

La chaux

Définitions et histoire

par **Gilles MARTINET**

Directeur général du LERM, Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux

et **Philippe SOUCHU**

Documentaliste au LERM, Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux

1. Le calcaire, la pierre à chaux	C 922 – 2
2. La chaux, toute une histoire	— 2
2.1 Archéologie de la chaux	— 2
2.2 La chaux dans l'histoire de la construction	— 2
2.2.1 Période gréco-romaine	— 2
2.2.2 Période médiévale	— 3
2.3 Les liants des Lumières (ou lumière sur les liants)	— 3
3. La chaux : ce que la chimie a permis de comprendre	— 4
3.1 Cuisson du calcaire, création de la chaux	— 4
3.2 Extinction de la chaux vive	— 4
3.3 Les « deux » chaux	— 5
3.3.1 Chaux aérienne ou chaux grasse	— 5
3.3.2 Chaux hydraulique ou chaux maigre	— 5
3.4 Mécanismes de durcissement et de prise	— 5
3.4.1 Carbonatation ou prise aérienne	— 5
3.4.2 Hydratation ou prise hydraulique	— 5
3.4.3 Réaction pouzzolanique	— 6
4. Conclusion	— 6
Pour en savoir plus	Doc. C 922

La chaux est à la fois le liant minéral majeur de l'histoire de la construction et un des produits minéraux les plus utilisés depuis le début de l'ère industrielle. Avant la chaux, le plâtre, fut la première matière cuite pour réaliser l'acte de construire. Issu du gypse, roche évaporitique, il fut notamment maîtrisé dès l'Ancien Empire de l'époque pharaonique. Puis, les mélanges avec des matériaux carbonatés apparurent.

Le présent article ne cherchera pas à retracer l'histoire des liants minéraux et se focalisera sur la chaux seule. L'apparition des ciments dits « naturels » et des ciments dits « Portland » suivra dans le temps, même si cette chronologie linéaire n'est pas si simple : tous ces produits ont parfois cohabité et cohabitent encore.

Après la présentation de la matière première, ce document retracera l'évolution de l'utilisation de la chaux dans la construction, les expérimentations séculaires dont elle fut l'objet, et l'apport de la science à sa compréhension.

La dernière partie sera consacrée à lister simplement les données, réactions et définitions chimiques acquises et tentera de faire le lien avec deux documents de cette collection qui traiteront dans le détail, pour l'un de la chaux aérienne, pour l'autre de la chaux hydraulique.

1. Le calcaire, la pierre à chaux

Pour évoquer la chaux, il faut en premier lieu parler de la matière première : le calcaire.

Sans calcaire, pas de chaux.

Le calcaire est le cru, la chaux est le cuit.

Les calcaires sont des roches sédimentaires très abondantes dans la constitution superficielle de la croûte de notre terre. Elles sont composées majoritairement de carbonate de calcium (CaCO_3) et, dans une moindre mesure, de carbonate de magnésium ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Lorsque ces roches comportent une proportion non négligeable d'argiles, on utilise des terminologies telles que « marne calcaire » ou « calcaire argileux ».

■ Leurs **principales caractéristiques** sont les suivantes :

- du point de vue chimique : elles contiennent au moins 50 % de calcite (CaCO_3), ont généralement une faible dureté et font effervescence à l'acide chlorhydrique (dégagement de CO_2) ;
- du point de vue géologique : elles proviennent la plupart du temps de l'accumulation de dépôts, fossiles ou terrigènes. Elles peuvent être aussi issues de précipitations chimiques ou biochimiques.

■ Leur **classification** est faite suivant leurs caractéristiques principales :

- la proportion de calcite : calcaire pur, dolomitique, argileux... ;
- le milieu de dépôt : calcaire marin, lacustre, continental... ;
- la taille des grains : calcaire micritique (calcite microcristalline dont la taille n'excède pas 10 μm), sparitique (calcite spathique d'environ 100 μm), grossier (calcite de plus de 200 μm) ;
- leur texture, leur compacité, la nature et/ou la quantité de fossiles : calcaire marbrier, coquillier, oolithique, récifal, à milioles...

■ Les roches calcaires (figure 1) sont **aujourd'hui utilisées** comme :

- matériau ornemental (sculpture et statuaire) ;
- roche à bâtir dans la construction ;
- matériau de voirie ;
- sable et granulats dans la fabrication des mortiers, des bétons, des assises de chaussée et des enrobés bitumineux ;
- charge minérale pulvérulente dans divers produits industriels (plastiques, colles, récurrents...) ;
- fondant dans la fusion du verre (en sable) et dans la fusion des métaux ferreux (en castines) ;
- amendement calcique agricole pour lutter contre l'acidification du sol ;



Figure 1 – Carrière de calcaire – Pierre à bâtir (Source Lerm)

- apport de calcium, dans l'alimentation des animaux d'élevage ;
- matière première entrant dans la fabrication de chaux ou de ciment.

C'est ce dernier point qui intéresse cet article. Le paragraphe suivant résume comment l'homme va développer la fabrication, l'usage et la compréhension des liants minéraux à partir de la cuisson des roches carbonatées.

2. La chaux, toute une histoire

Les usages de la chaux ont largement précédé la connaissance rationnelle des mécanismes de sa fabrication et de sa prise. Jusqu'au 19^e siècle, ce sont donc les savoirs empiriques qui ont guidé les pratiques des chaudronniers, des maçons et des architectes. Les usages de ce matériau, qui a permis des réalisations architecturales, artistiques et domestiques majeures, ont recoupé ce que l'analyse scientifique a ensuite dénommé décarbonatation, prise aérienne, réaction pouzzolanique et prise hydraulique.

Nous nous proposons, dans cette partie historique, de suivre les péripéties de l'usage de la chaux dans le domaine de la construction, péripéties qui trouveront leurs explications et leur conclusion dans les recherches des chimistes et des ingénieurs de la fin du 18^e et du début du 19^e siècles, recherches qui ouvriront les voies de l'exploitation rationnelle et industrielle des propriétés des roches carbonatées.

2.1 Archéologie de la chaux

Sans que l'on sache comment en est apparu l'usage, la chaux est employée depuis des temps très anciens. Des fouilles de sites du néolithique du début du 6^e millénaire, en Syrie, ont mis à jour de la vaisselle blanche de chaux, contemporaine d'habitats aux sols et murs chaulés [1].

La chaux fraîchement modelée étant extrêmement fragile, l'ajout de fibres végétales fournissait une cohésion au mortier frais. Cette fibre constituait également un réseau d'échanges gazeux permettant son durcissement au sein de parois épaisses.

2.2 La chaux dans l'histoire de la construction

2.2.1 Période gréco-romaine

Les Grecs ont eu recours à la technique du stuc, matériau à base de chaux additionnée de plâtre et de poudre de marbre, dès le 7^e siècle av. J.-C. pour recouvrir les appareillages de pierre. C'est à la fin du 2^e siècle av. J.-C. que le mortier de chaux se répand pour la construction des murs. Ces mortiers étaient généralement constitués de chaux et de sable fin. Pour rendre les mortiers plus durs et stables dans l'eau, des cendres volcaniques (*Terre de Santorin*, du nom de l'île de la mer Égée), étaient parfois ajoutées...

Les Romains ont poursuivi et grandement amélioré les techniques de fabrication de la chaux et celles de sa mise en œuvre dans les maçonneries. On ignore quand l'usage de la chaux a commencé dans la maçonnerie romaine, mais Caton, le premier, signale cet usage au cours du 2^e siècle av. J.-C. [2]. Son usage se répandit ensuite rapidement. Vitruve, au premier siècle, dans *De l'Architecture*, précise le mode de fabrication du mortier romain et préconise l'ajout de la pouzzolane : « cette terre mêlée avec la chaux et les pierres, rend la maçonnerie si solide, que non seulement dans les édifices ordinaires, mais même au fond de la mer, elle fait des masses d'une grande dureté ». (Chapitre 6, *De la pouzzolane*).

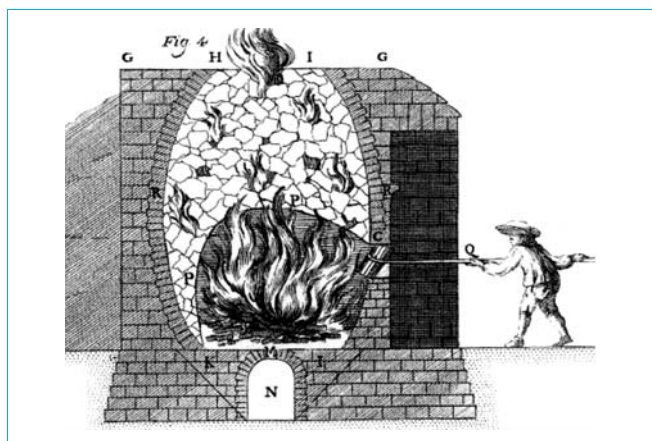


Figure 2 – Coupe verticale d'un grand four (d'après Fourcroy de Ramecourt, 1776)

Le mortier romain doit sa grande qualité à ses éléments constitutifs et à leurs proportions, mais également au grand soin avec lequel il est préparé et mis en œuvre. Il était souvent employé dans les murs pour noyer un blocage de pierre tout venant coffré entre deux parements de pierres appareillées. Ce mélange central était généralement vigoureusement pilé pour ne laisser aucun interstice vide. La face supérieure du mur était ensuite couverte pour soustraire le matériau ainsi réalisé à l'érosion.

Cette technique de maçonnerie au « ciment de chaux » (*opus caementicium*) a permis l'essor formidable de la construction romaine. L'*opus caementicium* ne permet pas seulement à une main d'œuvre peu spécialisée de réaliser les ensembles considérables de maçonnerie des édifices et des grands ouvrages de génie civil ; la qualité du mortier et la compacité de la maçonnerie permettent en outre de réaliser des voûtes qui, la prise terminée et le cintre ôté, « se comportent comme des monolithes dans lesquels on a creusé un volume » [3].

L'exceptionnelle qualité des mortiers des édifices romains qui ont traversé le temps jusqu'à la Renaissance a fait naître, à cette époque, la légende d'adjonctions secrètes au mortier de chaux.

2.2.2 Période médiévale

Il est difficile de garder une vue d'ensemble des mortiers d'après la chute de l'Empire romain. On assiste alors à une sorte d'atomisation des techniques et des pratiques locales. Les mortiers sont souvent de qualité médiocre.

L'évolution majeure de la période se situe à la fin du Haut Moyen-âge avec l'invention du four continu. L'objectif de l'invention du four droit continu est l'économie de combustible et le rendement : on enfourne en strates successives pierres et combustible. L'élévation de la température au sein du four, si elle permet une calcination plus rapide, s'accompagne d'un effet secondaire : elle permet la recombinaison des argiles contenues dans le calcaire en aluminate de calcium et en silicate bicalcique.

Elles prennent alors la forme de boules de matière dure que les chaufourniers appelleront *grappier*.

Ce grappier était séparé par tamisage de la chaux dont il était considéré comme un déchet. F.-X. Deloye remarque que, ce faisant, les maçons se privaient de « l'apport, si minime soit-il, constitué par la pouzzolanité involontaire des argiles déshydroxylées [4] ». Selon Leduc [5], ce n'est qu'en 1865 qu'on utilisa les grappiers pour en faire du ciment naturel.

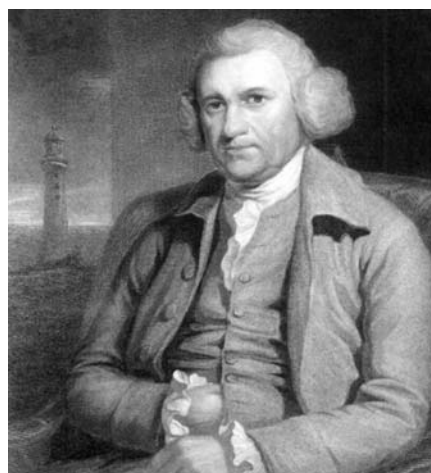


Figure 3 – John Smeaton et le phare d'Eddystone (Source Library of Congress)

2.3 Les liants des Lumières (ou lumière sur les liants)

Les mortiers de chaux dans le courant du 18^e siècle sont unanimement décriés comme médiocres. Les recherches sur l'amélioration des mortiers sont alors stimulées par la nécessité de grands travaux d'infrastructures (canaux, ports, urbanisme) et par de grandes entreprises de fortification, dans un contexte de concurrence pour la suprématie économique et politique entre l'Angleterre et la France (figure 2).

Dans le courant du 18^e siècle, la prise aérienne est explicitée successivement par les travaux de Black [6] et Higgins [7]. Black, donne la première explication scientifique de la décarbonatation du calcaire, en montrant que, par la calcination, on enlève à la pierre une certaine quantité d'une « substance acriforme ». Ce fut le point de départ de recherches sur le durcissement des mortiers. En 1780, c'est Higgins qui publie une série de recherches dans lesquelles il montre que le durcissement provient de ce que la chaux a repris à l'atmosphère tout le gaz carbonique qu'elle avait perdu lors de la cuisson, et revient donc à l'état de pierre.

La piste privilégiée pour améliorer les mortiers de chaux est d'abord, et restera longtemps, celle de l'addition pouzzolannique. La tradition romaine a probablement retardé la découverte des liants hydrauliques (en France, du moins, où Philibert Delorme dans son *De l'architecture* se réfère, dès 1567, à la pouzzolane de Vitruve).

Dans les traités romains il est d'ailleurs précisément insisté sur le fait qu'une bonne chaux n'est obtenue qu'à partir d'un calcaire aussi pur que possible.

Le phénomène de l'hydraulicité a été découvert par Smeaton (figure 3), ingénieur anglais chargé, en 1757, de la reconstruction du phare d'Eddystone. Il est décidé selon ses propres mots, à ce que ce soit « la mer qui se brise sur l'édifice et non l'édifice sous la mer... ». Il remarque que les marbres et les craies qui ne laissent aucun résidu à l'acide sont incapables de durcir sous l'eau, mais qu'inversement les calcaires qui contiennent de 5 à 20 % d'argiles, et notamment la pierre d'Alberthaw, présentent cette propriété.

Les travaux de Smeaton ne sont publiés qu'en 1791. Il y demande explicitement « pourquoi la présence de l'argile dans le tissu de la pierre calcaire rend la chaux propre à durcir sous l'eau, propriété que la chaux tirée des pierres calcaires pures n'acquiert point [8] ».

Les Français Lorient [9], Guyton de Morveau [10], Chaptal [11] explorent, eux, continûment la voie de l'ajout pouzzolanique. Élie Leduc fait une remarque importante sur ces tentatives d'addition : « Gratien Lepère, ingénieur des ponts et chaussées à Cherbourg, remplace en l'an XII la pouzzolane d'Italie par un schiste calciné, provenant d'Haineville. Ses efforts eurent plus ou moins de succès, et son produit, dit quelque part Vicat, avait besoin de chaux hydraulique pour durcir. Cette observation s'applique à beaucoup de produits expérimentés comme pouzzolanes artificielles, qui pour les uns étaient excellents et ne valaient rien pour d'autres ; le peu de connaissances qu'on possédait sur les chaux devait certainement faire prendre parfois et selon le hasard des chaux hydrauliques durcissant seules, faisant par cela même croire à l'inventeur que son procédé [d'ajout] en était cause... [12] ».

Le rapport [13] de Gay-Lussac, De Prony et Girard en 1819 sur les travaux de Vicat pose d'ailleurs en termes français l'avancée décisive de Smeaton en comparant l'efficacité de la prise hydraulique à l'effet de l'ajout pouzzolanique : « Il est une des observations de Smeaton que nous ne pouvons passer sous silence : c'est que la chaux maigre étant mélangée avec le sable ordinaire seul, peut former un mortier hydraulique presque d'aussi bonne qualité que celui que l'on composerait de chaux grasse et de pouzzolane ».

C'est finalement Vicat qui, ingénieur au prise avec des difficultés dans les fondations du pont de Souillac dans le Lot, résoudra le problème en 1818 dans un mémoire intitulé *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*. Sa démarche consiste à synthétiser l'ensemble des travaux menés jusqu'à lui sur la chaux. Il montre la nécessité de la présence de l'alumine et contredit une opinion répandue depuis les travaux du suédois Bergmann sur la nécessité de la présence des oxydes de fer et de manganèse [14]. Dans le rapport de l'Académie de 1819 sur ce mémoire, il est demandé en outre : « Puisque l'on connaît les compositions que les chaux maigres présentent à l'analyse, ne serait-il pas possible d'en former artificiellement ? »

Vicat avait répondu à l'avance : « On conçoit déjà qu'étant maître des proportions, on l'est également de donner à la chaux factice le degré d'énergie que l'on désire, et d'égaliser ou de surpasser à volonté les meilleures chaux naturelles [15] ».

Vicat établit également une classification liée au pourcentage d'argile présente dans le calcaire avant cuisson. Cinq types de chaux, classées d'aérienne à éminemment hydraulique, se voient donc attribuer un indice d'hydraulicité.

Cet indice représente le rapport pondéral argile/chaux, c'est-à-dire l'équivalent (silice + alumine)/(chaux + magnésie), qui montre l'importance des éléments acides pour former des combinaisons stables et résistantes à l'eau.

3. La chaux : ce que la chimie a permis de comprendre

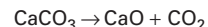
Malgré cette longue histoire remplie d'actes et d'expérimentations et l'apport des connaissances scientifiques exposées plus haut, le vocable chaux reste encore très générique. Les chimistes, les industriels et les utilisateurs n'en ont pas toujours la même définition. Nous tâcherons ici de permettre une nécessaire clarification sémantique.

3.1 Cuisson du calcaire, création de la chaux

Le terme chaux regroupe donc, encore aujourd'hui, un grand nombre de produits, dont le seul point commun est d'être obtenu

par calcination (chauffage à haute température) d'une pierre calcaire. En cherchant volontairement à simplifier : selon la composition du matériau de base, le cru, on obtiendra au final de la chaux aérienne ou de la chaux hydraulique.

Par décarbonatation de la calcite aux environs de 900 °C (CaCO_3), la chaux vive (CaO) est obtenue selon la réaction suivante :



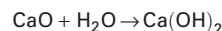
Cette réaction génère un fort dégagement de gaz carbonique (CO_2) et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45 %.

La chaux vive désigne donc le matériau brut obtenu en sortie de four dont le constituant principal est l'oxyde de calcium, qui a pour formule CaO . C'est un **produit potentiellement dangereux**, principalement employé dans l'industrie, l'agriculture et le traitement des sols (terrassément).

Hydrophile, elle est également utilisée pour assécher et détruire les matières organiques riches en eau.

3.2 Extinction de la chaux vive

L'extinction de la chaux correspond à la transformation de chaux vive en chaux éteinte par ajout d'eau (H_2O). Cette opération d'extinction produit l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , selon la réaction :



Cette réaction est très exothermique (1 155 kJ/kg de CaO). Elle correspond à un processus violent et dangereux donnant lieu à un bouillonnement et à un échauffement pouvant atteindre 400 °C.

Cette étape est nécessaire à l'obtention de chaux éteinte, qu'elle soit aérienne ou hydraulique.

Dans le cas de la chaux hydraulique, il est nécessaire d'employer la juste quantité d'eau, afin de ne pas permettre la prise du matériau. Dans le cas de la chaux obtenue à partir de calcaire pur, la quantité d'eau n'est pas limitée.

Lorsque la quantité d'eau ajoutée est juste suffisante pour réussir la réaction d'extinction, c'est-à-dire d'hydratation de la chaux, on obtient une poudre blanche. Si la quantité d'eau est plus importante, on obtient alors une pâte blanche (figure 4).



Figure 4 – Utilisation de chaux en pâte (Site de Dougga – Tunisie – Source Lerm)

Après transformation (extinction), l'augmentation du volume est proche de 30 %. L'extinction peut être réalisée de différentes manières :

- arrosage superficiel des fragments de chaux vive, puis achèvement de la réaction à l'air ;
- immersion des fragments de chaux vive dans un grand volume d'eau, puis achèvement de la réaction à l'air ;
- mélange eau/chaux dans un malaxeur avec contrôle de la réaction exothermique (processus industriel) ;
- immersion des fragments de chaux vive dans un grand volume d'eau, puis achèvement de la réaction dans l'eau.

Dans les trois premiers cas listés précédemment, on obtient une chaux en poudre, aérienne ou hydraulique :

- pour les chaux aériennes, la terminologie utilisée regroupe, selon les cas et les époques, le vocabulaire suivant : fleur de chaux, chaux grasse, chaux éteinte, CAEB (ancienne normalisation : Chaux aérienne éteinte pour le bâtiment), CL (nouvelle normalisation européenne : *Calcic Lime*) ou DL (*Dolomitic Lime*) pour les chaux dolomitiques ;
- pour les chaux hydrauliques, les anciennes appellations ont été également chaux maigre, chaux hydrauliques naturelles, XHL selon l'ancienne normalisation, NHL selon la nouvelle (*Natural Hydraulic Lime*).

Les différences entre ces deux types de chaux et leurs appellations découlent de spécifications modernes, qui ont été établies par des recherches relatives à la composition et aux caractéristiques de ces liants.

Aujourd'hui, la normalisation européenne classe les chaux aériennes selon leurs caractéristiques chimiques et les chaux hydrauliques selon leurs performances mécaniques. En fonction du calcaire qu'ils extraient, les « anciens » utilisaient quant à eux, trois termes : chaux grasse, moyenne ou maigre.

Dans le dernier cas évoqué pour l'extinction et pour les chaux issues de calcaire dépourvu d'impuretés, la chaux éteinte produite prend la texture d'une pâte (chaux en pâte). De l'eau surnageante est conservée limitant les échanges du matériau avec le gaz carbonique de l'atmosphère et, ainsi, la carbonatation du matériau.

3.3 Les « deux » chaux

3.3.1 Chaux aérienne ou chaux grasse

La **chaux aérienne** est obtenue à partir de calcaire très pur. C'est de l'hydroxyde de calcium ou portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (figure 5).

Depuis l'antiquité, la chaux aérienne sert, grâce à ses propriétés, à réaliser des mortiers pour la construction, des enduits et des badigeons sur les murs. Elle est aussi utilisée pour protéger les arbres fruitiers, ou lutter contre la putréfaction des cadavres en cas d'épidémie.

■ La **chaux en poudre**, de par sa forme, est en adéquation avec les pratiques actuelles de fabrication des mortiers pour la construction : dosage en volume, mélange à l'aide d'un malaxeur,...

■ La **chaux en pâte** permet l'obtention de mortier plus « gras », moins sujet à la dessiccation rapide. Les enduits ou les badigeons, carbonatant ainsi plus vite, sont donc plus rapidement résistants. Par contre, son dosage est plus difficile, le mélange avec le sable plus délicat, sauf à utiliser l'outillage adapté (malaxeur planétaire, rabot...). La meilleure carbonatation de la chaux en pâte a probablement comme origine le fait que, l'extinction se faisant à l'abri de l'air, aucune carbonatation partielle anticipant la prise ne se produit. Par ailleurs, la finesse de la chaux obtenue, sa porosité, sa surface spécifique et la présence de gels colloïdaux sont autant de paramètres permettant une réaction carbonique optimisée.

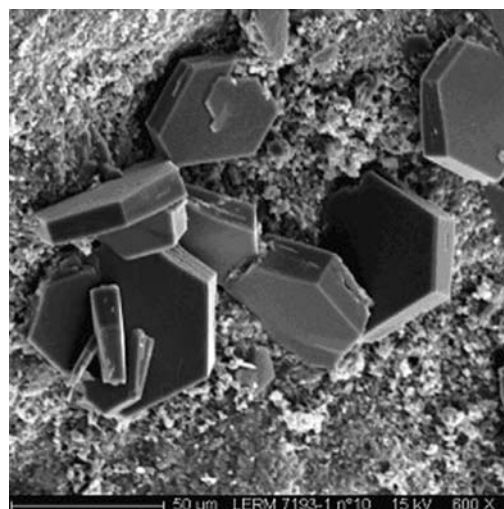


Figure 5 – Cristaux de portlandite – Microscopie électronique à balayage (Source Lerm)

3.3.2 Chaux hydraulique ou chaux maigre

La **chaux hydraulique** est obtenue à partir de calcaire contenant des silicates et des aluminates. La chaux hydraulique la plus courante provient de la calcination de calcaire contenant des argiles. Elle fait prise, en quelques heures, au contact de l'eau, d'où son appellation.

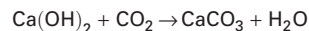
Le calcaire naturel contient souvent des argiles ou des minéraux siliceux et silicatés dits « réactifs ». Aux températures de cuisson, situées entre 800 et 1 500 °C, le calcium se combine avec ces éléments pour former des silicates, des aluminates et, dans une moindre mesure, des ferro-aluminates de calcium.

Comme l'a montré Vicat, le rapport entre différents composants associés à l'argile et la part de CaO et de MgO définit l'indice d'hydraulicité de la chaux.

3.4 Mécanismes de durcissement et de prise

3.4.1 Carbonatation ou prise aérienne

La prise de toute chaux éteinte s'effectue au moins partiellement par carbonatation. L'hydroxyde de calcium absorbe le gaz carbonique (CO_2) présent dans l'atmosphère, d'où le nom de « chaux aérienne » dont la prise est uniquement aérienne, suivant la réaction :



Selon l'humidité du milieu, cette réaction, même si elle peut débuter très rapidement, se produit sur plusieurs mois : la vapeur d'eau se lie avec le gaz carbonique atmosphérique pour former l'acide carbonique ; la chaux fixe le gaz carbonique contenu dans cet acide. Le résultat de cette réaction aboutit donc à nouveau à la formation de calcite (CaCO_3) (figure 6).

3.4.2 Hydratation ou prise hydraulique

La prise hydraulique est essentiellement due à la réaction entre le CaO et les silicates lors de la cuisson du calcaire qui permet l'obtention de silicates calciques. En présence d'eau, la réaction chimique entre ces constituants anhydres, souvent relativement

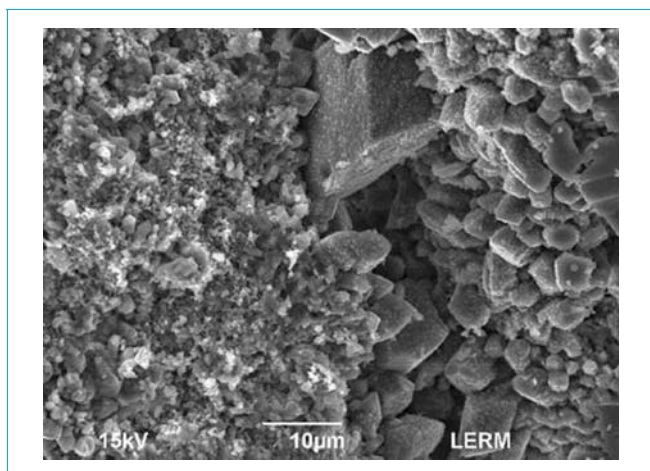
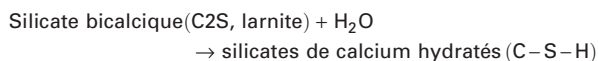


Figure 6 – Cristaux de calcite (1) – Microscopie électronique à balayage (Source Lerm)

rapide, correspond à une hydratation qui peut, pour une chaux partiellement hydraulique, se résumer comme suit :



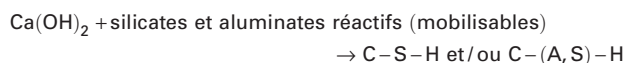
Au contact de l'eau, lors de l'extinction de la chaux vive, et surtout pendant la mise en œuvre des mortiers, ces molécules forment donc essentiellement des silicates de calcium hydratés, dont les propriétés liantes sont importantes et stables. Dans les chaux, de par le mode et les températures de cuisson, la larnite est souvent le seul silicate calcique impliqué dans l'hydratation, alors que pour les ciments Portland, d'autres silicates ont un rôle prépondérant (notamment le silicate tricalcique, C3S ou alite).

Dans le même cadre de comparaison, les proportions d'alumine et, surtout de fer, sont souvent très faibles dans les calcaires à chaux.

L'intervention des silico-aluminates ou des ferro-aluminates est ainsi le plus souvent négligeable.

3.4.3 Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique, qui est issue du mélange de chaux et de produits naturels ou artificiels, siliceux ou alumineux, se décline de la manière suivante :



Souvent lente, elle permet, par attaque alcaline de la solution ionique riche en calcium sur les silicates et les aluminates, la production de silicates de calcium hydratés identiques à ceux obtenus lors de la prise hydraulique et de silico-aluminates de calcium hydratés C-(A,S)-H. Cette réaction est souvent mentionnée pour les mélanges de chaux aériennes et de tufs volcaniques ou de débris de terre cuite et de tuileaux, matériaux riches en minéraux silicatés dits « réactifs ».

Il y a également fort à penser que, pour certaines catégories de chaux hydrauliques, la réserve en espèces siliceuses réactives « non cuites » telles que des sphérules de cristobalite présentes dans le cru, permette à cette réaction de prendre le relais des deux premières (prise aérienne et prise hydraulique) et d'être donc intrinsèquement due à la seule chaux concernée.

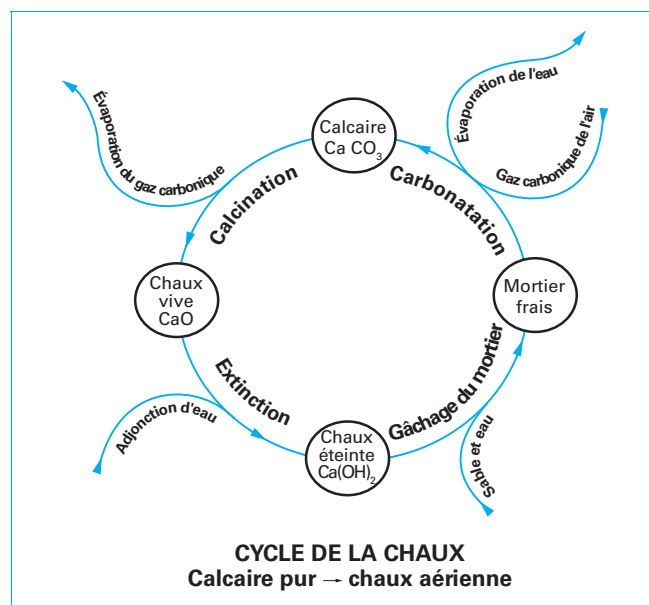


Figure 7 – Cycle de la Chaux (Source École d'Avignon)

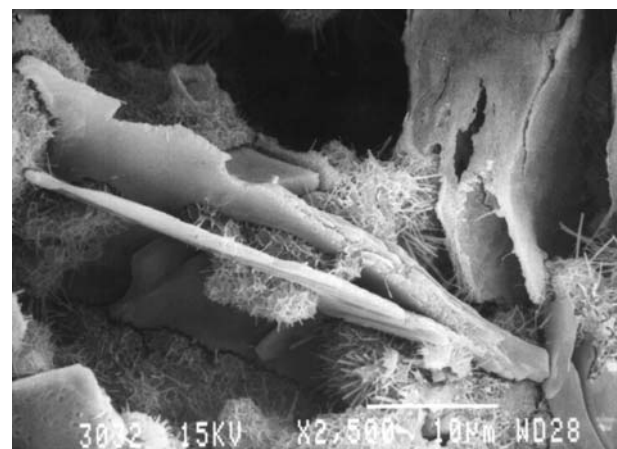


Figure 8 – Portlandite et C-S-H mêlés – Microscopie électronique à balayage (Source Lerm)

4. Conclusion

Au terme de cet article, il apparaît que la chimie a permis d'appréhender clairement les diverses réactions dans lesquelles est impliquée la chaux : décarbonatation, hydratation, carbonatation, prise aérienne, prise hydraulique, prise pouzzolanique (figure 7). Comme dit le rapport de l'Académie royale des sciences à propos des recherches de Vicat : « de saines théories éclairent de leurs lumières la pratique de l'art que l'on exerce ».

Cette mise en ordre des phénomènes et l'explication rationnelle de leurs mécanismes sont les résultats décisifs de la pratique du laboratoire moderne.

N'oublions pas, cependant, que « dans la pratique de l'art que l'on exerce », les différents phénomènes, que l'analyse rationnelle

a dissociés, restent contemporains : une chaux aérienne peut être faiblement hydraulique, une prise hydraulique n'exclut nullement une prise aérienne, une réaction pouzzolanique, en fonction de la composition du calcaire ou de la chaux, peut prendre le relais de la réaction hydraulique (figure 8).

C'est précisément la diversité de phénomènes imbriqués qui, jusqu'à Vicat, a fait obstacle à la compréhension de l'hydraulicité. Le rapport de Gay-Lussac fait à l'Académie des Sciences sur le mémoire de Vicat, résume l'ensemble des recherches menées jusqu'alors et aligne des noms aussi prestigieux que ceux de Smeaton, Clark, Higgins, Chaptal, Vitalis, Saussure, Descotils, Bergman... Ce résumé fait de la recherche sur la chaux une exceptionnelle aventure intellectuelle.

« ...Ensuite, du point où s'étaient arrêtés ses devanciers, M. Vicat a franchi l'intervalle qui séparait encore le laboratoire du chimiste des grands ateliers de construction » écrit dans son exposé

introdutif au rapport de Girard [16], dès 1819, M. Bruyère, Inspecteur général des Ponts et Chaussées.

Cette remarque souligne l'un des projets de Vicat (pour lequel il ne déposera pourtant aucun brevet) : suite à l'analyse des constituants de la chaux hydraulique, s'ouvre la possibilité de fabrication à grande échelle d'un liant artificiel aux qualités régulières. C'est ce que Vicat nomma *la chaux factice*.

L'ère des pionniers, qu'ils soient *artistes* ou savants, débouche ainsi sur celle de la production industrielle. Dans cette même collection, deux articles font suite à cette introduction, à la fois géologique, historique et chimique : ils seront dédiés pour l'un à la chaux aérienne, et pour l'autre à la chaux hydraulique.