

# Chaux aérienne

## Contexte, fabrication, domaines applicatifs

par **Gontran HERRIER**

*Docteur en sciences chimiques de l'université de Namur  
Ingénieur de recherche dans les applications de la chaux en Génie civil – Lhoist  
R&D – Groupe Lhoist*

**Marc PELLETIER**

*Ingénieur Polytech'Orléans  
Responsable du Laboratoire analytique et de l'Assistance technique – Lhoist  
R&D – Groupe Lhoist*

et **Daniel PUIATTI**

*Ingénieur INSA de Strasbourg  
Directeur marketing et développement des applications de la chaux en Génie civil – Groupe Lhoist*

<b>1. Contexte .....</b>	<b>C 923 – 2</b>
1.1 Différentes catégories de chaux aérienne .....	— 2
1.2 Propriétés physico-chimiques des chaux aériennes calciques .....	— 2
1.3 Caractérisation des chaux aériennes .....	— 5
<b>2. Fabrication de la chaux aérienne .....</b>	<b>— 6</b>
2.1 Généralités .....	— 6
2.2 Phase amont, de l'extraction à la préparation de la pierre .....	— 6
2.3 Calcination de la pierre .....	— 9
2.4 Paramètres influençant la calcination .....	— 10
2.5 Fours à chaux .....	— 10
2.6 Aval four et produits finis .....	— 13
2.7 Contrôles qualité .....	— 14
2.8 Conclusion .....	— 14
<b>3. Diversité des applications de la chaux aérienne .....</b>	<b>— 14</b>
3.1 Rappel des propriétés de la chaux .....	— 14
3.2 Sidérurgie et industrie des métaux non-ferreux .....	— 15
3.3 Environnement .....	— 15
3.4 Agriculture .....	— 15
3.5 Industrie chimique .....	— 15
3.6 Industries alimentaire et sucrière .....	— 15
3.7 Industrie verrière .....	— 16
3.8 Industrie papetière .....	— 16
3.9 Activités de la construction .....	— 16
3.10 Activités du génie civil .....	— 16
3.11 Autres applications .....	— 17
<b>4. Normes et réglementation .....</b>	<b>— 17</b>
4.1 Normalisation .....	— 17
4.2 Cas particulier de la construction .....	— 17
<b>5. Précautions lors de la manutention et du stockage .....</b>	<b>— 18</b>
<b>6. Conclusions .....</b>	<b>— 18</b>
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. C 923</b>

**U**tilisée depuis plusieurs millénaires, la chaux aérienne est un produit que chacun croit connaître, mais dont les multiples propriétés restent encore mal comprises.

*Le présent dossier donne une présentation générale du produit, sous forme de chaux vive comme de chaux hydratée. Puis, il fait une description de ses propriétés, des modes de fabrication et de ses applications.*

*Le lecteur pourra aussi utilement se reporter aux articles complémentaires parus dans les bases TI (consulter la liste non exhaustive proposée dans le « Pour en savoir plus » [Doc. C 923]).*

## 1. Contexte

Le terme chaux est générique. Il désigne l'oxyde, et/ou l'hydroxyde de calcium, et l'oxyde, et/ou l'hydroxyde de calcium et de magnésium, issus de la décomposition thermique (calcination) de carbonate de calcium (par exemple : calcaire, craie, coquillages), ou de carbonate de calcium et de magnésium (par exemple : calcaire dolomitique, dolomite).

La chaux aérienne répond à cette définition générale, laquelle doit son nom et sa popularité aux propriétés qu'elle confère aux mortiers de construction (mortiers à maçonner, pour enduits) :

- après gâchage, elle forme une pâte qui améliore l'ouvrabilité et la rétention d'eau des mortiers frais ;
- par la suite, la fixation de dioxyde de carbone, présent dans l'air, par l'hydroxyde de calcium et l'hydroxyde de calcium et de magnésium, conduit à la formation de carbonates qui contribuent à la résistance mécanique et à la durabilité des mortiers durcis.

La chaux aérienne est un matériau utilisé depuis plusieurs millénaires. Malgré l'apparente simplicité de la réaction chimique à l'origine de sa formation, les procédés de fabrication d'aujourd'hui n'ont évidemment plus rien à voir avec ceux utilisés à l'origine. Ils se sont considérablement perfectionnés et diversifiés pour mieux répondre aux exigences des utilisateurs actuels. Il en est de même, pour les applications au point que la construction, un des premiers domaines d'application dans l'antiquité, représente une part relativement modeste des applications actuelles.

Au-delà des généralités sur la chaux aérienne, nous abordons aussi, dans ce dossier, sa fabrication et ses applications. Cet article s'inscrit dans un ensemble de publications des Techniques de l'Ingénieur consacré à la chaux, matériau omniprésent parce que indispensable, et pourtant mal connu. Il succède à un premier article intitulé « La chaux, définition et histoire » et précède un troisième article consacré à la chaux hydraulique naturelle.

### 1.1 Différentes catégories de chaux aérienne

#### ■ On distingue :

- la **chaux aérienne calcique**, obtenue à partir de carbonate de calcium ;
- la **chaux aérienne dolomitique**, obtenue à partir de carbonate mixte de calcium et de magnésium.

Du fait de la pureté des calcaires d'origine, ces chaux n'ont pas de propriétés hydrauliques.

#### ■ La norme européenne harmonisée, EN 459-1 : chaux de construction, distingue deux catégories de chaux aériennes utilisées en construction :

- la chaux aérienne calcique (notation CL selon la norme EN 459-1) qui désigne :
  - l'oxyde de calcium :  $\text{CaO}$ ,
  - et l'hydroxyde de calcium :  $\text{Ca(OH)}_2$  ;

– la chaux aérienne dolomitique (notation DL selon la norme EN 459-1) qui désigne :

- l'oxyde de calcium et de magnésium :  $\text{CaO.MgO}$ ,
- et l'hydroxyde de calcium et de magnésium :  $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$ .

Les chaux aériennes sont sans addition de composants dotés de propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.

#### ■ Les chaux aériennes peuvent se présenter sous deux formes.

- la **chaux vive** (notation Q selon la norme EN 459-1) se présente essentiellement sous forme d'oxyde et réagit de façon exothermique avec l'eau. On distingue l'oxyde de calcium et l'oxyde de calcium et de magnésium.

Ces deux types de chaux vive sont disponibles sous différentes présentations granulométriques, discontinues ou continues, pouvant aller, du bloc sortant du four (ou « roche » selon la terminologie des chauffourniers), à la poudre obtenue par broyage.

- la **chaux hydratée** – également qualifiée d'« éteinte » – (notation S selon la norme EN 459-1) se présente essentiellement sous forme d'hydroxyde obtenu par hydratation – ou extinction – contrôlée de l'oxyde. On distingue l'hydroxyde de calcium et l'hydroxyde de calcium et de magnésium.

La chaux hydratée est disponible à l'état de poudre, d'une part, et en suspension dans l'eau, d'autre part. Dans ce dernier cas, on obtient, du plus concentré au plus dilué, une pâte, un coulis, ou un lait de chaux.

Il faut signaler que la chaux dolomitique est également produite sous forme de chaux dolomitique semi-hydratée, c'est-à-dire constituée d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de magnésium (notation S1 selon la norme EN 459-1) :  $\text{Ca(OH)}_2.\text{MgO}$ .

## 1.2 Propriétés physico-chimiques des chaux aériennes calciques

■ La **chaux vive**, ou oxyde de calcium, est obtenue par calcination et décarbonatation de la pierre calcaire. De formule chimique brute  $\text{CaO}$ , c'est un solide se présentant sous formes de roche ou de poudre, et qui est très avide et réactif vis-à-vis de l'eau.

■ La **chaux hydratée**, appelée aussi « chaux éteinte » ou encore « hydroxyde de calcium » [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] est une poudre sèche obtenue par addition contrôlée d'eau à la chaux vive. Cette opération se pratique industriellement dans un hydrateur.

Ces deux formes de la chaux aérienne ont des caractéristiques propres et des propriétés utilisables dans un panel étendu d'applications. Ces propriétés, ainsi que les moyens de caractérisation physico-chimiques de la chaux, sont présentés dans ce chapitre.

### 1.2.1 Réactivité à l'eau et extinction de la chaux vive

La chaux vive possède une grande affinité vis-à-vis de l'eau et est, de ce fait, un dessiccant efficace. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de maintenir les stocks et échantillons de chaux vive

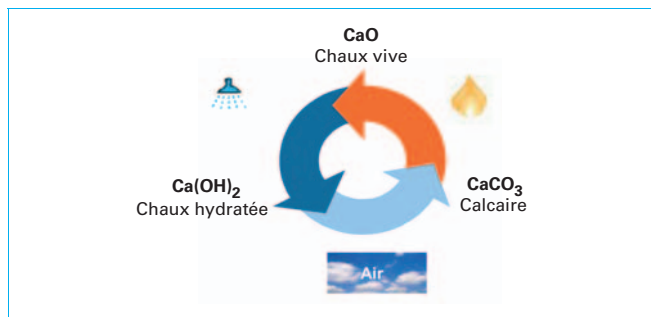


Figure 1 – Cycle de la chaux aérienne calcique

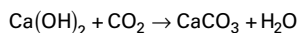
à l'abri de l'atmosphère, sous peine de voir la réactivité diminuer suite à une hydratation partielle.

Une fois la chaux vive au contact avec l'eau, il se produit une réaction très exothermique (1 155 kJ/kg de CaO) qui, en conditions et quantités d'eau contrôlées, mène à la formation de chaux hydratée appelée aussi « chaux éteinte » ou encore « hydroxyde de calcium », solide dont les molécules d'eau sont liées chimiquement. Le suivi de la production de chaleur au cours du temps est, par ailleurs, mis à profit pour tester la réactivité d'une chaux vive.

Le dégagement de la chaleur d'hydratation s'enclenche au fur et à mesure que l'eau pénètre dans les pores de la chaux vive, ce qui exerce des forces expansives internes dans les particules et provoque leur fracturation. Les cristaux originels sont ainsi désintégrés en micro-particules de chaux hydratée. L'extinction de la chaux vive provoque alors une expansion volumique d'un facteur 2,5.

En pratique, un excès d'eau par rapport à la quantité stœchiométrique est nécessaire pour que la réaction d'hydratation soit complète. En effet, une fraction de l'eau ajoutée est évaporée lors du dégagement de chaleur initial, d'une part, et une autre fraction se retrouve sous forme d'eau libre, non combinée chimiquement, adsorbée par les particules d'hydrate, d'autre part.

Contrairement à la chaux vive, la chaux hydratée est capable de fixer le dioxyde de carbone de l'air, en atmosphère humide, pour donner du carbonate de calcium (voir figure 1) selon la réaction suivante :



### 1.2.2 Couleur, odeur

La chaux vive est un solide de couleur blanche. Sa teinte peut tendre vers le gris, le brun, ou le jaune, lorsque des impuretés sont présentes (particulièrement les oxydes de fer et de manganèse). La chaux éteinte, consécutivement à la réaction d'hydratation, est plus fine et plus blanche que la chaux vive dont elle dérive.

Les chaux aériennes ont une légère, mais perceptible, odeur terreuse, cependant non agressive.

### 1.2.3 Structures cristallines

L'oxyde de calcium, dans sa forme la plus pure, cristallise dans le système cubique, la longueur de la maille élémentaire étant égale à 4,8 Å.

Les particules de chaux éteinte sont microcristallines ou de taille colloïdale, la chaux cristallisant dans le système hexagonal ( $a = 3,58 \text{ Å}$ ,  $c = 4,9 \text{ Å}$ ).

### 1.2.4 Poids spécifique et densités

■ Le **poids spécifique** de la chaux vive, c'est-à-dire le rapport entre la masse de solide et le volume qu'il occuperait à porosité nulle et sans vide entre les grains, est compris dans une gamme de 3,25 à

3,38. Celui de la chaux hydratée est moindre, la valeur calculée étant de 2,24.

■ La **densité apparente des particules** de chaux vive est comprise entre 1,6 et 2,8, selon le degré de porosité ou, à l'inverse, de frittage des particules. La réaction d'hydratation entraîne une diminution de la densité apparente jusqu'à des valeurs de l'ordre de 0,4 à 0,55.

■ La **valeur de densité en vrac** tient compte, à la fois de la porosité intra-particulaire, et des vides laissés entre les grains. Elle est d'environ 0,8 à 1 pour la chaux vive, et est fonction de la distribution granulométrique et de la morphologie des particules.

L'éclatement des particules, suite à l'extinction, entraîne un abaissement de la densité en vrac jusqu'à une valeur finale de 0,4 à 0,6, en ce qui concerne la chaux hydratée.

■ La **porosité des grains** est dépendante, à la fois, de celle du calcaire de départ et des conditions de sa calcination. Elle peut varier dans une gamme de 25 à 55 %.

### 1.2.5 Solubilité et pH

Les chaux aériennes sont solubles en très petite quantité dans l'eau. À 20 °C, la masse de CaO, soluble dans 100 g d'une solution saturée, est de 0,125 g et cette solubilité décroît avec la température.

Si on augmente la concentration en chaux au-delà du seuil de saturation le pH n'augmente plus, mais il se forme alors une suspension de chaux en excès (eau de chaux, puis lait de chaux pour des concentrations plus élevées).

La chaux aérienne est un produit basique. Ainsi, sa dissolution dans l'eau provoque une augmentation du pH jusqu'à 12,4, dans le cas d'une solution saturée à 25 °C. L'ajout d'une trace de chaux vive peut provoquer une brusque augmentation du pH (de 7 à 11) d'une eau distillée.

### 1.2.6 Présence d'impuretés

Les éléments étrangers, que l'on peut détecter dans une chaux, sont directement dépendants de la pureté de la pierre calcaire extraite du gisement.

■ Le **carbonate de calcium** peut ainsi être considéré comme inerte ou, au contraire, actif selon la destination finale de la chaux. La présence d'oxyde de magnésium n'est pas dommageable en application sidérurgique, mais au-delà d'un taux de 2 à 5 %, cela peut rendre la chaux inadaptée à certaines applications spécifiques.

■ D'autres **éléments chimiques** se retrouvent dans la chaux, en quantités variables. Ainsi, le silicium, l'aluminium, le fer ou le soufre peuvent provenir, soit de la pierre calcaire, soit du combustible utilisé pour la calcination. D'autres éléments moins abondants (traces) sont spécifiques de la composition du calcaire originel.

### 1.2.7 Stabilité à l'air et conservation

La chaux vive et la chaux hydratée sont des produits stables.

■ La **chaux vive** est réactive à l'eau, qui provoque son extinction, comme évoqué plus haut. C'est pour cette raison qu'elle doit être conservée à l'abri de l'air ambiant, pour éviter que sa réactivité ne se dégrade au cours du temps. De plus, contenant une faible quantité de  $\text{Ca(OH)}_2$ , les chaux vives commerciales sont susceptibles d'absorber le  $\text{CO}_2$  contenu dans l'air et de se carbonater. Cette réaction libère l'eau liée chimiquement, qui est alors rendue disponible pour hydrater la chaux vive et perpétuer le processus. L'exposition à l'air des chaux vives doit, dès lors, être la plus restreinte possible durant les différentes opérations de manipulation.

■ La **chaux éteinte** est encore plus stable, puisque l'ajout d'eau n'apporte plus de modification de sa composition chimique. La réaction d'hydratation peut être réversible à haute température : la

chaux éteinte se décompose alors en oxyde de calcium et en eau. Seule la présence de  $\text{CO}_2$  dans l'air peut affecter la conservation de la chaux hydratée en conditions ambiantes, *via* sa recarbonatation en  $\text{CaCO}_3$  (voir le cycle de la chaux aérienne calcique à la figure 1).

## 1.2.8 Réactions chimiques avec divers composés

### 1.2.8.1 Chaux vive

La principale réaction chimique de la chaux vive qui est mise à profit est son extinction et la production de chaleur qui en découle.

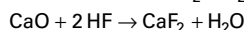
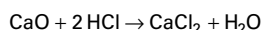
Cette propriété est largement utilisée, par exemple dans le traitement des sols dans le domaine du Génie civil : l'abaissement de la teneur en eau naturelle des sols est la conjonction de l'hydratation de la chaux vive épandue, de la production de chaleur et des opérations de malaxage du sol.

Il existe d'autres types de réactions connues de la chaux vive.

#### ■ Réactions avec les gaz acides

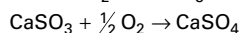
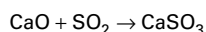
Les gaz acides ne réagissent pas en conditions sèches et à température ambiante avec la chaux vive. Cependant, à des températures plus élevées, peuvent se produire les neutralisations suivantes :

– au-dessus de  $350^\circ\text{C}$  :

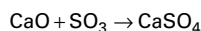


Les réactions avec le dioxyde et trioxyde de soufre peuvent se dérouler selon la séquence suivante, pour former du sulfate de calcium :

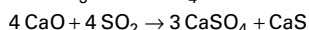
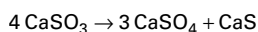
– de  $300$  à  $400^\circ\text{C}$  :



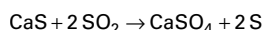
Ou encore directement :



D'autres réactions se produisent à haute température : notamment la décomposition du sulfite de calcium, et la combinaison directe de la chaux vive et du dioxyde de soufre :



Une hausse de température supplémentaire donne lieu à la conversion des sulfures en sulfates et en soufre élémentaire :



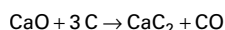
Ces séquences réactionnelles complexes sont importantes et étudiées dans le contexte du cycle du soufre dans les fours à chaux, et dans les processus de désulfurisation des gaz et fumées.

#### ■ Réactions avec les métaux

En absence d'eau, la chaux vive ne réagit pas avec les métaux. La chaux hydratée, pour sa part, a la faculté d'attaquer certains métaux (voir § 1.2.8.2).

#### ■ Réactions avec le carbone

Le carbone déplace l'oxygène de la chaux vive par fusion, à plus de  $1\,650^\circ\text{C}$ , pour former du carbure de calcium et du monoxyde de carbone :

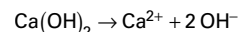


### 1.2.8.2 Chaux hydratée

Un grand nombre de réactions connues de la chaux se font, soit à partir de la chaux vive et en présence d'eau, soit *via* la chaux hydratée en poudre, soit encore *via* des suspensions de chaux dans l'eau à des concentrations diverses. Quelques schémas réactionnels représentatifs sont présentés ici, faisant intervenir la chaux hydratée sous ses différentes formes possibles.

#### ■ Neutralisation des acides en solution aqueuse

La chaux hydratée mise en solution aqueuse s'ionise directement selon :



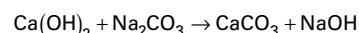
La solution résultante possède des propriétés basiques et alcalines qui peuvent ensuite être mises à profit. La chaux hydratée est une base bifonctionnelle, ce qui, malgré sa faible solubilité, en fait une base très forte. En comparaison avec les bases alcalines ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ), une masse moindre de chaux hydratée est nécessaire pour la neutralisation des acides. Elle réagit avec les acides faibles pour donner lieu à des sels alcalins, et avec les acides forts, les produits réactionnels étant alors des sels neutres ou légèrement alcalins.

#### ■ Neutralisation des gaz acides

La chaux hydratée en poudre, dont les propriétés de taille de particules et de porosité (surface spécifique, volume poreux accessible) peuvent être contrôlées, peuvent capter et neutraliser les gaz acides contenus dans les fumées et rejets industriels, tels que les oxydes de soufre et d'azote, ainsi que le gaz carbonique.

#### ■ Réactions avec les carbonates alcalins

Ce type de réaction est utilisé, entre autre, pour la fabrication de la soude caustique. La chaux hydratée réagit avec les carbonates alcalins, solubles, en formant du carbonate de calcium insoluble et de l'hydroxyde métallique.



#### ■ Réactions avec la silice et l'alumine

Ce sont les réactions qui entrent en jeu dans les processus de stabilisation des sols à la chaux, donnant lieu à l'apparition de silicates et d'aluminates de calcium hydratés. Elles peuvent être initiées grâce à la dissolution des espèces siliceuses et alumineuses à haut pH. Ces réactions font également partie du processus de prise des mortiers à base de pouzzolanes et de chaux.

#### ■ Réactions avec les métaux

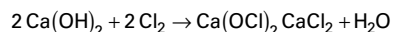
Le fer et l'acier sont insensibles à l'attaque par la chaux hydratée, au contraire de l'aluminium, du laiton et du plomb, ce qui peut mener, dans le cas de ce dernier, à sa totale dissolution.

Les métaux toxiques et, particulièrement les métaux lourds contenus dans les boues ou les eaux polluées, peuvent être rendus insolubles par adjonction de chaux. Cette méthode permet de précipiter, sous forme d'hydroxydes, les ions métalliques, tels que l'argent, l'arsenic, le baryum, le cadmium, le cobalt, le cuivre, le mercure, le manganèse, le nickel, le plomb, le zinc.

Chaque métal possède une gamme de pH optimale pour laquelle la concentration restante en solution est minimisée. Pour permettre la récupération d'un maximum de métaux, des opérations de précipitation sélective sont nécessaires.

#### ■ Réactions avec le chlore

La chaux éteinte adsorbe le chlore et le transforme en hypochlorite, agent de blanchiment actif :



## 1.3 Caractérisation des chaux aériennes

### 1.3.1 Normes et principes

■ Ce chapitre s'inspire des principes et méthodes d'analyse des différentes chaux utilisées dans les domaines du Génie civil et du Bâtiment qui sont répertoriés et décrits dans la **norme européenne EN 459-2** : « Chaux de construction – Partie 2 : méthodes d'essai ».

Cette norme régit la manière selon laquelle les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des chaux de construction sont évaluées pour répondre aux critères édictés dans la première partie de la norme consacrée à la chaux de construction : EN 459-1 : « Chaux de construction – Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité ».

■ La troisième partie de la **norme EN 459-3** énumère, quant à elle, les principes d'évaluation de la conformité. Cette conformité est attestée par une certification matérialisée par le marquage CE applicable aux chaux de construction.

■ Sont décrits ci-après, de manière détaillée, les **principes de deux tests essentiels** :

- le premier vise à déterminer la réactivité à l'eau d'une chaux vive ;
- le second est destiné à quantifier l'oxyde de calcium réellement « disponible ».

En revanche, les autres méthodes d'essai relatives aux chaux de construction sont présentées plus succinctement. Le lecteur est invité à consulter la norme EN 459-2 pour connaître les détails des modes opératoires, ainsi que les conditions d'échantillonnage des chaux en poudre, granulaires ou sous forme de pâte (cf. le *Pour en savoir plus*).

### 1.3.2 Analyses chimiques

#### ■ Teneur en oxydes majeurs

Des exigences de composition concernent, à la fois les chaux vives et hydratées, qu'elles soient calciques ou dolomitiques. Elles concernent les composants suivants :

- oxyde de calcium (CaO) et oxyde de magnésium (MgO) : détermination par titrage complexométrique à l'EDTA ;
- dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), contenu sous forme de carbonates : détermination volumétrique suite à la réaction avec HCl ;
- soufre, sous forme de sulfate, exprimé en trioxyde de soufre (SO<sub>3</sub>) : détermination par dissolution à l'HCl et précipitation sous forme de sulfate de baryum.

#### ■ Perte au feu

La perte de masse d'un échantillon de chaux porté à une température de (950 ± 25) °C est représentative de la somme des teneurs en eau (eau libre adsorbée, d'une part, et eau liée chimiquement, d'autre part), ainsi que du dioxyde de carbone résiduel.

L'eau libre d'un échantillon de chaux hydratée calcique est l'eau non liée chimiquement au produit. Dans le cas d'un lait de chaux ou d'une pâte de chaux, c'est le contenu en eau de la suspension qui est concerné par cette appellation. Il est déterminé par chauffage d'un échantillon à une température de (105 ± 5) °C, d'une durée variable selon la nature du produit (en évitant la recarbonatation de ce dernier en présence du dioxyde de carbone présent dans l'air).

#### ■ Chaux disponible d'une chaux vive ou d'une chaux éteinte

Le terme « chaux disponible » est un terme propre à l'industrie de la chaux. Dans le cas d'une chaux vive ou d'une chaux éteinte, la teneur en chaux disponible (on utilise aussi parfois le terme de « chaux libre ») est un paramètre essentiel pour le contrôle de la qualité, car elle est indicative de la pureté de la chaux.

Elle exprime la quantité d'oxyde de calcium disponible, sous forme d'oxyde, comme sous forme d'hydroxyde, et chimiquement

réactif. Elle s'oppose à la teneur en oxyde de calcium total (ou « chaux totale ») qui englobe, en plus de l'oxyde de calcium réactif, l'oxyde de calcium « lié » chimiquement, sous forme de carbonates, de silicates, d'aluminates ou de ferrites de calcium, et dont la réactivité et les propriétés chimiques sont tout-à-fait différentes de celles de l'oxyde de calcium « disponible ».

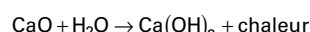
La **méthode de détermination de la teneur en chaux disponible** est l'essai au saccharose. Elle repose sur la solubilité de l'oxyde et de l'hydroxyde de calcium dans une solution de saccharose (sucre raffiné).

La solution alcaline de saccharate de calcium, qui résulte de cette mise en solution, fait alors l'objet d'un titrage par l'acide chlorhydrique jusqu'à neutralisation.

### 1.3.3 Analyses physiques

#### ■ Test de réactivité à l'eau d'une chaux vive

Cette méthode tire profit du dégagement de chaleur qui se produit suite à l'extinction d'une chaux vive par l'eau :



$$\Delta H = -1155 \text{ kJ/kg de CaO}$$

L'essai est pratiqué de la manière suivante (cf. figure 2). Dans un récipient de type Dewar, on ajoute 150 g de chaux vive, dont on veut tester la réactivité, à 600 g d'eau préalablement portée à une température de 20 °C. L'élévation de température dans le récipient est suivie en continu en fonction du temps : c'est la courbe d'extinction par voie humide. Le temps mis par ce mélange pour atteindre une température de 60 °C est la valeur de référence appelée  $t_{60}$ . Il s'exprime en minutes. Ce délai est inversement proportionnel à la réactivité intrinsèque de la chaux, elle-même dépendante de la granulométrie, du taux d'oxyde de calcium disponible et, surtout, du procédé de calcination de la pierre calcaire d'origine.

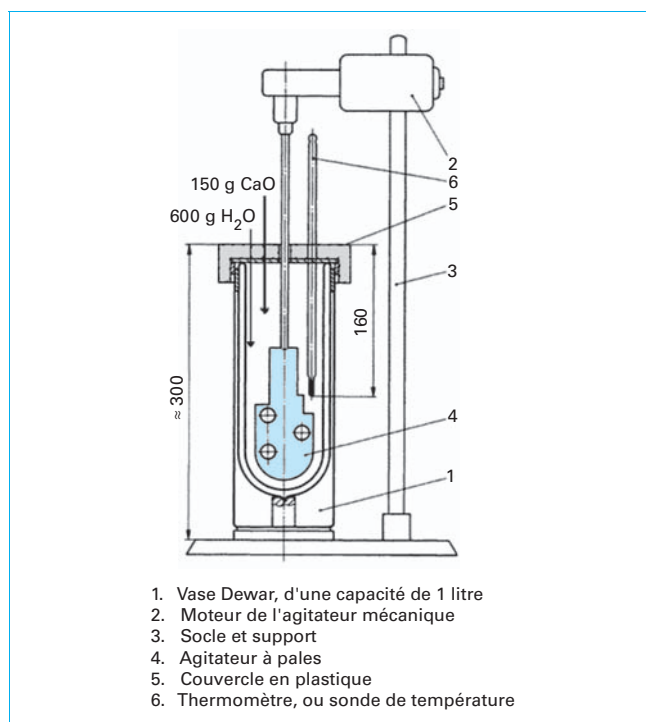


Figure 2 – Appareillage de mesure de réactivité de la chaux



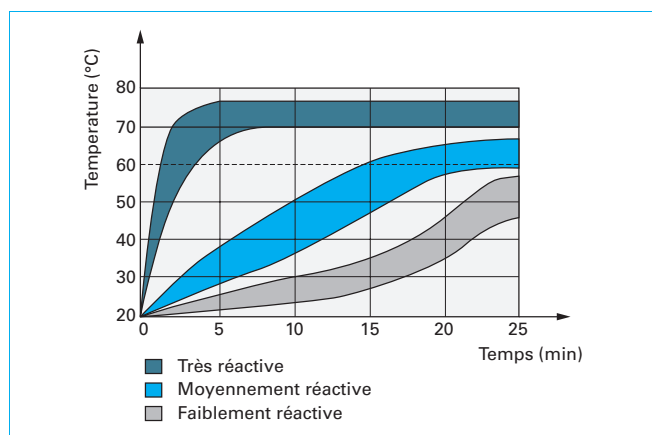


Figure 3 – Différents fuseaux de courbes de réactivité

D'autres facteurs, tels que la présence d'impuretés dans la chaux, ou encore des altérations du produit suite aux diverses manipulations (absorption d'eau, de dioxyde de carbone de l'atmosphère ambiante durant le stockage ou de la préparation de l'échantillon) peuvent affecter la réactivité.

L'initiation de la réaction peut être retardée dans le temps avec, par exemple, la présence d'hydroxyde de calcium. Cependant, une fois la réaction d'extinction enclenchée, c'est bien la réactivité intrinsèque de la chaux qui gouverne, à la fois, la vitesse de dégagement de chaleur et la température finale atteinte par le mélange.

Ces dernières caractéristiques permettent alors de « classer » une chaux vive comme étant très réactive ( $t_{60}$  faible), moyennement réactive, ou faiblement réactive ( $t_{60}$  élevé) et de vérifier ainsi l'adéquation du produit avec l'usage auquel il est destiné (cf. figure 3).

#### ■ Finesse

La finesse de la chaux, notamment hydratée, se mesure par la détermination des refus aux tamis de 90  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$ . Cette opération se fait *via* un tamisage à courant d'air.

#### ■ Masse volumique en vrac

La masse volumique en vrac est déterminée en versant, à l'aide d'un appareillage décrit dans la norme EN 459-2, la quantité de chaux nécessaire pour remplir un récipient d'un litre que l'on pèse ensuite.

#### ■ Essais particuliers pour le domaine de la construction

##### • Stabilité, tests d'expansion ou de retrait

L'instabilité de la chaux de construction peut se manifester, après mise en œuvre d'un mortier par exemple, par de la fissuration, la formation de cavités ou de cloques, des déformations de surface, etc. Ces défauts ont pour origine la présence de particules grossières (> 0,6 mm) ou, *a contrario*, de fines en excès (< 74  $\mu\text{m}$ ), ou encore d'oxydes non hydratés susceptibles de subir une hydratation retardée.

Plusieurs méthodes sont répertoriées pour évaluer les risques de désordres liés à ces paramètres, chacune d'elle étant relative à un type de chaux donné :

- chaux hydratées fortement calciques et chaux hydrauliques : hydratation à la vapeur d'une éprouvette circulaire et mesure de la variation de son diamètre ;
- chaux vive, chaux en pâte, chaux dolomitique, hydratée ou non : visualisation de fissures éventuelles sur des gâteaux de pâte de chaux étuvés ;
- chaux calciques hydratées, en pâte et chaux dolomitiques hydratées, contenant des particules > 200  $\mu\text{m}$  : façonnage et

étuvage de galettes de mélange chaux/plâtre, et visualisation de fissures éventuelles.

##### • Essais sur mortiers de chaux : pénétration et écoulement

Les mesures des valeurs de pénétration, du besoin en eau et de la teneur en air nécessitent, au préalable, la fabrication d'un mortier normalisé, dont la teneur en eau est déterminée par une série de tests d'écoulement, également normalisés.

À partir de cette composition de mortier, les tests de caractérisation (valeur de pénétration, teneur en air, rétention d'eau) peuvent être accomplis.

##### • Rendement des chaux vives calciques

Le rendement des chaux vives calciques après extinction est la détermination du volume occupé par cette chaux après extinction à l'eau. La hauteur qu'occupe la couche de pâte de chaux, issue de l'extinction de 200 g de CaO dans le récipient d'extinction normalisé, est illustrative de ce rendement et permet son calcul.

## 2. Fabrication de la chaux aérienne

### 2.1 Généralités

La fabrication industrielle de la chaux aérienne consiste à transformer un matériau naturel (le carbonate de calcium ou le carbonate mixte de calcium et magnésium) en un produit aux multiples usages et, donc, aux spécifications techniques différentes selon les usages.

Le carbonate de calcium (le calcaire) et le carbonate mixte de calcium et de magnésium (les calcaires magnésiens et la dolomite, parfois appelée « dolomie crue »), sont le point de départ de la fabrication de la chaux aérienne. Dans certaines langues, on désigne même le calcaire par le terme « pierre à chaux » : « *limestone* » en anglais, « *kalkstein* » en allemand.

Le carbonate de calcium est largement présent dans l'écorce terrestre avec une teneur moyenne de l'ordre de 3,5 à 4,0 % (2,0 % pour le carbonate mixte).

Les principales étapes de fabrication sont résumées dans le schéma de la figure 4 qui va être détaillé par la suite. Il s'applique, aussi bien aux produits calciques, qu'aux produits magnésiens ou dolomitiques. On distingue successivement la phase amont, qui va de l'extraction à la préparation du calcaire avant enfournement, la calcination de la pierre dans les fours, et la phase aval qui concerne l'élaboration et le conditionnement du produit final avant chargement pour expédition.

### 2.2 Phase amont, de l'extraction à la préparation de la pierre

Pour le chauxournier, un gisement de carbonate de calcium se caractérise, non seulement par son étendue et sa pureté, mais aussi par le comportement au four de la roche. Il n'est pas rare, en effet, qu'une pierre de bonne composition apparente se cuise mal et exige une forte quantité de combustible, voire même qu'elle ne puisse pas se cuire correctement parce qu'elle éclate dans le four et perturbe le processus de cuisson, au risque de détériorer le four.

Il existe quelques exploitations souterraines, mais la plupart des carrières sont à ciel ouvert avec, lorsque nécessaire, rabattement de nappe par des groupes de pompage pour permettre l'exploitation hors eau (cf. figure 5).

La phase amont se décompose en plusieurs opérations, décrites ci-après (cf. figure 4).

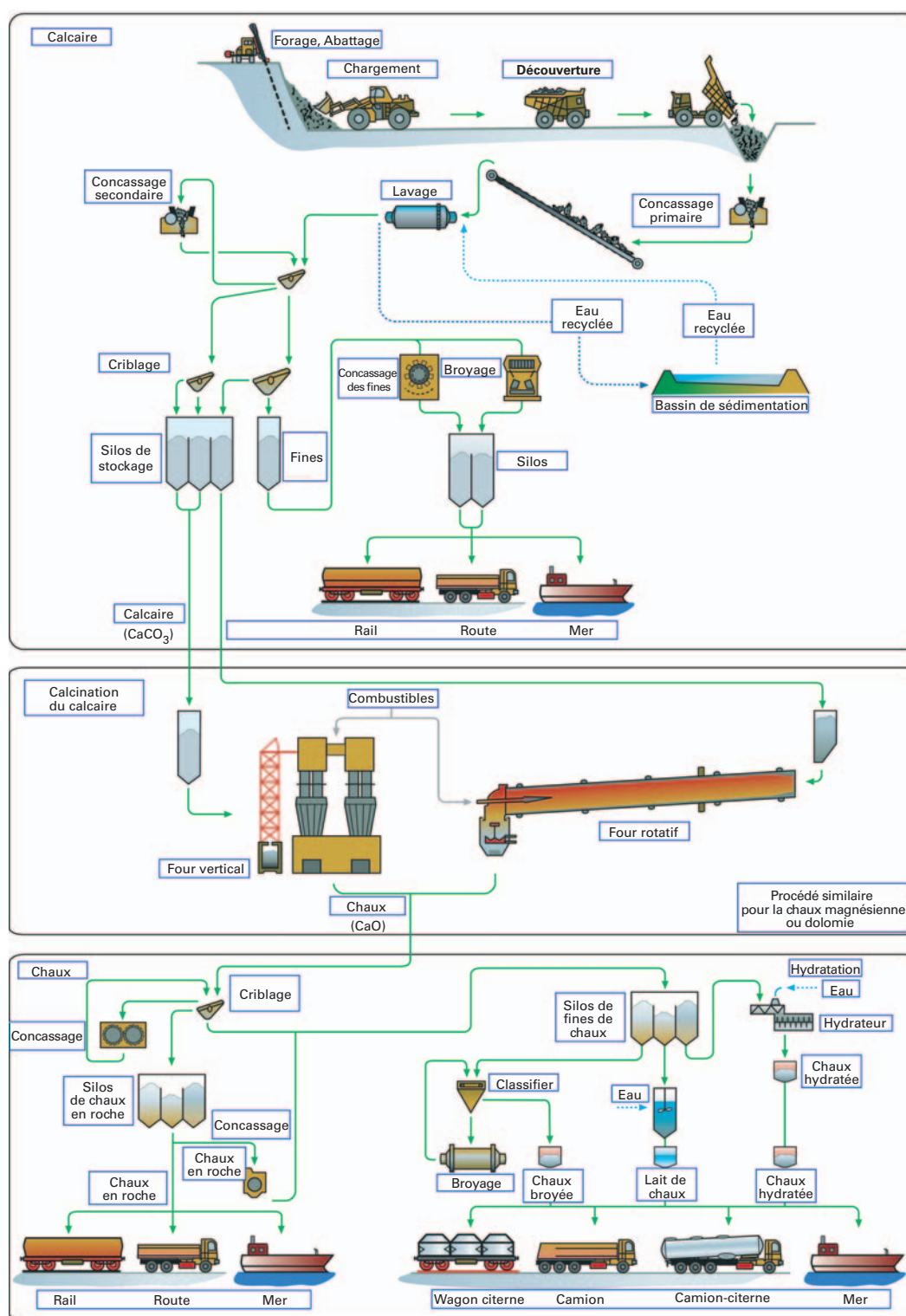


Figure 4 – Schéma de production de la chaux (Crédit Lhoist)



Figure 5 – Carrière de Dugny-sur-Meuse (Crédit Lhoist)

### 2.2.1 Enlèvement des terres de découverte

En général, les gisements sont recouverts d'une épaisseur de terre ou de roche altérée d'épaisseur variable (de 0 à 2 m). Il faut donc enlever cette couche, ainsi que la végétation qui la recouvre. Cette opération s'appelle la « découverte ». Il arrive aussi, lorsqu'on est en présence d'un gisement fissuré, que de l'argile vienne remplir les fissures, notamment dans les étages supérieurs. Cette pollution naturelle ne peut se traiter que par une opération spécifique de lavage de la pierre qui se fait ultérieurement, avant son enfouissement.

### 2.2.2 Abattage de la pierre

À l'exception des gisements de calcaire tendre, tel que la craie, qui sont exploités à la pelle hydraulique, ou par ripage, puis reprise à la chargeuse, l'extraction de la pierre se fait par abattage à l'aide d'explosif selon des fronts de taille en gradins de 10 à 30 m de hauteur (cf. figure 6).

Le chef de carrière définit son plan de tir en fonction de la nature de la pierre, du comportement du tir précédent, du volume de pierre à abattre, et de la dimension des blocs souhaitée.

L'analyse des débris (ou « *cuttings* »), obtenus lors du forage des trous servant à placer la charge explosive, permet de définir si des mélanges de pierre sont nécessaires pour garantir la constance de la composition chimique de la chaux finale.

Après abattage, les pierres sont chargées dans des tombereaux qui les transportent vers le poste de concassage. Les blocs de trop grosse taille subissent un préfractionnement au marteau pneumatique avant d'être chargés.

### 2.2.3 Concassage primaire

Le concasseur primaire peut être à mâchoires, à cylindres, à couteaux ou giratoire. Son rôle est de réduire la dimension des plus gros éléments à 250 mm, et d'éliminer par criblage les éléments plus petits impropres à la cuisson (inférieurs à 10 et jusqu'à 30 mm), avant acheminement de la pierre par bandes transporteuses jusqu'à un stock de réserve ou, directement, au concassage secondaire.

### 2.2.4 Lavage

Lorsque le gisement est pollué par des argiles, une opération de lavage est nécessaire. Cette opération nécessite une station de traitement des eaux pour le recyclage de l'eau et un dispositif de traitement des boues.

### 2.2.5 Concassage secondaire, criblage et stockage

La pierre 10-30/250 mm est envoyée au poste de concassage secondaire, suivi d'un criblage. Le but de l'opération est de calibrer

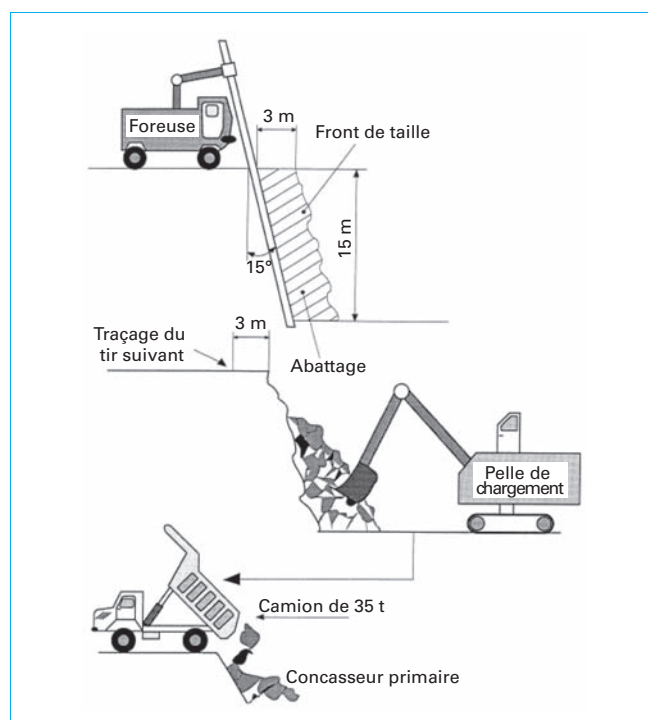


Figure 6 – Exploitation de la carrière (Crédit ESEM 1985)

la pierre, dont la dimension maximale ne dépasse pas 150 mm au final, en fonction des types de fours :

- le 75/150 mm est expédié vers des silos de stockage avant d'alimenter les fours droits de grande capacité ou pouvant recevoir des gros produits ;
- le 30/75 mm est expédié vers des silos de stockage avant d'alimenter les fours droits de plus faible capacité ou pouvant recevoir des produits plus petits ;
- le 10/60 mm est expédié vers des trémies de stockage pour alimenter les fours rotatifs.

La pierre inférieure à 10 mm n'est actuellement pas traitable, d'un point de vue économique, dans les fours à chaux actuels. Elle peut être utilisée telle quelle, comme agrégats pour la construction, ou broyée pour l'agriculture, l'alimentation animale, la désulfuration des fumées, ou la construction en tant que *filler*.



**Remarque :** certaines pierres sont gélives, avec risque de fractionnement en période de gel, ou poreuses, et susceptibles d'emmagasiner de l'eau. Leur stockage prolongé, en période hivernale ou pluvieuse, peut contrarier le bon fonctionnement des fours. Dans ce cas, l'exploitation du gisement est ajustée à la demande des fours, ce qui nécessite des tirs d'abattage journaliers.

## 2.3 Calcination de la pierre

### 2.3.1 Décomposition du carbonate, ou calcination

#### ■ Thermodynamique

Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) se décompose, lorsqu'il est chauffé au dessus de  $800^\circ\text{C}$ , en oxyde de calcium  $\text{CaO}$  et dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) :



Cette réaction de décomposition, hétérogène et réversible, est fortement endothermique. Cette caractéristique thermodynamique peut être déterminée à l'aide de l'enthalpie de réaction  $\Delta H$  et de la pression d'équilibre  $p_{\text{CO}_2, \text{eq}}$ , dont la relation s'exprime par la formule suivante :

$$p_{\text{CO}_2, \text{eq}} = \exp \left[ -\frac{\Delta H}{RmT} + \frac{\Delta S}{Rm} \right]$$

avec  $T$  température,  
 $\Delta S$  entropie,  
 $Rm$  constante universelle des gaz.

Ces grandeurs sont fonction de la température et sont influencées, entre autres, par la nature du calcaire, le degré d'impuretés et, surtout, le réseau cristallin, de sorte qu'en pratique chaque type de calcaire possède sa propre enthalpie de réaction, et sa propre fonction de pression d'équilibre dépendante de la température. Plus le degré d'impuretés augmente, plus l'enthalpie de réaction diminue, et  $p_{\text{CO}_2, \text{eq}} = f(T)$  évolue vers des températures plus basses. Les tables de données thermodynamiques donnent des valeurs très différentes. Cependant, pour la plupart de nos calculs, nous pouvons prendre, entre  $800$  et  $1\,000^\circ\text{C}$  :

$$\Delta H_{900} = 3\,200 \text{ kJ/kg CaO}$$

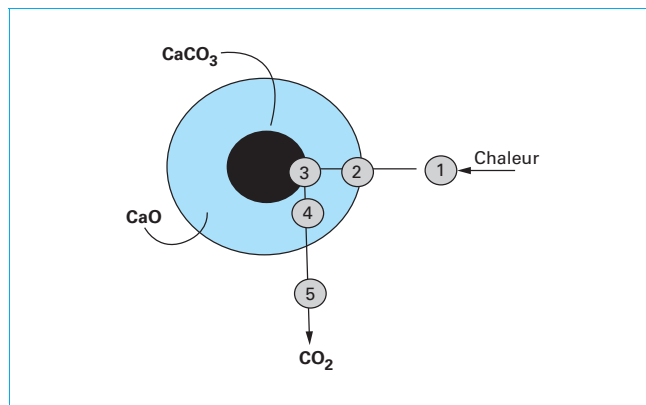
Pour la pression d'équilibre,  $p_{\text{CO}_2, \text{eq}}$ , entre  $800$  et  $1\,000^\circ\text{C}$ , nous avons respectivement  $217$  à  $222 \text{ hPa}$  et  $3\,570$  à  $3\,920 \text{ hPa}$ , selon les auteurs.

#### ■ Cinétique

La réaction de décomposition du calcaire se caractérise par le fait qu'elle se produit dans un front de décomposition (zone de réaction), dans lequel le noyau non décomposé de  $\text{CaCO}_3$  et l'enveloppe de  $\text{CaO}$  qui s'est formée se touchent (figure 7).

Ce front de décomposition se déplace de la périphérie vers le centre à une vitesse déterminée. En même temps, il y a transfert de chaleur, de l'extérieur vers l'intérieur, et dégagement de dioxyde de carbone vers l'extérieur. Cette réaction présente les cinq étapes suivantes :

- transfert de la chaleur de l'extérieur vers la surface des grains, généralement par convection ;
- conduction de la chaleur à travers la couche déjà décomposée vers la zone de réaction ;



**Figure 7 – Schéma de la réaction de décomposition du carbonate de calcium (modèle de l'enveloppe ou de la boule réduite)** (Crédit Lhoist)

- réaction chimique dans la zone de réaction (avec utilisation de la quantité de chaleur apportée, dégagement de dioxyde de carbone, germination, et recristallisation de l'oxyde de calcium formé) ;
- diffusion du dioxyde de carbone à travers la couche d'oxyde de calcium vers la surface des grains ;
- passage de matière de la surface des grains vers l'environnement.

La vitesse globale des réactions est une fonction des vitesses de ces cinq étapes. Dans la mesure où ces vitesses se situent dans un même ordre de grandeur, il s'établit un équilibre entre elles, dans les conditions de température et de pression partielle de dioxyde de carbone à la surface, ou plutôt sur le front de décomposition ; de sorte que la vitesse globale de réaction et la vitesse des diverses étapes acquièrent la même valeur.

• **Si une étape se déroule avec une lenteur extrême**, elle détermine la vitesse de l'ensemble de la réaction. Il en résulte des valeurs limites déterminées pour les conditions de température et de pression partielle données. La vitesse d'ensemble est alors uniquement une fonction de la vitesse de cette étape. Ce sont principalement la dimension des grains, la température, et la pression partielle de  $\text{CO}_2$ , qui déterminent l'étape régissant la vitesse.

• **S'il s'agit de gros grains**, le passage et la conduction de chaleur prédominent, si les températures environnantes sont élevées et les pressions partielles de  $\text{CO}_2$  faibles. Au contraire, c'est le débit des matériaux et la diffusion de  $\text{CO}_2$  à travers la couche de  $\text{CaO}$  qui prédominent dans le cas de températures basses et de pression partielle de  $\text{CO}_2$  élevées.

• **Pour de la poudre**, ce sont les réactions chimiques qui jouent le rôle décisif.

#### ■ Croissance granulaire ou frittage

Au cours de la décarbonatation, le dioxyde de carbone formé doit donc diffuser, hors de la pierre, au travers de la couche de  $\text{CaO}$  formée. Cette diffusion du  $\text{CO}_2$ , ajoutée à la différence de volume molaire entre le carbonate de calcium et l'oxyde de calcium ( $36,9$  et  $16,9 \text{ cm}^3/\text{g}$  respectivement), entraîne le développement d'une structure poreuse au sein du grain de  $\text{CaO}$ . À des températures modérées, la porosité maximale de la chaux produite, estimée à partir des volumes molaires, est de l'ordre de  $54\%$ . En pratique, elle se situe plutôt entre  $20$  et  $54\%$ , à la suite d'un phénomène physique permettant la croissance des grains de chaux au cours du traitement thermique : le frittage.

Le **frittage** est, en fait, un processus de transport de matière des parties riches vers des parties déficientes (telles que des joints de grains et *via*, par exemple, les lacunes dans le réseau cristallin de l'oxyde de calcium) par un processus de minimisation de l'énergie de surface du grain de chaux.

Finalement, plus le rayon de courbure du grain est important – c'est-à-dire plus le grain est gros – plus son énergie de surface est faible – c'est-à-dire plus il est stable – et, donc, plus la porosité est également faible. Ce processus de croissance granulaire et de minimisation d'énergie de surface est donc appelé « frittage » – ou plutôt, dans le cas de la chaux et aux températures classiques de cuisson, devrait on parler de « préfrittage » ou « recuit » – et joue un rôle très important sur les caractéristiques générales de la chaux produite (dureté, réactivité à l'eau,...) et, donc, sur son utilisation, comme il en sera question par la suite.

En règle générale, il semble qu'une température élevée, ainsi qu'une atmosphère riche en dioxyde de carbone, favorise fortement le frittage de la chaux. Bien entendu, ces affirmations ne peuvent être considérées que comme des tendances, et non comme des faits rigoureusement obtenus et bien reproductibles. En effet, comme il est dit précédemment, la complexité de cette réaction de décarbonatation résulte de la grande quantité de paramètres pouvant influencer son déroulement et son aboutissement.

## 2.4 Paramètres influençant la calcination

### 2.4.1 Roche

La chimie de la roche est extrêmement influente sur la cinétique de décarbonatation et aucune tendance ne peut être clairement établie. En effet, la quantité d'impuretés, leurs natures, les formes sous lesquelles elles se trouvent et leurs localisations dans l'édifice carbonaté sont autant de paramètres différents à connaître. D'autre part, certaines de ces impuretés, sous certaines formes particulières, semblent jouer un rôle important dans le processus de frittage de la chaux et, ainsi, influencent considérablement les propriétés du produit final. Enfin, la texture physique de la pierre (porosité, teneur en eau, taille des cristallites,...) est également un paramètre des plus importants.

En effet, une pierre tendre et friable ne se cuira évidemment pas de la même manière qu'une roche dure et compacte. Mais, l'importance de la texture ne s'arrête pas là : deux pierres d'apparence dure et compacte peuvent avoir des cinétiques de décarbonatation identiques et, finalement, conduire à des chaux de propriétés très différentes.

### 2.4.2 Conditions du traitement thermique

La température maximale atteinte au cours de la décarbonatation est évidemment un critère très important. En règle générale, plus cette température est élevée et plus la cinétique de décarbonatation est rapide. De plus, le niveau de température atteint est un facteur essentiel dans le processus de frittage de la chaux et, donc, affecte les propriétés du produit final.

Par ailleurs, il est évident que le temps de séjour dans la zone de température élevée est un critère primordial dans le processus de décarbonatation du calcaire, mais surtout sur le phénomène de recuit ou de frittage de la chaux.

### 2.4.3 Caractéristiques de l'atmosphère gazeuse

L'atmosphère gazeuse dans laquelle s'effectue la décarbonatation est un paramètre prépondérant. La simple observation du bilan de la réaction chimique de décarbonatation montre la formation de CO<sub>2</sub> gazeux. Ainsi, plus la proportion de dioxyde de carbone dans les gaz ambiants est importante, et moins la vitesse de réaction

sera élevée. Dans un même ordre d'idées, plus la pression ambiante sera importante, moins le CO<sub>2</sub> aura de facilités à diffuser à travers la chaux déjà formée et donc, une fois de plus, la cinétique de décarbonatation sera lente.

Par ailleurs, l'atmosphère gazeuse intervient également dans le processus de frittage de la chaux. Dans ce cas, il semble bien établi que la présence de dioxyde de carbone favorise fortement ce frittage, ainsi que la présence de vapeur d'eau.

## 2.5 Fours à chaux

Un four à chaux est un réacteur dans lequel les morceaux de calcaire sont portés pendant une durée déterminée à une température supérieure à 800 °C.

La cuisson de la chaux est donc, en principe, une opération très simple. Sa réalisation pose cependant quelques problèmes, car il faut traiter des tonnages importants et fabriquer un produit de très bonne qualité.

Les fours peuvent être classés en deux catégories :

- fours produisant une chaux de gros calibre supérieur à 50 mm et fours produisant des chaux de petit calibre inférieur à 50 mm et des chaux spéciales ;
- fours verticaux et fours rotatifs.

C'est ce second type de classification que nous allons suivre.

### 2.5.1 Fours verticaux

Ces fours sont conçus pour calciner de la grosse pierre, afin d'avoir une charge perméable aux fumées de combustion et de réactions. Cependant, ils peuvent travailler avec des petits calibres à condition de diminuer le rendement. Dans ces fours, le temps de séjour moyen est de l'ordre de 24 heures. On distingue les fours à cuve ou fours droits, les fours annulaires ou Warmestelle, et les fours à flux parallèles.

#### ■ Four à cuve ou four droit

La production typique de ces fours est de 150 t/j. Ils sont souvent regroupés par batteries de quatre (cf. figure 8).

Un four droit à cuve est un long cylindre de 30 m de hauteur et de 5 m de diamètre. La paroi interne est revêtue de briques réfractaires, dont la durée de vie varie de 2 à 3 ans. Leur rôle est de protéger la virole métallique externe et de limiter les pertes de chaleur par rayonnement des parois.

Les trois parties principales d'un four droit sont, en partant du sommet :

- l'enfournement de la pierre et du coke ;
- le corps du four pour la décarbonatation, avec des températures entre 900 et 1 300 °C ;
- l'évacuation de la chaux avec le refroidissement de cette dernière à 70 °C.

Dans les années 1970, nombreux sont ces fours qui ont été modernisés avec suppression de l'alimentation en coke, et mise en place de lances d'injection de combustibles dans la zone de cuisson, permettant de mieux contrôler la cuisson.

#### ■ Four annulaire ou four Warmestelle

La production typique de ces fours est de 150 t/j, ou 300 t/j. Ils sont souvent regroupés par batteries de quatre. Il existe également des fours de 600 t/j de capacité (cf. figure 9).

Un four annulaire de 300 t/j se présente comme un long cylindre de 35 m de hauteur et de 6,5 m de diamètre, comportant à l'intérieur un cylindre concentrique de 17 m de hauteur et de 2,7 m de diamètre servant à la récupération des fumées, d'où son nom de four annulaire.

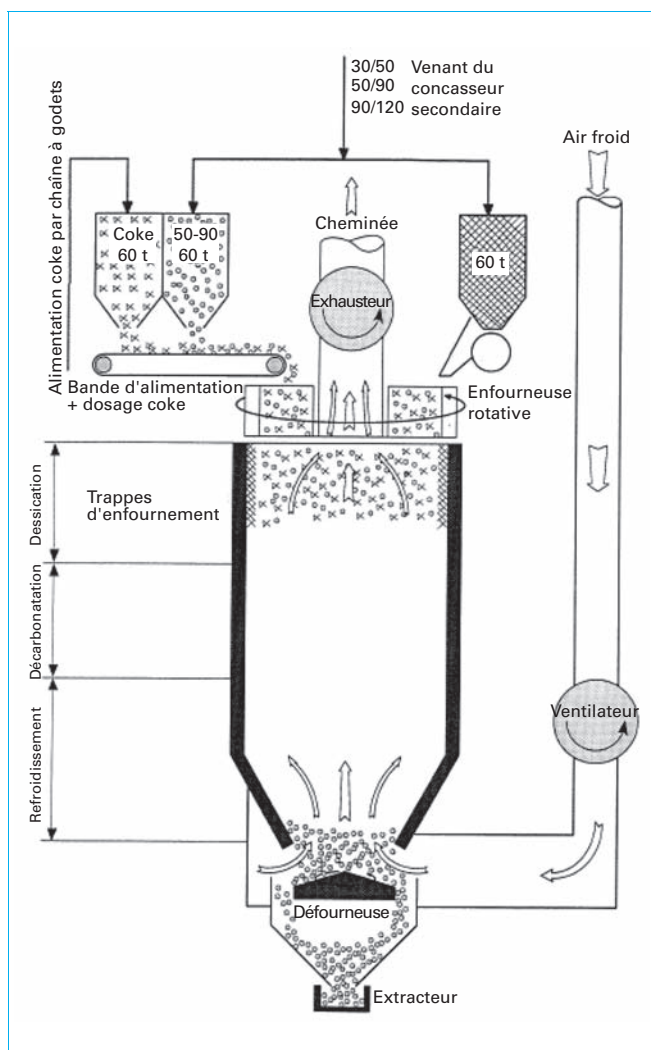


Figure 8 – Four à cuve ou four droit (Crédit Lhoist)

Les trois parties principales d'un four annulaire sont, en partant du sommet :

- une zone de préchauffage, avec approvisionnement en pierre et évacuation des fumées ;
- le corps du four avec une zone de cuisson composée de 5 brûleurs supérieurs à 22,95 m, et de 5 brûleurs inférieurs à 19,25 m permettant d'atteindre des températures entre 900 et 1 300 °C ;
- l'évacuation de la chaux avec le refroidissement de cette dernière.

#### ■ Four à flux parallèles

Il est possible, à partir de deux fours droits suffisamment rapprochés, de créer un four à flux parallèles à deux cuves. Ces deux fours droits sont reliés entre eux au niveau de 9 à 12 m par un canal de liaison appelé « carneau », garni de réfractaires (cf. figure 10).

Les fours de ce type ont une capacité standard de 300 t/j, mais nous pouvons trouver des capacités allant jusqu'à 600 t/j.

Pour un four de 300 t/j, nous avons une hauteur de 30 m. Le diamètre intérieur est de 4 m en partie inférieure, et de 2,7 m en partie supérieure. Les deux cuves sont séparées d'axe en axe de 8,5 m.

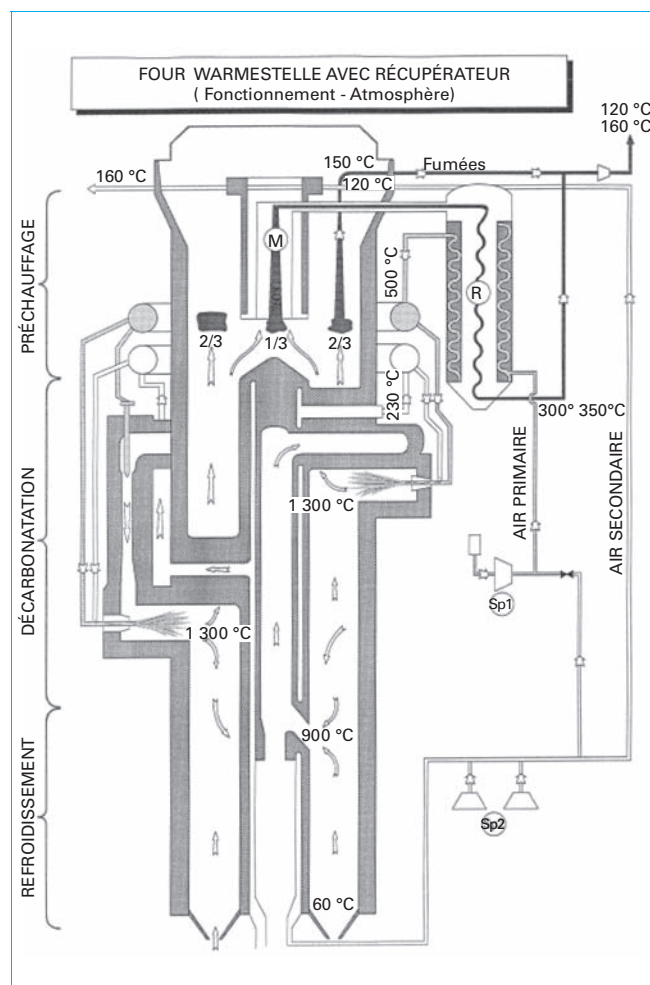


Figure 9 – Four annulaire (Crédit Lhoist)

Les lances à combustibles plongent dans le four, et leurs nez se trouvent à environ 3 m en dessous de la partie haute du four.

Il existe aussi des fours avec trois cuves. Les cuves sont principalement cylindriques, mais peuvent être carrées.

Les trois parties principales d'un four à flux parallèles sont en partant du sommet :

- une zone de préchauffage, avec approvisionnement en pierre et évacuation des fumées ;
- le corps du four pour la décarbonatation, avec des températures entre 800 et 1 100 °C ;
- l'évacuation de la chaux avec le refroidissement de cette dernière.

L'air de refroidissement est introduit simultanément au bas des cuves. Ce four travaille par cycles en alternances sur les cuves. Après enfournement sur une cuve, la combustion se fait sur l'autre permettant aux fumées de passer par le canal de liaison et de préchauffer la pierre qui vient d'être enfournée. Une automatisation des clapets de chargement de la pierre et d'évacuation des fumées permet au four de travailler en légère surpression.

La charge est, avant tout, cuite suivant un flux parallèle et l'air de combustion est préchauffé par récupération. Les fumées servent au chauffage du récupérateur qui est constitué par la pierre se

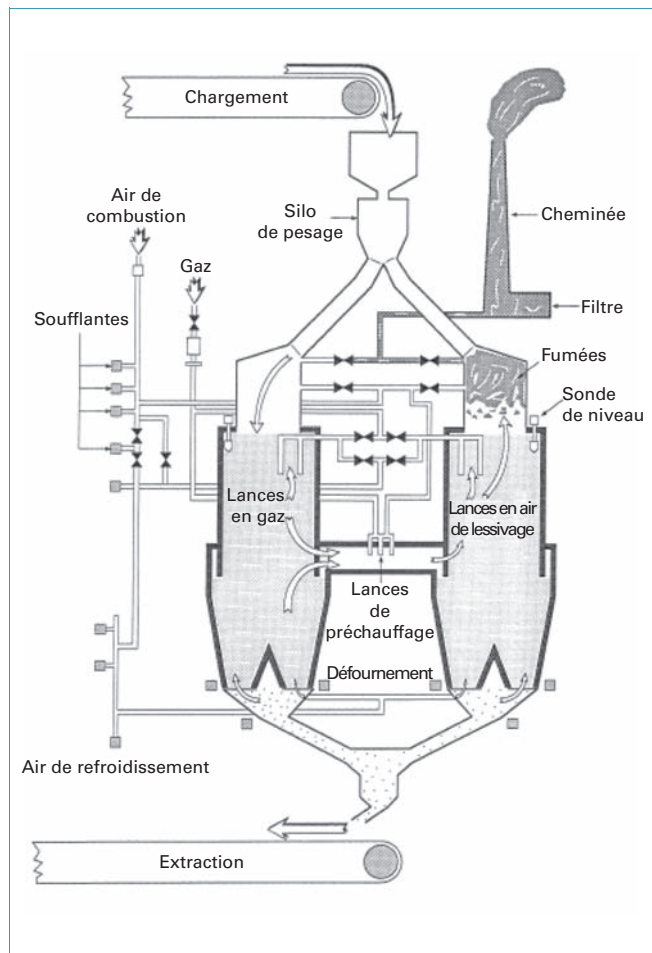


Figure 10 – Four à flux parallèles (Crédit Lhoist)

trouvant dans la cuve en préchauffage. Un tel processus de cuisson est possible grâce au concours d'au moins deux cuves, dont le chauffage et le courant gazeux sont périodiquement inversés.

Ce sont les fours les plus couramment rencontrés avec les fours annulaires.

### 2.5.2 Fours rotatifs

Ces fours sont inspirés des fours cimentiers. Ce sont des cylindres garnis de réfractaires, de longueur et diamètre variables (3 à 4 m pour le diamètre) selon la capacité qui peut aller de 150 à 1 800 t/j. Il en existe différentes configurations :

- les fours longs, sans préchauffeurs ;
- les fours, avec préchauffeurs, qui peuvent être verticaux, surtout aux États-Unis, ou à grille (cf. figure 11).

Le système de refroidissement peut être à ballonnets, à grille, ou en trémie.

L'intérieur du cylindre est souvent équipé de relevateurs qui permettent un meilleur échange entre la matière et les gaz chauds dont la température se situe entre 900 et 1 400 °C.

Comme pour les fours verticaux, nous retrouvons trois zones principales :

- une zone de préchauffage, avec approvisionnement en pierre ;
- le corps du four pour la décarbonatation ;
- l'évacuation de la chaux avec le refroidissement de cette dernière.

Contrairement aux fours verticaux qui ont un enfournement et un défournement discontinus, le processus d'approvisionnement des fours rotatifs est entièrement continu. Le temps de séjour y est de l'ordre de 6 à 8 heures.

Les fours rotatifs présentent les avantages suivants :

- de fortes capacités de production, jusqu'à 1 800 t/j ;
- la possibilité d'utiliser des petits calibres (< 60 mm) ;
- une souplesse d'utilisation dans la capacité de production, et les changements de qualité.

Par contre, un four rotatif est très énergivore, et nécessite de gros frais de maintenance.

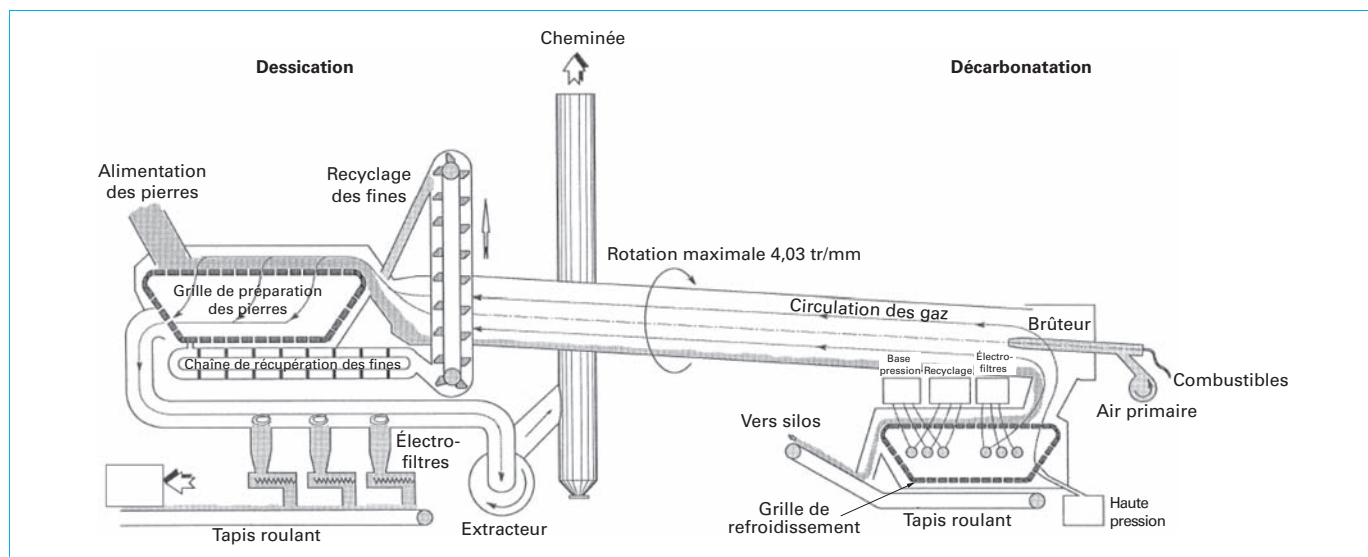


Figure 11 – Four rotatif avec grille de préchauffage (Crédit Lhoist)



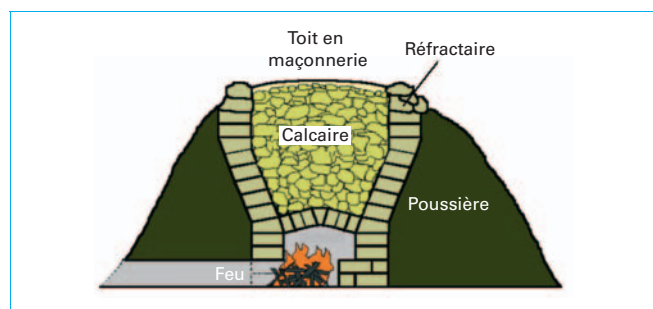


Figure 12 – Ancien four à chaux (Crédit Lhoist)

### 2.5.3 Autres types de fours

Il existe d'autres types de fours, beaucoup moins répandus que ceux décrits auparavant. Citons notamment :

- les **fours de type « Calcimatic »** : four à sole tournante ayant l'intérêt de pouvoir calciner des petits calibres, mais dont le système d'entraînement de la sole peu présenter des difficultés mécaniques ;
- les **fours « cascade »** : comme leur nom l'indique, la descente des matériaux dans ces fours se fait en cascade avec des paliers munis de brûleurs.

Nous mentionnerons, pour mémoire, les anciens modèles de four qui étaient directement intégrés dans la carrière. Ils ont quasiment disparu (cf. figure 12).

### 2.5.4 Données générales sur le fonctionnement des fours

La plupart des fours acceptent des combustibles, aussi bien liquides que solides. Bien entendu, tous sont équipés de systèmes de dépoussiérage. Le tableau 1 résume les principales caractéristiques des fours les plus répandus.

La bonne conduite de la calcination des calcaires nécessite donc une connaissance aussi complète que possible :

- de la pierre ;
- de l'outil de cuisson ;

Tableau 1 – Synthèse des caractéristiques des fours à chaux (Crédit Boynton)

	Calibre des pierres enfournées (en mm)	Production journalière (en t/j)	Consommation spécifique (*) (en GJ/t CaO)
Four droit	75/150 ou 35/75	100 à 200	4,0 à 4,6
Four annulaire	75/150 ou 35/75	100 à 600	3,8 à 4,4
Four à flux parallèles	75/150 ou 35/75	300 à 600	3,5 à 4,0
Four rotatif avec préchauffeur	10/60	300 à 1 800	5,0 à 5,5
Four rotatif long	10/60	300 à 1 800	5,5 à 7,0

(\*) Les consommations spécifiques peuvent augmenter fortement en présence de pierres poreuses humides.

- du mécanisme de décarbonatation ;
- des tests de caractérisation des produits.

## 2.6 Aval four et produits finis

### 2.6.1 Criblage

Cette opération permet de calibrer la chaux « tout venant » sortie du four en différentes granulométries :

- roches > 20 mm ;
- 5 mm < grains < 20 mm ;
- fines (ou criblées) < 5 mm.

Ces chaux peuvent être commercialisées telles quelles, ou acheminées vers les ateliers de broyage ou d'hydratation.

### 2.6.2 Broyage

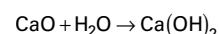
Le broyage est nécessaire pour des applications qui nécessitent un calibre inférieur à 5 mm. On parle alors de « chaux broyée » (< 2 mm), ou « pulvérisée » (< 200 µm), ou moulue (< 90 µm), selon la granulométrie finale.

Selon la dureté de la chaux et la finesse désirée, les broyeurs sont à marteaux, à meules ou, éventuellement, à boulets.

Le tamisage du produit broyé se fait par des séparateurs dynamiques qui assurent une coupure granulométrique et évitent la présence de particules de grandes tailles qui pourraient être préjudiciables pour les utilisateurs.

### 2.6.3 Hydratation

Le passage de la chaux vive à la chaux éteinte se fait par ajout d'eau selon une réaction chimique exothermique (1 155 kJ/kg CaO), dite « extinction » ou « hydratation » :



Industriellement, cette réaction est réalisée dans un réacteur appelé « hydrateur » où la chaux est mise en contact avec l'eau (voir figure 13). On distingue l'hydratation par voie sèche et l'hydratation par voie humide.

#### ■ Hydratation par voie sèche

La chaux vive et l'eau peuvent être incorporées dans l'hydrateur via un pré-mélangeur ; la chaux, d'un calibre inférieur à 10 mm, voire inférieur à 4 mm, y est dosée par une vis doseuse. La quantité d'eau introduite dans l'hydrateur est ajustée de manière à ce qu'elle soit suffisante pour assurer l'hydratation, mais également l'évacuation de la chaleur dégagée par la réaction.

Certaines particules de chaux vive ne réagissent pas lors de l'hydratation. Il peut s'agir d'impuretés, mais aussi de particules de calcaire non transformées en chaux vive (les « incuits ») ou, inversement, de particules de chaux vives trop cuites (les « surcuits »). Cet ensemble forme ce que l'on appelle le « grappier », qui est éliminé dans deux séparateurs successifs, après broyage de ses éléments les plus grossiers. À la sortie de l'hydrateur, la chaux éteinte est introduite dans un séparateur où elle subit une sélection granulométrique.

La qualité de l'eau d'hydratation a une importance primordiale sur la qualité du produit final car des traces d'impuretés peuvent changer la réactivité de la chaux vive et impacter les propriétés de la chaux hydratée. La chaux hydratée ou éteinte est parfois appelée « fleur de chaux ».

**Le terme de « chaux blutée » correspond à une chaux hydratée dont les impuretés ont été enlevées.**



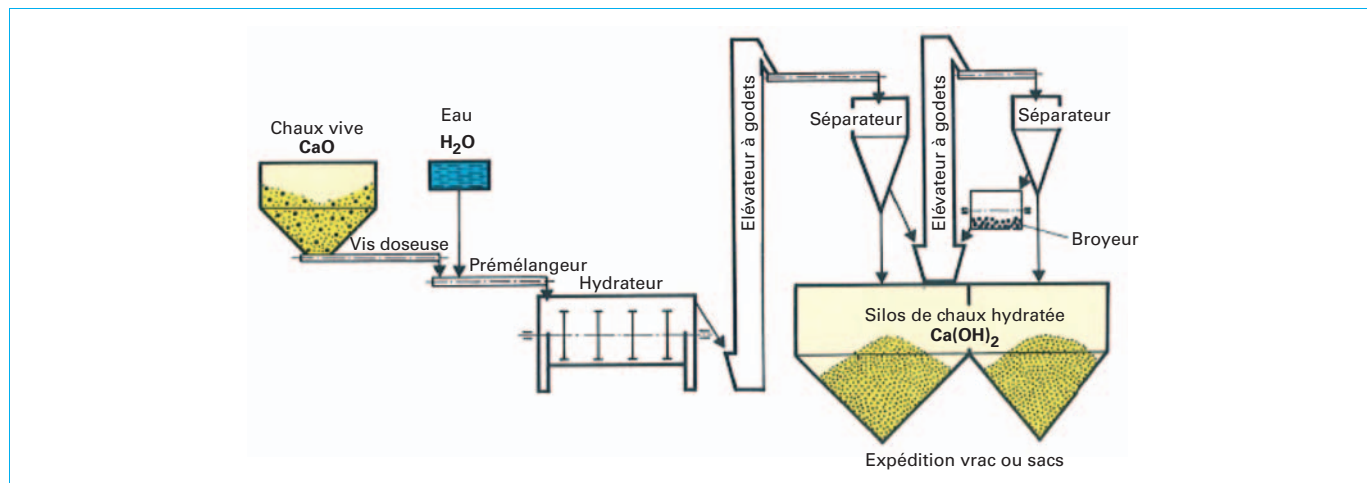


Figure 13 – Installation d'hydratation de chaux (Crédit Balthazard et Cotte)

L'hydratation complète de la chaux magnésienne ou dolomitique nécessite de travailler sous pression. Des installations le permettent aux États-Unis où il est produit une chaux dite « Type S ». En Europe, on ne produit quasiment que de la dolomie semi-hydratée, dans laquelle une partie seulement est hydratée, donnant un mélange du type  $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$ , voire parfois  $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$ .

#### ■ Hydratation par voie humide

Lorsque l'hydratation s'effectue avec un excès d'eau, on obtient soit de la pâte de chaux, soit du lait de chaux lorsque la concentration en matières sèches est inférieure à 45 %. La pâte de chaux peut aussi être obtenue par hydratation, en cuve « statique », de chaux en roche. Le lait de chaux peut également découler de la mise en suspension de la chaux hydratée dans l'eau.

La qualité des laits de chaux dépend fortement de la méthode de préparation et de la qualité de l'eau utilisée.

## 2.7 Contrôles qualité

Ils sont nécessaires, depuis la carrière, afin d'assurer une qualité constante au niveau des impuretés.

- La **qualité de la chaux vive** est essentiellement caractérisée par :
  - sa réactivité ou vitesse d'extinction à l'eau ;
  - son degré de cuisson avec la teneur en  $\text{CO}_2$  résiduel ;
  - sa teneur en  $\text{CaO}$  actif.

- La **qualité de la chaux hydratée** est caractérisée par :
  - sa finesse ;
  - sa stabilité (absence de chaux vive) ;
  - sa pureté ( $\text{CO}_2$  résiduel,  $\text{Ca(OH)}_2$ ).

Toutes ces déterminations, rappelées au § 1.3, sont décrites dans la norme EN 459-2 : Chaux de construction – Méthodes d'analyses.

## 2.8 Conclusion

Bien qu'étant une réaction très simple, la **décarbonatation du calcaire est un processus complexe** de par le grand nombre de paramètres, tant physiques, que chimiques et thermiques, susceptibles d'influencer son déroulement et modifier les propriétés du produit final.

Dans ce chapitre consacré à la fabrication de la chaux, nous n'avons repris que les éléments caractéristiques du chaufournier. Pour les autres aspects, comme la combustion, les réfractaires, les systèmes de dépoussiérage, les contraintes réglementaires, nous conseillons au lecteur de se reporter aux rubriques correspondantes des Techniques de l'Ingénieur (en consultant la bibliographie du *Pour en savoir plus*).

## 3. Diversité des applications de la chaux aérienne

### 3.1 Rappel des propriétés de la chaux

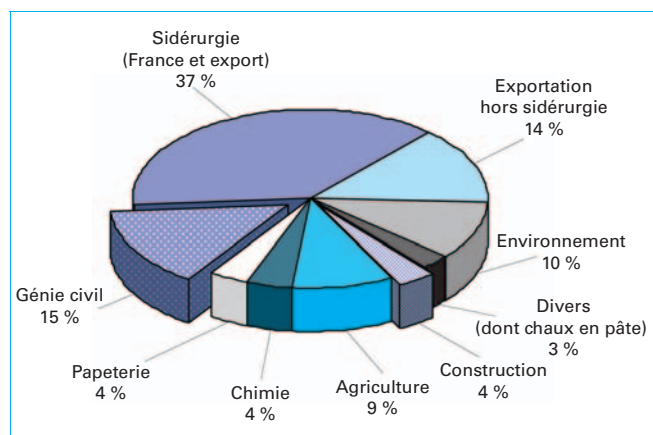
La chaux possède un ensemble étendu de propriétés exploitées dans des domaines très diversifiés, dépassant largement le cadre de la construction et du génie civil. En outre, l'industrie de la chaux, par sa maîtrise des procédés de production, a pu développer des qualités de chaux vives, chaux hydratées, laits de chaux, chaux magnésiennes et dolomitiques, ainsi que des calcaires, dont la composition et les propriétés physico-chimiques sont désormais modulables en fonction de l'application concernée.

- La liste suivante illustre les **nombreuses fonctionnalités** de ces produits :

- source de calcium et de magnésium ;
- pouvoir neutralisant ;
- déshydratant ;
- agent purifiant ;
- agent flocculant et précipitant ;
- fondant ;
- caustifiant ;
- filler ;
- pouvoir réfractaire ;
- agent de blanchiment.

- Ces propriétés fonctionnelles sont mises à profit dans de **nombreuses applications** industrielles, agricoles, environnementales et autres qui, bien que ne constituant pas le sujet principal de ce dossier, méritent cependant d'être mentionnées.

Le présent paragraphe n'a pas la prétention d'être exhaustif, ni même figé. Il donne simplement une vue d'ensemble des utilisations actuelles dans un contexte industriel, économique et



**Figure 14 – Utilisations des chaux produites en France en 2008, en pourcentage des volumes produits** (Crédit Union des producteurs de chaux)

réglementaire en constante évolution, auquel la chaux s'adapte en permanence pour apporter ses solutions.

### 3.2 Sidérurgie et industrie des métaux non-ferreux

Si, historiquement, la chaux a surtout été utilisée abondamment dans le domaine de la construction, l'essor industriel du début du 20<sup>e</sup> siècle a définitivement inversé cette situation, l'industrie sidérurgique devenant, depuis lors, la consommatrice majoritaire de chaux calcique et dolomitique, ainsi que de calcaire de grande pureté, comme le montre la figure 14.

■ Le **calcaire et la chaux** sont exploités essentiellement comme fondants et purifiants dans la sidérurgie. Le calcaire, appelé dans ce cas précis *castine*, est capable de concentrer les impuretés du minerai de fer à haute température dans le haut fourneau, afin de procéder à la séparation de la fonte et de ses impuretés (essentiellement silicium, phosphore, soufre et manganèse) qui se retrouvent sous forme de laitier, dont l'évacuation devient plus aisée.

La fonte est ensuite épurée et appauvrie en carbone en vue de la fabrication de l'acier dans le convertisseur à oxygène. Le rôle purifiant de la chaux intervient à nouveau dans ce processus. La chaux dolomitique présente, elle, en outre, l'avantage de préserver les matériaux réfractaires des fours en limitant leur dissolution par les composés des scories formées.

■ Les **spécifications relatives à la pureté et à la réactivité** de la chaux dite « sidérurgique » sont particulièrement sévères. De plus, le secteur exige une granulométrie régulière et constante.

■ L'**industrie métallurgique** (métaux non-ferreux), tire également profit de l'utilisation de la chaux :

- comme agent de flottation des minerais renfermant le cuivre, le zinc, le nickel, ou encore le plomb ou l'uranium ;
- comme agent de basicité pour un ajustement précis du pH (par exemple d'une solution de cyanure, en vue des extractions de métaux précieux) ;
- pour régénérer la lessive de soude nécessaire à l'extraction de l'aluminium de la bauxite (procédé Bayer) ;
- comme source de calcium ou de magnésium métallique.

### 3.3 Environnement

Les applications environnementales de la chaux se manifestent dans plusieurs registres.

■ Le traitement des eaux domestiques ou industrielles, où l'action de la chaux permet la neutralisation de l'acidité de l'eau, son adoucissement, sa reminéralisation, ou encore sa purification (par floculation des matières en suspension, précipitation des éléments toxiques, ou stérilisation).

On utilise également la chaux dans le traitement des boues industrielles pour ses facultés d'absorption de l'eau et d'évaporation, l'apport de matière sèche qu'elle procure, et ses capacités à bloquer les étapes de fermentation.

■ Des chaux hydratées développant une grande surface spécifique et un volume poreux important ont été élaborées pour la **captation des composés acides contenus dans les rejets gazeux** des incinérateurs ou des installations industrielles. Sont particulièrement visés ici des composés, tels le dioxyde de soufre, l'acide chlorhydrique ou fluorhydrique. La chaux forme, avec ces gaz acides, des solides qui sont captés et évacués au niveau des installations de dépoussiérage. En fonction du procédé utilisé, la chaux sera injectée sous forme de chaux éteinte pulvérulente, ou de lait de chaux.

### 3.4 Agriculture

La tendance naturelle des sols est à l'acidification qui, à terme, entraîne une diminution de la fertilité vis-à-vis des cultures. Le calcaire et la dolomie sont des amendements qui permettent de restaurer l'équilibre des sols et favorisent ainsi la vie microbienne.

La chaux, de son côté, améliore la structure des sols argileux ou limoneux, devenus lourds, plastiques et difficilement travaillables au cours du processus d'acidification. Le calcium et le magnésium apportés par la chaux sont aussi des éléments nutritifs, indispensables à la croissance des plantes, qui compensent les carences du sol naturel.

### 3.5 Industrie chimique

La chaux est un produit de base polyvalent et peu onéreux, intervenant à différents stades dans de nombreux processus industriels de fabrication d'autres composés. On peut citer, pêle-mêle :

- production de soude caustique et autres alcalis, par réaction avec les carbonates de sodium ;
- fabrication des carbures de calcium, intermédiaires de production de l'acétylène et du cyanamide de calcium ;
- fabrication d'hypochlorites de calcium (agent de blanchiment) ;
- fabrication des sels de déneigement ;
- production de glycols ;
- production d'intermédiaires de l'industrie pharmaceutique (bromures, fluors, phosphates de calcium...). Ce sont surtout les propriétés de réactivité de la chaux avec les acides qui sont mises en avant ;
- saponification des huiles ;
- production des phosphates ;
- production de magnésie au départ de calcaire dolomitique, en vue de la fabrication de matériaux réfractaires ;
- etc.

### 3.6 Industries alimentaire et sucrière

La chaux est un intermédiaire important dans l'industrie alimentaire pour l'élaboration, la transformation ou la conservation de produits. Citons notamment :

- en sucrerie, la chaux hydratée est un agent de correction d'acidité du jus issu des betteraves. De plus, elle coagule les impuretés indésirables dans les produits finaux ;
- dans l'industrie laitière : la réduction de l'acidité du lait avant pasteurisation, la séparation de la caséine, le prétraitement du maïs... ;

- dans l'industrie pâtissière : la préparation d'ingrédients divers, de gélatines ;
- la purification de l'acide citrique ;
- la conservation des fruits et légumes : la chaux hydratée absorbe le  $\text{CO}_2$  émis par le processus de mûrissement et régule l'équilibre oxygène/ $\text{CO}_2$ .

### 3.7 Industrie verrière

La chaux, mélangée à du sable siliceux et du carbonate de sodium, a la faculté de former, à haute température, une pâte de verre. La chaux vive, le calcaire et le calcaire dolomitique sont utilisés, non seulement pour assurer la fusion du mélange, mais aussi pour stabiliser la structure du verre afin d'empêcher sa dévitrification à l'issue du refroidissement.

### 3.8 Industrie papetière

Dans l'industrie papetière, la chaux, et différentes formes de calcaires, interviennent à plusieurs niveaux :

- régénération de la soude caustique intervenant dans la fabrication de la pâte de papier (procédé Kraft) ;
- neutralisation par le lait de chaux des eaux acides issues de la fabrication de la pâte par le procédé au bisulfite ;
- production d'hypochlorite de calcium pour le blanchiment ;
- fabrication du carbonate de calcium précipité à partir de lait de chaux (*PCC = Precipitated Calcium Carbonate*). Le *PCC* existe sous plusieurs formes cristallines. Il est utilisé principalement comme charge minérale (*filler*) en substitution de la cellulose, assurant au papier son épaisseur, ainsi que des propriétés de blancheur et d'opacité. Une autre forme cristalline du *PCC* est appliquée en surface du papier pour lui conférer des propriétés de brillance, de la résistance mécanique et favoriser l'impression.

### 3.9 Activités de la construction

#### 3.9.1 Contexte

On entend par construction toutes les activités liées à la construction de bâtiments, quelle que soit leur destination (habitations, locaux administratifs, commerciaux, industriels, de loisirs, etc.).

Ce sont les applications dans ce domaine qui ont permis à la chaux d'acquies sa notoriété et sa popularité. Cette popularité s'exprime toujours, même si, en France tout au moins, les quantités utilisées sont particulièrement modestes comme le montre la figure 14.

De nos jours, la chaux est utilisée, tant pour restaurer et rénover, que pour construire des bâtiments neufs. Elle s'emploie (sous forme de chaux aérienne hydratée, ou de chaux en pâte) dans les travaux de maçonnerie, d'enduits (intérieurs et extérieurs) et de décoration. Elle est aussi utilisée dans la fabrication de blocs structuraux porteurs, tels que les briques silico-calcaires et le béton cellulaire.

Les applications de la chaux dans le domaine de la construction font l'objet d'un dossier particulier des Techniques de l'Ingénieur auquel le lecteur est invité à se reporter pour plus d'information (consulter le *Pour en savoir plus*).

#### 3.9.2 Mortiers, enduits et badigeons

Par mortiers, on entend ici des mélanges de charges minérales (essentiellement du sable) et de liants (chaux, ciment, etc.), ou de mélanges appropriés de liants, utilisés principalement en travaux de maçonnerie et d'enduisage. Ils peuvent être fabriqués sur chantier ou en usine. Dans ce dernier cas, on parle de mortiers industriels prêts à l'emploi.

La chaux améliore les propriétés rhéologiques des mortiers et leur ouvrabilité. Elle augmente l'adhérence des mortiers sur leurs supports, tout en leur procurant la souplesse s'opposant à l'apparition de fissures. En augmentant la perméabilité à la vapeur d'eau, et en diminuant la conductivité thermique des mortiers, elle contribue à la régulation de l'hygrométrie dans les habitations et à l'amélioration du confort de vie. Sur le plan esthétique, elle donne aux enduits une luminosité appréciée.

#### 3.9.3 Briques silico-calcaires et bétons cellulaires

Les briques silico-calcaires et les bétons cellulaires sont des matériaux de construction mis au point au tout début du XX<sup>e</sup> siècle. Ils sont fabriqués à partir de sable, de chaux vive et d'eau pour les briques silico-calcaires, et des mêmes composants, auxquels on ajoute une faible quantité d'aluminium métallique, à l'origine de la forte porosité du matériau, pour les bétons cellulaires.

Ces mélanges subissent un autoclavage au cours duquel une réaction chimique se produit entre la chaux, la silice et l'eau, avec formation de silicates de calcium hydratés (CSH) qui entraîne une rigidification du système. En autoclave, cette réaction est, non seulement accélérée, mais aussi mûrie, de sorte que les CSH se transforment en un cristal plus ordonné : la tobermorite-11Å, qui confère au matériau néoformé des propriétés mécaniques élevées.

Dans le cas du béton cellulaire, la réaction de l'aluminium en milieu basique provoque un dégagement gazeux à l'origine de la grande porosité du matériau et de ses propriétés d'isolation thermique intéressantes.

### 3.10 Activités du génie civil

#### 3.10.1 Principes

Par Génie civil, il faut entendre toutes les activités liées à la construction des infrastructures et, notamment, de transports (routes, voies ferrées, ouvrages portuaires, aéroportuaires et hydrauliques, plates-formes de tous types, travaux souterrains, etc.). Il peut s'agir, aussi bien de travaux publics, que de travaux privés.

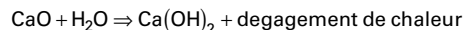
**C'est probablement dans ce domaine d'activité que la chaux exprime le mieux ses fonctionnalités**, tant les applications y sont nombreuses et diversifiées.

Aux États-Unis, on la qualifie même de produit à usages multiples (« *versatile product* »). L'importance des volumes utilisés chaque année (voir figure 14) illustre bien l'intérêt accordé au produit.

#### 3.10.2 Traitement des sols

La chaux est surtout connue pour ses qualités dans le domaine du traitement des sols en place. Les réactions sont complexes et multiples et peuvent se résumer comme suit :

- réduction immédiate de la teneur en eau par hydratation de la chaux vive :



- modifications rapide des caractéristiques des sols argileux, en particulier grâce à la réduction de l'activité des argiles et à leur floculation ;
- augmentation instantanée de la portance du sol facilitant les opérations de terrassement (extraction, transport et mise en œuvre) ;
- dans le cas des sols argileux, combinaison lente et progressive de la chaux avec les argiles pour former un liant dit « pouzzolanique » qui améliore les performances mécaniques finales. Cette dernière réaction peut aussi se produire avec des sols argileux secs, à condition de fournir l'eau nécessaire à la réaction. Cette



**Figure 15 – Traitement d'un limon à la chaux par malaxage en place**

opération peut se faire en une seule étape en faisant appel à du lait de chaux.

Le traitement à la chaux permet aussi, en modifiant le comportement des minéraux argileux, de préparer certains matériaux en vue d'un traitement ultérieur d'une autre nature telle que :

- traitement mécanique par tamisage, en carrière notamment, pour éliminer les fines d'un matériau granulaire argileux et optimiser la production de l'installation (cf. figure 15) ;
- traitement chimique par un liant hydraulique dont on sait qu'il s'accommode mal de la présence d'argile. On parle alors de traitement mixte ;
- recyclage de matériaux chargés en fines argileuses.

Il faut également signaler que la chaux convient aussi au traitement de matériaux calcaires, tels que les craies humides et les calcaires tendres. Dans ce cas, elle apporte une amélioration des performances mécaniques imputable à sa carbonatation, une fois mélangée au matériau.

### 3.10.3 Complément de prise des liants hydrauliques et pouzzolaniques

La chaux, essentiellement sous forme vive, entre dans la composition de certains liants à base de laitiers de hauts-fourneaux et/ou de cendres volantes silico-alumineuses de centrales thermiques. Ces liants sont fabriqués sur chantier ou en usine, pour les besoins des travaux routiers.

### 3.10.4 Renforcement des sols et travaux en souterrains

Sous forme hydratée, la chaux, en suspension dans l'eau, seule ou en mélange avec d'autres composants, est utilisée en injection dans les sols pour modifier leurs caractéristiques (porosité, stabilité mécanique, etc.).

Elle est aussi utilisée dans le même but, sous forme vive, en poudre ou granulaire, pour réduire la teneur en eau en profondeur. L'incorporation se fait avec malaxage à la tarière verticale, ou par cartouches dans des forages.

Enfin, la chaux hydratée intervient dans les mortiers spéciaux pour usage spécifique dans les ouvrages souterrains, par exemple dans les mortiers de bourrage des tunnels.

### 3.10.5 Agent modifiant des enrobés bitumineux

La chaux, sous forme d'hydrate, est considérée comme un agent modifiant multifonctionnel, qui permet :

- d'améliorer l'adhésivité bitume/granulat ;

- de s'opposer à l'orniérage en augmentant la viscosité du bitume ;
- de ralentir le vieillissement chimique de ce dernier ;
- de ralentir la propagation des fissures de fatigue dans l'enrobé et donc globalement d'augmenter la durée de vie des matériaux bitumineux.

## 3.11 Autres applications

Les vertus antiseptiques et médicinales de la chaux sont exploitées depuis des siècles. L'eau de chaux est encore employée de nos jours pour ses vertus thérapeutiques. De façon artisanale ou industrielle, la chaux est utilisée dans les activités de tannerie, de savonnerie, et bien d'autres encore...

La chaux a accompagné de tous temps l'activité humaine, artisanalement et industriellement. Elle fait partie intégrante de notre environnement, et est un ingrédient indissociable de l'ensemble de nos activités. La modernisation et la maîtrise de sa fabrication ont permis, et permettent encore à l'heure actuelle, le développement de produits à haute valeur ajoutée, adaptés aux besoins de tous les secteurs.

## 4. Normes et réglementation

### 4.1 Normalisation

En tant que produit multifonctionnel à usages multiples, il va de soi que la chaux doit satisfaire un grand nombre d'exigences exprimées dans de nombreuses normes, normes de produits comme normes d'application. Le lecteur désireux d'approfondir la question se reportera aux normes relatives aux applications qui l'intéressent. On trouvera cependant dans la rubrique « *Pour en savoir plus* » les références de deux normes produits pour des usages importants :

- **NF EN 12518** : produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine. – Chaux (indice de classement : T94-254) ;
- **NF EN 459** : chaux de construction.

Ces normes contiennent toutes les spécifications relatives aux produits pour l'usage considéré.

### 4.2 Cas particulier de la construction

La norme NF EN 459, déjà citée, se décompose en 3 parties :

- partie 1 : définition, spécifications et critère de conformité ;
- partie 2 : méthodes d'essais ;
- partie 3 : évaluation de la conformité.

Il s'agit d'une norme française homologuée reprenant une norme européenne harmonisée qui a été établie à partir du mandat M 114 du 04/06/1997 délivré au CEN pour la réalisation de travaux de normalisation visant à établir des normes harmonisées pour les ciments, chaux de construction et autres liants hydrauliques.

Pour les fabricants de chaux de construction, le respect de cette norme permet de répondre aux exigences réglementaires exprimées notamment dans son annexe ZA qui constitue la partie « harmonisée » de la dite norme et qui définit :

- les exigences minimales à respecter pour le produit ;
- le niveau d'attestation de conformité à respecter (niveau 2) ;
- les dispositions pour que le fabricant appose le marquage obligatoire CE, prévu par la Directive produits de construction (DPC), et qui atteste que les produits satisfont aux dispositions de la réglementation européenne.



La conformité à cette norme permet la libre circulation en Europe et la mise sur le marché du produit en tant que produit de construction.

## 5. Précautions lors de la manutention et du stockage

■ La **chaux est un produit irritant** pour les voies respiratoires et pour la peau en présence d'humidité. Elle présente un risque de lésions graves en cas de contact avec les yeux. Elle n'est pas toxique, mais son inhalation peut provoquer éternement et toux, et son ingestion en fortes doses peut irriter le système gastro-intestinal. Elle est classée Xi.

Lors de sa manipulation, il convient donc de respecter les consignes et recommandations qui figurent sur les fiches de données sécurité établies par les fabricants, conformément à l'annexe II du Règlement REACH (EC) 1907/2006.

■ Dans le **cas d'une exposition professionnelle**, les systèmes de manutention et/ou de transfert seront préférentiellement fermés. Dans le cas contraire, un dépoussiérage sera installé afin de maintenir le taux de poussières au-dessous de la valeur limite d'exposition. Sinon, porter les équipements de protection individuelle appropriés, secs et propres :

- protection respiratoire contre les poussières ;
- gants imprégnés en nitrile avec marquage CE ;
- lunettes ajustées au visage avec volets latéraux ou lunettes de protection contre les poussières avec large champ de vision, conformes à la norme EN 166. Ne pas porter de verres de contact. Il est recommandé d'avoir à proximité un rince œil facilement accessible, ou un rince œil individuel de poche ;
- vêtements recouvrant la peau entièrement, pantalon long, manches longues resserrées aux ouvertures, chaussures résistantes aux produits caustiques et étanches aux poussières.

Pour de fortes expositions journalières, se doucher et, si nécessaire, utiliser une crème de protection pour la peau, notamment pour le cou, le visage et les poignets.

■ Le **produit peut être conservé plusieurs mois**, sans altération de ses propriétés, à condition d'être stocké à l'abri de l'humidité, de préférence dans des silos, pour éviter la recarbonatation. Ils doivent être séparés des acides et des produits azotés. En ce qui concerne la chaux vive, bien que le produit ne soit pas inflammable, il faut l'éloigner de quantités importantes de pailles et papiers pour éviter tout risque d'incendie déclenché par l'échauffement causé par une hydratation accidentelle du produit. Maintenir hors de portée des enfants.

Ne pas utiliser l'aluminium pour le transport ou le stockage, s'il y a risque de contact avec l'eau.

### ■ Conduite à tenir en cas d'accident :

- **contact avec les yeux** : laver immédiatement et abondamment avec de l'eau. Consulter un ophtalmologue. La rapidité d'intervention est déterminante ;
- **inhalation** : déplacer la source de poussières ou transférer la personne dans un endroit aéré ;
- **ingestion** : rincer abondamment la bouche à l'eau. Boire beaucoup d'eau. Ne pas faire vomir. Consulter un médecin ;
- **contact avec la peau** : retirer les vêtements concernés. Éliminer les poussières et rincer abondamment la peau avec de l'eau. Consulter un médecin, si nécessaire.

## 6. Conclusions

Connue et appréciée depuis plusieurs millénaires, simple dans sa composition et sa présentation, apparemment facile à fabriquer, la chaux aérienne est, en fait, un matériau aux fonctionnalités multiples qui n'ont été véritablement explorées que relativement récemment, au cours des deux derniers siècles. Des technologies de fabrication, modernes et sophistiquées, se sont alors développées pour mieux répondre aux exigences des applications, qui se sont considérablement diversifiées, et des différents utilisateurs, de l'industriel au simple particulier.

Les progrès réalisés ces derniers temps, dans les moyens et les méthodes d'analyse et de recherche, ont permis de faire avancer nos connaissances sur le produit et de mieux comprendre et interpréter les comportements à l'origine de certaines fonctionnalités. Ainsi, il se confirme qu'en plus de ses caractéristiques chimiques, les caractéristiques physiques de la chaux, notamment la forme et la taille des particules, jouent aussi un rôle important.

Parallèlement, stimulés par un esprit d'innovation, ou contraints par la pression réglementaire, chercheurs, industriels, prescripteurs, utilisateurs, font régulièrement preuve d'ingéniosité en mettant au point des produits, techniques et procédés nouveaux dans lesquels la chaux joue un rôle crucial.

On peut donc parler d'un effet d'entraînement qui, amplifié par les systèmes de communication (échanges directs, publications, conférences, etc.), génère une dynamique favorable à une meilleure connaissance de la chaux et de ses fonctionnalités.

Ainsi peut-on dire de la chaux que, solidement ancrée sur des références historiques reconnues, elle révèle, depuis quelque temps, au monde moderne toutes ses qualités et ses capacités. Bien que discrète, elle est devenue omniprésente dans notre environnement quotidien, et cependant, elle nous réserve encore bien des sujets de réflexion, générateurs de progrès.