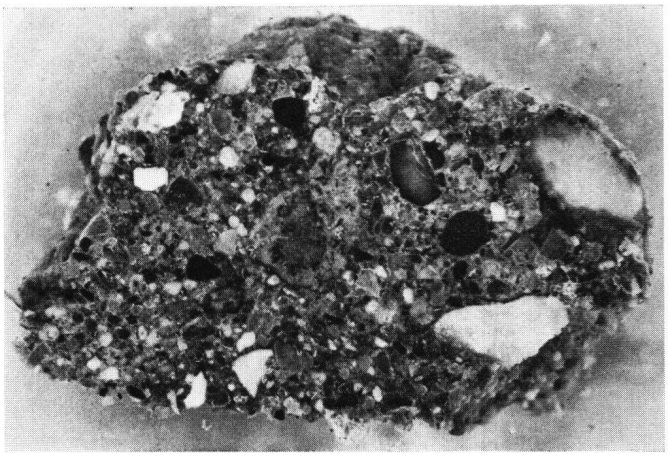


Fig. 2 Coupe polie d'un mortier ancien. Echantillon n° 24, Russin GE, 5 ×



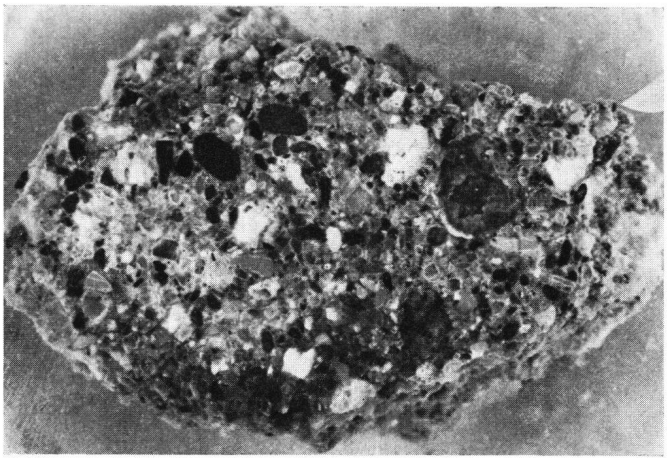


Fig. 3 Coupe polie d'un mortier ancien. Echantillon n° 3, Russin GE, 5 ×

Serrières

Pour appuyer ce qui précède, nous donnons encore l'exemple suivant: l'analyse chimique de 3 échantillons de mortier provenant d'un autel carolingien à Serrières NE a donné les résultats rapportés sur le tableau ci-après:

N° échantillon	A	C	D
Perte au feu	30,62	28,02	28,82
Résidu insoluble %	29,78	34,37	33,39
SiO_2 soluble %	0,52	0,65	0,51
Fe_2O_3 %	1,50	1,73	1,13
Al_2O_3 %	0,05	0,15	0,04
CaO %	37,02	34,48	35,44
MgO %	0,34	0,28	0,27
SO_3 %	0,08	0,10	0,09
Na_2O %	0,08	0,08	0,08
K_2O %	0,10	0,11	0,06

Tableau II *Analyse chimique d'échantillons de mortier provenant d'un autel carolingien à Serrières NE*

A quelques faibles variations près, les résultats de l'analyse sont assez semblables. Sur la base de ce seul résultat, on pourrait conclure qu'il s'agit de mortiers à peu près identiques. L'examen des coupes prouve catégoriquement le contraire. En effet, il s'agit de 3 mortiers très différents:

- Dans le cas de l'échantillon A, il s'agit d'un mortier très hétérogène de dureté très variable, contenant un sable à tonalités chaudes, formé d'éléments de 0–5 mm de diamètre, dont au moins 50% calcaire et des noyaux de chaux assez grossiers. Dans l'ensemble, le dosage en liant paraît plutôt faible.
- Par rapport au précédent, le mortier C est beaucoup plus homogène et a une tonalité rose due à la présence de tuileau. Le sable ainsi que le tuileau est formé d'éléments de 2–4 mm de diamètre. La teneur en tuileau se situe entre 5 et 10%. La teneur en liant paraît très faible.
- Le mortier D a une texture grossière et est très friable. Le sable formé de grains de diamètre allant jusqu'à 10 mm est composé de beaucoup de calcaire jaune, d'éléments quartzeux clairs et de quelques rares grains noirs. La teneur en liant dans les interstices est très élevée.

Ainsi, les résultats de l'analyse chimique peuvent être trompeurs, puisqu'ils engendrent parfois des contradictions internes, ou parce que, comme dans le second exemple, ils sont en contradiction totale avec l'aspect visuel de l'échantillon. En définitive, ces incertitudes rendent l'analyse chimique, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, assez peu significative, surtout si les résultats sont considérés isolément.

3.2 *Analyse pétrographique*

Du point de vue minéralogique, l'examen du sable est également décevant. En effet, par cette méthode, il n'est pas non plus possible d'aboutir à des résultats certains. Il est probable que des sables venus de deux lieux distincts diffèrent dans leurs composantes minéralogiques voire dans leur granulométrie. Toutefois, il est exclu d'affirmer a priori que deux mortiers qui différeraient par ces caractères, appartiennent forcément à deux phases de construction distinctes, ou qu'inversement, des mortiers dont les résultats d'analyse pétrographique sont semblables, soient contemporains.

Très souvent, en effet, comme pour la chaux, les sources d'archives nous apprennent qu'on a employé pour un certain édifice des charretées de sable provenant de différentes carrières; par contre, en bordure d'un lac ou d'une rivière, par exemple, on a toujours retiré du sable d'un même lieu, utilisant donc un matériau identique pour des édifices d'époques diverses.

Comme l'analyse chimique, l'étude pétrographique ne peut donner en elle-même d'éléments certains, mais un tel examen peut fournir pourtant des renseignements très utiles. En effet, le pétrographe est en mesure d'identifier les grains du sable et d'évaluer ainsi avec une précision non négligeable la teneur en calcaire de celui-ci, de distinguer tous produits d'adjonction tels que gypse, fragments de céramique, calcaire pilé, etc... Il est très important de connaître si, et dans quelle mesure, des éléments à caractère pouzzolanique ont été ajoutés intentionnellement au mortier. De plus, cet examen permettrait d'étudier un autre phénomène du même ordre, celui de l'attaque lente de certaines particules siliceuses par la chaux. Il peut y avoir formation de silicates solubles, qu'il convient de distinguer des silicates obtenus intentionnellement ou par hasard, par calcination de calcaires argileux et par hydra-

tation successive. Il est aisé d'imaginer les conséquences que peuvent avoir de tels renseignements pour une meilleure connaissance des méthodes médiévales de fabrication et d'utilisation du mortier à la chaux.

3.3 *Analyse microscopo-planimétrique*

Cet examen effectué sur une coupe polie d'un échantillon de mortier permet de mesurer avec une assez grande précision la surface occupée par les différentes composantes.

On peut alors transposer aisément ces données en pourcentage volumétrique. Bien mieux que l'analyse chimique qui, nous l'avons vu, ne fait parfois aucune distinction entre sable et liant, cette méthode permet de déterminer de manière précise les véritables proportions du mélange, donc une des caractéristiques principales du mortier. Ainsi fournit-elle des éléments significatifs de comparaison.

3.4 *Analyse thermo-différentielle et thermo-gravimétrique*

Ces méthodes permettent d'observer et de mesurer (au cours d'un échauffement progressif de l'échantillon) les effets endo- ou exothermiques, ou les variations de poids liées aux changements de phase et aux réactions chimiques déclenchées par l'augmentation de température.

Il est possible, par exemple, de repérer ainsi la présence de matières organiques dont la décomposition provoque des variations gravimétriques caractéristiques. Il est facile également de démontrer la présence de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), attestée par un fort effet endothermique dû à une déshydratation progressive.

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot \tfrac{1}{2}H_2O + 1\tfrac{1}{2}H_2O \quad \text{à} \sim 128\ ^\circ C$$
$$CaSO_4 \cdot \tfrac{1}{2}H_2O \rightarrow CaSO_4 + \tfrac{1}{2}H_2O \quad \text{à} \sim 163\ ^\circ C$$

De même, la réaction de décomposition du carbonate de calcium vers 880 °C est fortement endothermique.

Cet examen souvent ne fait que confirmer les résultats de l'analyse chimique. Mais parfois il permet de déceler des substances qui risquent de passer inaperçues ou d'être détruites lors de l'analyse chimique. La simple comparaison des graphiques enregistrés (sans identification des composés) peut déjà fournir de précieux renseignements.

3.5 *Essais physiques*

La détermination rigoureuse des caractéristiques physiques des échantillons doit permettre de mieux saisir et de mieux définir les propriétés des mortiers étudiés; elle faciliterait également les comparaisons. En effet, une telle approche devrait englober au moins des notions telles que densité relative et absolue, porosité, dureté, résistance à la traction et à la compression, ainsi que couleur de l'échantillon.

Ciach et Osler[22], à partir des données obtenues par divers tests effectués sur des mortiers provenant de pavements du haut Moyen Age, ont tenté de reconstituer les recettes de fabrication. A partir de ces recettes et en utilisant des liants actuels (chaux, plâtre, etc...) ils ont fabriqué des éprouvettes, dont ils ont testé les caractéristiques après divers temps de maturation. Ils ont pu établir ainsi que la résistance des mortiers anciens qu'ils ont examinés est très élevée et qu'elle ne s'est pas modifiée jusqu'à nos jours. Les caractéristiques physiques de ces mortiers se situent à l'intérieur des limites fixées par la technologie moderne pour ce type d'utilisation, ce qui constitue bien une preuve du très haut niveau d'habileté technique atteint par certains constructeurs médiévaux.

Ainsi, non seulement les essais physiques sur les échantillons anciens, mais également la reconstitution de ces mortiers et des tests sur les éprouvettes récentes, présentent un intérêt certain.

3.6 *Examen microscopique*

L'observation à un grossissement relativement élevé (100–400 X) présente un gros inconvénient, puisqu'elle ne permet d'observer qu'une minuscule portion de l'échantillon. Cependant cet examen est indispensable à une description précise et détaillée des éléments constitutifs du mortier et du liant en particulier. Seule l'observation microscopique permet en effet de déterminer de façon absolument sûre la présence et les caractéristiques d'éventuels constituants hydrauliques. La technique métallographique (observation en lumière réfléchie) est celle qui convient le mieux pour ce genre d'investigations.

Même dans les meilleures conditions de conservation, l'hydratation d'un liant hydraulique contenu dans un mortier ou béton n'est jamais complète. Dans un mortier âgé de quelques mois, de quelques années, voire de plusieurs décennies, une partie des grains de liant est à l'état anhydre ou partiellement hydraté. Une fois ces grains repérés, il est aisé de faire les mêmes observations qu'il eût été possible de faire sur des liants anhydres d'origine, et ainsi de les caractériser. Pour atteindre ce but, une préparation très soigneuse des coupes revêt une importance capitale. Il est indispensable d'imprégner et de consolider l'échantillon avec un produit adéquat (généralement une résine, ou un mélange de résines synthétiques). Après consolidation du produit, la coupe doit être parfaitement polie sans provoquer d'arrachements. Dans ces conditions, la partie anhydre des grains apparaît généralement blanchâtre, bien distincte des produits d'hydratation amorphes, des grains de sable et des éventuelles cavités remplies de résine.

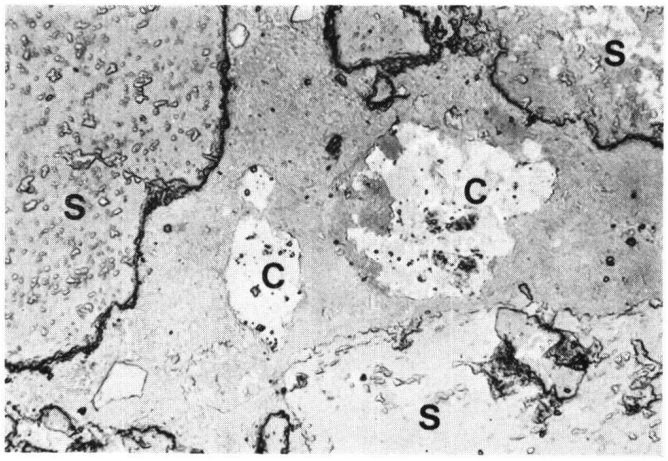


Fig. 4 Grains de ciment Portland anhydre dans un mortier (c = ciment, s = sable), 150 ×

La figure 4, prise sur un mortier au ciment Portland âgé d'environ une année, en témoigne. Les grains de sable sont indiqués par un «S», tandis que deux grains de ciment anhydres entourés de produits d'hydratation sont indiqués par un «C».

La structure des grains de ciment peut être mise en évidence par microattaques. Ainsi par exemple, les photographies n°s 5 et 6 montrent après attaque la partie anhydre de deux grains de ciment Portland actuel, c'est-à-dire obtenu par un procédé de fabrication très rationnel aboutissant à la formation de cristaux très bien développés. L'un des grains est formé essentiellement de cristaux de silicate bicalcique (S2C) de forme arrondie et l'autre de silicate tricalcique (S3C), principaux composés du ciment Portland.

Lorsqu'on examine de vieux mortiers datant du début de ce siècle ou de la deuxième partie du siècle passé, la nature, la structure et l'abondance des phases dans les grains de liant sont d'une très grande variété. Ceci dépend de divers facteurs tels que: composition et homogénéité du crû d'origine, conditions de cuisson et de trempe, etc... Si bien que les caractéristiques vont de celles d'un ciment analogue au Portland actuel à celles de la chaux hydraulique ou du ciment prompt.

Les figures 7 et 8 montrent, à titre d'exemple, des grains observés dans deux différents mortiers de la deuxième partie du siècle passé.

Les figures 9 et 10 montrent de manière plus détaillée la structure de 2 grains, repérée également parmi d'autres dans un mortier du XIXe siècle. L'une montre des cristaux de S3C partiellement transformés en S2C (par défaut de trempe) dans une abondante phase vitreuse constituée d'aluminoferrite tétracalcique (AF4C), d'aluminate tricalcique (A3C) et d'un autre aluminate. L'autre présente surtout des cristaux de S2C, caractérisés par une seule série de stries. L'examen en question a permis de

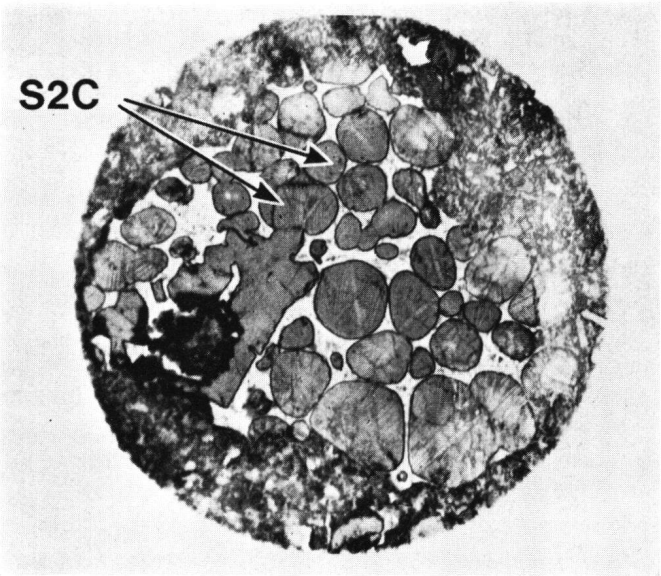
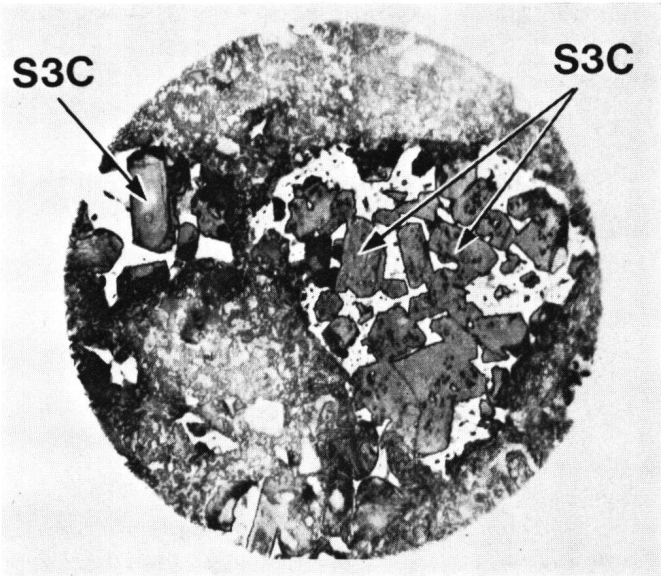


Fig. 5 Grains de ciment partiellement anhydre, formé essentiellement de silicate bicalcique (S2C). Attaque HNO_3, 300 ×

trancher de manière catégorique les divergences d'opinion surgies entre deux conservateurs, l'un prétendant qu'il s'agissait d'un enduit du XVIe siècle et l'autre du XIXe siècle.

En conclusion, l'examen microscopique permet de déceler la présence d'un liant hydraulique, de le caractériser et éventuellement d'établir des analogies entre mortiers en se basant sur certains aspects typiques du liant. Par contre, bien qu'il permette d'autres observations, il se révèle peu efficace à l'égard de la chaux aérienne.

Fig. 6 Grains de ciment partiellement anhydre, formé essentiellement de silicate tricalcique (S3C). Attaque HNO_3, 300 ×



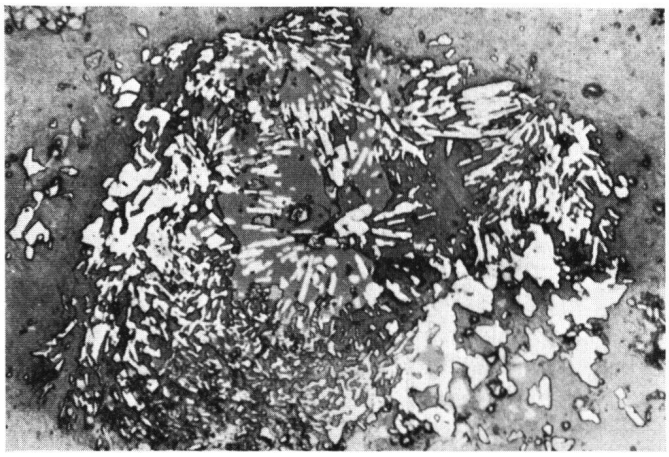


Fig. 7 Grain de liant hydraulique partiellement anhydre dans un mortier du XIXe siècle, 200 ×

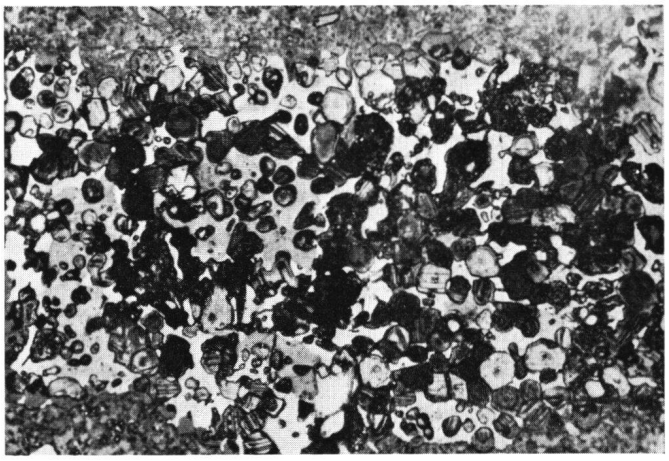


Fig. 8 Grain de liant hydraulique partiellement anhydre dans un mortier du XIXe siècle, 225 ×

3.7 *Examen macroscopique*

Cet examen permet la description d'autres caractéristiques telles que la grosseur et la nature des grains de sable, la proportion et la couleur du liant, l'homogénéité du mélange. Tous ces éléments ne peuvent vraiment être observés qu'à la loupe binoculaire, grossissant de 6 à 50 fois.

Pour permettre une bonne observation, il est indispensable de préparer les coupes selon la technique déjà décrite pour la microscopie. L'emploi de certaines résines implique une dessiccation parfaite des échantillons. De plus, la résine doit être absolument incolore pour ne pas fausser la teinte naturelle du mortier. L'observation macroscopique est plus rationnelle que le simple examen de chantier sur des fragments de mortier dont les surfaces non préparées, granuleuses, friables peuvent difficilement être comparées. Ce procédé a en outre l'avantage d'être beaucoup plus simple, plus rapide et par là moins coûteux que les autres techniques d'investigation. Ainsi, il doit constituer un premier pas vers une étude plus scientifique, et parfois les résultats obtenus peuvent suffire à résoudre le problème rencontré.

Cependant, l'archéologue doit disposer des résultats suffisamment tôt, alors que la fouille est encore ouverte, pour vérifier, en cas de doute, tous résultats contradictoires. Si elle se généralisait, cette méthode de comparaison requerrait la mise à disposition d'un matériel simple, tel que: cloche à vacuum, un appareil de polissage, pour permettre une préparation rapide des échantillons, et une loupe. Les coupes peuvent ensuite être aisément numérotées et conservées; elles constituent donc un matériel archéologi-

Fig. 9 Partie anhydre d'un grain de liant hydraulique dans un mortier du XIXe siècle. Attaque HNO_3 (S3C = silicate tricalcique, S2C = silicate bicalcique, A3C = aluminate tricalcique, AF4C = aluminoferrite tetracalcique), 950 ×

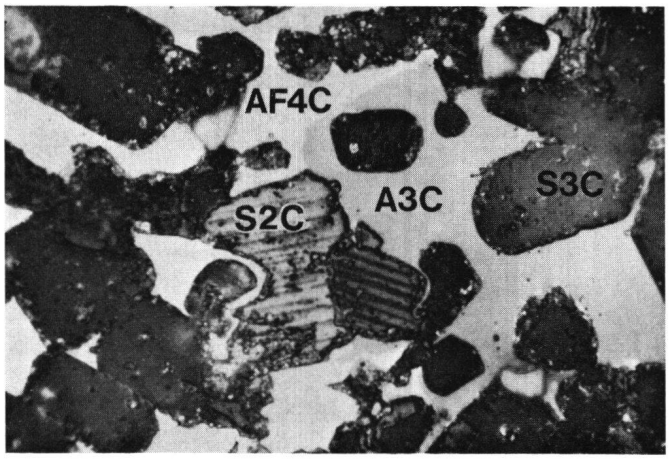
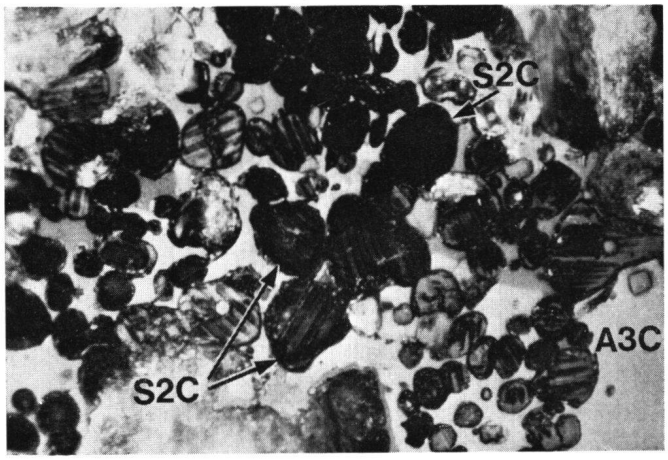


Fig. 10 Grain de liant hydraulique partiellement anhydre dans un mortier du XIXe siècle. Attaque HNO_3 (S2C = silicate bicalcique), 950 ×



que de choix, au même titre que les trouvailles, photos ou relevés, limitant ainsi un peu plus la destruction irrémédiable que représente toute fouille archéologique.

4. Problèmes de datation

4.1 *Analyse du ^{14}C*

Pour la datation des mortiers, certains chercheurs ont envisagé la méthode du ^{14}C, puisque la chaux hydratée se durcit par carbonatation au contact de l'air. Le mortier fixe ainsi des molécules de gaz carbonique. Or, un certain nombre des atomes de carbone sont des isotopes radioactifs, soit du ^{14}C, qui émet un rayonnement et se transforme en azote avec une périodicité de 5568 ans. Cela signifie que le nombre des isotopes diminue de moitié après chaque période, et qu'un échantillon est donc datable en fonction de sa teneur en isotopes.

Mais, quoi qu'en disent des chercheurs français[24], dans le cas du mortier la fixation de molécules de CO_2 pose un problème, puisqu'elle peut avoir lieu très longtemps après la mise en œuvre, si le mortier se trouve dans un endroit très peu accessible à l'air. Nous avons cité plus haut le cas extrême de mortiers romains, dont une partie de la chaux ne s'est jamais carbonatée; il est probable que dans de nombreux cas, la fixation du CO_2 ait eu lieu avec un retard important, ce phénomène faussant évidemment les datations.

Cette méthode, surtout utilisée pour des restes végétaux ou animaux, est maintenant à nouveau beaucoup discutée, après avoir connu un très grand succès. En effet, elle pose comme axiome que l'échantillon examiné renfermait, au moment de sa mort ou de sa carbonatation complète, une proportion déterminée d'isotopes radioactifs, et que cette proportion est la même pour tous les échantillons de toutes les époques. Un autre principe est que la quantité initiale d'isotopes ne s'est modifiée par la suite – indépendamment de toutes les influences extérieures possibles – qu'en fonction de la périodicité régulière du ^{14}C. Or, outre la simple erreur statistique que l'on peut calculer, il y a d'autres facteurs qui peuvent influer grandement sur les résultats, par exemple l'état de conservation et la contamination de l'échantillon, ainsi que la modification, au cours du temps, de la proportion de ^{14}C dans l'air.

Ainsi, les mortiers fabriqués entre 1700 et 1920 donnent tous la même datation; vers 1700, en effet, la teneur en ^{14}C de l'air était supérieure à la normale, au point que les échantillons de cette époque n'ont atteint la proportion normale que vers 1870. Ils ne se distinguent donc pas des échantillons qui se sont formés à ce moment-là. Après le milieu du XIXe siècle a eu lieu un dégagement massif de CO_2 sans isotopes radioactifs, dû aux émanations industrielles résultant de la combustion généralisée de charbon minéral. Cet apport fit baisser la proportion d'isotopes au-dessous de la normale, de sorte que les échantillons de 1920 en contiennent la même quantité que ceux de 1870. Entre 1954 et 1963 enfin, on a vu doubler la concentration de ^{14}C atmosphérique, à la suite des essais nucléaires[25].

Cette concentration n'a donc rien de stable. Toutefois, grâce à la dendrochronologie, les variations qu'elle a subies au cours du temps peuvent être calculées approximativement, jusque dans les temps préhistoriques, ce qui, pour la datation des mortiers, serait amplement suffisant. Mais une telle datation est rendue aléatoire par une autre cause d'erreurs: la contamination de l'échantillon par des calcaires organogénétiques qui peuvent être présents dans le matériau de remplissage (sable ou adjuvants). C'est là la raison principale de l'échec des essais réalisés par A. Walton et M.S. Baxter[26] qui ont analysé des échantillons provenant des monuments médiévaux anglais, datés avec précision. Pour tous ces édifices, la datation obtenue par le ^{14}C est beaucoup plus ancienne que leur âge réel, l'erreur pouvant aller, pour Oxford Castle, jusqu'à 6600 ans!

4.2 *Datation par thermoluminescence*

Cette nouvelle méthode de datation s'applique surtout aux carbonates et se base sur le fait que leur structure cristalline constitue en quelque sorte un piège à photons: en effet, lorsqu'une particule (provenant des radiations cosmiques ou terrestres) vient frapper un carbonate, elle pénètre dans la structure cristalline, en y créant un léger déséquilibre. Depuis les temps géologiques, les cristaux sont soumis à des radiations et emmagasinent donc de l'énergie; celle-ci peut être libérée – entre autre sous forme de lumière – au cours d'un fort échauffement du cristal (cuisson de pâtes céramiques ou calcination de calcaire). Dès lors, le «compteur» reprend à zéro, et le piégeage des photons recommence à nouveau. En mesurant l'émission au cours d'un fort échauffement, et connaissant la quantité d'énergie emmagasinée chaque année au lieu de la découverte archéologique (en tenant compte de la radioactivité du sol, de la concentration des éléments radioactifs contenus dans le mortier, etc.), on peut calculer l'âge de l'échantillon[27].

En ce qui concerne le mortier, le problème est une fois de plus de distinguer entre les carbonates appartenant à la chaux et les carbonates contenus dans le sable. Ces derniers, n'ayant pas été échauffés, ont conservé l'énergie emmagasinée depuis les temps géologiques. Aussi cette méthode de la thermoluminescence appliquée au mortier de chaux est-elle surtout théorique. De plus, avec les moyens actuels d'investigation, les périodes qui sont proches de nous ne peuvent encore être datées avec suffisamment de précision.

5. Conclusion

La conclusion qui se dégage de cette étude est qu'actuellement il n'existe aucune méthode simple et rapide pour l'identification et la datation des mortiers anciens.

En effet, ceux-ci constituent un ensemble assez complexe de matériaux hétérogènes, que l'homme de laboratoire doit chercher à dissocier, afin de parvenir à les caractériser efficacement. Or, pour identifier les constituants du liant, du sable et des éventuels adjuvants réunis lors du gâchage et intimement soudés par des réactions chimiques, plusieurs examens et analyses seraient nécessaires, chacun éclairant un aspect particulier du problème.

Pourtant, les techniques que nous avons énumérées au cours de cette étude, représentent un éventail de possibilités qu'il est exclu d'exploiter systématiquement dans la pratique courante. L'archéologue ne pourra recourir habituellement qu'à l'une ou à l'autre de ces techniques et, à titre exceptionnel seulement, à plusieurs d'entre elles, dans des cas particulièrement intéressants.

Pour les travaux usuels, on fera déjà œuvre de rationalité en pratiquant l'examen des échantillons dans de bonnes conditions. Cela peut se faire au moyen d'une préparation par enrobage de résine et polissage des coupes, ainsi que nous l'avons mentionné. L'examen macroscopique, en effet, est un outil idéal pour une première approche du problème; il autorise non seulement une comparaison plus efficace des échantillons d'une seule fouille, mais la conservation aisée de ceux-ci permet d'accumuler tout un matériel de comparaison sur une échelle plus vaste, en évitant le recours à des notions aussi mal définies que «assez friable» ou «gris plutôt brunâtre».

Cependant, il conviendrait de se soumettre, lorsque cela est possible, à une discipline d'analyses plus poussées, dans un but de recherches à plus long terme, pour arriver à mieux cerner l'apport scientifique des autres techniques et ainsi parvenir à une meilleure méthodologie.

Une telle démarche nous paraît souhaitable pour mieux connaître les techniques anciennes du mortier, d'autant plus qu'elle pourrait apporter des renseignements utiles lors des restaurations. Elle doit donc fournir, avec une documentation plus précise, les bases indispensables à un réel progrès et il n'est pas exclu de parvenir ainsi à une classification typologique et chronologique.

Cette approche du problème nous paraît pour le moment plus sûre et plus efficace que les essais de datation absolue au moyen de l'analyse du ^{14}C et de la thermoluminescence.

Zusammenfassung

Nach den griechischen und römischen Erfindungen haben die Verputztechniken jahrhundertelang kaum mehr weitere Entwicklungsphasen durchgemacht. Im Gegenteil: seit dem beginnenden Mittelalter geraten die römischen Fabrikationsrezepte des Kalks in Vergessenheit. Die Qualitätsunterschiede des Mörtels, die in dieser Zeit anzutreffen sind, muß man wahrscheinlich auf diese Ursache zurückführen; zudem schenkt man der Anfertigung des Mörtels weniger Aufmerksamkeit. Erst nach der Erfindung der hydraulischen Bindemittel erfährt die Entwicklung des Mörtels seit der Mitte des 19. Jahrhunderts eine technologische Revolution.

Wir besitzen heute keine sichere und rasche Methode, Mörtel aus früheren Zeiten zu identifizieren oder gar zu datieren. Die Bestimmung der Zusammensetzung verschiedener Materialien ist dabei von großer Wichtigkeit. So sind mehrere Untersuchungen und Analysen erforderlich, um Bindemittel, Sand oder sonstige Bestandteile, die bei der Mischung von Mörtel zusammenkommen und chemisch verbunden werden, zu identifizieren. Jeder Vorgang dieser Analyse belichtet einen Aspekt des Problems.

RÉFÉRENCES

1 J. Mellaart, *Çatal Hüyük, une des premières cités du monde* (trad. de l'anglais: Louis Frédéric), Paris 1971, p. 50.

2 R.R. Schmidt, *Jungsteinzeitsiedlungen im Fedeseemoor*, Stuttgart 1930, 1936, 1937, p. 58, 67, etc.
G.T. Schwarz, *Das Misox in ur- und frühgeschichtlicher Zeit*, Helvetia archaeologica, n° 6, 2/1971, p. 26–42.
M. Sitterding, *Eine spätbronzezeitliche Siedlung am Nußbaumersee*, Helvetia archaeologica, n° 9, 3/1972, p. 13–20.

3 J. Hoika, *Einige Analysenergebnisse zur Frage der Inkrustation in Keramikverzierungen der nordischen Trichterbecherkultur*, Archäologisches Korrespondenzblatt, 1, n° 2, 1971, p. 79–81.

4 M. Daumas, *Histoire générale des techniques*, Paris PUF 1962, t. I, p. 403.

5 A. Orlandos, *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs*, Paris 1966–1968, 2 vol., p. 136 ss.
R. Martin, *Manuel d'architecture grecque. Matériaux et techniques*, Paris 1965, vol. I, p. 373.

6 L. Santarelli, *Elementi di chimica del cemento*, Milano 1960.

7 Caton, *De re rustica. Les agronomes latins*, Paris 1861.

8 G. Lugli, *La technica edilizia romana con particolare riguardo a Roma et Lazio*, Roma 1957, vol. I–II.

9 P.M. Vitruve, *Œuvres complètes*, Ed. et trad. par Auguste Choisy, Paris 1971, 2 vol., t. I, chap. II, V, VI, t. II, chap. IV, VI.

10 M. Daumas, *Histoire générale des techniques*, Paris PUF 1962, t. I, p. 220.

[11] C. GRANGES, *Chaux et sels de chaux*, Paris 1894.
[12] M. VIOLLET-LE-DUC, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Paris 1863, t. VI, p. 402.
[13] R.D. BLECK/E. HENNIG, *Mörteluntersuchungen an mittelalterlichen Bauwerken in Thüringen*, Ausgrabungen und Funde 13, n° 5, 1968, «Rätsel...», p. 24–27.
[14] A. NAEF, *Chillon*. T.I: *La Camera Domini*, Genève 1908, p. 50.
[15] A. NAEF, *Chillon*. T.I: *La Camera Domini*, Genève 1908, p. VII, note 28.
[16] M. GRANDJEAN, *La ville de Lausanne. Les monuments d'art et d'histoire du canton de Vaud*, Bâle 1965, t. I, p. 43–44.
[17] A. MACHE, *Ciments et mortiers*, Paris 1935, p. 5ss.
[18] LEA, *The Chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold, 1970, p. 5.
[19] E. MARCOTTE, *Liants, chaux, ciments, plâtres, goudrons et bitumes*, Paris 1929, p. 3–4.
[20] ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS, cf. article *ciment*, p. 493.
[21] H. JEDRZEJEWSKA, *Old mortars in Poland: a new method of investigation*, Studies in conservation 5, 1960, n° 4, p. 132–138. *New methods in the investigation of ancient mortars*, Archæological Chemistry Symposium 3rd, Atlantic City 1962.
[22] T.D. CIACH/S. OSLER, *Recherches sur les mortiers du haut Moyen Age provenant des pavements des anciens monuments de Wislica*. Monumentum VIII, 1972, p. 55–69.
[23] V. FURLAN, *Analyse chimique d'échantillons de mortier provenant de l'église de Russin*, inédit, 1972.
[24] J. LABEYRIE/G. DELIBRIAS, *Dating of old mortars by the carbon-14 Method*, Nature, London, 201, n° 4920, 1964.
[25] H. WILKOMM, *Möglichkeiten der ^{14}C-Datierung*, Germania 1970, 48, n° 1–2, p.. 98–109.
[26] M.S. BAXTER/A. WALTON, *Radiocarbon dating of mortars*, Nature, London, 225, n° 5236, 1970, p. 937–938.
[27] S.J. FLEMING, *Thermoluminescent dating. Principles and application*. Naturwissenschaften 58, n° 7, 1971, p. 333–338.

COMPLÉMENT BIBLIOGRAPHIQUE

F.B. ANDREWS, *The medieval builder and his methods*, University Press, Oxford 1925.

G. BAND, *Le bâtiment. Technologie de la maçonnerie, matériaux, mise en œuvre*, Lausanne, Paris 1972.

J.L. BONDY, *Découvertes de traces d'exploitation de minerais de fer à l'époque gallo-romaine sur le territoire de la commune de Saint-Rémy du Nord*, Rev. Hist. Sidér., 6, n° 1, 1965.

Chronique des datations radio-carbone armoricaines, Annales de Bretagne, 72, n° 1, 1965.

C. CENNINI, *Le Livre de l'Art ou traité de la peinture*, Paris 1911.

Dictionnaire archéologique des techniques, Paris 1963.

G. DUMA/I. LENGYEL, *Calcareous mortars with vegetable fibers*, Epitoanyag 24, n° 5, 1972.

F. FERRARI, *Historical review of the use of hydraulic cements*, Cemento 65, n° 762, 763, 764; 66, n° 765, 766.

J. FORMIGE, Bulletin de la Société nationale des Antiquaires de France, 1945–1947, p. 74–75.

J.D. FRIERMANN, *Limeburning as the precursor of fired ceramics*, Israel Exploration Journal, 21, 1971.

E. HENNIG, cf. R.D. BLECK.

W. HORN, *The potential and limitations of Radiocarbon dating in the Middle Ages; the art historians view*, Scientific Methods in Medieval archæology, University of California Press 1970.

D. KNOOP/G.P. JONES, *The medieval mason*, Manchester 1933.

La construction au Moyen Age. Histoire et archéologie, Actes du congrès de la Société des Historiens Médiévistes de l'Enseignement Supérieur Public (Besançon 2–4 juin 1972), Paris 1973.

W.F. LIBBY, *Dating by radiocarbon*, Accounts chem. Research 5, n° 9, 1972.

C. MATHIEU, *Observations sur le matériau d'une construction gallo-romaine*, Cahier des Naturalistes 27, n° 3, 1971.

I.U. OLSON, *Radiocarbon variations and absolute chronology*, Nobel Symposium 12, Stockholm 1970.

L.F. SALZMANN, *Building in England down to 1540*, Oxford 1952.

H. SCHLAEGER/D.J. BLACKMANN/J. SCHAEFER, *Der Hafen von Anthedon mit Beiträgen zur Topographie und Geschichte der Stadt*. Archäologischer Anzeiger, n° 1, 1968 (par Gerd ANGER: Etude pétrographique des mortiers du port).

H. SEYER, *Ausgrabungen in der Kölner Petrikirche. Ein Beitrag zur Frühgeschichte von Berlin*. Zeitschrift für Archäologie 3, n° 1, 1969 (Analyses de mortier par R.D. BLECK).

J.H. WILLIAMS, *Roman Building Materials in South East England*, Britannia II, 1971.

PROVENANCE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1–10: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département des matériaux. Laboratoire des matériaux pierreux