

Notes

techniques



MONUMENTS ANCIENS

## La chaux à travers les âges

François-Xavier DELOYE

Chef de la section Chimie analytique

Service Chimie

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Qu'il s'agisse d'un mur de soutènement ou de défense, d'un ouvrage d'art ou d'un monument, toute construction en pierre ou en brique (qui n'est pas monolithique) nécessite l'emploi d'un liant pour assurer durablement la cohésion de son assemblage, notamment son aptitude à résister aux intempéries et aux séismes.

Ce n'est pas un effet du hasard si les constructions les plus anciennes, qui soient parvenues jusqu'à nous, se situent dans des contrées au climat particulièrement sec comme la vallée du Nil, où l'on peut encore voir des voûtes, datant du Moyen Empire, constituées de briques simplement séchées au soleil et jointoyées à l'aide du limon du fleuve. Pour parler de liant plus élaboré, les blocs de grès du temple de Karnak étaient assemblés, dès le règne d'Aménophis II, à l'aide de plâtre surcuit ; mais cela se passait toujours sur les bords du Nil et il est aisé de comprendre que de telles constructions n'auraient pas résisté trois mille cinq cents ans dans une région au climat un tant soit peu humide.

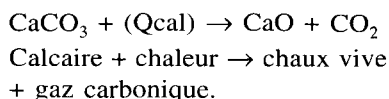
L'abondance de l'eau s'accompagne généralement d'une végétation luxuriante où les arbres sont susceptibles de fournir le combustible nécessaire à la fabrication de la chaux.

On ne peut que se perdre en conjectures sur les origines de l'utilisation de la chaux pour la maçonnerie. D'une façon plausible, on peut penser que certains artisans qui voulaient fabriquer des briques blanches ont fait

cuire par hasard de la craie et qu'ils ont obtenu un produit, certes blanc, mais friable, très dangereux à manipuler et qui se transformait en une sorte de pâte avec un grand dégagement de chaleur et de vapeur lorsqu'il était mis en contact avec l'eau. Ils ont tout d'abord dû jeter ce produit qui ne servait à rien et constater par la suite qu'il durcissait très lentement, même en présence d'humidité, ce qui tout compte fait pouvait être utile.

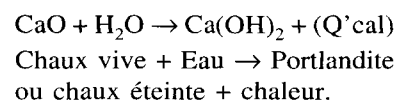
Il est également possible que la découverte des propriétés de la chaux et de sa fabrication aient eu lieu indépendamment en différents points de la Terre. Mais il ne peut, toutefois, s'agir là que d'hypothèses difficilement vérifiables.

Pendant toute l'Antiquité et même durant le Haut Moyen Âge, la technique de cuisson de la chaux a très peu évolué. En four intermittent : simple trou creusé à flanc de talus, elle consistait à réaliser un empilement plus ou moins savant de pierre à chaux (calcaire) et de bois en ménageant des vides pour que l'air puisse alimenter la combustion, puis à mettre le feu. Lorsque la température de décarbonatation était atteinte, elle se stabilisait à une valeur comprise entre 630 °C et 650 °C pour ne plus bouger avant que la dissociation ne soit complète, en raison du caractère fortement endothermique de la réaction :



La fin de la réaction étant aisément perceptible pour un chauffournier quelque peu averti (diminution de la quantité de gaz émis et reprise de la montée en température) il était alors facile d'arrêter les feux en bouchant les entrées d'air, ne serait-ce que pour ne pas gaspiller le combustible. Il est même permis de penser que la cuisson de la chaux ait entraîné l'invention du charbon de bois.

La chaux vive ainsi obtenue (l'oxyde de calcium) est un produit extrêmement dangereux que l'on doit éteindre pour le rendre utilisable en maçonnerie. Cette extinction à l'eau a pour but de transformer l'oxyde en hydroxyde suivant la réaction d'hydratation suivante :



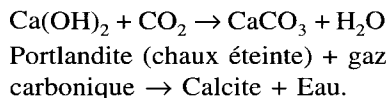
Cette réaction fortement exothermique s'accompagne d'un foisonnement important qui très souvent entraîne l'effritement du produit, ce qui dispense le chauffournier d'un broyage.

L'extinction de la chaux a pu, dans les premiers temps, se produire naturellement dans les pays humides, simplement en laissant pourrir sur place la chaux vive avec les cendres, qu'il était préférable de ne pas toucher. C'est ce que laisse supposer une analyse effectuée sur du mortier provenant de la pyramide de Tajin au Mexique, laquelle montre qu'une réaction à caractère pouzzolanique s'est développée entre la chaux du mortier et les cendres du combustible, reconnaissables à leur composition chimique.

Avant l'utilisation de la chaux, les constructions en pierres sèches, parfois plus ou moins liées par de l'argile, existaient déjà, surtout dans le domaine de la défense et dans l'art sacré. Elles vieillissaient très mal car les racines des plantes s'accommodent fort bien des argiles et des interstices entre les pierres ; leur croissance est capable en un temps relativement court de

disloquer un mur en pierres sèches, même bien appareillé. Enfin, le liant éventuel (limon, argile ou torchis) se délitait petit à petit sous l'effet des intempéries.

La supériorité de la chaux réside essentiellement dans le caractère irréversible de son durcissement, obtenu très lentement par carbonation atmosphérique, suivant la réaction :



Celle-ci nécessite de l'eau au départ, car  $\text{CO}_2$  ne réagit pas à sec sur la Portlandite mais l'humidité de l'air suffit pour cela et, de plus, la réaction libère de l'eau.

La calcite produite est tout simplement de la pierre à chaux reconstituée, elle ne se délite plus une fois durcie et, de ce fait, participe à la résistance de l'ensemble. En plus de la permanence du durcissement, la chaux possède tout ce qu'avait apporté le limon ou l'argile dans la mise en œuvre d'une maçonnerie : plasticité pour la pose des blocs et participation à la répartition des contraintes, sans présenter les inconvénients cités plus haut, à savoir le caractère labile de la liaison et l'accueil de la végétation.

Vis-à-vis de ce dernier inconvénient, la basicité conférée par la chaux éteinte (pH 12,5) interdit, pour longtemps, la fixation des racines et, plus généralement, toute prolifération végétale.

Par ailleurs, de même qu'une argile, la Portlandite (chaux éteinte) est formée de fines plaquettes hexagonales (fig. 1) à peine plus grosses que celles d'un kaolin (fig. 2), ces plaquettes ne dépassent pas quelques micromètres. Cette texture lui confère une plasticité au moins égale à celle d'un limon, nécessaire pour une mise en place aisée des blocs de pierre ou des briques. Il s'ensuit que les premiers maçons qui l'ont utilisée n'ont pas été déroutés par

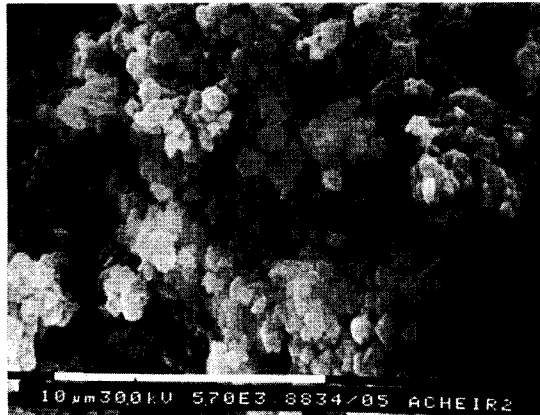


Fig. 1 -  
Chaux éteinte  
dans un monument  
ancien.  
Vue au microscope  
à balayage x 5 000.

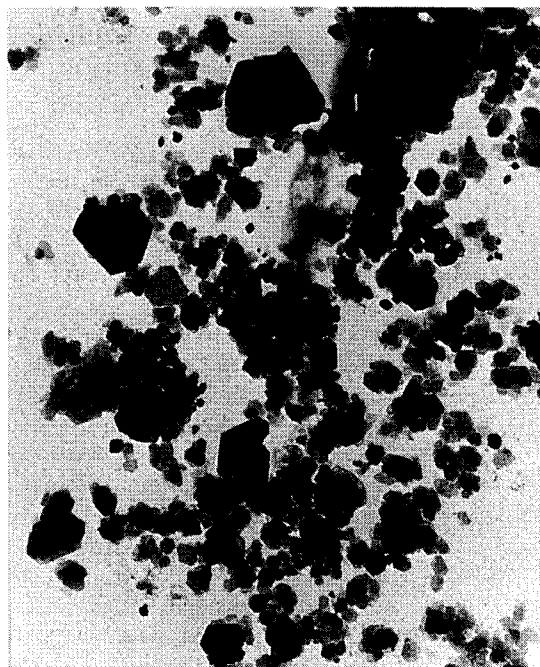


Fig. 2 -  
Kaolin de Provins.  
Vue au microscope  
à transmission  
x 15 000.

rapport à leurs anciennes habitudes et ils ont dû avoir l'agréable surprise de constater une meilleure adaptation de la structure en place, au fur et à mesure de la construction. Ceci grâce à l'aptitude du mortier de chaux à répartir les contraintes en raison de son extrême lenteur à se rigidifier par carbonatation, cette dernière ne se terminant très souvent que bien après l'achèvement de l'édifice. À ce propos, il existe des murs byzantins dont le cœur est encore mou et présente un pH supérieur à 12.

Cette faculté d'adaptation a été très tôt mise à profit pour construire des monuments à la fois plus hauts et plus durables,

même dans des contrées au climat relativement humide. Ainsi, le torchis fût petit à petit relégué dès l'Antiquité au rang de remplissage dans des éléments tels que des cloisons dont la structure porteuse était en bois ou pour réaliser des constructions modestes dont il ne reste que très peu de choses.

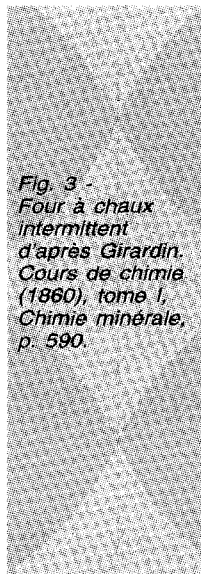
De toute évidence, la qualité de la chaux produite dans les fours intermittents dépendait naturellement de la pureté de la pierre à chaux utilisée : s'il s'agissait d'un calcaire ou d'une craie pure, on obtenait de la chaux grasse, c'est-à-dire liante et plastique. S'il s'agissait d'un calcaire assez siliceux, le produit était

moins octueux et la chaux était déclarée *maigre*, car moins facile à mettre en œuvre. Mais, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce ne sont pas les calcaires les plus purs qui ont donné les meilleurs résultats en matière de pérennité des constructions.

En dehors des marbres et de certaines craies très pures, les calcaires sont plus ou moins argileux. Entre 450 °C et 600 °C, toutes les argiles perdent leurs hydroxyles sans que leur structure minérale soit complètement modifiée. Ce n'est qu'à une température nettement plus élevée, comprise entre 750 °C et 800 °C, que commencent les recombinaisons, avec formation d'un verre, d'aluminates de chaux puis de silicates à plus haute température ; or les chauffourniers antiques étouffaient leurs feux vers 700 °C dès que la carbonatation était achevée, c'est-à-dire lorsque les argiles présentes dans les pierres à chaux étaient simplement déshydroxylées, donc involontairement transformées en pouzzolanes artificielles. De ce fait, les chaux maigres, celles qui en contenaient le plus, étaient les meilleures... mais à long terme.

La technologie d'élaboration de la chaux n'évoluera pas durant toute l'Antiquité, pendant le Haut Moyen Âge et même la période byzantine dans l'empire d'Orient. Le seul fait marquant à prendre en considération est l'invention du *ciment romain*, qui a la propriété de durcir sous l'eau même en milieu marin. Il s'agit d'un ajout volontaire de terre de Pouzzole à de la chaux plus ou moins grasse. Cela a permis la construction d'ouvrages hydrauliques et surtout maritimes impossibles à réaliser auparavant.

Il est très probable que la mise au point du matériau en question soit issue de nombreux tâtonnements, mais des vestiges de mortiers de cette nature, immergés en permanence, existent bien aux environs de Naples et d'Ostie, or ils sont antérieurs à l'ère chrétienne. Ceci prouve bien la durabilité légendaire du ciment romain.



Cependant, Rome n'a pas eu l'exclusivité de cette invention car les balinais, qui fabriquent depuis la plus haute antiquité, de la chaux à partir des coraux qui entourent leur île en se servant de noix de coco comme combustible, mélangent depuis toujours et encore actuellement, celle-ci avec les cendres de leur volcan sacré l'Agung, ces dernières étant censées conférer aux mortiers qui en contiennent des propriétés miraculeuses.... L'origine religieuse de cette pratique efficace se perd dans la nuit des temps, mais c'est ainsi que l'on peut voir de nos jours, dans l'île de Bali, des murets de rizières en terrasses datant du second siècle avant J.-C. entretenus certes, mais toujours opérationnels.

Dans les deux cas, pour des raisons diverses à Rome comme à Bali, il s'agit en fait d'une incorporation, volontaire et intentionnelle, de cendres de volcan présentant des propriétés pouzzolaniques dans des mortiers à la chaux ; et il n'est pas impossible que cette invention ait pu avoir lieu indépendamment dans d'autres contrées volcaniques.

Les cendres ne sont pas les seuls matériaux présentant une activité pouzzolanique, c'est-à-dire la capacité de consommer de la chaux pour former des produits hydratés silico-calciques ou alu-

mino-calciques aux propriétés liantes (comme la terre de Pouzzole, d'où le nom). Pour cela il faut un silico-aluminate hors équilibre thermodynamique, un verre par exemple ou une argile deshydroxylée, finement divisée. Si les cendres de volcan répondent généralement bien à cette définition, il en va de même pour les déchets (incuits) de fabrication des tuiles et des briques. Les romains s'en sont aperçus dans des conditions que l'on ignore mais ils ont utilisé ces sous produits, les *tuileaux*, comme succédanés dans des provinces éloignées où les pouzzolanes faisaient défaut.

Ce savoir a été transmis aux gallo-romains, qui l'ont exploité pendant de longs siècles. Toutefois vers le milieu du Moyen Âge, les raisons de l'incorporation de tuileaux dans les mortiers ont fini par tomber dans l'oubli, car on en rencontre de moins en moins en analysant les mortiers réalisés postérieurement, au XII<sup>e</sup> siècle.

Une invention du Moyen Âge va révolutionner les méthodes de production de la chaux. Il s'agit du four droit continu : au lieu de cuire le calcaire dans une sorte de cuve (fig. 3) et de laisser refroidir le tout lorsque l'opération est terminée, le four vertical (une sorte de cheminée très large) est chargé par la partie

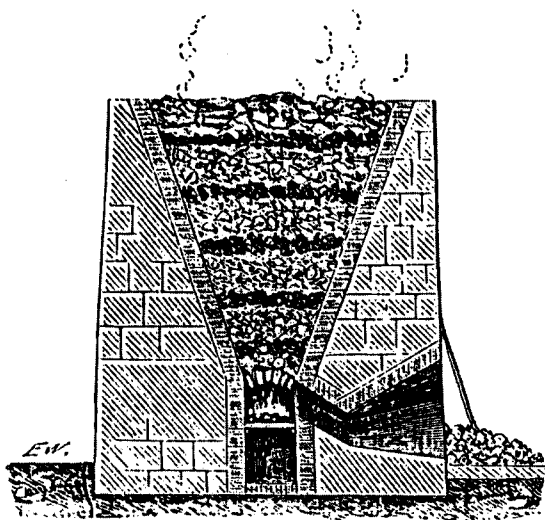


Fig. 4 -  
Four à chaux  
continu  
d'après Girardin,  
Cours de chimie  
(1860), tome I,  
Chimie minérale,  
p. 591.

supérieure alternativement d'un lit de combustible et d'un lit de pierres à chaux (fig. 4) le feu est continu et passe d'un lit de bois au suivant pendant que la matière descend ; le défournement se fait à la partie inférieure, qui sert également d'entrée d'air tandis que les gaz de combustion s'échappent par l'orifice de chargement.

Le gros avantage de ce mode de cuisson réside dans le rendement : économie de combustible par double récupération de chaleur et accroissement de la production unitaire. La cuisson est plus rapide, ce qui implique une température finale plus élevée, permise du fait que la combustion s'effectue avec de l'air réchauffé par la chaux déjà cuite.

Dans la cuisson au four droit, en raison de la température finale, les argiles contenues dans le calcaire de départ peuvent se recombinaison sous forme d'aluminates de calcium et même de silicate bicalcique, constituant des nodules très durs, rassemblés en sortes de grappes baptisées *grappier* par les chauffourniers, du fait de leur apparence. Le grappier étant très dur et ne présentant *a priori* aucun intérêt était séparé par tamisage et mis au rebut. La chaux obtenue était plus blanche et plus pure.

Cette révolution technologique était un progrès incontestable, mais, vis-à-vis de la durabilité des constructions, il n'en demeure pas

moins que l'élévation de la température de cuisson de la chaux a privé les maçons de l'apport, si minime soit-il, constitué par la pouzzolanité involontaire des argiles déshydroxylées. La chaux cuite au four droit est devenue exclusivement aérienne, hormis l'infime activité hydraulique de quelques petits grains de grappier qui sont passés au travers des mailles du tamis.

En France, du XIV<sup>e</sup> siècle jusque vers le milieu du XVII<sup>e</sup> siècle, il n'y aura pratiquement aucune nouveauté majeure en dehors de l'amélioration continue du four droit. La chaux apparaît alors comme un produit de bonne réputation, comme l'indique l'adage populaire « bâti à chaux et à sable », synonyme de résistant et durable.

À la fin de la période classique, peut-être à cause du regain d'intérêt pour les choses anciennes qu'a suscité la Renaissance, l'incorporation de tuileaux dans les mortiers fait sa réapparition, mais d'une façon différente : sous forme de débris de tuiles ou de briques manifestement broyés, peut-être pour donner aux enduits un ton rosé si prisé dans les constructions italiennes. La pouzzolanité, qui en résulte, demeure cependant très faible en raison du degré de cuisson que ces granulats artificiels ont subi, comme en atteste la présence de

mullite détectée dans certains mortiers.

Au même moment, le développement de la navigation s'accompagne de celui des ports, avec la nécessité de construire en milieu marin. Sous l'impulsion de la monarchie, des recherches sont entreprises, précisément pour résoudre ce problème. Celles-ci prennent en compte les écrits des anciens sur l'incorporation de cendres volcaniques dans les mortiers de chaux et des observations éparses faites par certains chauffourniers, par exemple le fait que les grappiers avaient tendance à prendre en masse au bout d'un certain temps, parfois même sous l'eau. Il faut dire que l'augmentation de la température de cuisson de la chaux facilitait la combinaison de la silice et de l'alumine avec l'oxyde de calcium, rendant le grappier de plus en plus réactif.

Selon toute vraisemblance, à cette époque, l'amalgame a pu être fait par certains esprits curieux entre les grappiers et les produits volcaniques utilisés par les anciens, si bien que l'on eut l'heureuse idée de broyer le grappier pour le réincorporer au mortier plutôt que de le jeter, signant ainsi l'acte de naissance de deux produits plus performants que la chaux pour l'époque, puisqu'ils étaient capables de durcir sous l'eau : il s'agit du ciment de grappier et de la chaux hydraulique. Ce sont les précurseurs des ciments actuels, car ils possèdent déjà une hydraulicité au sens moderne du terme.

À partir de là, l'histoire s'accélère puisqu'il ne faudra pas plus de cinquante ans pour qu'apparaisse le ciment Portland proprement dit, en 1756 avec le brevet de Smeaton en Angleterre et la création d'usines fabriquant du ciment naturel en France, grâce à la qualité de certaines marnes comme celles de Wassy ou de Port-de-France. Le principe qui a conduit à cette évolution consiste tout simplement à ne produire dans le four à chaux que du grappier (qui prend alors le nom de clinker), qu'il suffit de broyer pour obtenir le produit fini.

Un peu plus tard, à l'orée du XIX<sup>e</sup> siècle, et grâce aux travaux de Vicat, on a réalisé artificiellement le mélange de craie et d'argile, qui se trouvent intimement mêlées d'une façon naturelle dans les marnes donnant du ciment naturel, créant de ce fait le ciment Portland artificiel (notre actuel CPA), par cuisson de ce mélange et broyage du clinker produit en présence d'un peu de gypse.

Pourtant, malgré la supériorité du ciment, la production de la chaux n'en a pas moins perduré malgré toutes les tentatives plus ou moins fructueuses effectuées pour la remplacer par les ciments amaigris, baptisés du nom générique de *liant à maçonner*. La chaux a

résisté grâce aux propriétés spécifiques que ce produit confère au mortier, principalement au moment de la mise en œuvre, qu'il s'agisse de jointoyer une maçonnerie ou d'enduire une façade. La révision actuelle des normes sur les chaux aériennes et hydrauliques est là pour en attester.

De nos jours, on réalise encore des mortiers bâtards chaux-ciment pour bénéficier dans la mesure du possible des avantages propres aux deux types de liants.

La brève histoire de la chaux qui vient de vous être proposée ne résulte pas d'une suite de réflexions plus ou moins spéculatives. Elle découle de la lecture

attentive des résultats d'une centaine d'analyses minéralogiques quantitatives de mortiers antiques, ou simplement anciens, réalisées dans nos laboratoires. Les mortiers étudiés sont répartis dans des lieux parfois aussi éloignés que le Mexique ou la Grèce, leur période de mise en place s'échelonne du second millénaire avant J.-C. jusqu'à la fin du siècle dernier, avec, toutefois, une prédominance pour la période allant des gallo-romains au XVIII<sup>e</sup> siècle. Cette lecture des analyses a été faite à la lumière des connaissances que l'on a de la chimie des silicates, tant dans le domaine de la céramique que dans celui des liants hydrauliques. \_\_\_\_\_