

Frédéric Davidovits (Université de Caen)

ANDROSTENE DI TASO E IL PERIPLO DELL'INDIA

Introduction: l'invention de la chaux

D'un point de vue général, l'invention de la fabrication d'un liant, à partir de la cuisson d'une roche, semble être aussi ancienne que l'art du potier. La cuisson du calcaire pour la chaux ou du gypse pour le plâtre semble tirer leur origine du four du potier. Déjà les parois de la ville de Çatal Höyük au sixième millénaire, reçurent des enduits de plâtre, mais c'est l'Égypte du III^e millénaire qui semble, la première, avoir eu l'idée de lier les pierres à l'aide d'un mortier de plâtre. C'est l'Orient qui va, durant de longs siècles, conserver 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. Si la chaux était parfaitement connue des Grecs, ils en limitèrent l'usage à la fabrication des stucs, des enduits peints et des enduits de citernes.¹ Les Grecs connaissaient parfaitement le mode opératoire de la chaux: celle-ci 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".

La révolution architecturale romaine.

Mais ce sont les Romains qui seront à l'origine d'un emploi "industriel" de la chaux. De plus, par rapport aux Grecs, ils 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. Cette manière de procéder allait révolutionner l'architecture romaine. Ils mêlaient ensemble de la chaux et de la pouzzolane de Campanie (*pulvis*) ou du sable volcanique (*harenae fossicia*) ou encore du sable volcanique, mais cuit au four cette fois (*carbunculus*). Lorsque la pouzzolane ou le sable volcanique faisaient défaut, ils fabriquaient des liants à base de chaux et de *testa* pilée (tuile ou brique d'argile kaolinique broyée). Les Romains emploieront de façon systématique ce mélange de chaux et d'éléments réactifs naturels ou artificiels 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.

Dans son ouvrage, J. C. Anderson Jr. décrit cette révolution architecturale, dûe au mortier de kaolinite calciné et de sable volcanique.² Les murs faits avec des assises en pierre de taille ne peuvent

¹ Cf. G. Lugli, *La tecnica edilizia romana, con particolare riguardo a Roma e Lazio*, tome 1, Rome, 1957, p. 363 sq. ; R. Martin, *Manuel d'archéologie grecque*, tome 1, *Matériaux et techniques*, Paris, 1965, p. 430 sq. ; J.-P. Adam, *La construction romaine, matériaux et techniques*, Paris, 1989, p. 69 sq. ; R. Sersale, *La storia della calce dell'antichità ai nostri giorni*, in "L'industria italiana del cemento", 1, 1991, p. 56-62.)

² J. C. Anderson Jr., *Roman Architecture and Society*, Baltimore, 1997, p. 146-147.

fournir à eux seuls la véritable résistance d'un mur, laquelle s'obtient en versant un mélange de ciment "pouzzolanique" et d'agrégats entre des parements de tuf taillé, de briques, ou de moellons. Ces parements déjà en place font corps avec le béton, quand ce dernier est versé. En même temps ils protègent extérieurement le béton ce qui élimine le besoin de moule. Le béton prend la forme du moule ou du coffrage dans lequel il est versé, ainsi on évite de le tailler. "La plasticité inhérente au béton obligera les architectes romains à expérimenter et à inventer de nouvelles solutions voûtées, plutôt que le traditionnel "pilier et linteau", à tel point que les arcs et voûtes de béton devinrent un des principes fondamentaux de *design* dans le répertoire de l'architecture romaine."³

La maîtrise de la chaux et des ajouts hydrauliques permettent au béton de durcir au coeur de la voûte ou du mur sans le gaz carbonique de l'air. En effet, il faut savoir que l'air ne peut traverser une couche de chaux aérienne déjà carbonatée épaisse d'au moins 1,125 cm.⁴ Cela signifie que la chaux qui est au delà de 1, 125 cm ne peut pas durcir. Sans les ajouts hydrauliques que les Romains ajoutaient à la chaux aérienne, le béton ne peut prendre et donc les murs et les voûtes de béton ou voûtes concrètes ne peuvent être stables.

On le voit, ces ajouts sont à l'origine d'une révolution architecturale qui a son origine peut-être lors de l'édification du Porticus Aemilia, ce gigantesque entrepôt construit entre -193 et -174. La maîtrise des voûtes concrètes date probablement de cette époque.

Ce développement technique apparut en Italie romaine au moment même où les bâtisseurs romains étaient influencés par la grandeur architecturale des royaumes hellénistiques et par les créations extraordinaires des architectes grecs, comme Hermogènes. Le résultat fut la création de ce que Vitruve appella en architecture, *consuetudo italica*, qui est la formation d'un style romain vraiment marqué d'architecture monumentale, qui est basé sur la résistance et la plasticité du mortier, plutôt que sur les propriétés structurales des pierres de taille avec un parement de tuf taillé de maçonnerie de briques, puis décoré avec un enduit ou du marbre. Quoique Vitruve ne développe pas dans son ouvrage la fabrication des voûtes de béton, il s'en fait l'écho dans le chapitre 4 du livre II.

Les mélanges expérimentaux calcaire-argile.

Au Moyen-Age, aucun progrès ne fut fait dans la recherche des ciments et l'on recherchait en vain, en suivant à la lettre les instructions de Vitruve et de Pline l'Ancien, le fameux secret du "ciment romain". En effet, nombre d'architectes et d'érudits tentèrent de mêler de la chaux et de la brique pilée et varièrent à l'infini les proportions de chaux et de brique dans leurs préparations. Mais à chaque fois, ils essayaient échec sur échec.⁵ En effet, seule la kaolinite a la particularité de réagir avec la chaux.

Mais il faut relativiser cette vision d'un Moyen-Age, qui ne pouvait retrouver le secret du "ciment romain". En Italie, la *testa* fut toujours employée avec la chaux depuis la fin de l'antiquité et l'exemple le plus impressionnant de la pérennité de cette technique est le béton de fondation en *coccio pesto*, qui soutient l'immense et lourd baldaquin de bronze de la basilique Saint Pierre à Rome.

³ *Op. cit.* p. 147: "Furthermore, since concrete will take on the form of the mold or frame into which it is poured, rather than having to be cut to shape, the plasticity inherent in concrete challenged Roman architects to experiment and devise new solutions, often arched or vaulted rather than post-and-lintel, to the point that the arch and the vault executed in concrete became one of the fundamental design principles in the repertoire of the Roman architect."

⁴ W. M. Patton, *A Treatise on Civil Engineering*, New-york, 1975, p. 175; David Moore, *The Roman Pantheon, The Triumph of Roman Concrete*, Office Outlet, Pinedale, 1995, p. 49-69.

⁵ M. Frizot, *Mortiers et enduits peints antiques. Etude technique et archéologique*, Dijon, 1975, p. 14-15.

Puisqu'en Europe du nord les 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 argileux 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 fait, cela pouvait fonctionner en prenant n'importe quelle argile (montmorionite ou kaolinite). En 1818, Vicat publia ses recherches: il avait inventé le principe du ciment portland qui est une chaux hydraulique artificielle.⁶ Ainsi, c'est en voulant recréer le ciment imperméable que décrit Vitruve, que les savants inventèrent tout à fait autre chose: le "ciment artificiel" ou "ciment Portland".

L'invention d'une chaux hydraulique artificielle romaine?

L'histoire de la découverte du portland, par Parker et Vicat, amène à se poser une question: si Vicat a eu l'idée de mélanger ensemble calcaire et argile et de cuire ensuite le tout, pourquoi les Romains n'en auraient-ils pas fait autant? Après tout, ils étaient suffisamment habiles pour imaginer un tel procédé. De plus l'invention du portland au début du XIX^e siècle annonça le début de l'emploi du béton et donc de la révolution architecturale au XX^e siècle, avec Le Corbusier notamment.

Or, les ingénieurs romains ont fait des mélanges: Vitruve (2, 5, 2) mentionne cette expérience, après avoir parlé des pierres à chaux et de leur nature diverse: "Si la chaux assure la solidité de la maçonnerie quand de l'eau et du sable s'y trouvent mêlés, la raison en est certainement que les pierres [*saxa*], comme tous les autres corps, sont un dosage des quatre éléments [*e principijs*]. Celles qui ont plus d'air sont tendres; celles qui ont plus d'eau sont rendues malléables par l'humidité; celles qui ont plus de terre sont dures; celles qui ont plus de feu se brisent facilement." [7]

Vitruve reprend la théorie des quatre éléments qu'il a présentée au chapitre 2 du livre II. Il en tire une typologie des pierres calcaires fondée sur la prédominance de tel ou tel élément, bien conscient malgré tout du fait que ce qui doit être expliqué est le durcissement du mélange artificiel, qu'il va développer dans la phrase suivante, et aussi le durcissement du mortier "standart" de chaux et d'*harena fossicia*, lorsque ce liant est joint aux *caementa* [8].

La phrase suivante de Vitruve (2, 5, 2) est la preuve que les Romains ont fait des expériences de mélanges: "C'est pourquoi, si les pierres, avant d'être cuites, sont broyées en petits morceaux et mêlées à du sable volcanique, et si elles sont incorporées dans la maçonnerie, elles ne durcissent pas et elles ne peuvent la maintenir." [9]

Cette phrase de Vitruve appelle quelques commentaires. D'abord, c'est la preuve que les ingénieurs romains ont fait des expériences de mélange pour améliorer les produits existants et que Vicat a eu les mêmes idées 1800 ans plus tard. Les Romains ont donc voulu faire un mélange artificiel calcaire-sable volcanique comme Vicat a fait des mélanges calcaire-argile. Les pierres sont peut-être des calcaires, facilement broyables. De plus, il semble évident que les ingénieurs voulaient gagner du temps en mettant ensemble dans un même four deux matériaux, que l'on faisait jusque là cuire séparément et que l'on réunissait seulement pour le gâchage, la chaux et, pour prendre un autre produit plus courant, la *testa*. En effet, ces deux matériaux sont obtenus entre 800 et 900 °C. Il aurait donc été logique, pour les ingénieurs de cuire ensemble ces deux produits, par économie de temps et de combustibles.

Quelle est la nature de l'*harena*, que Vitruve mêle au calcaire broyé avant que l'on cuise le tout? La réponse est évidente: c'est l'*harena fossicia*, du sable volcanique. Comme nous l'avons dit

⁶ J. L. Vicat, *Recherches expérimentales sur les chaux hydrauliques, les bétons, et les mortiers ordinaires*, Paris, 1818.

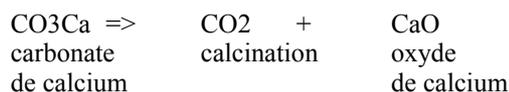
ci-dessus, les ingénieurs ont cuit ensemble des matériaux, calcaire et sable volcanique, qui étaient calcinés séparément. Ce sable volcanique cuit au four porte un nom que Vitruve a donné en 2, 4, 1: le *carbunculus*. Ce procédé de la cuisson au four du sable volcanique est la confirmation que le *carbunculus* est bien le produit artificiel, que nous avons mis en évidence dans une précédente publication [10]. Calcinés ensemble à la même température (800-900 °C), le sable volcanique et le calcaire deviennent réactifs en même temps.

Ce nouveau procédé permettait d'épargner du temps et du combustible. De plus, les matériaux sont cuits à une température plus basse que celle requis par le ciment de Vicat (1200 °C). Mais comme le remarque Vitruve, ce mélange n'était pas utilisable dans la maçonnerie: le liant ne durcit pas et comme disent les maçons, il est alors "mort". On peut supposer que c'est la façon de travailler des *structores* romains qui peut en être la cause. En effet ils trituraient la chaux éteinte avec soin et lentement, pour écraser les nodules de chaux mal cuite. Dès que le mélange entre en contact avec l'eau, les réactions chimiques d'hydratation entrent en action et ce trop rapidement. Donc le mortier a déjà réagi dans les grains pris individuellement et quand les maçons l'intègrent à l'*opus caementicium*, il ne durcit plus. Pour éviter cela, il aurait fallu que les *structores* changent leur méthode de travail ou qu'ils ajoutent un agent retardateur. C'étaient des procédés trop complexes, et les méthodes traditionnelles avaient fait leurs preuves depuis longtemps: le mélange de chaux et de sable volcanique ou de *testa* sur le chantier permettait au maçon de faire la mise en oeuvre du mur.

Dans la bibliographie archéologique et technique, nous n'avons pas de commentaires concernant cette phrase de Vitruve. Pour quiconque s'intéressant à l'histoire des mortiers anciens et modernes, il aurait été logique de faire le lien avec les expériences de Vicat.

La cuisson de la chaux.

Avant d'aborder les autres problèmes de la chaux dans le texte de Vitruve, il convient de rappeler quelques notions élémentaires la concernant. La chaux est obtenue par cuisson de pierre calcaire 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). On effectue alors l'hydratation ou extinction de la chaux. Cela se fait par immersion dans l'eau et provoque la dislocation des blocs. Ceux-ci foisonnent, dégagent une forte chaleur et se transforment en pâte qui est la chaux éteinte. C'est ce matériau plastique que l'on va mêler aux agrégats pour obtenir les mortiers. Vitruve (2, 5, 1) appelle *calx extincta* ou *calx evanida* (7, 2, 2 et 7, 3, 7) la "chaux éteinte", mais notre architecte ne s'étend guère sur la calcination du calcaire.

L'opération chimique de l'extinction de la chaux 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:



de calcium

de calcium

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 montmorionitiques ou illitiques, qui dans certaines régions sont justement les plus aptes à fabriquer des briques et des tuiles.

“L'extrême lenteur du phénomène de prise [de la chaux], qui est la caractéristique des calcaires purs, était fort prisée 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. Les chaudourniers et les maçons avaient remarqué que les marbres répondaient parfaitement à ces caractéristiques, de même que les calcaires blancs.” [11]. Tels sont les avantages, dépeints par J.-P. Adam, de l'utilisation systématique de la chaux aérienne par les Romains.

Les différentes sortes de chaux.

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

1. Les chaux aériennes, ainsi nommées car la prise s'effectue seulement en présence du gaz carbonique (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 de l'oxyde de calcium pur, ou bien contient 0,1 à 1 % d'argile.

b) la chaux maigre, qui contient 2 à 8 % d'argile. Même en faible proportion, l'argile a une influence non négligeable sur l'oxyde de calcium, puisque l'on peut supposer que le calcaire a une proportion d'argile d'origine de 10 à 12 %.

2. Les chaux hydrauliques peuvent prendre sous l'eau. Ainsi un mortier encore frais, lié avec de telles chaux, peut être submergé après mise en forme, sans que son durcissement soit interrompu. Elles sont 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 kaolinitique, de la *testa*; comme le conseille Vitruve (2, 5, 3). On obtient alors un liant hydraulique, qui fut la principale découverte des Romains concernant le domaine architectural. Toutes ces chaux hydrauliques naturelles ou non, après calcination et extinction, durcissent seules sans l'intervention du gaz carbonique.

En théorie, telles sont les différentes chaux qu'employèrent les Romains. Or, dans la pratique, l'on n'est pas sûr de l'emploi de chaux hydraulique par les ingénieurs Romains, et, J.-P. Adam écrit que les “analyses contemporaines font apparaître que les constructeurs romains n'ont utilisé que des chaux aériennes.” [12] M. Frizot remarque que, dans les mortiers antiques, la chaux s'est entièrement carbonatée, alors que dans les liants médiévaux, la chaux n'a pas encore durci. Cela revient à dire qu'il lui faut plusieurs siècles pour durcir! Donc à quoi bon construire un bâtiment avec la chaux s'il faut attendre tout ce temps pour l'utiliser! C'est évidemment absurde, si l'on veut expliquer la solidité des monuments romains par la seule carbonatation de la chaux. Mais M. Frizot met en avant les silicates solubles, issus des éléments volcaniques et du “tuileau” dont l'action sur la

prise du mortier est complète avant la très lente carbonatation de la chaux. Ces silicates sont apportés par le tuileau, dont la nature poreuse favorise la pénétration de la chaux [13]. M. Frizot remarque que la chaux hydraulique a pu être employée localement pour des bâtiments, mais qu'il est difficile d'attester un emploi systématique de cette chaux.

Par conséquent, pour les spécialistes des mortiers anciens, Vitruve, dans le chapitre 5 du livre II, décrit une chaux aérienne. En fait, il faut examiner attentivement le texte de Vitruve pour déterminer quelle type de pierre ou de chaux, il recommande pour les murs et pour les enduits.

La chaux hydraulique de Vitruve.

Vitruve en 2, 5, 2-3 décrit le phénomène de chaleur dans l'extinction de la chaux. Les pierres sont comme tous les corps, composés de quatre éléments [*principia*]. Ainsi "celles qui ont plus d'air sont tendres; celles qui ont plus d'eau sont rendues malléables par l'humidité; celles qui ont plus de terre sont dures; celles qui ont plus de feu se brisent facilement." La cuisson au four a chassé les éléments "liquide" *liquor* et "air" *aer* de la pierre, mais il reste de la chaleur cachée *in se residuum calorem latentem*; c'est ce qui permet à la chaux d'être allumée par l'eau. Bref, l'eau prend la place des éléments, qui avaient été chassés par la cuisson.

Vitruve donne ainsi les explications du phénomène de chaleur, lors de l'extinction et explique la différence de poids de la pierre avant et après la cuisson. "En conséquence le poids des pierres à chaux que l'on sort du four ne peut pas être égal à celui qu'elles ont au moment où on les y jette: quand on les pèse, et bien qu'elles conservent le même volume, on constate - l'eau ayant disparu sous l'effet de la chaleur - que leur poids est diminué d'environ un tiers." [14] On sait qu'il existe une différence de poids entre la pierre calcaire et la chaux [15]. Cette différence de poids d'un tiers est fondamentale dans la suite de notre étude.

Si Vitruve ne décrit pas la cuisson de la chaux (il en dit plus en 7, 3, 7), il indique la "perte au feu" des pierres calcaires qu'il calcine. Cette perte au feu désigne l'évaporation du dioxyde de carbone du calcaire à la cuisson. Cette indication va nous permettre de déterminer quelle type de calcaire Vitruve calcine. Dans le cas idéal où la pierre contient 100 % de calcite (CaCO_3), la cuisson fait perdre 44 % de CO_2 à la pierre. Celle-ci perd donc 44 % de son poids et on obtient une chaux très grasse, la meilleure des chaux aériennes. Les calcaires, qui sont composés à 95 % de calcite et 5% de silice ont une perte au feu de 43 % et donnent donc une chaux moyennement grasse. Cette perte diminue jusqu'à 40 %, si le calcaire contient 10 % de silice; la chaux est alors maigre et faiblement hydraulique.

Vitruve dit que la différence de poids est d'un tiers environ *circiter tertia parte ponderis* après la cuisson: la perte au feu est donc de 33 %, soit un calcaire, qui contient avant cuisson 75 % de CaCO_3 et 25 % de matériau siliceux: la chaux est alors maigre et moyennement hydraulique.

Quel calcaire choisit Vitruve?

En 2, 5, 1, il écrit: "Une fois traitée la question des différents sables que l'on trouve, on s'intéressera plus particulièrement aussi à la chaux: celle-ci doit être obtenue par calcination de pierre blanche ou de roche solide; celle qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure conviendra pour la maçonnerie, celle qui sera faite avec une pierre poreuse, pour les enduits." [16]

Vitruve prend donc des calcaires durs et blancs *uti de albo saxo aut silice coquatur*. Ce calcaire dur, qui a une perte au feu de 33 %, correspond à une pierre contenant 75 % de CaCO_3 et 25 % d'autres éléments, qui ne sont pas des argiles rouges, mais qui peuvent être des argiles blanches. Le

calcaire dur blanc et siliceux correspond à la description d'un calcaire compact blanc à grain très fin et à fracture conchoïdale. On trouve cette pierre en Italie du nord. C'est un calcaire de type roche sédimentaire organogène. Il existe bien sûr d'autres couleurs: jaunâtres, roses, rouges dues à la présence d'ocres limonitiques ou hématiques, grises et noires à cause de pigments charbonneux ou de bitumineux. Le grain est fin, voire même très fin et la tessiture est compacte. La stratigraphie est d'habitude peu nette, ce qui a pour conséquence une fracture conchoïdale: la cassure est de même nature que celle qu'on obtient sur un verre ou un silex [17]. Donc le calcaire compact et siliceux de Vitruve a l'aspect d'un silex blanc. Ce calcaire contient autour de 20 % de silice.

Après l'extinction, il se forme du silicate de calcium qui est un composant majeur des chaux hydrauliques et du ciment portland. La chaux, qu'obtient Vitruve est, d'après nos critères modernes, une chaux hydraulique. La présence de la chaux hydraulique dans les mortiers a été discuté par de nombreux auteurs dont J.-P. Adam [18]. M. Frizot est plus nuancé: "Nous pensons en effet que si des chaux hydrauliques ont été employées dans l'Antiquité (et cela est rarement prouvé), c'est plutôt par méprise ou hasard que par connaissance réelle des possibilités." [19]

Cette indication de Vitruve, sur la perte d'un tiers de poids du calcaire calciné est étonnante. Elle contredit ce que l'on pensait jusqu'à présent, à savoir que les Romains n'ont employé que de la chaux aérienne. On ne peut pas supposer l'altération du texte latin car l'apparat critique n'en révèle aucun. F. Krohn, qui a établi la version du texte latin de Vitruve en 1912 chez Teubner à Leipzig, a transféré cette phrase de 2, 5, 3 à la fin du paragraphe précédent (2, 5, 2), car Vitruve fait un retour à la phase de la calcination, après l'évocation de l'hydratation. Mais P. Gros n'est pas d'accord avec ce déplacement et écrit: "C'est oublier, au nom d'une logique technique ou opératoire, la logique propre au théoricien qui entend préparer la formule conclusive du chapitre, laquelle prétend expliquer la cohésion de la maçonnerie concrète." [20]

Il paraît donc étonnant que personne n'ait vérifié la proportion fournie par Vitruve, pour déterminer quel type de pierre calcaire il calcinait et en conséquence quelle chaux il obtenait. Peut-être a-t-on supposé que cela n'en valait pas la peine, puisque l'on postulait par principe que seule la pierre blanche donne *ipso facto* de la chaux aérienne, alors qu'il s'agit sans discussion d'une chaux hydraulique.

La couleur du calcaire.

La couleur du calcaire à calciner (*de albo saxo aut silice*: "à partir de roche blanche ou de pierre dure") est blanche *album*. D'après l'étude de J. André, l'adjectif *albus* est "le blanc dépourvu d'éclat" et il s'oppose à *candidus* "blanc éclatant" [21]. Servius, *ad. G.* 3, 82 différencie les deux adjectifs: *aliud est candidum esse, id est quadam nitenti luce perfusum, aliud album, quod pallori constat esse vicinum*. *Albus* désigne aussi le blanc des peintres (Plin. *nat.* 35, 50; 35, 64; Apul. *mund.* 20, 334).

Concernant le marbre, Théophraste (lapid. 9) atteste de son emploi pour la chaux [22]. Dans la locution de *albo saxo aut silice*, *albo* est en facteur commun avec *saxo* et *silice*, comme l'indique le texte de Palladius (1, 10, 3: *albo saxo duro*). En latin, l'adjectif épithète de plusieurs noms s'accorde avec le plus proche: *Ardor gaudiumque maximum*: "une ardeur et une joie extrêmes". La règle est classique et est connue sous l'expression d'*accord de voisinage*. C'est ainsi que dans son édition de Vitruve, Morris H. Morgan traduit que la chaux cuite "à partir d'une pierre, qu'elle soit tendre ou dure, est en tout cas blanche." [23]

Le classement des chaux de Vitruve est donc claire: la chaux hydraulique pour le béton est issue de pierre compact et assez dure [*ex spisso et duriore*] et cette description correspond au calcaire

compact, qui contient autour de 20 % de silice. La chaux issue de pierre poreuse [*ex fistuloso*], donnera une excellente chaux aérienne, pour les enduits.

Les chaux employés chez Pline l’Ancien.

Si Vitruve recommande le *silix* pour la chaux, ce n’est pas le cas de Pline (*nat.* 36, 174) qui écrit que la chaux “provenant de pierre dure est davantage indiquée pour la construction, celle issue de pierres poreuses davantage pour les enduits. Pour l’un et l’autre usage, on rejette celle provenant de la silice.” [24] La traduction de J. André reste vague, car il reprend en partie la traduction et le commentaire de K. C. Bailey. Celui-ci renonce, dans le paragraphe 168 à trouver en anglais un équivalent à *silix*, car il semble impossible de trouver une traduction satisfaisante [25]. De plus, le commentaire de 36, 174 indique que *ex silice* peut désigner un tuf calcaire. Dans ce cas, pourquoi Pline condamne-t-il le *silix*? A cela, il peut y avoir plusieurs réponses. D’abord, une technique: la chaux de Vitruve, est comme nous l’avons vu, hydraulique, et le développement de l’architecture concrète a exigé sans doute une standardisation de la préparation de chaux. La chaux de l’époque de Pline l’Ancien est aérienne et il n’est nul besoin de produire de la chaux hydraulique, car les Romains ajoutent de la *testa* à la chaux aérienne.

Le terme *silix* chez les auteurs anciens.

Le mot *silix* signifie “caillou, pierre dure”, “roche, petite ou grande”, “pierre à feu” [26]. Le mot peut donc désigner aussi bien une pierre siliceuse qu’une lave. Chez Pline l’Ancien, *silix* désigne toute sorte de roche. Ainsi en 36, 135, il parle du *Luniensis silix*, qui est le marbre de Carrare. Plus loin, en 36, 168, Pline donne plus de précision sur le *silix*: “Les meilleurs *silix* sont noirs, en certains lieux aussi rouges, quelquefois encore blancs comme dans les carrières d’Anicius qui se trouvent sur le territoire de Tarquinies, près du lac de Volsinies et sur le territoire de Statonia. A ces derniers, le feu lui-même ne fait aucun mal. Les mêmes aussi, quand on les sculpte dans des monuments, durent sans que la vieillesse les altère; on en fait des moules dans lesquels on fond les bronzes.” [27]

Le texte de Pline reprend Vitruve 2, 7, 3-4. Si le commentaire du livre 36 indique que les *silices* noires et rouges sont des tufs d’origine volcanique, les variétés blanches [*silices albi*] des environs de Volsinies et de Statonia sont considérés comme du “tuf calcaire blanc” [28]. Or, il s’agit d’une erreur, car d’après les propriétés de cette pierre dure blanche mentionnées par Vitruve et Pline, c’est du *peperino*, de même nature, que celui des monts Albins. Du calcaire n’aurait pas été utilisé comme moule de fonderie. Le pépérin (italien *peperino*) est cette roche volcanique à l’aspect poivré et qui est défini par R. Ginouvès et R. Martin, comme une “roche (éruptive) formée par la cimentation de sable volcanique, de cendres, de scories: c’est donc une variété de tuf volcanique.” En latin, le pépérin est qualifié de *lapis albanus*, ou *saxum albanus*: la pierre d’Albe. On trouve aussi *lapis gabinus* ou *saxum gabinum*, qui est la pierre de Gabies [29]. Le pépérin d’Etrurie méridionale, celui dont Vitruve et Pline parle, se trouve à Bolsena et à Albenga. L’exemple archéologique de l’emploi du pépérin en Etrurie se trouve dans le théâtre romain de la ville étrusque de Ferento, près de Viterbo, dont la fondation ne remonte pas au-delà du IV^e s. avant J.-C. L’étude de ce théâtre a mis en évidence un schéma planimétrique qui semble avoir été influencé par les principes vitruviens du livre V [30]. G. Lugli ajoute que la pierre de Manziana, composée de feldspath vitreux et de mica a été identifiée avec la pierre des carrières d’Anicius, qu’on trouve, dit Vitruve, autour du lac de Bolsena et de Statonia [31]. Pline, qui reprend Vitruve, décrit donc un *silix* blanc, qui est de toute évidence une roche volcanique blanchâtre, dont la composition rappelle le pépérin ou la pierre de Manziana, et qui a une très bonne tenue au feu. En métallurgie, les minerais fondent quand ils atteignent la température de fusion. Or Théophraste (*lapid.* 9) mentionne que le marbre ne fond pas à l’inverse des minerais métalliques, car celui-ci est entièrement brûlé et se transforme en chaux. Apparemment, seul le test du

feu permettait de différencier un calcaire blanchâtre d'une roche volcanique de la même couleur. Le test classique du calcaire qui fait effervescence avec un acide dilué ne fonctionne ni avec une roche volcanique ni avec un calcaire dolomitique. Il est donc évident que seules la calcination et l'extinction d'une roche, peut indiquer s'il s'agit d'un calcaire. Il n'est donc pas étonnant que Pline ne recommande pas le *silex* blanc, pour faire de la chaux, s'il s'agit de roche volcanique ou de dolomite.

Conclusion

Nous avons vu que Vitruve, en 2, 5, 2, a fait mention d'une expérience originale, dans l'amélioration des mortiers existants: les ingénieurs romains ont fait des mélanges calcaire-sable volcanique comme Vicat, au XIX^e siècle, qui l'avait fait avec du calcaire et de l'argile. Ces mélanges sont ensuite cuits dans les fours. L'ajout de sable volcanique au calcaire broyé confirme que le carbunculus est un sable volcanique cuit au four. Malheureusement, ce klinker calcaire-sable volcanique était inadapté aux méthodes des maçons romains, car il durcissait trop rapidement.

D'autre part, Vitruve, remarque qu'après la cuisson, les pierres calcaires perdent un tiers de leur poids [*circiter tertia parte ponderis*]. Cette constatation est l'indice de la calcination d'un calcaire contenant autour de 20 % de silicates: il s'agit bien d'une chaux moyennement hydraulique. Or notre architecte a bien conscience du caractère hydraulique de la chaux et recommande un calcaire compact siliceux pour l'édification des murs, car le classement qu'il donne en 2, 5, 1 des usages ressemble à celui, moderne, de la distinction chaux aérienne et hydraulique: "Une fois traitée la question des différents sables que l'on trouve, on s'intéressera plus particulièrement aussi à la chaux: celle-ci doit être obtenue par calcination de pierre blanche ou de roche solide; celle qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure conviendra pour la maçonnerie, celle qui sera faite avec une pierre poreuse, pour les enduits." [32]

H.-O. Lamprecht, spécialiste allemand connu pour l'étude des mortiers anciens, écrit qu'il faut tenir compte de plusieurs facteurs lorsque l'on fait le mortier pour l'*opus caementicium*: la chaux, et les adjuvants qui lui confère l'hydraulicité nécessaire. Vitruve indique que c'est le calcaire le plus blanc qui produit la meilleure chaux pour le bâtiment. Mais pour Lamprecht cette remarque ne peut s'appliquer qu'à la chaux aérienne, puisqu'une chaux hydraulique ou très hydraulique, exige, comme matière première, un calcaire argileux, donc impur et coloré [33].

H.-O. Lamprecht n'a pas vu que le calcaire blanc de Vitruve était un calcaire siliceux et c'est pour cela qu'il déduit que son raisonnement est faux. Or Vitruve recommande ce calcaire siliceux précieusement pour l'édification des murs, ce qui implique le caractère fortement hydraulique exigé par H.-O. Lamprecht. Il est curieux qu'il n'ait pas fait plus attention à la constatation de Vitruve indiquant, qu'au cours de la cuisson, les pierres calcaires perdent un tiers de leur poids [*circiter tertia parte ponderis*]. H.-O. Lamprecht aurait aussi très vite compris que Vitruve connaissait et recommandait l'usage de cette chaux hydraulique pour le bâtiment.

Notes.

[1]

[2]

[3]

[4]

[5]

[6]

[7] Vitruve, *De l'architecture*, livre 2, édit. Louis Callebaut, Pierre Gros et Catherine Jacquemard, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1999: *Quare autem cum recipit aquam et harenam calx, tunc confirmat structuram, haec esse causa videtur quod e principiis, uti cetera*

corpora, ita et saxa sunt temperata. Et quae plus habent aeris, sunt tenera; quae aquae, lenta sunt ab umore; quae terrae, dura; quae ignis, fragiliora.

[8] Cf. l'introduction de P. Gros du livre II de Vitruve, p. XXV sq. et son commentaire de Vitruv. 2, 5, 2, p. 92.

[9] Vitruv. 2, 5, 2: *Itaque ex his saxa si, antequam coquantur, contusa minute mixta harenae in structuram coiciantur, non solidescunt nec eam poterunt continere.*

[10] F. Davidovits, "A la recherche du carbunculus", in *Voces*, 5, 1994, p. 33-46.

[11] J.-P. Adam, *op. cit.* p. 76.

[12] *Idem* p. 75.

[13] M. Frizot, *op. cit.* p. 310-318.

[14] Vitruv. 2, 5, 3: *Ideo autem, quo pondere saxa coiciuntur in fornacem, cum eximuntur, non possunt ad id respondere, sed cum expenduntur, permanente ea magnitudine, excocto liquore, circiter tertia parte ponderis inminuta esse inveniuntur.*

[15] Cf. J.-P. Adam, *op. cit.* p. 75; David Moore, *op. cit.* p. 49-69.

[16] Vitruv. 2, 5, 1: *De harenae copiis cum habeatur explicatum, tum etiam de calce diligentia est adhibenda uti de albo saxo aut silice coquatur; et quae erit ex spisso et duriore erit utilis in structura, quae autem ex fistuloso, in tectoriis.*

[17] Annibale Mottana, Ridolfo Crespi, Giuseppe Liborio, *Minerali e rocce*, dixième édition, Arnoldo Mondadori Editore, 1993, p. 339.

[18] J.-P. Adam, *op. cit.* p. 76.

[19] M. Frizot, *op. cit.*, p. 328.

[20] Vitruve, *De l'architecture, livre 2*, édit. Louis Callebaut, Pierre Gros et Catherine Jacquemard, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1999, n. 2, p. 92.

[21] J. André, *Etude sur les termes de couleurs dans la langue latine*, Paris, 1949.

[22] Le marbre, par rapport aux autres calcaires, brille à cause des grains de calcite. Si l'on se base sur l'opposition *albus/candidus*, le marbre blanc brillant serait défini comme *candidus*.

[23] Vitruvius, *The Ten Books on Architecture*, edit. Morris Hicky Morgan, Londres, 1914: "Sand and its sources having been thus treated, next with regard to lime we must be careful that it is burned from a stone which, whether soft or hard, is in any case white."

[24] Pline l'Ancien, *Histoire Naturelle*, livre 36, édit. J. André, R. Bloch, A. Rouveret, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1981; *Plin. nat.* 36, 174: *Quae ex duro, structurae utilior; quae ex fistuloso, tectoriis; ad utrumque damnatur ex silice.*

[25] K. C. Bailey, *The Elder Pliny's Chapters on Chemical Subjects*, Arnold, Londres, 1932, tome 2, p. 271.

[26]] Le dictionnaire latin-anglais Lidell-Scott indique qu'il s'agit d'abord d'une pierre dure trouvée dans un champ, ensuite que c'est une pierre dure en général.

[27] *Plin. nat.* 36, 168: *Nigri silices optimi, quibusdam in locis et rubentes, nonnusquam uero et albi, sicut in Tarquinienis Anicianis lapicidinis circa lacum Volsiniensem et in Statoniensi, quibus ne ignis quidem nocet. Idem et in monimentis scalpti contra uetustatem quoque incorrupti permanent; ex iis formae fiunt, in quibus aera funduntur.*

[28] *Op. cit.* p. 227.

[29] René Ginouvès, Roland Martin, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*, tome 1, *Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor*, Ecoles françaises de Rome et d'Athènes, Rome, 1985, p. 40.

[30] P. Pensabene, *Il teatro romano di Ferento*, Rome, 1989, p. 3 sq.

[31] G. Lugli, *op. cit.*, I, p. 317; l'identification a été faite par F. Corsi, *Delle pietre antiche*, Rome, 1845, p. 72 sq.

[32] Vitruv. 2, 5, 1: *De harenae copiis cum habeatur explicatum, tum etiam de calce diligentia est adhibenda uti de albo saxo aut silice coquatur; et quae erit ex spisso et duriore erit utilis in structura, quae autem ex fistuloso, in tectoriis.*

[33]] H.-O. Lamprecht, *Opus caementitium, Bautechnik der Römer*, cinquième édition corrigée, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1996, p. 44-45: "Welche Gesichtspunkte waren bei der Mörtelherstellung für das *opus caementitium* zu beachten? Die Funktion des Bindemittels übernehmen der gebrannte Kalk und häufig hydraulische Zusätze. Vitruv geht davon aus, daß der reinste (weiße) Kalkstein den besten Baukalk ergibt. Diese Meinung ist jedoch nur für Luftkalk zutreffend, da ein hydraulischer oder ein hochhydraulischer Kalk einen tonhaltigen - also nicht reinen - Kalkstein als Ausgangsprodukt erfordert."

RESUME

Dans son traité d'architecture, Vitruve (2, 5) explique comment fabriquer de la chaux à partir d'un type de pierre calcaire. Il mentionne (2, 5, 2) une expérience de calcination d'un klinker, composé de calcaire broyé et de sable volcanique. Cette expérience confirme que le *carbunculus* est un sable volcanique cuit au four. De plus, en 2, 5, 3, pour la chaux il indique qu'après la calcination, le calcaire a perdu un tiers de son poids [*circiter tertia parte ponderis*]. On en déduit que le calcaire a 20 % de silicates et l'on obtient une chaux moyennement hydraulique. Vitruve, recommande pour l'édification des murs [*in structura*], l'usage d'une chaux faite d'un calcaire siliceux compact et assez dur [*ex spisso et duriore*], ce qui implique le caractère hydraulique exigé pour un tel usage. Pour les enduits [*in tectoriis*], la chaux est aérienne issue de pierre poreuse [*ex fistuloso*].