



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الإخوة منتوري – قسنطينة 1
Université Frères Mentouri – Constantine 1
Faculté des Sciences de la Technologie
كلية علوم التكنولوجيا
Département de Génie Civil
قسم الهندسة المدنية



Cours

Matériaux de construction I

Spécialité : Master I- Matériaux en Génie Civil

Elaboré par :

Dr BELEBCHOUCHE Cherif

(Docteur en Génie Civil – Option : Matériaux et Structures)

CHAPITRE I.
CIMENTS ORDINAIRES ET COMPOSES
FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

CHAPITRE I.

CIMENTS ORDINAIRES ET COMPOSES

FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

I.0. LIANT : DEFINITION

Un liant est un produit qui sert à agglomérer en masse solide des particules solides sous forme de poudre ou de granulats. Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles : les liants minéraux et les liants organiques selon l'organigramme de la figure I.0.

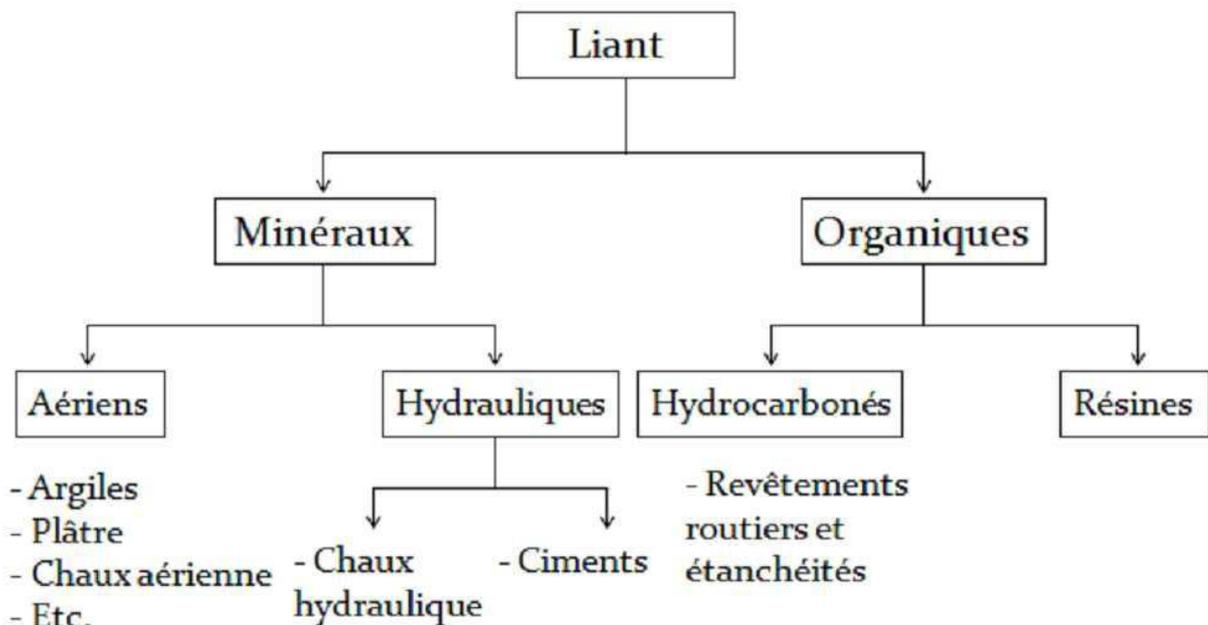


Figure I.0. Classification des liants

I.1. GENERALITES SUR LES CIMENTS

I.1.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique. C'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à

l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

I.1.2. Constituant des ciments

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker, auquel il peut être ajouté d'autres matériaux (calcaire, laitier de haut fourneau, les cendre volantes, etc.) dont le but est de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions environnementales, soit pour des raisons de performances mécaniques. On distingue des constituants principaux, secondaires et additifs.

I.1.2.1. Constituants principaux

I.1.2.1.1. Clinker Portland (K)

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile, de minerai de fer et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines à savoir :

- Le silicate tricalcique : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) avec un pourcentage de 50 à 70 % ;
- Le silicate bicalcique : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) avec un pourcentage de 15 à 30 % ;
- L'aluminate tricalcique : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) avec un pourcentage de 5 à 10 % ;
- L'aluminoferrite tetracalcique : $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) avec un pourcentage de 5 à 15 %.

En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

- De la chaux libre dont le pourcentage ne doit pas excéder 2% dans le clinker pour ne pas provoquer une expansion en présence d'eau ;

- De l'oxyde de magnésium MgO , encore appelé périclase, qui, non combiné (qui n'a pas les formes suivantes : $MgCO_3$, $MgCl_2$, $Mg(OH)_2$), peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

I.1.2.1.2. Laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier, sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes (Fe_2O_3 , P_2O_5 , MnO , TiO_2) en très faibles quantités. Tous ces éléments sont pratiquement les mêmes que ceux du clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre, il résiste mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

I.1.2.1.3. Cendres volantes (V et W)

Les cendres volantes sont des produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être:

- Siliceuses (V), elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est à dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation ;
- Calciques (W), outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes siliceuses (V) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55%, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25%, d'alumine entre 20 et 30 % environ, et de chaux réactive dont la proportion doit être inférieure à 5 %. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

I.1.2.1.4. Pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de la silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer. Cependant, lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium dissous pour former des composés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium générateurs de résistance.

I.1.2.1.5. Schistes calcinés (T)

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800°C, contiennent des phases du clinker (silicate bicalcique et aluminat monocalcique) ainsi que des oxydes réagissant de façon pouzzolanique (SiO_2) et présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés.

I.1.2.1.6. Calcaires (L, LL)

Les calcaires sont utilisés comme un ajout principal dans la fabrication du ciment lorsqu'ils sont ajoutés au clinker avec un pourcentage de plus de 5% de la masse totale du clinker. Les calcaires utilisés dans la fabrication du ciment doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse. Les calcaires L et LL ont une teneur en carbone organique (TOC maximale) respectivement de 0.5% et 0.2% en masse.

I.1.2.1.7. Fumée de silice (D)

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Elles doivent contenir au moins 85% de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes.

I.1.2.1.8. Sulfate de calcium (gypse)

Le sulfate de calcium a pour effet de réguler la prise du ciment. Le sulfate de calcium qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hémihydrate, doit être ajouté en faible quantité, c'est à dire de l'ordre de 3 à 5 % maximum.

I.1.2.2. Constituants secondaires

Les constituants secondaires peuvent être:

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion inférieure à 5%, exception faite du clinker ;
- Soit des fillers (F), leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3 %.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques, Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment, ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton. De plus, ces constituants ne doivent pas accroître sensiblement la demande en eau du ciment, ni diminuer la résistance du béton ou du mortier à la détérioration et la protection des armatures contre la corrosion.

I.1.2.3. Additifs

Les additifs ne doivent présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Ils agissent comme défloculants, empêchant ainsi les phénomènes de réagglomération des grains en cours de broyage.

Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, bétons ou coulis qui, dans ce cas, agissent sur une caractéristique précise mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée en vue d'éviter d'éventuelles incompatibilités avec d'autres produits.

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0,5% de la masse totale du mélange.

I.2. PRINCIPES DE FABRICATION DES CIMENTS

Sans vouloir entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est cependant nécessaire de connaître les principes généraux et les différentes phases du procédé de fabrication.

Les matières premières utilisées dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions d'ordre de 80 et 20 % respectivement. Le calcaire (CaCO_3) apporte le calcium CaO , l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , nécessaires au processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels que la magnésie MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalis K_2O et Na_2O , dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises. La fabrication du ciment peut avoir lieu indépendamment de celle du clinker et inversement. En effet, le clinker issu de la cuisson de la matière première provenant de la carrière est stocké dans un hall ou un silo à clinker. Le broyeur, quant à lui, utilise le clinker stocké comme matière première. La consommation de ciment étant très cyclique (forte utilisation en été, faible en hiver), cette indépendance permet ainsi de maintenir une production constante de clinker, et de réduire ou augmenter la production de ciment en utilisant les capacités de stockage d'une usine (en clinker et en ciment) comme tampon. La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes:

I.2.1. Extraction des matières premières

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à fragmenter la roche en petit blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, par contre pour l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues-pelles avant d'être transportée par camions aux halls de stockage.

I.2.2. Concassage des matières premières

Les matériaux extraits des carrières présentent des granulométries grossières volumineuses allant jusqu'au m^3 , le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50 mm, voire 100 mm au maximum. Les concasseurs utilisés à cette fin peuvent être mobiles, ou fixes.

I.2.3. Préparation du cru

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières (hétérogènes), mais toujours proches du rapport 80 % de calcaire pour 20 % d'argile. Le calcul du cru peut se faire aussi par des méthodes numériques en utilisant le logiciel Hefc. Le résultat final doit permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

- 65% de CaO avec une fourchette de 60 à 69 % ;
- 21% de SiO₂ avec une fourchette de 18 à 24 % ;
- 6% de Al₂O₃ avec une fourchette de 4 à 8 % ;
- 3% de Fe₂O₃ avec une fourchette de 1 à 8 % ;
- 2% de MgO avec une fourchette de 0 à 5 % maximum ;
- 1% d'alcalis MgO avec une fourchette de 0 à 2 % maximum ;
- 1% de SO₃ avec une fourchette de 0 à 3 % maximum.

Ces proportions permettent de prévoir certaines des qualités ultérieures du ciment.

La préparation du cru peut être réalisée suivant quatre procédés différents, on cite essentiellement:

- Procédé par voie sèche, il est le plus utilisé dans le monde ;
- Procédé par voie humide, pratiquement abandonné du fait sa consommation importante en énergie et la préparation de la pâte dans des délayeurs, pâte qui est ensuite homogénéisée et stockée. Ce procédé s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité très élevé ;
- Procédé par voie semi-sèche, consiste à humidifier la poudre obtenue après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules qui sont ensuite cuits sur une grille mobile ;
- Procédé par voie semi-humide, consiste à filtrer la pâte réalisée de façon analogue à la voie humide mais, après filtration, à en faire des boudins qui sont ensuite cuits sur une grille.

Il existe des phases communes à tous les procédés :

- L'extraction de la matière première, constituée de calcaire et d'argile ;
- La préhomogénéisation, qui consiste à homogénéiser les différents minéraux provenant de la carrière avec des ajouts minéraux secondaires. On obtient ainsi le "cru" qui a la composition idéale pour obtenir une matière finale avec la composition recherchée ;
- La cuisson, réalisée dans un four rotatif horizontal, qui porte à haute température le cru et le transforme en un produit fini appelé clinker.

I.2.3.1. La voie humide

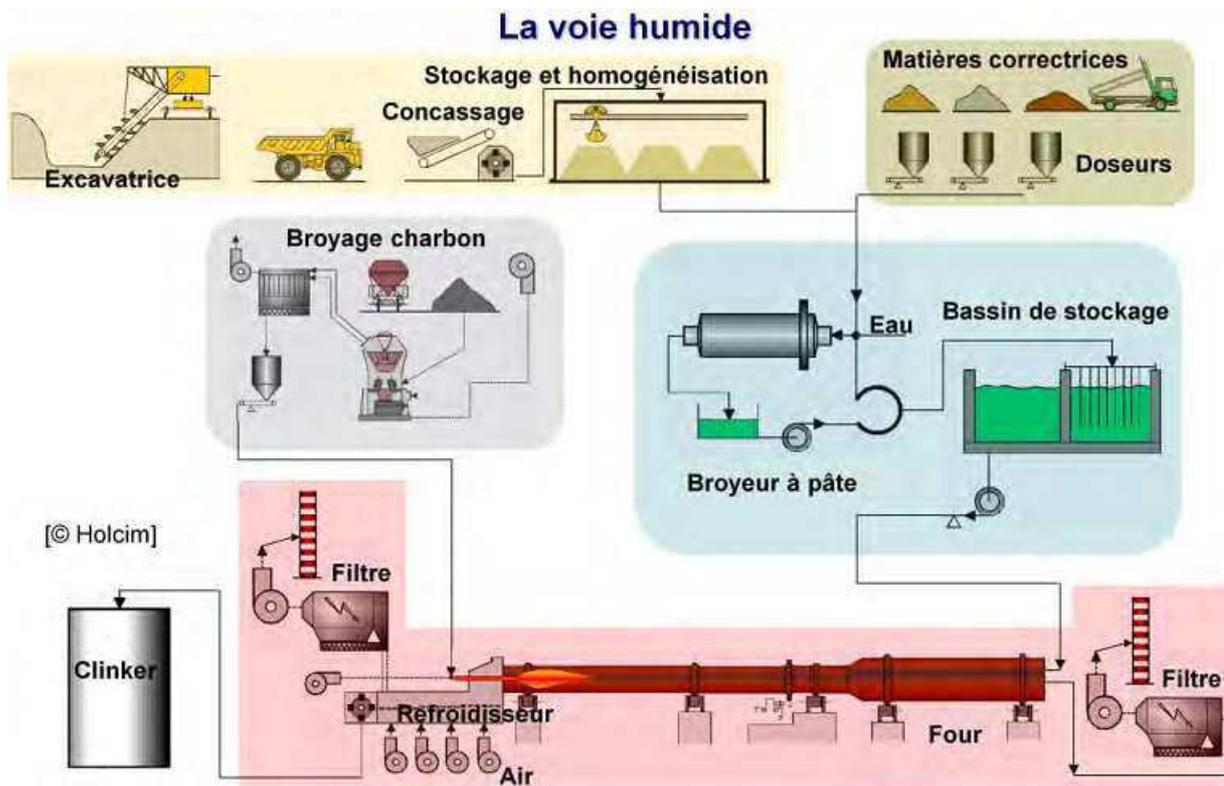


Figure I.1.a. Schématisation du procédé de fabrication du ciment par voie humide.

- Le procédé le plus ancien des quatre est celui de la voie humide ;
- La craie constituant la matière première est extraite en carrière et peut être très humide, elle est concassée et homogénéisée ;
- Les matières de correction, nécessaire à l'obtention de la composition désirée, sont dosées et ajoutée à la craie au niveau du broyeur à pâte ;
- Dans ce broyeur, on ajoute également de l'eau et la pâte obtenue est filtrée au travers de tamis. La partie la plus grossière retourne dans le broyeur et la partie fine est stockée dans un bassin ;
- La pâte, qui contient de l'ordre de 30 à 35 % d'eau, est ensuite pompée depuis le bassin et injectée dans un four très long (qui peut atteindre 220 m). Dans ce four, la pâte va avancer à contre-courant des gaz provenant de la combustion de charbon, de coke et aujourd'hui de déchets provenant d'autres industries ;

- Au fur et à mesure de son avancement dans le four, la pâte va se transformer en clinker, qui va être trempé dans le refroidisseur, avant d'être stocké en silo ;
- Les gaz provenant de la combustion sont filtrés et rejetés.

I.2.3.2. La voie semi-humide avec filtre presse et tour de préchauffage

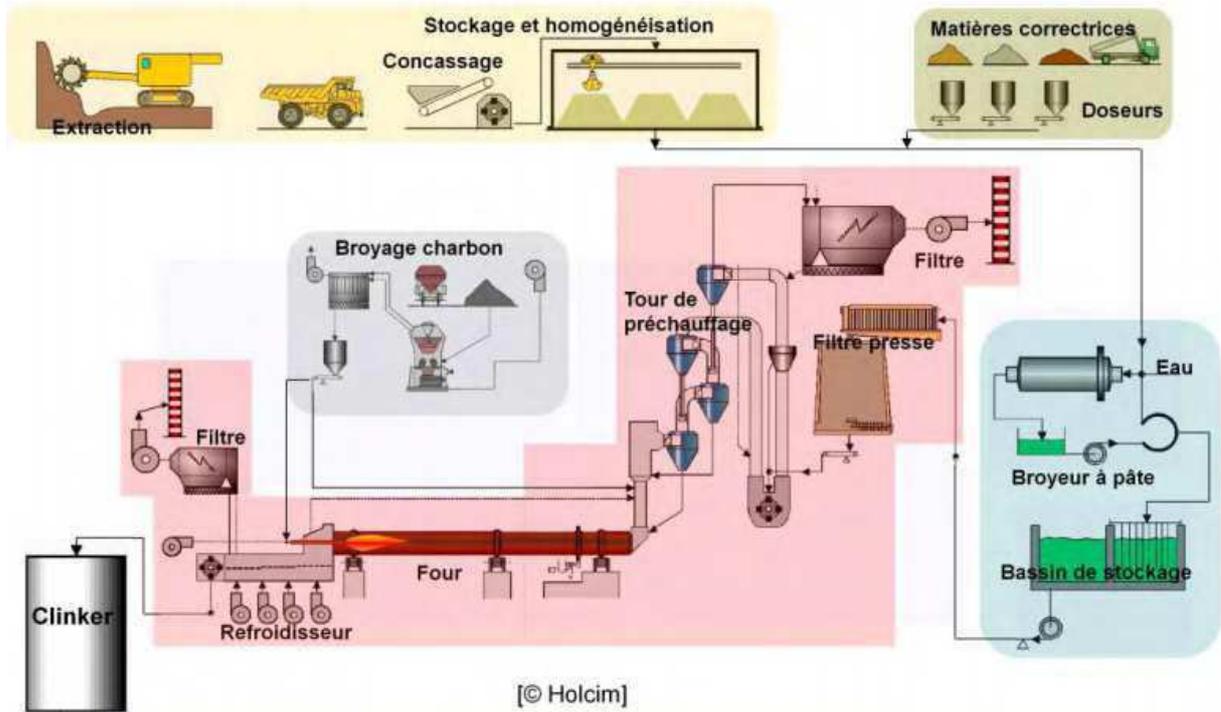


Figure I.1.b. Schématisation du procédé de fabrication du ciment par voie semi-humide avec filtre presse et tour de préchauffage.

- Dans le procédé semi-humide, on retrouve les mêmes étapes de préparation des matières premières, excepté le fait que la pâte va être filtrée au travers d'un filtre presse puis introduite dans une tour de préchauffage ;
- Dans cette tour, les gâteaux de pâte, qui ne contiennent plus que 17 à 21 % d'eau, rencontrent les gaz issus du four dans des cyclones et se transforment petit à petit en une farine par déshydratation ;
- Cette farine entre ensuite dans un four rotatif, plus court que celui présent dans le procédé voie humide, puisqu'il n'est plus nécessaire à ce niveau d'éliminer l'eau de la pâte.

I.2.3.3. La voie semi-humide avec filtre presse et grille Lepol

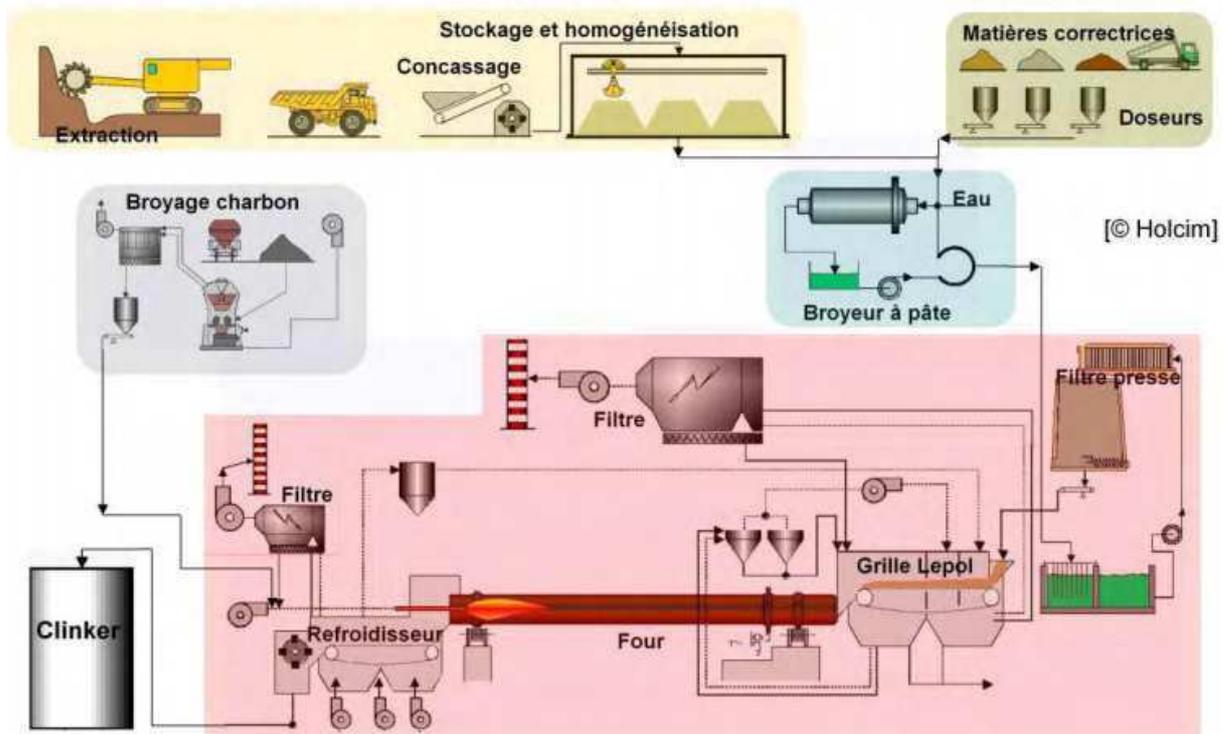


Figure I.1.c. Schématisation du procédé de fabrication du ciment par voie semi-humide avec filtre presse et grille Lepol.

- Dans le procédé semi-humide, avec grille Lepol, les gâteaux de pâte provenant du filtre presse ne sont pas introduits dans une tour, mais dans un préchauffeur à grille Lepol ;
- Dans ce préchauffeur, les gâteaux de pâte tombent sur des grilles perforées, au travers desquelles passent les gaz de combustion, provenant du four. Les gâteaux sont ainsi déshydratés et partiellement décarbonatés avant de pénétrer dans le four rotatif.
- Le reste du procédé est analogue au précédent et on obtient le clinker en sortie du four rotatif.

I.2.3.4. La voie semi-sèche avec sole de granulation et grille Lepol

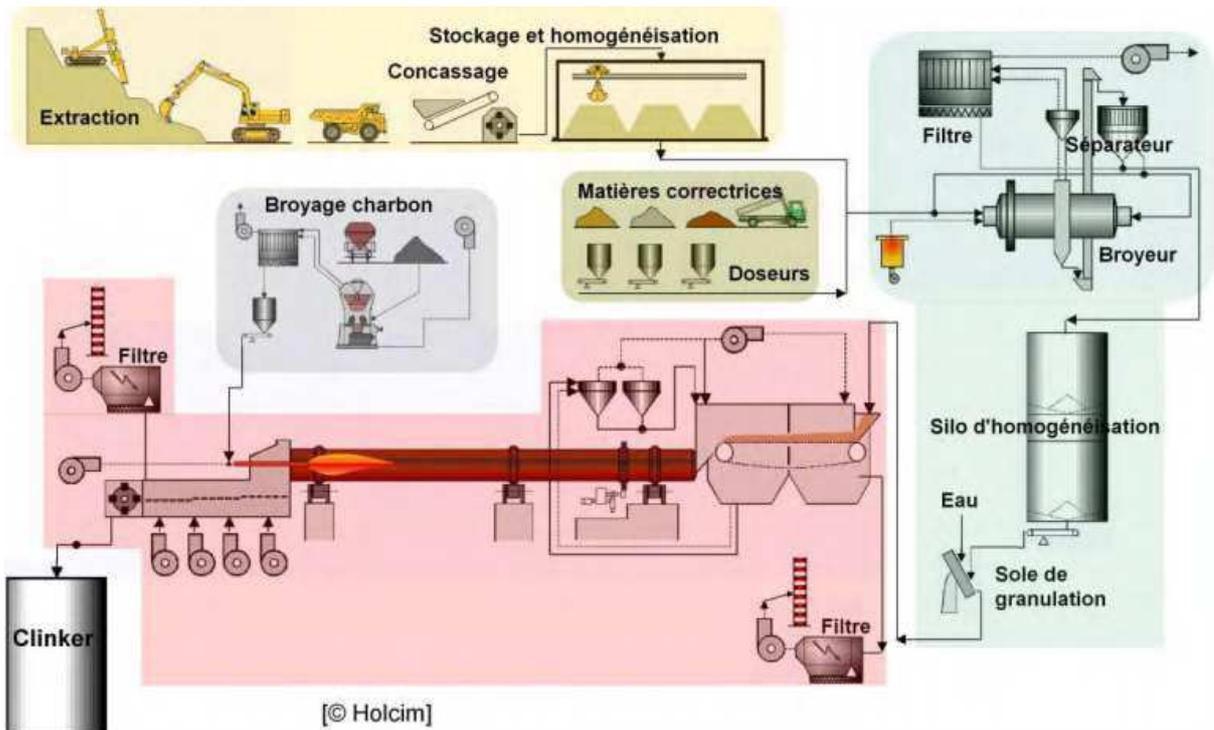


Figure I.1.d. Schématisation du procédé de fabrication du ciment par voie semi-sèche avec sole de granulation et grille Lepol.

- Dans le procédé semi-sec, on ne fabrique plus de pâte ;
- Les matières premières sont broyées et homogénéisées avant d'être introduites sur une sole de granulation où, en étant mélangées avec de l'eau, elles donnent naissance à des granules. Le pourcentage en eau des granules est de l'ordre de 10 à 12 % ;
- Ces granules sont ensuite introduites sur la grille Lepol, à travers laquelle passent les gaz de combustion, comme lors du procédé précédent.

I.2.3.5. La voie sèche avec tour de préchauffage

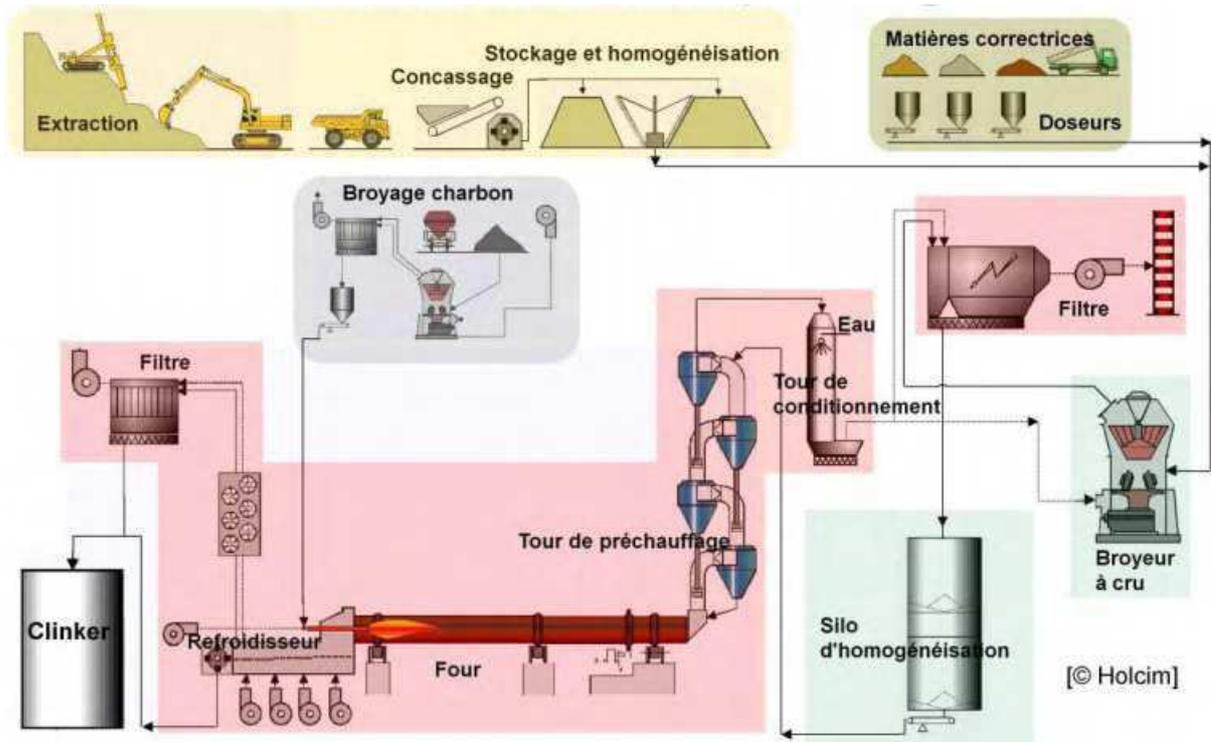


Figure I.1.e. Schématisation du procédé de fabrication du ciment par voie sèche avec tour de préchauffage.

- Le procédé sec a été mis au point pour éliminer l'étape d'évaporation d'eau contenu dans la pâte, il nécessite un calcaire dur contenant peu d'humidité ;
- Dans ce procédé, on a amélioré l'étape d'homogénéisation des matières premières, en utilisant des systèmes de stockage radial ou circulaire, équipé de système de reprise capable de prélever les matières de manière plus homogène.
- Les matières premières et correctrices sont ensuite introduites dans un broyeur à cru vertical, capable également de séparer les grosses et les fines particules et enfin capable de sécher également les matériaux ;
- La farine obtenue avec ce broyeur est ensuite homogénéisée dans un silo aéré puis elle est introduite dans la tour de préchauffage. Elle y rencontre les gaz de combustion circulant en sens inverse et l'échange thermique ainsi créé permet d'économiser une énergie considérable ;

- Les gaz sortant de la tour de préchauffage vont être partiellement refroidis dans la tour de conditionnement et vont ensuite être réutilisés en partie dans le broyeur à cru, pour réchauffer la farine ;
- En sortie du four rotatif, on obtient le clinker comme dans les autres procédés.

I.2.3.6. La voie sèche avec tour de pré-calcination

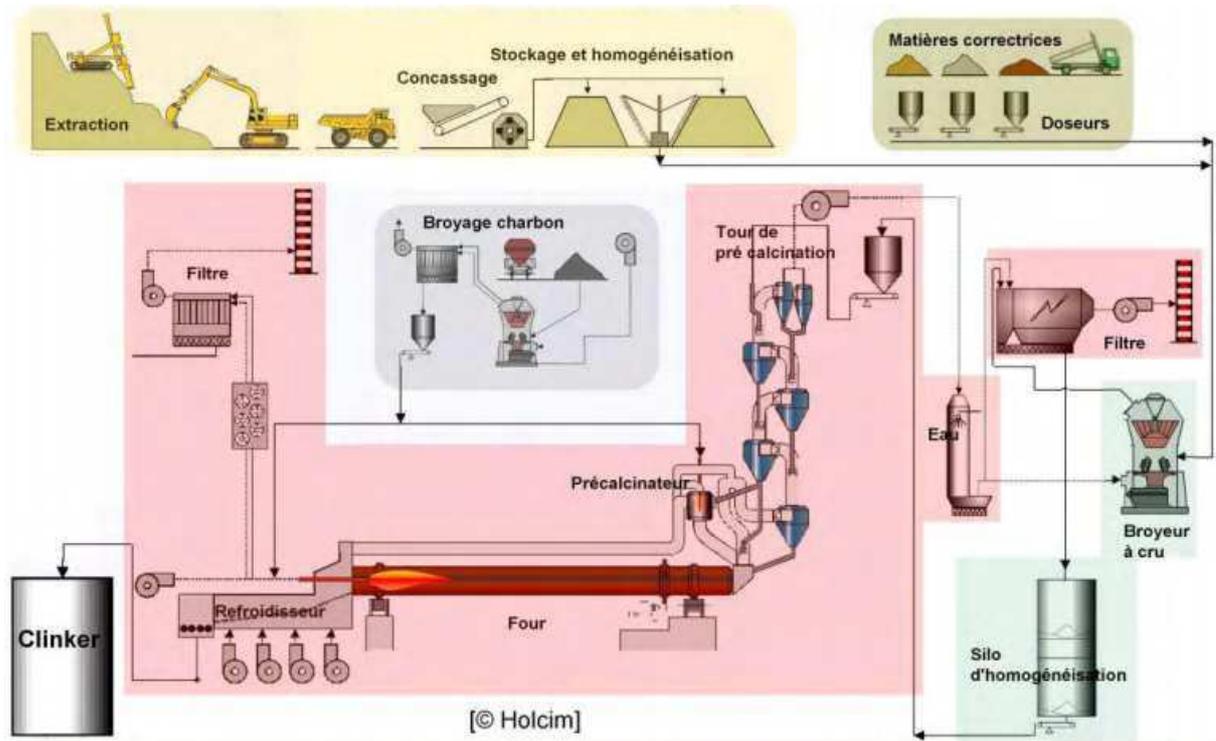


Figure I.1.e. Schématisation du procédé de fabrication du ciment par voie sèche avec tour de pré-calcination.

- Le procédé utilisant une tour de pré-calcination est très similaire au précédent ;
- La différence essentielle réside dans le fait que lorsque la farine descend en passant de l'un à l'autre des cyclones dans la tour, elle passe dans une chambre de pré-calcination où elle va atteindre une température de l'ordre de 1000 °C. Dans cette chambre de pré-calcination, on peut injecter jusqu'à 40 % de la totalité des combustibles utilisés dans ce procédé ;

- Lorsque la matière entre dans le four rotatif, on ne peut plus vraiment parler de farine, et comme cette matière est plus ou moins décarbonatée, la longueur du four rotatif peut être réduite considérablement ;
- Lorsque aujourd'hui une nouvelle usine est construite, c'est en général ce procédé qui est choisi parce qu'il est le plus économique et permet d'atteindre de très grandes capacités de production.

I.2.4. Fabrication du clinker

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (150 m dans le procédé par la voie humide), à une température comprise entre 1400 et 1500 °C. L'objectif du processus de cuisson est de transmettre à la matière à cuire, pour une qualité donnée du cru, la quantité de chaleur qui assure la qualité désirée du produit cuit en vue de fabriquer des ciments hydrauliques suivant les spécifications des normes et de la clientèle en :

- Minimisant les coûts de production ;
- Optimalisant le débit du produit de cuisson ;
- Minimisant la dépense d'énergie ;
- Minimisant les variations de qualité.

La cuisson donc, permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comporte les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant ;
- La décomposition des argiles qui se réalise au dessus de 500°C ;
- La décarbonatation de calcaire qui s'effectue à 950 °C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000 °C. Cette réaction est

fortement endothermique. Pour 1 tonne de CaCO_3 , on évacue à la cheminée 440 kg de CO_2 , du simple fait de la décarbonatation. Ce dernier est évacué à la cheminée ;

- La formation du clinker ou clinkérisation à $1450\text{ }^\circ\text{C}$ qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur. Le mélange cru après séchage et décarbonatation arrive sous la forme de poudre ou de petites granules dans cette zone de cuisson. Les réactions chimiques commencent sous l'effet de la température. L'oxyde de fer se combine à l'oxyde d'aluminium et à l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tetracalcique (C_4AF). L'alumine restante réagit avec de l'oxyde de calcium pour former l'aluminate tricalcique (C_3A). Ces deux phases forment la phase liquide. Les oxydes de silicium et de calcium réagissent ensemble pour former le silicate bicalcique (C_2S) qui, lui-même, se transforme en silicate tricalcique (C_3S) tant qu'il reste de l'oxyde de calcium non combiné. A la sortie du four, l'oxyde de calcium non combiné s'appelle chaux libre. La magnésie ne réagit pas avec les autres constituants. Elle cristallise sous forme de périclase ou reste en solution solide dans la phase liquide. Les alcalis et les sulfates forment des sulfates alcalins ou réagissent avec l'aluminate tricalcique pour donner des cristaux d'alcali aluminate. Les métaux lourds peuvent remplacer le fer dans certains cristaux. Une variation des constituants principaux (oxydes de calcium, de silicium, de fer et d'aluminium) ou des éléments mineurs et secondaires (alcalis, sulfate, titane, phosphate, fluor, ...) modifie d'une part l'aptitude à la cuisson du mélange cru et d'autre part les caractéristiques hydrauliques du clinker produit.

I.2.4.1. Refroidissement (Trempe)

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ à la sortie du four à environ $50/250\text{ }^\circ\text{C}$ suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent

pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C_3S en C_2S qui entraînent l'expansion du béton (environ 12%) et conduisant à sa destruction. Au cours du refroidissement, les fumées sont épurées par les électro-filtres.

La trempe, donc, a pour but de figer les espèces minérales qui seraient instables à la température ambiante (le C_3S se décomposerait en $C_2S + CaO$). Le C_2S cristallise sous sa forme allotropique β , seule phase capable de réagir avec l'eau, au lieu de la phase γ , qui est inerte. Les aluminates, phase liquide dans le four (phase interstitielle), vont être "figés" en entourant les phases cristallines du clinker.

Le bilan énergétique théorique (en comptabilisant les réactions endothermiques et exothermiques) permet d'estimer la chaleur de formation du clinker à 1765 kJ/kg. En réalité les besoins énergétiques sont de l'ordre de :

- 3200 kJ/kg dans le cas d'une voie sèche ;
- 5400 kJ/kg dans le cas d'une voie humide.

Il existe plusieurs procédés pour effectuer l'opération de la trempe. Le refroidissement par ballonnets est un des plus anciens, il est relativement simple mais d'une efficacité limitée. Le système le plus récent et largement utilisé aujourd'hui, est le refroidissement à grille.

Refroidisseur à ballonnets : En bout de four, le clinker tombe dans des ouïes (à droite) et passe dans des ballonnets, accrochés au four (à gauche). Une circulation d'air frais assure le refroidissement du clinker (Voir figure I.2.a).

Dans le refroidisseur à grille, le clinker chute sur les grilles en sortie de four. Le mouvement des grilles le fait avancer lentement, pendant que de l'air froid circule par les trous et traverse le tapis de matière chaude. L'air passant au travers du clinker immédiatement après sa chute du four, se réchauffe fortement et est dirigé vers le four, pour servir de comburant. L'air passant au travers du clinker déjà partiellement refroidi, est aspiré vers

l'extérieur (il n'est pas nécessaire à la combustion) et évacué après avoir été filtré (Voir figure I.2.b).



Figure I.2.a. Refroidisseur à ballonnets.

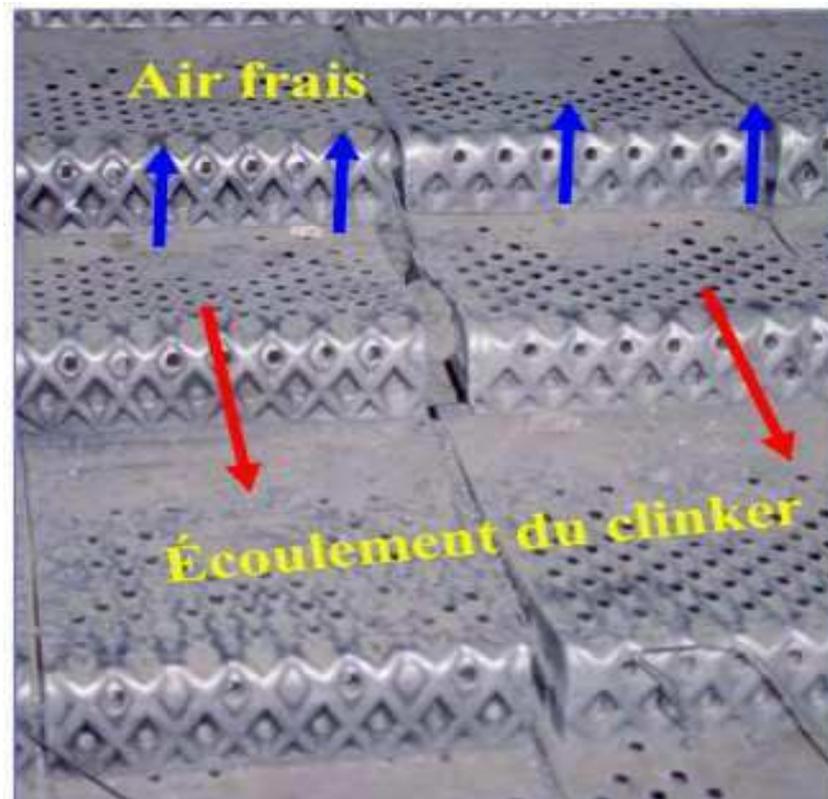


Figure I.2.b. Refroidisseur à grille.

Le clinker est ensuite évacué par tapis vers le hall/silo à clinker où il sera stocké en attendant d'être broyé pour faire du ciment. La capacité de stockage peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de tonnes (60 000 tonnes en bas)

I.2.5. Broyage du clinker

Le ciment est fabriqué en broyant le clinker avec du sulfate de calcium (environ 5 %), qui sert de régulateur de prise, et éventuellement d'autres constituants minéraux. On utilise pour cela un ensemble d'équipements dont les plus importants sont les broyeurs à boulets (Figure I.3) et les séparateurs (Figure I.4).

Selon le type de ciment qui est fabriqué, on introduit dans le broyeur le clinker avec les autres matières. En sortie du broyeur tous les matériaux broyés sont entraînés dans un séparateur, qui renvoi les particules les plus grosses dans le broyeur, alors que les plus fines sont dirigées vers les silos de ciment. L'air qui sert de moyen de transport est filtré et les particules récupérées sont envoyées également vers les silos de ciment.

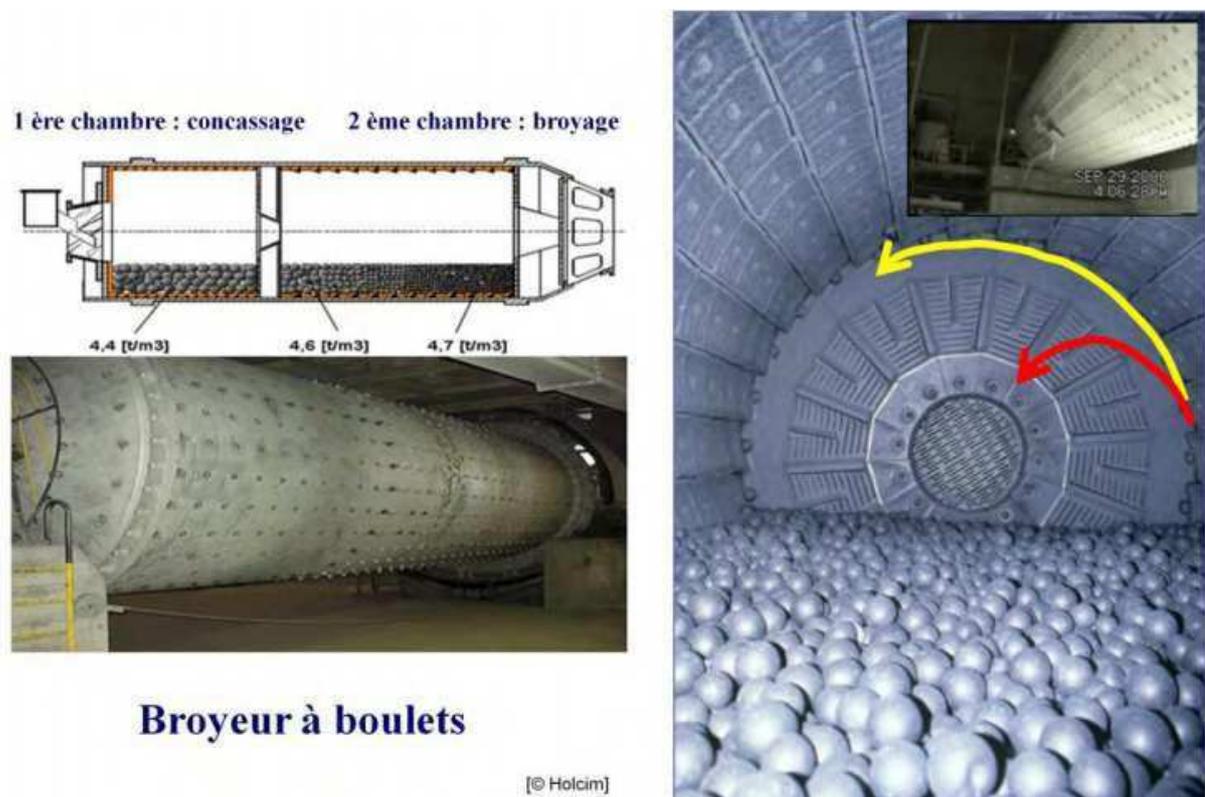


Figure I.3. Broyeur à boulets.

Le broyeur est assez souvent rempli de boulets en aciers spéciaux et tapissé de plaques de blindage. Le broyeur tourne à une vitesse calculée pour que boulets et clinker se percutent sans être centrifugés. La matière concassée est rejetée vers le centre du broyeur par les plaques de blindage légèrement relevées (comme des tuiles). Les particules les plus fines finissent par passer à travers les grilles (en fond de broyeur) et passent dans une seconde chambre pour être broyées plus finement.

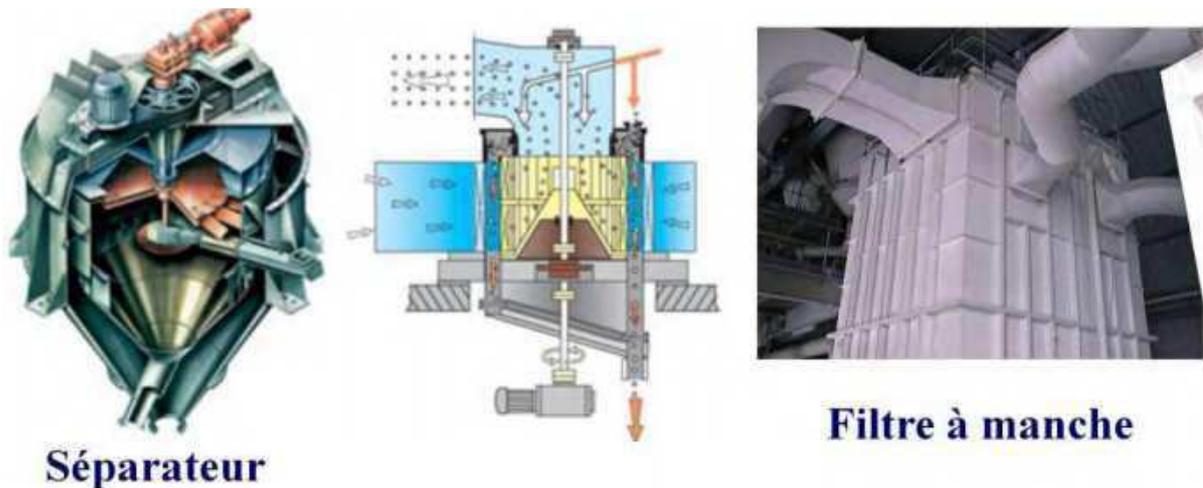


Figure I.4. Séparateur et filtre à manche.

Dans un séparateur moderne, on ajuste la finesse du ciment, et donc la quantité de matière retournant à l'entrée du broyeur, en modifiant la vitesse de rotation de l'axe supportant la cage (plus il tourne vite et plus le ciment est fin). La récupération des fines particules en suspension dans l'air est réalisée avec un filtre à manche, ces dernières étant "décolmatées" à intervalle régulier, par des jets d'air comprimés.

I.2.6. Stockage et expédition des ciments

Après le broyage, les ciments sont envoyés dans des silos. Un silo ne peut recevoir qu'une qualité de ciment bien définie. La capacité courante est de l'ordre de 2000 à 5000 tonnes, mais peut varier selon les usines et les produits à conserver.

Le ciment est ensuite commercialisé, en vrac, par camions ou en train pour alimenter des dépôts (proches des agglomérations), soit en sacs pour alimenter les négociants de

matériaux et les grandes surfaces de bricolage (GSB). Parfois il peut être mis en « big bags » (ou poches) pour alimenter des chantiers particuliers avec certains produits spécifiques, ou pour l'exportation par mer. Les usines, autres les routes, sont souvent situées à proximité de voies ferrées et/ou de voies d'eau, permettant d'expédier les produits finis sur de longues distances, en général dans les grandes agglomérations. Les figures I.2.a et I.2.b décrivent les différentes zones d'une unité de fabrication de ciment par voie sèche et par voie humide.

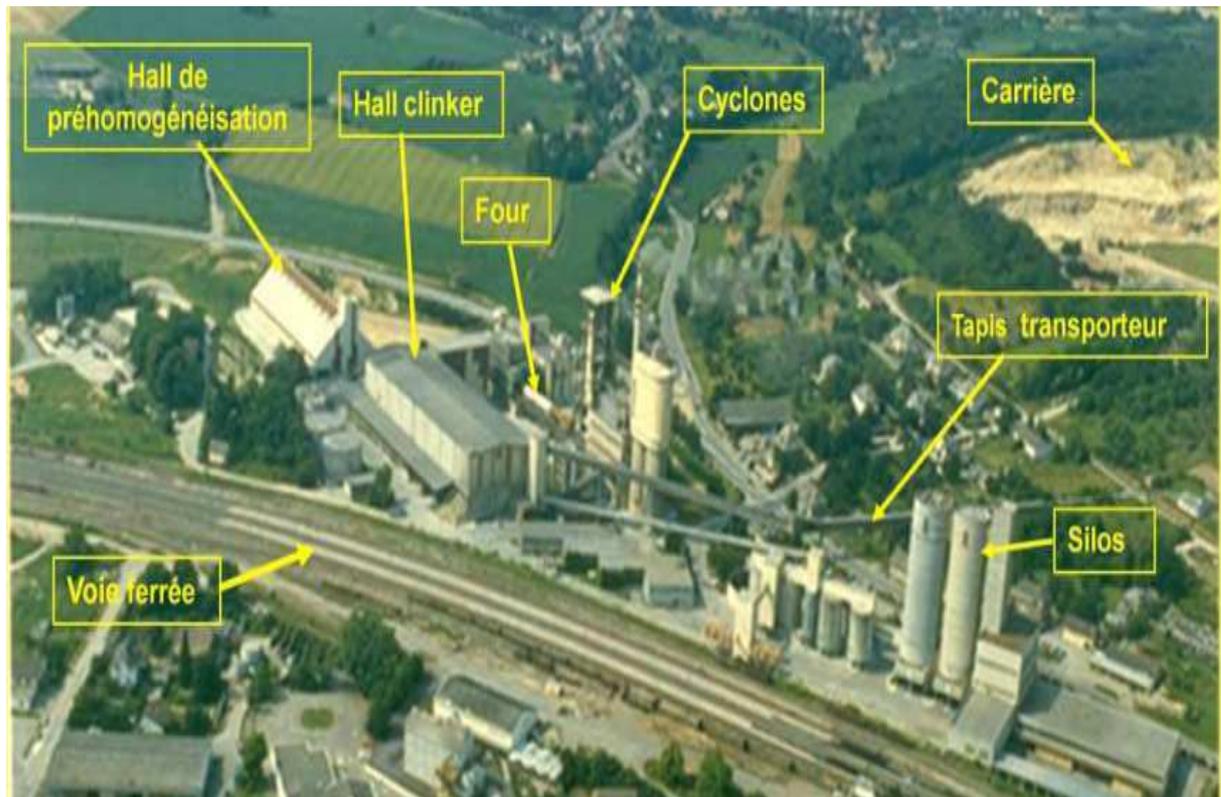


Figure I.2.a. Usine de fabrication du ciment par la voie sèche.

- Pour la voie sèche, on distingue la carrière (pierre dure) et les cyclones, échangeurs thermiques permettant le réchauffement de la matière et la décarbonatation du calcaire dans le cru, avant l'introduction dans le four proprement dit ;
- Pour la voie humide, on distingue un bassin d'homogénéisation ;

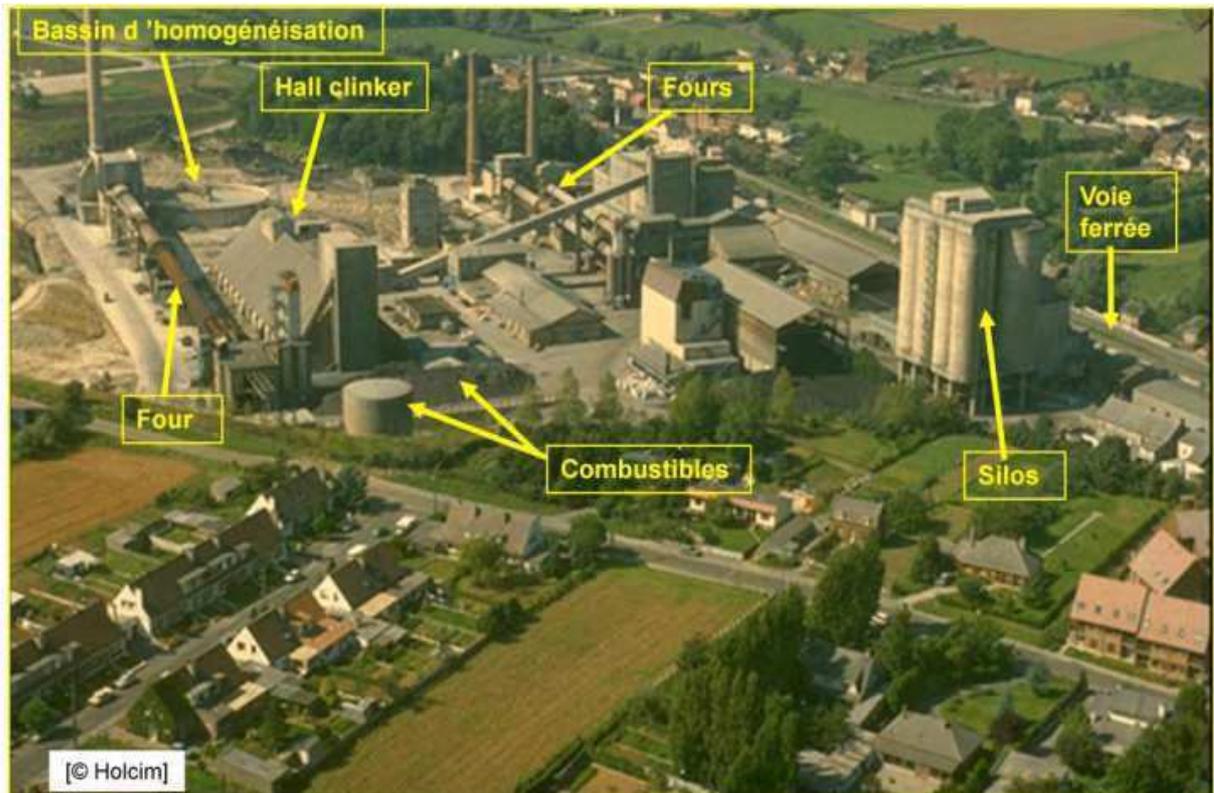


Figure I.2.b. Usine de fabrication du ciment par la voie humide.

A chaque étape du procédé de fabrication, des contrôles qualité sont effectués : sur le cru pour vérifier si la composition est conforme au cahier des charges, sur le clinker pour vérifier sa composition et certains paramètres de cuisson, sur les produits finis pour en accepter la commercialisation et vérifier leur conformité aux normes en vigueur. Les essais sont donc réalisés tant :

- Sur les produits semi finis ou finis (analyses chimiques et minéralogiques) ;
- Sur les mortiers, voire les bétons, pour en vérifier leurs caractéristiques (prise, résistance mécanique, ...).

Tous ces essais sont eux-mêmes normalisés et les outils de mesures raccordés à des étalons internes, raccordés eux-mêmes aux étalons nationaux de masses, longueurs, températures, ...etc.

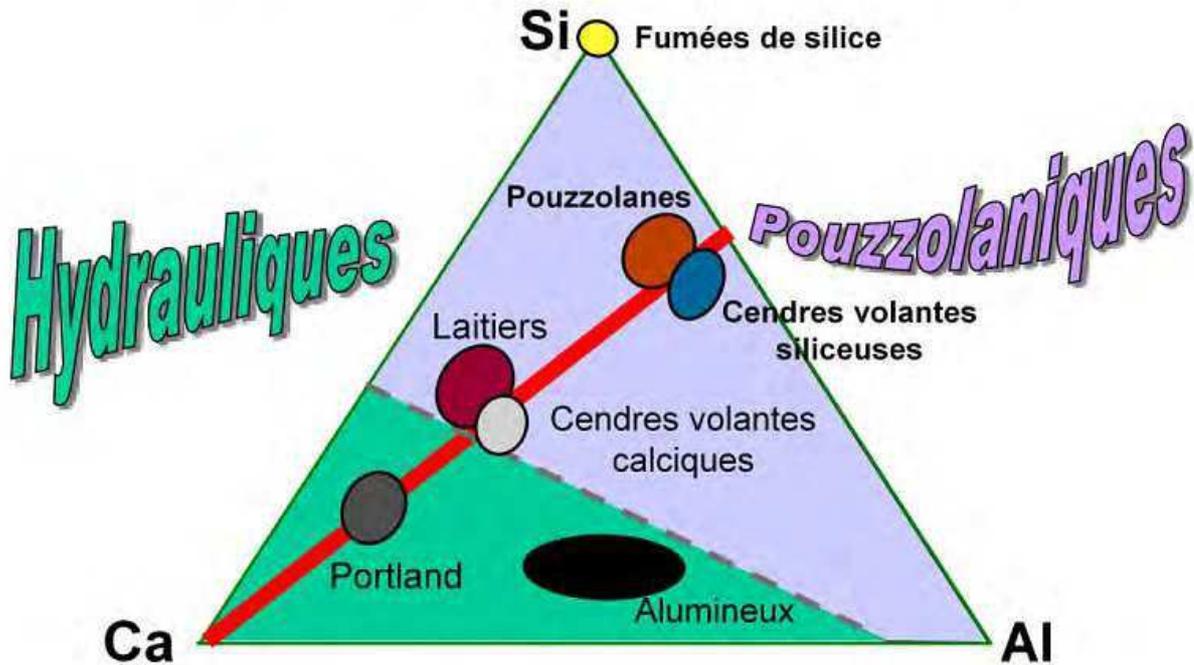


Figure I.3. Composition du ciment dans un diagramme ternaire : Silice - Calcium – Alumine.

Le ciment Portland a des propriétés hydrauliques. *Dans la zone verte*, le matériau a la propriété de faire prise en présence d'eau, même sous l'eau. *Dans la zone violette*, on trouve les matériaux pouzzolaniques : même en présence d'eau, le matériau ne fait pas prise (ou extrêmement lentement) car il lui manque du calcium. Les principaux constituants entrant dans la composition des ciments sont situés sur le trait rouge, qui représente un rapport Si/Al constant. Ces éléments ne contiennent pas tous les mêmes quantités de calcium. Aussi ceux qui en contiennent moins, comme les pouzzolanes, seront-ils plus lents à s'hydrater car ils nécessiteront un apport calcique plus important.

I.3. DIFFERENTS TYPES DE CIMENTS COURANTS

Selon les constituants, autres que le gypse, ajoutés ou non au clinker lors des étapes de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme des ciments (NA¹ 442). La norme NA 442, définit : la famille des ciments, leur composition, leur classe de résistance, la nature des constituants utilisés, les caractéristiques complémentaires, les spécifications mécaniques et physiques. Le tableau I.1 présente les 27 types de ciments

¹ NA 442 : Ciments : composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.

courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, on présente sa désignation propre et les pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent.

Tableau I.1. Principales catégories des ciments selon la norme NA 442.

		Composition (% en masse)												
		Constituants principaux										Constituants secondaires		
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres		Schiste Calciné	Calcaire				
					Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcaire						
P	Q				V	W								
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL			
Ciment portland	CEM I	95-100											≤ 5%	
Ciment portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20										≤ 5%	
	CEM II/B-S	65-79	21-35										≤ 5%	
Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94		6 - 10									≤ 5%	
Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94			6-20								≤ 5%	
	CEM II/B-P	65-79			21-35								≤ 5%	
	CEM II/A-Q	80-94				6-20							≤ 5%	
	CEM II/B-Q	65-79				21-35							≤ 5%	
Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94					6 - 20						≤ 5%	
	CEM II/B-V	65-79					21-35						≤ 5%	
	CEM II/A-W	80-94						6-20					≤ 5%	
	CEM II/B-W	65-79						21-35					≤ 5%	
Ciment portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94							6 - 20				≤ 5%	
	CEM II/B-T	65-79							21-35				≤ 5%	
Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94								6 - 20			≤ 5%	
	CEM II/B-L	65-79								21-35			≤ 5%	
	CEM II/A-LL	80-94									6-20		≤ 5%	
	CEM II/B-LL	65-79									21-35		≤ 5%	
Ciment portland composé	CEM II/A-M	80-94	← 12-20 →										≤ 5%	
	CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →										≤ 5%	
Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65										≤ 5%	
	CEM III/B	20-34	66-80										≤ 5%	
	CEM III/C	5-19	81-95										≤ 5%	
Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89	← 11-35 →										≤ 5%	
	CEM IV/B	45-64	← 36-55 →										≤ 5%	
Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	← 12-20 →										≤ 5%
	CEM V/B	20-38	20-38	← 21-35 →										≤ 5%

Remarque : Dans les cas des ciments CEM II/A-M, CEM II/B-M, CEM IV/A, CEM IV/B, CEM V/A et CEM V/B les constituants principaux autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment.

I.4. CIMENTS COURANTS RESISTANTS AUX SULFATES (CIMENTS SR)

Le tableau I.2 donne les sept (7) produits de la famille des ciments courants résistants aux sulfates, ils sont regroupés en trois types principaux comme suit :

Ciment portland résistant aux sulfates :

- CEM I-SR 0 Ciment portland résistant aux sulfates (teneur en C_3A du clinker = 0 %) ;
- CEM I-SR 3 Ciment portland résistant aux sulfates (teneur en C_3A du clinker ≤ 3 %) ;
- CEM I-SR 5 Ciment portland résistant aux sulfates (teneur en C_3A du clinker ≤ 5 %).

Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates :

- CEM III/B-SR et CEM III/C-SR le Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates (aucune exigence concernant la teneur en C_3A du clinker).

Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates :

- CEM IV/A-SR Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates (teneur en $C_3A \leq 9$ %) ;
- CEM IV/B-SR Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates (teneur en $C_3A \leq 9$ %).

Tableau I.2. Principales catégories des ciments résistant aux sulfates selon la norme NA 442.

Notation de sept produits (types de ciments courants résistant aux sulfates)		Composition (% en masse)				
		Constituants principaux				Constituants secondaires
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Pouzzolane naturelle	Cendre volante siliceuse	
K	S	P	V			
Ciment portland résistant aux sulfates	CEM I-SR0 CEM I-SR3 CEM I-SR5	95-100	-	-	-	$\leq 5\%$
Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	-	$\leq 5\%$
	CEM III/C-SR	5-19	81-95	-	-	$\leq 5\%$
Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates	CEM IV/A-SR	65-79	-	21-35		$\leq 5\%$
	CEM IV/B-SR	45-64	-	36-55		

I.5. PROPRIETES DES CIMENTS COURANTS

I.5.1. Composition chimique

De nombreux savants ont étudié la chimie du clinker Portland et la composition chimique est maintenant bien connue (Tableau I.3). Des travaux de Le Chatelier, Michaelis, Lea et Parker, Rankin et Wright, Kühn, Bogue, ..., il est établi que le clinker est principalement constitué en proportions variables de :

Tableau I.3. Composition chimique du ciment.

	Minimum (%)	Maximum (%)
SiO ₂	20.0	24.3
Al ₂ O ₃	3.7	7.1
Fe ₂ O ₃	1.7	5.7
CaO	61.0	68.1
MgO	1.7	4
SO ₃	0.05	1.3
K ₂ O	0.05	1.4
Na ₂ O	0.05	0.7
TiO ₂	0.15	0.4
Mn ₂ O ₃	0.05	1.2
P ₂ O ₅	0.05	0.6
Cl	0	0.1
F	0.01	0.3

I.5.2. Exigences mécaniques

La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la norme NA 234, mesurée à 28 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau I.4 ci-dessous.

Trois (3) classes de résistance courante sont couvertes : classe 32,5 ; classe 42,5 ; classe 52,5. A chaque classe de résistance courante, correspondent trois (3) classes de résistance à court terme :

- Une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N ;
- Une classe de résistance à court terme élevée, notée R ;
- Une classe de faible résistance à court terme, notée L.

La classe L est uniquement applicable aux ciments CEM III qui sont alors des ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme.

Tableau I.4. Résistances mécaniques des classes de ciment.

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32.5 L	-	≥ 12.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 N	-	≥ 16.0		
32.5 R	≥ 10.0	-		
42.5 L	-	≥ 16.0	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 N	≥ 10.0	-		
42.5 R	≥ 20.0	-		
52.5 L	≥ 10.0	-	≥ 52.5	-
52.5 N	≥ 20.0	-		
52.5 R	≥ 30.0	-		

I.5.3. Exigences physiques

I.5.3.1. Indice d'hydraulicité

L'indice d'hydraulicité ou l'indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à celle de la fraction basique, il est donné par la formule R.1 :

$$I = \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} \quad \text{R.1}$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice d'hydraulicité est plus élevé :

- Si $I > 0.5$, le ciment est dit basique (Portland) ;
- Si $I < 0.5$, le ciment est dit neutre (riche en laitier) ;
- Si $I \neq 1$, le ciment est dit acide, conventionnellement ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non de la chaux mais de l'alumine (ciment alumineux).

Actuellement, on préconise les règles suivantes :

$$1.40 < \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} < 1.45 \quad \text{et} \quad 0.45 < \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} < 0.50 \quad \text{R.2}$$

I.5.3.2. Temps de début de prise

Les temps de début de prise sont mesurés à l'aide de l'appareil de Vicat suivant la norme NA 230. L'aiguille est enfoncée dans un moule tronconique de 4 cm de haut contenant 80 ml de pâte. On dit qu'il y a début de prise lorsque l'aiguille n'est plus capable de

transpercer la totalité de la pâte, mais s'arrête à 4 ± 1 mm du fond du moule. Le temps de début de prise doit satisfaire aux exigences du tableau I.5.

Tableau I.5. Temps de début de prise.

Classe de résistance	Temps de début de prise (minutes)
32.5 L	≥ 75
32.5 N	
32.5 R	
42.5 L	≥ 60
42.5 N	
42.5 R	
52.5 L	≥ 45
52.5 N	
52.5 R	
Classe de résistance L uniquement pour les ciments CEM III.	

I.5.3.3. Expansion (stabilité)

L'expansion se mesure suivant un essai normalisé (norme NA 230) sur une pâte pure pour tous les ciments avec les aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion doit satisfaire aux exigences du tableau I.6 ci-dessus.

Tableau I.6. Stabilité des ciments.

Classe de résistance	Stabilité (expansion)
32.5 L	≤ 10 mm
32.5 N	
32.5 R	
42.5 L	
42.5 N	
42.5 R	
52.5 L	
52.5 N	
52.5 R	

I.5.3.4. Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation des ciments courants à faible chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser la valeur caractéristique de 270 J/g, déterminée selon la norme NA 5097 à 7 jours ou selon la NA 5061 après 41 heures. Les ciments courants à faible chaleur d'hydratation sont désignés par les lettres (LH).

NOTE 1 : Il a été observé que les résultats de l'essai réalisé selon la norme NA 5097 à 7 jours sont équivalents aux résultats obtenus avec l'essai effectué selon la NA 5061 après 41

heures. Néanmoins, en cas de litige entre les laboratoires, il convient que la méthode à appliquer fasse l'objet d'un accord.

NOTE 2 : Un ciment présentant une valeur de chaleur d'hydratation plus élevée est adapté à certaines applications. Il est nécessaire que cette valeur fasse l'objet d'un accord entre le fabricant et l'utilisateur et que le ciment ne soit pas identifié comme un ciment à faible chaleur d'hydratation (LH).

I.5.3.5. Finesse de mouture

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment, elle est mesurée à l'aide d'un manomètre en U selon la norme NA 231. Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g .

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'événement du ciment sont accrus.

I.5.3.6. Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. La norme impose les valeurs limites, à 28 jours de :

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments CEM I et CEM II de la classe 32.5 ;
- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les autres types de ciment mais des classes 32.5 R, 42.5 et 42.5 R.

I.5.4. Exigences chimiques

Déterminées conformément aux normes citées dans la colonne 2 du tableau I.6, les propriétés des types de ciments et classes de résistance figurant respectivement aux colonnes

3 et 4 de ce tableau doivent être conformes aux valeurs figurant à la colonne 5 du tableau I.7 ci-dessous.

Tableau I.7. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques.

1	2	3	4	5
Propriétés	Norme de l'essai	Type de ciment	Classes de résistance	Exigences
Perte au feu PAF	NA 5042	CEM I CEM III	Toutes les classes	≤ 5%
Résidus insolubles	NA 5042	CEM I CEM III	Toutes les classes	≤ 5%
Teneur en sulfates (SO ₃)	NA 5042	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5 N 32.5 R 42.5 N	≤ 3.5%
			42.5 R 52.5 N 52.5 R	≤ 4%
		CEM III	Toutes les classes	
Teneur en chlorure	NA 5042	Tous types	Toutes les classes	≤ 0.10%
Pouzzolanité	NA 1952	CEM IV	Toutes les classes	Satisfait à l'essai

I.5.5. Exigences de durabilité

Les exigences pertinentes sont données dans la NA 16002. Un ciment courant résistant aux sulfates doit satisfaire aux exigences chimiques supplémentaires spécifiées dans le tableau I.8. Les ciments résistants aux sulfates doivent être identifiés par la notation SR.

Tableau I.8. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques.

1	2	3	4	5
Propriétés	Norme de l'essai	Type de ciment	Classes de résistance	Exigences
Teneur en sulfates (SO ₃)	NA 5042	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5	32.5 N 32.5 R 42.5 N	≤ 3.0%
		CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	42.5 R 52.5 N 52.5 R	≤ 3.5%
Teneur de C ₃ A dans le clinker	NA 5042	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5	Toutes les classes	= 0% ≤ 3% ≤ 5%
	a ²⁾	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR		≤ 9%
Pouzzolanité	NA 1952	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	Toutes les classes	Le résultat d'essai doit être positif à 8 jours

I.5.6. Exigences de conditionnement, emballage et marquage.

L'emballage, le marquage et le conditionnement des ciments doivent répondre aux exigences définies dans la norme NA 5026. La masse nette du ciment contenu dans le sac ne

² a) En attendant la mise au point d'un essai, la teneur en C₃A du clinker doit être déterminé à partir de l'analyse du clinker réalisée dans le cadre du contrôle de production en usine du fabricant

doit pas différer de plus ou moins 1% de la masse indiquée sur le sac. Exemple sac de 50 kg : la masse nette doit être égale à $50 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$.

I.5.6.1. Dénomination.

Les ciments CEM doivent être identifiés, au minimum, par la notation du type de ciment suivie des nombres 32,5 ; 42,5 ou 52,5 indiquant la classe de résistance. Pour indiquer la classe de résistance à court terme, on doit ajouter la lettre N, la lettre R ou la lettre L, selon le cas. Les ciments courants résistants aux sulfates doivent, en plus, être identifiés par la notation SR. Les ciments courants à faible chaleur d'hydratation doivent, en plus, être identifiés par la notation LH.

Exemple 1 :

Un ciment de haut fourneau, conforme à la NA 442, contenant entre 81 % et 95 % en masse de laitier granulé de haut fourneau (S), appartenant à la classe de résistance 32,5, présentant une faible résistance à court terme, une faible chaleur d'hydratation et résistant aux sulfates est identifié par : **Ciment de haut fourneau NA 442 - CEM III/C 32,5 L - LH/SR.**

Exemple 2 :

Un ciment Portland au calcaire, conforme à la NA 442, contenant entre 6 % et 20 % en masse de calcaire, avec une teneur en TOC inférieure ou égale à 0,50 % en masse (L), appartenant à la classe de résistance 32,5 et présentant une résistance à court terme ordinaire, est identifié par : **Ciment portland au calcaire NA 442 - CEM II/A-L 32,5 N**

Exemple 3 :

Un ciment Portland composé, conforme à la NA 442, contenant au total une quantité de laitier granulé de haut fourneau (S) , de cendres volantes siliceuses (V) et de calcaire (L) comprise entre 12 % et 20 % en masse, appartenant à la classe de résistance 32,5 et présentant une résistance à court terme élevée, est identifié par : **Ciment portland composé NA 442 - CEM II/A-M (S-V-L) 32,5 R**

I.5.6.2. Indication complémentaire.

- Quantité nette exprimée en kilogrammes ;
- Nom du pays d'origine pour le ciment importé ; nom ou raison sociale et adresse du fabricant, du conditionneur et/ou de l'importateur ;
- Date de fabrication et numéro du lot ;
- Sel soluble ajouté (formule chimique-teneur en sel anhydre) ;
- Propriétés hydrauliques des cendres incorporées (mention cendres hydrauliques) ;
- L'adjuvant éventuellement incorporé en usine (dénomination commerciale, propriété, pourcentage).

Le fabricant est tenu de mentionner ces indications sur la sacherie, les bordereaux de livraison des conteneurs, et autres éléments d'identification.

Toutefois pour les ciments livrés en vrac et non destinés à la vente au détail, il est admis, à l'exception du nom et type de produit, que les mentions de marquage citées ci-dessus, puissent figurer uniquement sur les documents d'accompagnement.

I.6. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment à savoir : C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. L'étude des réactions d'hydratation des composants du ciment dissocie artificiellement des mécanismes dont le déroulement est résumé ci-après par les évolutions des principaux constituants.

Les notations cimentières³ sont utilisées dans l'écriture des réactions chimiques de transformation de ces éléments lors de l'hydratation, entre autres. L'expression en oxydes est

³ En notation cimentière C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃ et S = SO₃

une simplification d'écriture mais ne correspond pas à la réalité physique, ces éléments étant cristallisés pour la majorité d'entre eux.

I.6.1. Hydratation des silicates

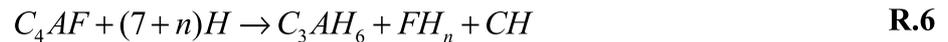
Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalciques (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions (R.3 et R.4) sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible, le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme par contre le C_3S donne au ciment une résistance rapide et élevée; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.



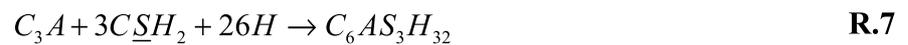
I.6.2. Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique C_3A est le constituant le plus réactif du clinker. En l'absence de gypse, il réagit très rapidement avec l'eau dès les premières minutes en entraînant la formation des hydrates métastables (C_4AH_{13} , C_2AH_8) en plaquettes hexagonales qui se transforment en un aluminate de calcium hydraté de cristaux cubique C_3AH_6 (R.5). La précipitation immédiate des aluminates bloquerait l'hydratation des autres constituants, provoquant une prise très rapide ce qui empêche son transport ou sa mise en place (mauvaise maniabilité). L'aluminoferrite tetracalcique C_4AF donne les mêmes hydrates que C_3A (R.6), par simple substitution Al avec le Fe, mais il réagit moins vite que C_3A ; son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

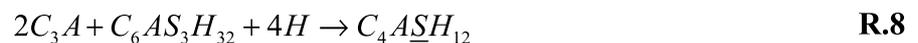




L'ajout de gypse permet de remédier le phénomène de fausse prise due à la cristallisation quasi immédiate des aluminates hydratés. Cet ajout de gypse provoque en effet la formation des hydrates de sulfoaluminates de calcium : le trisulfoaluminate de calcium, aussi connu sous le nom d'ettringite (R.7) autour des grains de C_3A , ralentissant donc l'hydratation des grains de ciment.



La formation d'ettringite consomme trois moles de sulfate de calcium par mole d'aluminate tricalcique. La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de C_3A par rapport au gypse. Lorsque le gypse est totalement épuisé, la solution devient sous saturée par rapport à l'ettringite. Celle-ci se dissout et devient la nouvelle source de sulfate pour former avec l'aluminate excédentaire un nouveau composé : le monosulfoaluminate de calcium hydraté, avec une mole de sulfate de calcium pour une mole de C_3A , selon la réaction R.8.



En résumé, la pâte de ciment durcie présente une morphologie structurale plus dense et des hydrates moins perméables. Le tableau I.9 et les figures I.4 et I.5 résument les principaux hydrates formés lors l'hydratation du ciment.

Tableau I.9. Principaux produits d'hydratation du ciment Portland.

Dénomination	Formule chimique détaillée	Abréviation
Portlandite	$Ca(OH)_2$	CH
Silicate de Calcium Hydraté	$3CaO.2SiO_2.3H_2O$	C-S-H
Trisulfoaluminate (AFt) ou ettringite	$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$	$C_6AS_3H_{32}$
Monosulfoaluminate (AFm)	$3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O$	C_4ASH_{12}
Aluminate tetracalcique hydraté	$4CaO.Al_2O_3.13H_2O$	C_4AH_{13}
Aluminate dicalcique hydraté	$2CaO.Al_2O_3.8H_2O$	C_2AH_8
Aluminate tricalcique hydraté (Hydragarnet)	$3CaO.Al_2O_3.6H_2O$	C_3AH_6

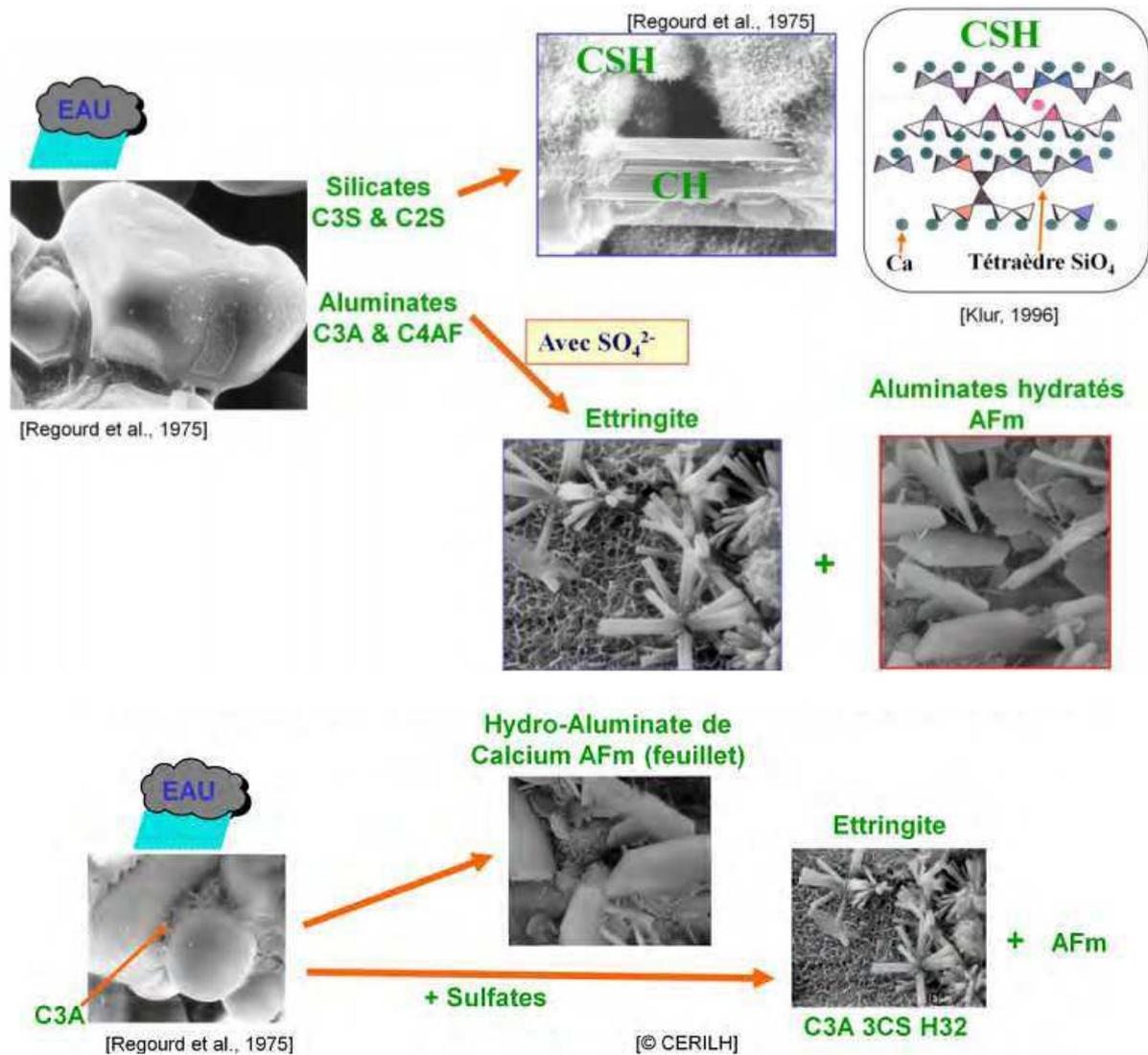


Figure I.4. Hydratation du ciment Portland.

Le graphique de Locher et al., 1976 résume l'ordre d'apparition des différents hydrates et leur quantité relative. La courbe pointillée de la porosité diminue proportionnellement avec le taux d'hydratation de la pâte de ciment, à cause du comblement progressif des vides intergranulaires initiaux par les différents hydrates. On constate qu'après quelques heures, l'ettringite augmente, passe par un maximum, puis diminue au profit du monosulfoaluminate de calcium et des aluminates hydratés.

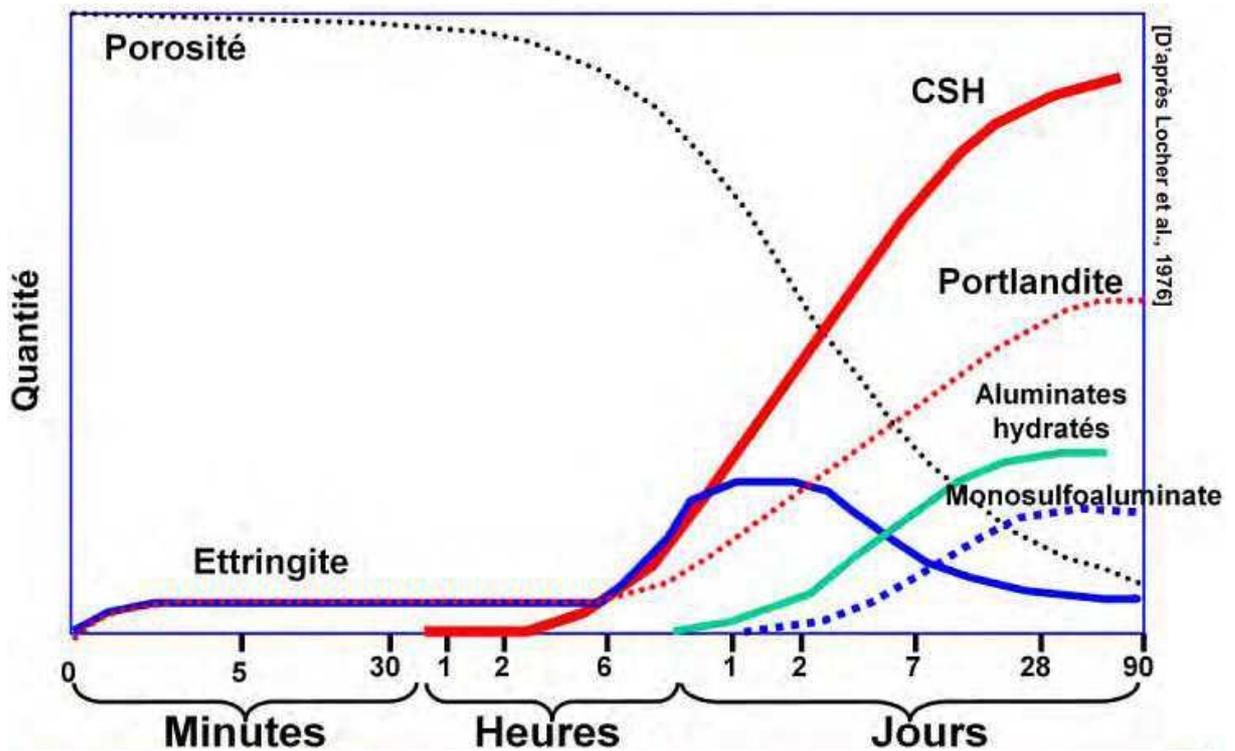


Figure I.5. Ordre chronologique de formation des hydrates et leur quantité relative.

I.7. STRUCTURE DE LA PÂTE DE CIMENT DURCIE

La pâte de ciment, qui est primitivement fluide, se structure au cours de l'hydratation pour former un corps poreux composé par des phases solides et des vides. La pâte de ciment hydraté est formée par

- Les hydrates (C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfoaluminates) ;
- Des grains de ciment non-hydratés ;
- Des espaces capillaires ;
- Des bulles d'air.

La figure I.6 montre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydratée.

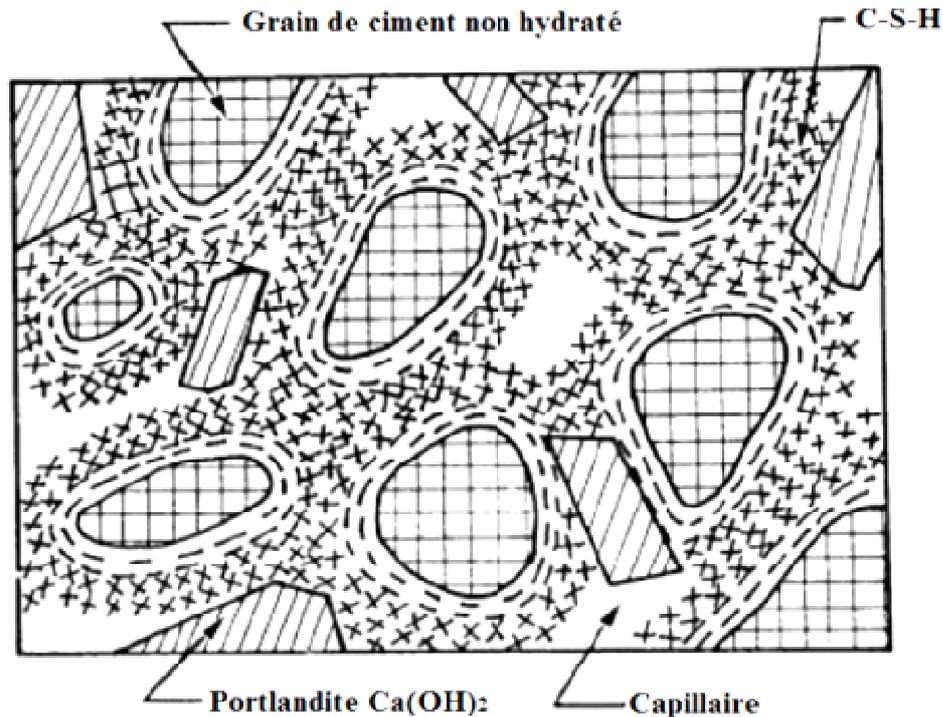


Figure I.6. Représentation schématique de la pâte de ciment hydratée.

On y retrouve:

- Des grains de ciment (10 à 80 μm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates ;
- Des hydrates (surtout des C-S-H et de portlandite) qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment ;
- Des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau, cette eau est en équilibre avec les solides de la pâte de ciment et constitue la phase liquide (interstitielle).

La phase solide assure la cohésion et la résistance mécanique du matériau dont leurs ordre décroissant d'importance est le suivant : les silicates de calcium hydratés C-S-H, la portlandite Ca(OH)_2 et les sulfoaluminates de calcium (monosulfoaluminate et trisulfoaluminate). Les proportions dépendent de la nature et la composition chimique du liant. Le pourcentage massique de ces produits est approximativement: C-S-H : 50-70% ; Ca(OH)_2 : 5-15% ; Sulfoaluminates (Aft et Afm) : 20-30%.

- Le C-S-H est un gel solide poreux qui a les propriétés d'un corps solide. Il a une structure en feuillets, formées de cristaux très petits et amorphes du fait de leurs germinations rapides. La surface spécifique des C-S-H est très élevée (100 à 700 cm^2/g). La cohésion des C-S-H est due, en partie, aux forces de Van der Waals entre les particules colloïdales des C-S-H. Le pH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13). Les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillets. Ils sont très petits (20Å à 30Å), La porosité du gel de C-S-H représente environ 28% du volume total du gel. L'eau des pores de gel n'est pas « libre » car elle est fortement retenue sur les feuillets par des forces de surface. Puisque les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.
- La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a une morphologie hexagonale prismatique; la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition du béton. Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12.5.
- Les sulfoaluminates hydratés se retrouvent généralement sous deux formes :
 1. Les monosulfoaluminate (AFm) se présentent sous forme des plaquettes hexagonales. Le calcium peut être substitué par du magnésium, l'aluminium par du fer et le soufre par des hydroxydes et du silicium. Une partie de la phase AFm faiblement cristallisée serait intimement mélangée aux C-S-H.
 2. Les trisulfoaluminates ou l'ettringite (AFt) ont une forme des aiguilles prismatiques, l'ettringite est une phase cristallisée, stable à une température de 20°C et pour une humidité relative de 4%. Différents analogues (carbonate, fer, hydroxyde, etc.) et des solutions solides ont été rapportés.

La porosité du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton à savoir :

- Presque toutes les caractéristiques mécaniques;
- Toutes les perméabilités (eau, ions, gaz);
- Durabilité.

Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue. Les matériaux cimentaires faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO_2 , Cl^- , ... etc.). La porosité de la pâte de ciment est constituée de plusieurs familles de vides dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'Angström (Å). Les plus petits vides d'une pâte de ciment sont donc 1 million de fois plus petits que les plus gros comme illustré en figure I.7.

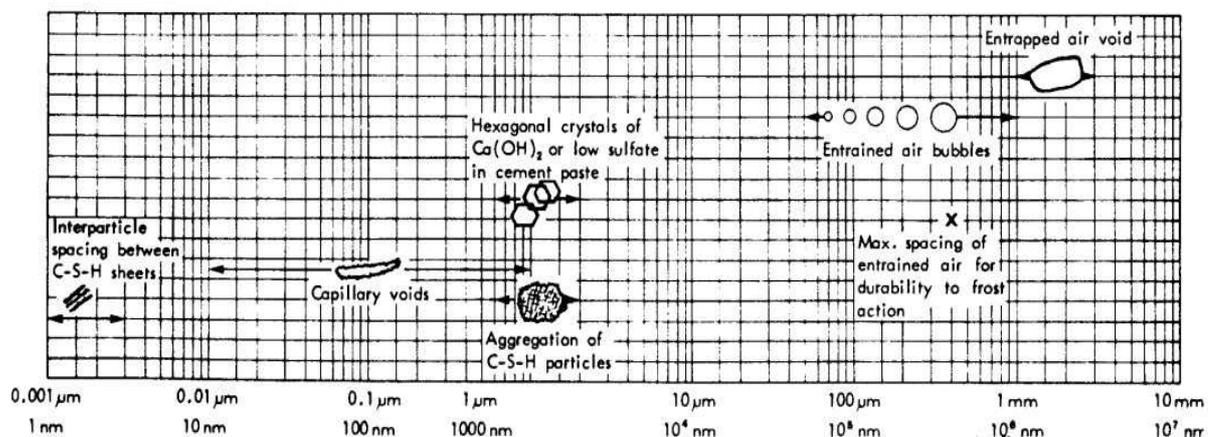


Figure I.7. Echelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté.

La figure I.4 montre la présence des pores capillaires et des pores nanométrique. Les pores capillaires ont une taille comprise entre 0,01 et 10 µm. Cette porosité capillaire forme évidemment au départ un réseau continu, représentant tout l'espace entre les grains de ciment. Après un certain temps de l'hydratation, le réseau de capillaires devient complètement discontinu, cela est dû à la formation des hydrates qui se déposent dans les capillaires, réduisant la dimension de ces pores. Le volume global des capillaires dépend fortement du

rapport E/C et de l'âge de la pâte. Des essais réalisés par porosimètre au mercure mettent en évidence une porosité nanométrique. Cette porosité est peu affectée par le rapport E/C mais dépend de la porosité intrinsèque de certains hydrates et en particulier les C-S-H qui ont une structure lamellaire. Feldman et Sereda ont observé cette porosité à l'aide de microscope électronique à transmission (Figure I.8). La porosité nanométrique comprend aussi l'espace interfeuillelet des C-S-H que les vides créés par l'empilement parfois irrégulier des lamelles de C-S-H. L'ordre de grandeur de ces pores est de 0.1 à 10nm ($<0.01\mu\text{m}$). La porosité nanométrique a été estimée par Powers au sein du gel de C-S-H, elle est de l'ordre de 28%.

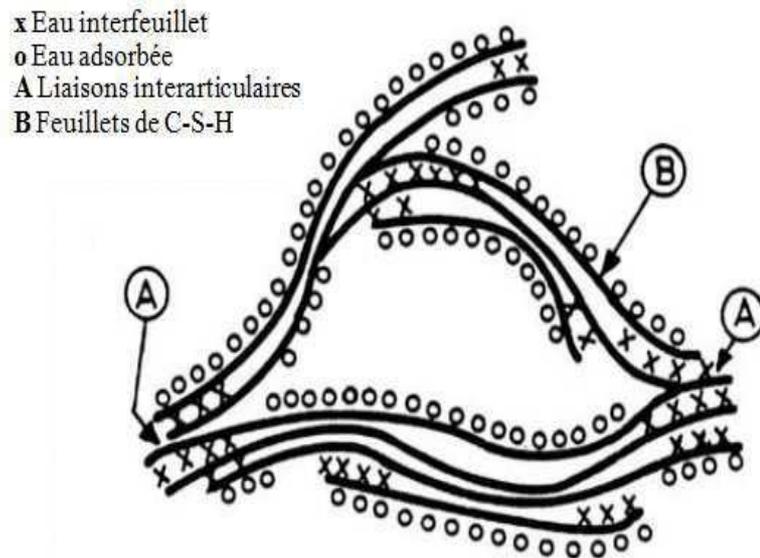


Figure I.8. Schématisation de la structure des C-S-H, selon Feldman et Sereda.

I.8. DOMAINE D'UTILISATION DES CIMENTS

Le ciment est l'un des matériaux indispensables à la construction. En 2013, le monde en a produit environ 4 milliards de tonnes, selon les données publiées par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS), dans son rapport de février 2014.

Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA⁴) a réalisé une production record en 2015 qui s'est établie à 12.143.557 tonnes de ciment contre 11.555.280 tonnes en 2014 (+5%). Les quantités de ciment produites par les 12 cimenteries de ce groupe "ont été

⁴ GICA : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie

totalemment injectées sur le marché national, honorant, ainsi, toutes les commandes et les besoins exprimés par les opérateurs du marché de la construction".

A l'horizon 2019, GICA compte augmenter sa production à près de 23 millions de tonnes conformément aux orientations des pouvoirs publics visant à encourager l'investissement productif, notamment dans les filières stratégiques, et à réduire les importations. Tous ces chiffres montrent l'importance de la fabrication du ciment et son impact au développement économique du pays. L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits du béton sur chantier ou en usine, pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil. Le tableau et la figure I.9 résument les différents domaines d'emploi du ciment et les principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2014 à 2019.

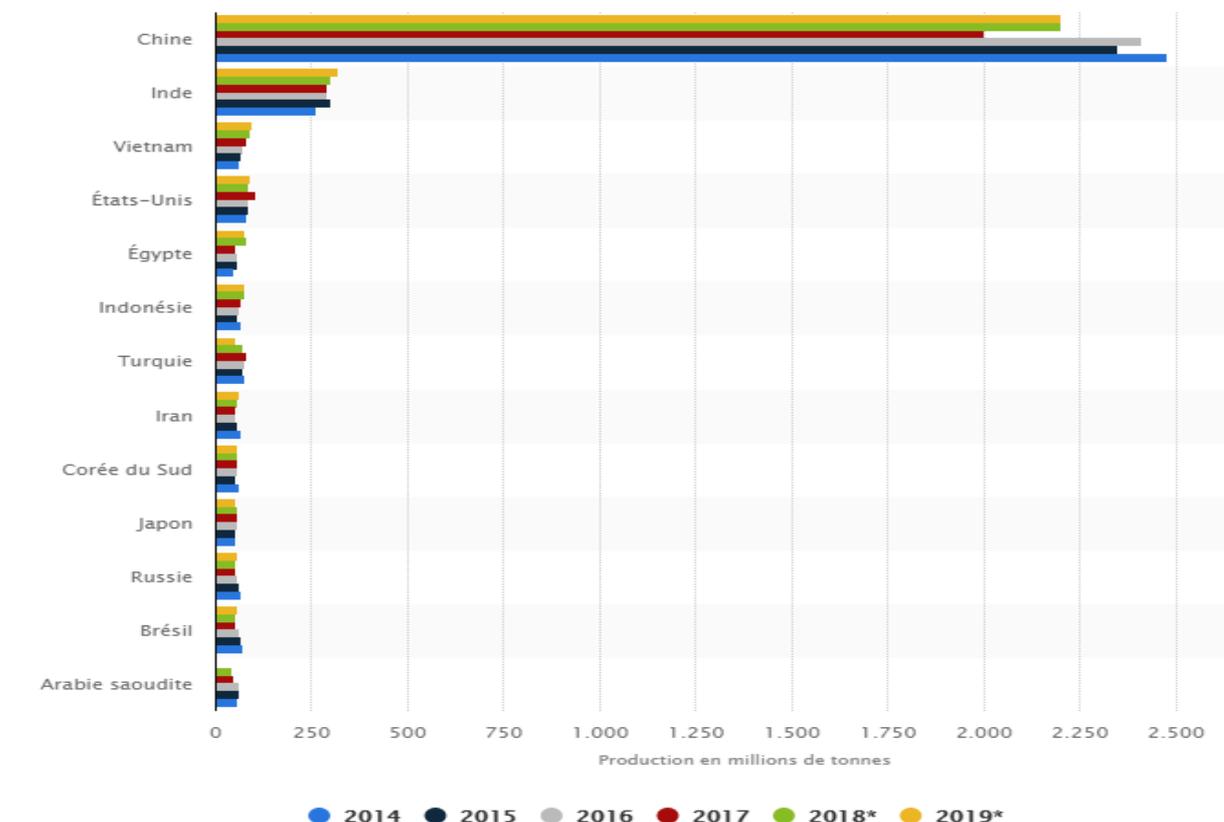


Figure I.9. Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2014 à 2019.

Le ciment est le plus utilisé des liants hydrauliques. Il entre dans la composition du béton, auquel il confère notamment sa résistance. Le ciment est un matériau de construction de haute qualité, économique, et utilisé dans les projets de construction du monde entier. La consommation mondiale de ciment a plus que doublé en 15 ans, surtout du fait du boom de la construction dans les pays émergents. L'industrie du ciment fait face au défi de la réduction des émissions de CO₂. Pour produire le clinker, principal composant du ciment, les fours doivent atteindre des températures supérieures à 1400 degrés. Conséquence : les cimenteries font partie des principaux producteurs de gaz à effet de serre (5% du CO₂ au niveau mondial). Les marchés émergents consomment aujourd'hui 90 % de la production de ciment, contre 65 % au début des années 1990. La consommation mondiale de ciment devrait croître régulièrement jusqu'en 2030-2050, pour culminer autour de 5 Mdt. La production de ciment est un indicateur économique, lié d'une part au nombre d'habitants, mais également au potentiel de croissance de chaque pays sur une période donnée. Sur la période 2030-2050, la consommation de ciment de la Chine pourrait être abaissée au-dessous de 1,4 Mdt, tandis que celle de l'Inde pourrait atteindre 800 millions de tonnes (Mt). La consommation de ciment suit une courbe « en cloche », qui atteint son plus haut niveau en phase de maturité – la Chine pourrait être en train d'aborder cette phase alors que l'Inde est encore en phase de croissance initiale – et décroît ensuite pour rejoindre un niveau de consommation asymptotique.

Le ciment a *un faible ratio valeur/poids* d'où des coûts de transport élevés, la production cimentière reste avant tout locale : 95 % en moyenne du ciment consommé dans le monde sont utilisés dans le pays de production. Pour être compétitifs, les cimentiers installent généralement leurs unités de production à proximité d'importantes réserves de calcaire et d'argile offrant un accès aisé à une source d'énergie fiable.

La production mondiale de ciment est dominée par quelques groupes internationaux occidentaux, le suisse Hol, le français Lafarge, l'irlandais CRH, l'allemand Heidelberg Cement, le mexicain Cemex et l'italien Italcementi.

Tableau I.9. Domaines d'emploi du ciment.

Désignation	Domaine d'emploi
CEM I 52,5 et 52,5 R	Béton armé ou précontraint avec un décoffrage rapide Préfabrication
CEM I 52,5 et 52,5 R	Béton armé ou précontraint avec un décoffrage rapide Préfabrication Ouvrages nécessitant des résistances finales élevées Béton à hautes performances
CEM II/A ou B 32,5 et 32,5 R	Béton en élévation armé ou non avec un décoffrage rapide Dallage Stabilisation des sols Travaux de maçonnerie Fondations ou travaux souterrains en milieux chimiquement non Agressifs
CEM II/A ou B 42,5 et 42,5 R	Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué Décoffrage rapide, mise en service rapide Béton étuvé ou auto-étuvé
CEM II /A 52,5 et 52,5 R	Béton armé ou précontraint avec un décoffrage rapide Préfabrication Ouvrages nécessitant des résistances finales Elevées Béton à hautes performances
CEM II / A [D] 52,5 et 52,5 R aux fumées de silice	Béton à hautes performances et toutes ses utilisations Béton armé et béton précontraint Préfabrication Béton fluide et pompable
CEM III / A ou B 32,5 ; 42,5 et 52,5	Travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation Bétons de masse et travaux en béton armé ou non Stabilisation des sols et travaux à la mer
CEM III / C 32,5	Travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation Bétons de masse et travaux en béton armé ou non Stabilisation des sols et travaux à la mer
CEM IV / A ou B 32,5	Travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation Bétons de masse et travaux en béton armé ou non Stabilisation des sols et travaux à la mer Travaux de maçonnerie
CEM IV / A ou B 42,5	Travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation Bétons de masse et travaux en béton armé ou non Stabilisation des sols et travaux à la mer
CEM V / A 32,5	Travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation Bétons de masse et travaux en béton armé ou non Stabilisation des sols et travaux à la mer

I.9. LISTE DES REFERENCES ET DES SITES INTERNET A CONSULTER

NA 442 Ciments : composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.

NA 5040 Ciments évaluation de la conformité.

NA 230 Ciments - Détermination du temps de prise et de la stabilité.

NA 234 Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques.

NA 5097 Méthodes d'essais des ciments - Chaleur d'hydratation - Méthode par dissolution.

NA 5042 Méthodes d'essais des ciments - Analyse chimique des ciments.

NA 1952 Méthodes d'essais des ciments - Essais de Pouzzolanité des ciments Pouzzolaniques.

NA 231 Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la finesse.

NA 254 Méthodes d'essais des ciments - Méthodes de prélèvements et d'Echantillonnage du ciment ;

NA 17058 Méthode d'essai des cendres volantes - Détermination de la teneur en oxyde de calcium libre.

NA17059 Déterminations du carbone organique total dans le calcaire.

NA 5039 Liants hydrauliques - Guide d'utilisation des ciments.

NA 16002 Béton - Spécification, performances, production et conformité.

NA 443 Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

NA 5026 Liants hydrauliques - Vérification de la qualité des livraisons - Emballage et marquage.

Festa Jean & Dreux Georges (2007) Nouveau guide du béton et ses constituons, 8 ème édition. Eyrolles, Paris

Sites internet :

- <https://fr.statista.com/statistiques/570415/principaux-pays-producteurs-de-ciment-dans-le-monde/>
- <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html>

Chritophe Charron (2008) L'industrie du ciment – Données générales. Ecole thématique « Matériaux cimentaires » du 21 au 26 septembre 2008.

CHAPITRE II.
CHAUX HYDRAULIQUE
FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

CHAPITRE II.

CHAUX HYDRAULIQUES

FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

II.1. RAPPEL HISTORIQUE

On peut supposer que les hommes de la préhistoire ont découvert la chaux à partir du moment où ils ont maîtrisés le feu : des pierres calcaire entourant un foyer, le feu brûlant nuit et jour et ces pierres ont fini par se décarbonater. Plus tard, la pluie sur un foyer éteint et la chaux vive s'est hydratée. Les Romains, les Chinois, les Égyptiens, les Mayas ont construit des édifices durables avec des mortiers à base de chaux à caractère hydraulique, obtenues par cuisson des calcaires locaux.

Plus près de nous, nos ancêtres ont utilisé les mêmes procédés pour construire des ouvrages et des bâtiments qui font partie de notre patrimoine.

II.2. QU'EST-CE QUE LA CHAUX HYDRAULIQUE ?

Les Romains sont arrivés à confectionner un véritable liant hydraulique à durcissement lent en mélangeant de la chaux grasse¹ à des cendres volcaniques d'origine récente, riches en silice et en alumine, qu'ils trouvaient au pied de Vésuve à Pouzzoles (Pozzuoli à côté de Naples; d'où le terme Pouzzolane).

Louis Vicat, grâce à des recherches commencées en 1812, montra que pour obtenir des chaux hydrauliques, il fallait que la matière première utilisée (calcaire) contienne une certaine proportion de silice et d'alumine.

La calcination du mélange (calcaire-argile), à une température supérieure à 900 °C, donne une chaux hydraulique qui fait prise par réaction à l'eau. La chaux sera plus hydraulique et plus résistante à la compression si le pourcentage d'argile est plus élevé.

¹ Terme souvent employé dans son sens imagé pour désigner une chaux aérienne de bonne qualité donnant un mortier gras, onctueux, collant.

II.3. FABRICATION DE LA CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE

La fabrication de la chaux hydraulique comporte les étapes suivantes :

II.3.1. Extraction et préparation des matières premières

La roche calcaire est extraite de carrières à ciel ouvert ou souterraines. Avant d'être cuits, le calcaire doit être préparé. La première opération consiste à forer des trous à intervalles réguliers. Ces trous sont ensuite remplis d'explosif, puis on procède au tir de mine (Plusieurs tonnes d'explosif sont utilisées lors d'un tir de mine), voir figure II.1. Une fois le tir effectué, il subsiste au pied du front de taille des pierres d'une grosseur allant de quelques centimètres à un mètre cube.



Foreuse



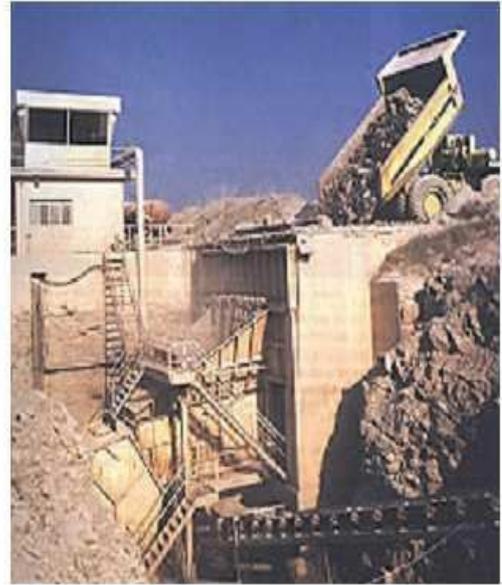
Tir de mine

Figure II.1. Extraction de la matière première (mine à ciel ouvert).

Le calcaire argileux est déposé dans des camions bennes, appelés également « Tombereau » ou « Dumper » par des pelles mécaniques ou des chargeuses puis transporté vers un concasseur qui réduit sa granulométrie. Il est ensuite criblé (voir figure II.2).



Pelle et dumper



Concasseur

Figure II.2. Transport, concassage et criblage de la matière première.

Le criblage de la matière première en résulte trois types de produits, de granulométries différentes :

- Les 0 à 30 mm pouvant être commercialisés en l'état ou réduit en poudre pour des applications spécifiques. Ils sont destinés à être cuits dans des fours rotatifs ;
- Les 30 à 60 mm pour un traitement similaire ou pour leur cuisson en four vertical ;
- Les 60 à 200 mm sont destinés à être cuits dans des fours verticaux.

II.3.2. Cuisson

II.3.2.1. Combustibles

Il est nécessaire de porter le calcaire à une température suffisamment élevée pour le décarbonater le calcaire. Pour ce faire, tout type de combustible peut être utilisé:

- Le gaz naturel (méthane), c'est le plus commode et le plus utilisé ;
- Le plus ancien, le bois. Il est employé en buches mélangées à la pierre, ou réduit en sciure, dans les fours modernes ;
- Le fuel lourd et ses résidus plus épais, également pour les fours modernes ;

- Le charbon, qui a pleinement participé à la révolution industrielle, est mélangé au calcaire ou injecté sous forme pulvérulente.

II.3.2.2. Les fours

II.3.2.2.1. Fours à alandier

Il Certainement le plus ancien et surtout le plus artisanal (voir figure II.3). Il était composé d'une cheminée, et d'une ouverture à sa base. Les pierres étaient bâties en voute face à l'ouverture, puis elles remplissaient la cheminée jusqu'à son sommet. Un feu était allumé sous la voute puis était alimentée en permanence durant plusieurs jours. La chaux était récupérée après refroidissement. Les quantités produites étaient faibles. Des fours de ce type fonctionnaient encore au début du 20^{ème} siècle pour des utilisations locales.



Figure II.3. Fours à alandier.

II.3.2.2.2. Fours à mélange

Le four à mélange (Figure II.4) est également de conception ancienne. Bâtit en pierres ou possédant une enveloppe métallique pour ceux de conception plus récente, revêtu à l'intérieur de briques réfractaires, il a l'avantage de produire la chaux en continu: Le calcaire

et le combustible sont mélangés en son sommet, la chaux en étant retirée à la base. A l'origine, le bois était utilisé comme combustible, plus tard ce fut le charbon.



Figure II.4. Fours à mélange.

Ces fours donnent un produit de bonne qualité. Les quantités produites allant de quelques tonnes à près de 200 tonnes par jour. Ceci en fonction de sa taille et de ses équipements annexes (Ventilation naturelle pour les plus anciens ou forcée pour accélérer la combustion sur les fours de conception plus récente). Des fours de ce type sont encore utilisés de nos jours.

II.3.2.2.3. Fours rotatifs

Le four rotatif (Figure II.5) est aujourd'hui assez peu employé du fait de sa forte consommation énergétique, cependant il reste indispensable pour la cuisson des petites granulométries. Il est constitué d'un tube présentant une légère pente et tournant lentement sur son axe. Le calcaire est introduit par l'orifice le plus élevé. Dans le même temps, un brûleur injecte le combustible à l'autre extrémité. La chaux est évacuée en continu par ce même côté. Ces fours acceptent également tout type de combustible et sont très souples en débit.

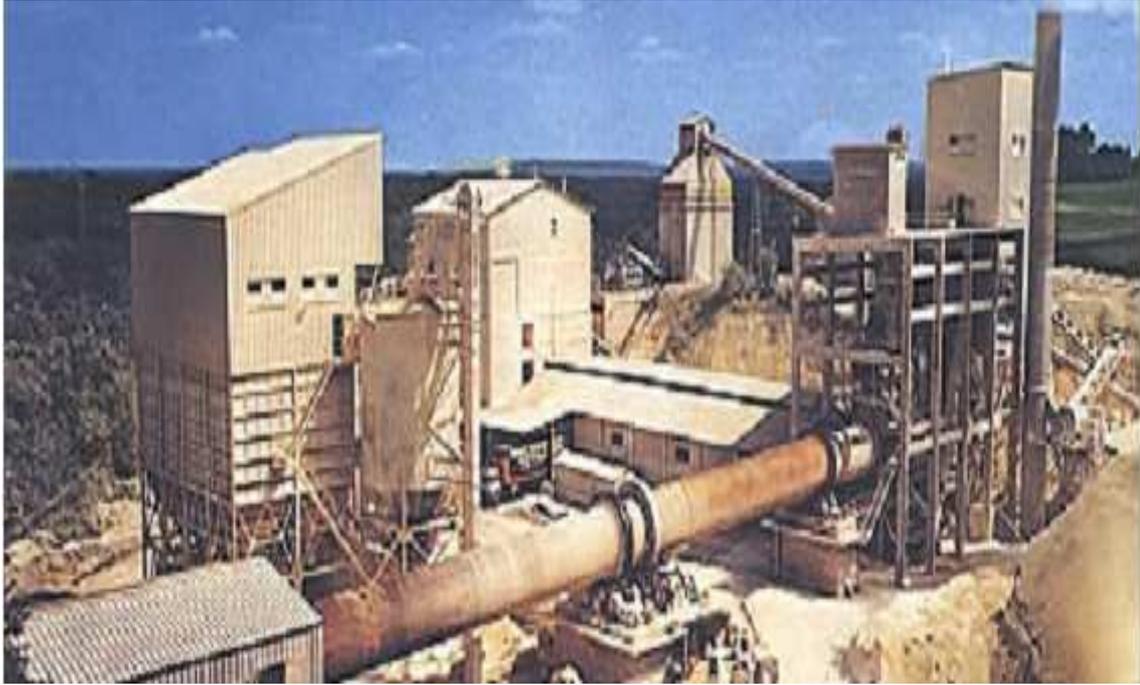


Figure II.5. Four rotatif.

Le four de type horizontal consomme plus de combustible que les fours droits. En contrepartie, la production peut atteindre 1000 tonnes par jour.

II.3.2.2.4. Fours à cycles alternés

Ce type de four (Figure II.6) est constitué de deux cuves métalliques reliées à leurs bases par un tunnel. Le combustible est injecté au sommet d'une cuve, les gaz issus de la combustion descendent à travers la masse de calcaire, traversent le tunnel puis viennent chauffer la masse de l'autre cuve. A intervalles réguliers, le cycle s'inverse : Combustion dans la deuxième cuve et réchauffage de la première.

Pendant l'inversion, une nouvelle charge de calcaire est introduite dans une cuve, l'équivalent en chaux en est retiré à la base. Ces fours, de conception récente, ont des capacités de production variant de 100 à 300 tonnes par jour, voire 500 tonnes.

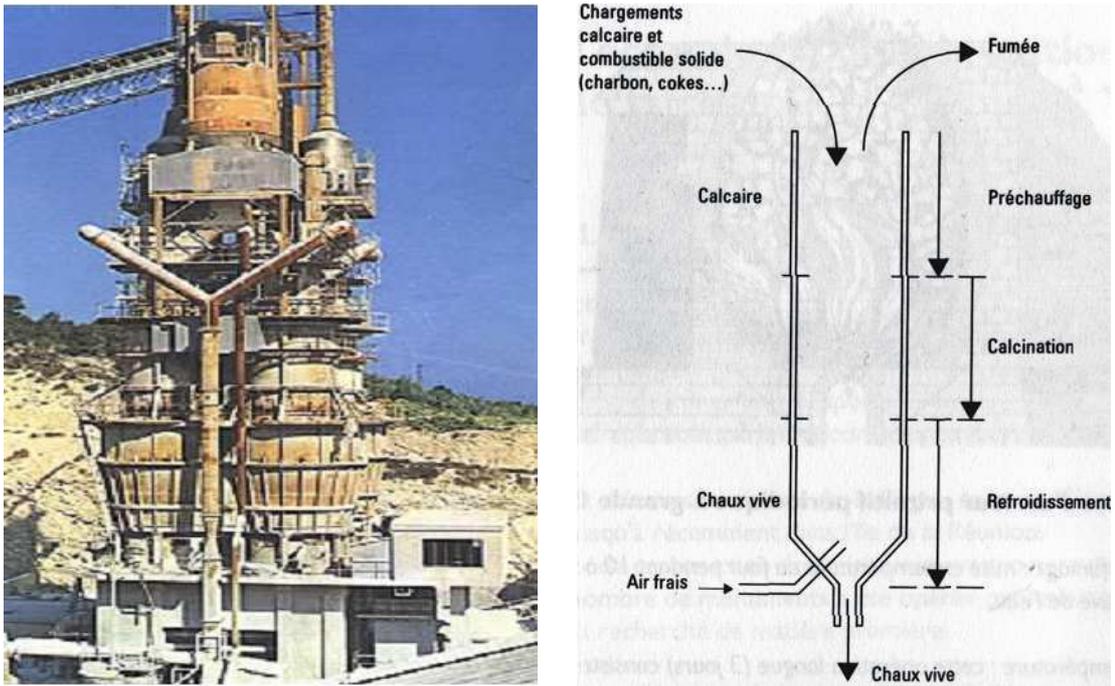


Figure II.6. Fours à cycles alternés.

Remarque :

Les fours à cycles alternés acceptent indifféremment des combustibles liquides, solides ou gazeux.

II.3.2.2.5. Fours droits annulaires

Le four annulaire (Figure II.7) est également de conception récente. Le four droit annulaire se présente généralement sous la forme d'un cylindre en acier (Diamètre moyen de 2m et une hauteur de 8m), chemisé intérieurement avec un matériau réfractaire, résistant à l'abrasion et à la corrosion.

Des brûleurs situés sur deux niveaux différents du four y injectent le combustible. Une partie des gaz issus de la combustion part vers une cheminée centrale.

Ces gaz sont alors mélangés à l'air provenant de la base du four, utilisé pour le refroidissement de la chaux. Ils viennent réguler la température de la flamme (et donc la chaleur) fournie par le combustible. Ces fours ont des capacités équivalentes aux précédents et acceptent également tout type de combustible tel que le fuel, et d'autres combustibles

d'origines végétales (pépins de raisin...), le gaz. Leur capacité de production, nettement plus importante, est de 150 à 500 tonnes par jour.

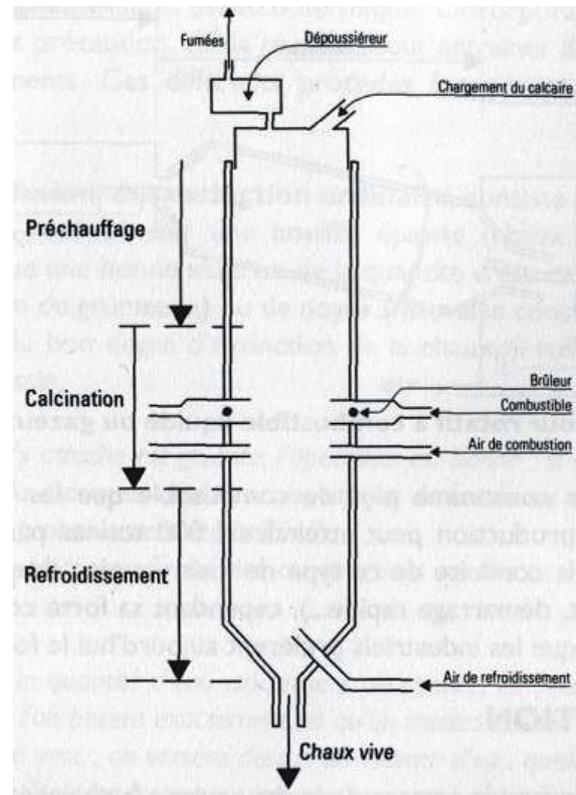


Figure II.7. Four annulaire.

III.2.3. Procédure de la cuisson

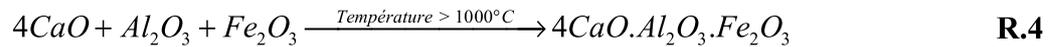
La cuisson s'effectue en général dans des fours verticaux à marche continue, dans lesquels sont introduits dans la partie supérieure, par couches successives, la pierre calcaire et le combustible.

La matière descend lentement, en traversant d'abord une zone de préchauffage, provoquant l'évaporation de l'eau libre et la déshydratation (vers 200°C). Elle traverse ensuite une zone de calcination où elle est décarbonatée à partir de 900 °C selon l'équation R.1.



La zone de cuisson proprement dite, où se forment les silicates et aluminates de calcium provenant de la combinaison d'une partie de la chaux vive avec les éléments siliceux

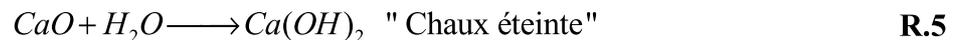
et alumineux, se situe à une température variant entre 1000 °C et 1300 °C selon la qualité de chaux recherchée (voir réactions R.2, R.3 et R.4).



Remarque : Plus les caractéristiques, de la chaux hydraulique, doivent être élevées et plus il est nécessaire de cuire à plus haute température

II.3.3. Extinction

A l'issue de la calcination, les chaux sont hydratées pour éteindre la chaux vive non combinée c.-à-d. la chaux non combinée (voir réaction R.5), tout en respectant les silicates et aluminates² qui lui donnent son caractère hydraulique.



Cette réaction s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur et provoque la pulvérisation du produit. Les chaux éteintes sont généralement broyées.

Les silicates et les aluminates de calcium leur donnent la propriété de faire prise et même de durcir sous l'eau. C'est à cette propriété qu'elles doivent leur désignation « chaux hydrauliques naturelles ». Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement.

La réaction chimique qui permet de passer de la chaux vive à la chaux éteinte nécessite une quantité d'eau égale à 1/3 du poids de chaux vive.

L'action d'extinction se fait suivant deux techniques :

² Au moment d'extinction, les silicates et aluminates fixent d'abord de l'eau, puis la perdent au profit de la chaux restant à éteindre.

Par immersion : La chaux est mise dans des paniers à claire-voie qu'on plonge dans l'eau pendant quelques secondes. Ce procédé est identique à celui utilisé pour l'extinction de la chaux grasse ;

Par aspersion : La chaux est étalée en couches de 15 à 20 cm. On l'arrose légèrement puis on la retourne et on l'arrose à nouveau de manière à ce que toute la masse soit humectée. La quantité d'eau employée se détermine expérimentalement (15 à 20% du poids de chaux). On relève ensuite la chaux en tas et on la laisse ainsi jusqu'à l'extinction complète (environ deux semaines); la fin de l'opération étant marquée par la transformation du produit en poudre.

Remarque :

Dans certains cas d'extinction difficile, on utilise un extincteur rotatif en tôle qui reçoit intérieurement la quantité nécessaire à l'opération. Après extinction, la chaux est stockée en silo où s'achève l'hydratation des parties les plus cuites.

II.3.4. Broyage et obtention du produit final

La chaux éteinte est passée par un grillage à mailles carrées de 10 cm de côté et subit enfin un tamisage dans les « blutoirs ». Ces derniers sont des tambours longs à section polygonale dont les faces sont garnies de toiles métalliques. L'axe du tambour est légèrement incliné vers le bas et tourne à la vitesse de 60 à 80 tr/min.

La chaux est introduite à la partie supérieure de l'appareil et descend lentement. Les éléments qui traversent les mailles des toiles métalliques sont recueillis et constituent la chaux légère. Les morceaux qui ne peuvent passer à travers les ouvertures des grilles sont recueillis et soumis à un silotage prolongé (50 à 60 jours) puis broyés et blutés à nouveau.

Le produit qui passe alors à travers les mailles de la toile constitue la chaux lourde. Souvent on mélange cette chaux lourde à la chaux légère pour obtenir une chaux éminemment

hydraulique. Enfin, le résidu de ce dernier blutage constitue les grappiers³. Ces grappiers sont utilisés pour la fabrication de ciments à prise lente par broyage.

II.4. TYPES DE CHAUX HYDRAULIQUES

II.4.1. Classification selon l'origine

Selon la roche ou le constituant d'origine et le traitement subi, on obtient les différentes chaux consignées dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Classification de chaux selon son origine.

Roche ou constituant d'origine	Calcination au dessus de 900 °C	Extinction par hydratation	Après tamisage et broyage des produits commerciaux
Calcaire argileux	Chaux vive + aluminates + silicates	Chaux éteinte + aluminates + silicates	Chaux Hydrauliques Naturelles NHL ⁴
Calcaire argileux + des matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques	Chaux vive + aluminates + silicates	Chaux éteinte + aluminates + silicates	Chaux Hydraulique Naturelle avec matériaux ajoutés NHL-Z ⁵
Calcaire argileux + constituants hydrauliques + de chaux calcique	Chaux vive + aluminates + silicates	Chaux éteinte + aluminates + silicates	Chaux Hydraulique HL ⁶

II.4.2. Classification selon l'indice d'hydraulicité « i »

Comme l'avait proposé Vicat, les chaux peuvent être classées selon leurs indice d'hydraulicité « i » qui est donné par le rapport des éléments les plus acides aux éléments les plus basiques (voir l'équation R.6).

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad \text{R.6}$$

Suivant les valeurs de « i », les chaux sont plus ou moins hydrauliques (tableau II.2).

Tableau II.2. Classification de chaux selon l'indice d'hydraulicité « i ».

Type de chaux	Pourcentage de l'argile (%)	Indice d'hydraulicité « i » et temps de prise
Faiblement hydraulique	5 à 8	0.10 à 0.16 (2 à 4 semaines)
Moyennement hydraulique	8 à 15	0.16 à 0.30 (10 à 15 jours)
Hydraulique	15 à 20	0.30 à 0.40 (2 à 4 jours)
Eminemment hydraulique	20 à 30	0.40 à 0.50 (prise en 2 jours)

³ Fragment de chaux qui ne se pulvérise pas entièrement après le passage dans le four à chaux.

⁴ **NHL** : Natural Hydraulic Lime

⁵ Certains produits spéciaux, qui peuvent contenir des matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques adaptés rajoutés, jusqu'à 20 % en masse, sont désignés de plus par la lettre « Z »

⁶ Chaux principalement constituées d'hydroxydes de calcium, de silicates de calcium et d'aluminates de calcium, produites par mélange des constituants appropriés. Elles ont la propriété de faire prise et de durcir en présence d'eau. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement. Dans certains pays, on l'appelle chaux hydraulique artificielle.

II.5. PROPRIETES DES CHAUX HYDRAULIQUES

II.5.1. Exigences portant sur la résistance mécanique normalisée des chaux hydrauliques

Les chaux hydrauliques naturelles (NHL) et les chaux hydrauliques (HL) sont classées en fonction de leur résistance à 28 jours exprimée en N/mm^2 ou MPa ($1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$). Il existe 3 classes de résistance (NA 5011 et EN 459-1:2002) désignées par la valeur minimale : 2 ; 3,5 et 5. A chaque classe correspond une plage de variation entre cette valeur minimale et une valeur maximale, comme indiqué au tableau II.3.

Tableau II.3. Résistance à la compression des chaux hydrauliques et des chaux hydrauliques naturelles.

Type de chaux de construction	Résistance à la compression en (MPa)		Pourcentage de la silice (%)
	7 jours	28 jours	
HL 2 et NHL 2	-	≥ 2 à ≤ 7	8%
HL 3.5 et NHL 3.5	-	$\geq 3,5$ à ≤ 10	10%
HL 5 et NHL 5	≥ 2	≥ 5 à $\leq 15^7$	12%

II.5.2. Exigences physiques et chimiques

La norme NA 5011 (EN 459-2:2002) fixe des valeurs inférieures ou supérieures pour un certain nombre de caractéristiques physiques et chimiques (Voir tableau II.4), à savoir : la finesse de mouture, la surface spécifique de Blaine SSB, la stabilité, la teneur en SO_3 , la masse volumique, la teneur en air CO_2 , l'eau libre, la valeur de pénétration et le pourcentage de la chaux libre.

⁷ Si HL 5 et NHL 5 ont une masse volumique apparente inférieure à $0,90 \text{ kg/dm}^3$, la résistance peut aller jusqu'à 20 MPa

Tableau II.4. Exigences physiques et chimiques pour la chaux hydraulique et la chaux hydraulique naturelle.

Type de chaux de construction	Finesse selon EN 459-2:2001 (% refus en masse)		Surface Spécifique Blaine en (cm ² /g)	Stabilité (Expansion) EN 459-2:2001	Teneur en SO ₃ (%)
	90 µm	200 µm			
HL 2 HL 3.5 HL 5 NHL 2 NHL 3.5 NHL 5	≤ 15%	≤ 5%	De 8000 cm ² /g à 10000 cm ² /g	L'expansion doit être inférieure ou égale à 2 mm.	≥ 2.5 et ≤ 3.5
Type de chaux de construction	Masse volumique (kg/dm ³)	Teneur en air (CO ₂)	Eau libre (%)	Valeur de pénétration en (mm)	Chaux libre (%)
HL 2	0,4 à 0,8	≤ 23%	≤ 2.5	≥ 10 et ≤ 50	≥ 8
HL 3.5	0,5 à 0,9				≥ 6
HL 5	0,6 à 1,0				≥ 3
NHL 2	0,4 à 0,8				≥ 15
NHL 3.5	0,5 à 0,9				≥ 9
NHL 5	0,6 à 1,0				≥ 3

II.5.3. Temps de début et de fin de prise

Les temps de début et de fin de prise sont mesurés à l'aide de l'appareil de Vicat suivant la norme NA 230 (EN 459-2:2001). L'aiguille est enfoncée dans un moule tronconique de 4 cm de haut contenant 80 ml de pâte. On dit qu'il y a début de prise lorsque l'aiguille n'est plus capable de transpercer la totalité de la pâte, mais s'arrête à 4 ± 1 mm du fond du moule. Le temps de début de prise doit satisfaire aux exigences du tableau II.5.

Tableau II.5. Temps de début et de fin de prise.

Classe de résistance	Temps de début de prise	Temps de fin de prise
HL 2	> 60 minutes	≤ 16 heures
HL 3.5		
HL 5		
NHL 2		
NHL 3.5		
NHL 5		

II.5.4. Exigences de conditionnement, emballage et marquage.

L'emballage, le marquage et le conditionnement des chaux doivent répondre aux exigences définies dans la norme NA 5011 (EN 459-1:2002). La masse nette de la chaux contenue dans le sac ne doit pas différer de plus ou moins 1% de la masse indiquée sur le sac. Exemple sac de 20 kg : la masse nette doit être égale à $20 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$.

Les chaux de construction doivent être identifiées par leur type spécifié dans les tableaux II.1 et II.3. Voir exemples ci-dessous).

- **Exemple 1** : La chaux hydraulique 5 est identifiée par : EN 459-1 HL 5 ;
- **Exemple 2** : La chaux hydraulique naturelle 3,5 contenant des pouzzolanes ajoutées, est identifiée par : EN 459-1 NHL 3,5-Z ;
- **Exemple 3** : La chaux hydraulique naturelle 2 est identifiée par : EN 459-1 NHL 2.

Il convient aussi d'ajouter les informations suivantes (voir figure II.8) :

Société	Nom du fabricant
Adresse	Adresse du fabricant
Usine	Identification de l'usine dans laquelle la chaux de construction a été produite
Année 01 (ou date)	Deux derniers chiffres de l'année au cours de laquelle le marquage a été apposé
EN 459-1	Numéro de la norme
NHL 2	Exemple de désignation : par exemple NHL 2

Figure II.8. Marquage et étiquetage de chaux.

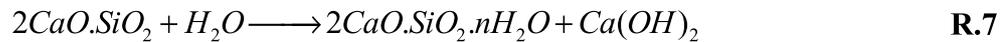
Il convient que le marquage soit effectué soit lorsque la chaux de construction est conditionnée en sacs soit lorsqu'elle est distribuée.

Pour la chaux de construction en vrac, il convient que le marquage de conformité et les informations supplémentaires, tel que spécifié ci-dessus pour la chaux de construction conditionnée en sacs, soient inclus dans la documentation d'accompagnement, sous une forme pratique appropriée.

II.5.5. Hydratation des chaux hydrauliques

C'est au contact de l'eau (40% à 50%) que les silicates et aluminates calciques forment des hydrates insolubles dans l'eau (prise hydraulique : 20% à 80%). Les proportions

d'alumines et de fer sont très faibles ($W_{\text{fer}} < 0,1$ ou $0,2\%$). Le phénomène de prise hydraulique est dû à la réaction R.7 :



La teneur en eau fixée « n » varie, entre 1 et 3.

Par la suite, au contact de l'air humide, la chaux et les hydrates ainsi formés vont se carbonater (avec le CO_2 de l'air) pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine (prise aérienne : 70 à 80%). Cette réaction prend plusieurs mois : c'est la partie aérienne de la prise.

Le caractère hydraulique des chaux se traduit également par leur prise ou leur durcissement plus ou moins rapide sous l'eau.

II.6. DOMAINE D'UTILISATION DES CHAUX HYDRAULIQUES

Les mortiers de chaux hydrauliques trouvent leurs applications essentiellement dans le bâtiment, où leurs qualités sont appréciées pour les enduits, les menus ouvrages en maçonnerie, la pose de carrelages anciens, le jointoiment et la consolidation de murs, les badigeons et d'une façon générale, pour les travaux de restauration.

II.6.1. La chaux dans les techniques routières

- **Assèchement** : La chaux vive est épanchée sur les sols humides afin de diminuer leur teneur en eau et faciliter ainsi le travail des engins de terrassement. En effet, la réaction d'extinction de la chaux avec l'eau contenue dans le sol favorise la diminution de cette dernière. La chaux vive fixe environ un tiers de son poids en eau. La chaux coagule l'argile. Cette propriété revient à neutraliser les sols lourds et argileux par le phénomène de floculation, correspondant au passage d'une structure plastique à une forme grumeleuse stable. La chaux rend alors le travail du sol plus facile, accroît sa perméabilité et favorise son activité.

- **Stabilisation des sols** : Les sols fins argileux, limoneux, sablonneux peuvent être malaxés avec les chaux hydrauliques naturelles (3 à 5 % en poids). Ceci a pour but d'abaisser leur teneur en eau, de faciliter leur compactage et d'améliorer fortement leurs propriétés mécaniques de résistance.

II.6.2. La chaux dans le bâtiment

- **Enduits et décoration** : Hormis les bétons, la chaux accepte tout type de support: Terre, pierre, brique, bois.... etc. Elle a la particularité d'être perméable à l'air et imperméable à l'eau évitant ainsi la condensation. Les mortiers de chaux sont employés indifféremment en extérieur ou à l'intérieur sont utilisés pour le rejointoiement et les enduits des constructions neuves ou en restauration. Les chaux hydrauliques conviennent bien pour la confection de laits de chaux ou badigeons, qui peuvent être colorés dans la masse. Ces chaux sont suffisamment fines et riches en hydroxyde de calcium pour rester en suspension aqueuse et donner un lait de chaux utilisable au moyen d'un pinceau ou d'un pulvérisateur (voir figure II.10).



Figure II.9. Restauration d'une ancienne construction.



Figure II.10. Utilisation des chaux hydrauliques comme badigeons dans les constructions.

- **Béton cellulaire** : Léger et excellent isolant, le béton cellulaire est fabriqué à partir d'un mélange de chaux vive, de sable, de ciment, de poudre d'alumine et d'eau. La réaction chaux/alumine provoque la formation de minuscules bulles de gaz. Ces bulles, piégées dans la masse, confèrent les propriétés isolantes des blocs de béton.
- **Mortiers de pose et de jointoiment** : Grâce à ses qualités de plasticité et d'adhérence aux supports, la chaux hydraulique naturelle est bien adaptée au hourdage et au jointoiment de blocs, briques et pierres. Elle peut être employée pure ou bâtarde selon la vitesse de durcissement souhaitée.

II.6.3. La chaux dans l'industrie

- **Sidérurgie** : La sidérurgie est un domaine où l'emploi de la chaux intervient très largement. Elle a le pouvoir de réagir à haute température avec les impuretés des métaux et participe ainsi à leur affinage. La chaux est employée :

1. Dans les convertisseurs produisant de l'acier, à partir de la fonte (fer et carbone). La chaux vive forme avec les impuretés (silicium, phosphore, soufre) des scories, plus faciles à isoler et à éliminer. Les procédés actuels demandent 60 à 70 kg par tonne d'acier. La chaux éteinte(en poudre ou en pâte) a plusieurs fonctions : comme lubrifiant pour le tréfilage de l'acier, comme revêtement dans les moules utilisés pour la fusion en lingots de l'acier (évite le collage), mais aussi comme protection temporaire contre la corrosion ;
 2. Dans la préparation du magnésium par précipitation de la magnésie hydratée, à partir d'une solution de chlorure de magnésium ;
 3. Dans la séparation par flottation de différents sels métalliques, tels que le calcium métal, le cuivre, le zinc, le plomb, l'or, l'argent et l'uranium.
- **Traitement des métaux :** La chaux est utilisée pour purifier la bauxite lors de la fabrication de l'aluminium. Elle évite la formation des silicoaluminates, inutilisables, et améliore ainsi les rendements de production. Elle est également employée pour la production de Zinc, Cuivre, Plomb, Or, Argent, Uranium due à son aptitude à séparer les sels métalliques et autres impuretés du minerai.
 - **Industrie papetière :** Le bois est traité à la soude afin d'en extraire la cellulose, qui deviendra la pâte à papier. En fin de traitement, la soude est devenue du carbonate de sodium. La chaux vive intervient alors comme régénérant de la soude. La chaux est également employée sous forme de carbonate de calcium précipité, très pur, permettant ainsi d'obtenir des papiers de grande qualité.
 - **Industrie sucrière :** La chaux y joue un rôle important, elle permet de séparer les impuretés du sucre contenu dans le jus extrait de la betterave et de la canne. la chaux intervient à deux moments précis du raffinage : lors de la coagulation des impuretés,

puis lors de l'action du gaz carbonique qui va la faire précipiter, pour former un carbonate. Elle joue alors le rôle d'adjuvant de filtration (2,5 à 5 kg de chaux sont nécessaires pour produire une tonne de sucre de canne)

- **Industrie pharmaceutique** : Par exemple dans les pâtes dentifrices pour son apport en calcium mais également pour ses propriétés désinfectantes et cicatrisantes. Elle entre également dans la composition de nombreux médicaments.
- **Industrie des tanneries** : Les tanneries se servent de la chaux pour préparer les peaux au tannage.
- **Industrie alimentaire** : Elle joue également le rôle de solvant pour les déchets d'abattoirs, lors de la fabrication de colles et de gélatines (alimentaires). Aux États-Unis, on l'utilise pour améliorer le stockage des fruits et légumes, la chaux éteinte absorbe le gaz carbonique émis lors du mûrissement des produits et permet ainsi de réguler le rapport oxygène/gaz carbonique. Elle rentre aussi parfois directement dans le procédé alimentaire, on l'utilise sous forme d'eau de chaux pour neutraliser ou réduire l'acidité avant la pasteurisation du beurre. On l'utilise également pour la fabrication des tortillas.
- **Dans l'industrie de la savonnerie** : la chaux intervient dans le procédé de saponification des huiles

II.6.4. La chaux et l'environnement

- **Traitement des eaux** : Dans les eaux de consommation ou de certains processus industriels, la chaux intervient comme agent de précipitation et de floculation. Elle est aussi employée dans le traitement des eaux usées pour floculer les matières organiques, les phosphates issus des détergents, pour précipiter les sels de métaux lourds des eaux industrielles et comme bactéricide par élévation du pH. Enfin elle est utilisée pour déshydrater, stériliser et stabiliser les boues issues du traitement des eaux.

- **Traitement des fumées :** Les combustibles, tels que le Fuel lourd ou le charbon contiennent naturellement du soufre en quantité plus ou moins importante suivant leur provenance. Les déchets ménagers et aussi certains déchets industriels dégagent également du soufre ou du chlore au court de leur incinération. Ces émissions sont à l'origine des pluies acides.

Il existe différents procédés pour neutraliser ces émissions de gaz acides :

- Lit fluidisé, ou la chaux est ajoutée au produit avant incinération.
- Voie sèche, ou les gaz acides sont piégés par la chaux dans un réacteur.
- Voie semi-sèche, selon le même principe, mais avec un lait de chaux.
- Voie humide, les gaz passent à travers un rideau d'eau. Cette dernière est ensuite neutralisée à la chaux.

II.6.5. La chaux en agriculture

Les plantes ont leur meilleur développement sur un sol dont le pH est compris entre 6.5 et 7.5. La chaux est utilisée depuis des siècles sur les sols acides, naturellement argileux ou sableux, ou encore devenus acides du fait de l'emploi excessif d'engrais chimiques ou organiques. La chaux est une base. Elle sert donc à lutter contre l'acidité des sols (besoin en redressement), laquelle a pour conséquence de perturber l'alimentation des plantes, en détruisant l'équilibre de restitution des éléments nutritifs (blocage de certains, prolifération d'autres qui, en grandes quantités, deviennent toxiques). La chaux aide le sol à rétablir son équilibre et à retrouver sa fertilité. Elle agit également directement sur la végétation. Absorbée et fixée par les plantes, elle intervient dans le processus de germination, la circulation de l'amidon et la saturation des acides organiques.

Le tableau II.6 consigne la quantité de chaux nécessaire pour élever d'une unité le pH d'un sol en tonne de chaux vive (CaO) par hectare et par an

Tableau II.6. Quantité de chaux nécessaire pour élever d'une unité le pH1 d'un sol en tonne de chaux vive (CaO) par hectare et par an.

Type de sol	Quantité en tonne/hectare.an
Terre sableuse	De 1.5 à 2
Limons	De 2 à 3
Terres fortes humidifiées	De 3 à 4

Remarque à propos de l'application de la chaux hydraulique :

SUPPORTS ADMISSIBLES

- Maçonneries anciennes ;
- Maçonneries de parpaings ou de briques (DTU 20.1) montées à joints traditionnels ou minces ;
- Bétons banchés (DTU 23.1) ;
- Sous enduits ciments et bâtards (DTU 26.1).

SUPPORTS INTERDITS

- Tous supports à base de Gypse (Plâtre) ;
- Peintures, R.P.E⁸ ;
- Bois en direct ;
- Surface horizontale ou inclinée non protégée.

REVÊTEMENTS ASSOCIÉS

- Badigeon de chaux, lait de chaux réalisées avec la chaux aérienne CL 90 ;
- Toutes peintures intérieures et extérieures après tests et compatibilité ;
- Peintures garnissantes et décoratives de type D2 et D3... etc.

CONDITIONS D'APPLICATION

- Températures comprises entre 5°C et 35°C ;
- Ne pas appliquer sur supports gelés ou en cours de dégel, chaud ou en plein soleil, trempés ou sous pluie battante et par vent fort.

⁸ L'enduit RPE est le sigle de « Revêtement Plastique Epais ». Comme son nom l'indique, c'est un enduit qu'il faut placer à la fin d'un ravalement. C'est ce que l'on appelle également crépi de façade. Il se présente sous la forme d'une pâte prête à l'emploi et il suffit de l'appliquer. Le liant utilisé pour un enduit RPE est notamment de la résine acrylique, vinylique ou siloxane en phase aqueuse, donc des charges minérales inertes. L'enduit RPE est constitué de granulats fins et vous pouvez le choisir en fonction des finitions que vous souhaitez avoir. L'enduit RPE est un bon moyen de finaliser complètement l'imperméabilité de votre mur. Conçu en plastique, il empêche la dégradation de vos murs suite à des fuites d'eau ou autres. Il peut d'ailleurs être appliqué sur une façade neuve ou sur une façade rénovée. Mais le principal atout d'un enduit RPE, c'est notamment l'esthétique. Il sert, en effet, à décorer votre mur et de nombreux motifs sont à votre disposition. Il suffit de bien choisir celui qui vous convient. De plus, vous pouvez aussi opter pour des motifs sur-mesure chez votre artisan.

II.7. LISTE DES REFERENCES ET DES SITES INTERNET A CONSULTER

NA 5011 (EN 459-1 :2002) Chaux de construction - Définitions, spécifications et critères de conformité

NA 5012 (EN 459-2 :2002) Chaux de construction - Méthodes d'essai

NA 5013 (EN 459-3 :2002) Chaux de construction - Evaluation de la conformité

EN 196-3 (PrNA 230), Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.

Festa Jean & Dreux Georges (2007) Nouveau guide du béton et ses constituons, 8 ème édition. Eyrolles, Paris.

GHOMARI Fouad (2003) Cours de « Science des matériaux de construction », Université Aboubekr Belkaid- Tlemcen

Techniques et pratique de la chaux. Ecole d'Avignon, Groupe Eyrolles, 2^{ème} édition 2003, ISBN 2-212-11265-3

Olivier Labesse (2005) Précis d'utilisation de Chaux Naturelle Hydraulique NHL « Ou comment utiliser la nature pour nous protéger de ses caprices ». Nantes, France

La Chaux, site internet

- « <http://www.infociments.fr> »
- « www.la-chaux.net »
- « www.ateliers-du-paysage.com »

CHAPITRE III.
CHAUX AERIENNE
FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

CHAPITRE III.

CHAUX AERIENNE

FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

III.1. INTRODUCTION

La chaux aérienne est un des premiers liants découverts par l'homme; il y a des sites archéologiques avec plus de 10.000 ans d'antiquité. La chaux aérienne sert depuis l'antiquité, jusqu'au début du 20^{ème} siècle, à réaliser des mortiers pour la construction, des enduits et des badigeons sur les murs.

L'utilisation de la chaux est pourtant restée quasiment incontournable dans le bâti jusqu'à la découverte de la chaux hydraulique naturelle et du ciment Portland à la fin du 19^{ème} siècle. Ils ont rapidement remplacé la chaux aérienne dans toutes les constructions modernes en raison d'une rigidité plus importante.

La chaux connaît au début du 21^{ème} siècle un regain d'intérêt, dû notamment à une certaine incompatibilité constatée entre le ciment (rigide et étanche) et le bâti ancien (d'avant la construction au ciment) plutôt souple et poreux. La redécouverte de l'efficacité de certaines techniques anciennes, associée à l'évolution technique des matériaux vers plus de perméance¹ n'est peut être pas étrangère non plus à ce phénomène.

III.2. QU'EST-CE QUE LA CHAUX AERIENNE ?

Les chaux aériennes sont des chaux constituées principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium qui durcissent lentement à l'air sous l'effet du dioxyde de carbone présent dans l'air. En général, elles ne durcissent pas sous l'eau, car elles n'ont pas de propriétés hydrauliques.

¹ La perméance est égale à la quantité de vapeur d'eau qui traverse un mètre carré en une heure avec un gradient de pression de 1 mm d'Hg.

La chaux aérienne est obtenue par cuisson de roches calcaires purs² (CaCO_3) ou dolomitiques (association de CaCO_3 et MgCO_3) suivie d'une extinction à l'eau, durcissant lentement à l'air, ce qui lui a valu son appellation couramment employée de chaux aérienne.

III.3. FABRICATION DE LA CHAUX AERIENNE

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..

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 IV.1 qui va être détaillé par la suite. Il s'applique, aussi bien aux produits calciques, qu'aux produits magnésiens ou dolomitiques.

III.3.1. Phase amont, extraction des matières premières

Le calcaire est extrait des carrières. Traditionnellement, l'extraction se faisait par des moyens manuels (pics, pioches,...). Actuellement, L'extraction de la matière première est réalisée par tir à l'explosif afin d'obtenir des blocs qui seront par la suite concassés.

Le calcaire extrait doit être très pur, de l'ordre de 95 à 99.5 % de carbonate de calcium. En effet de la matière première dépend entièrement la qualité et la pureté du produit final.

² La chaux aérienne provient d'un calcaire bas d'impuretés (< 5% matériaux argileux).

Les blocs ainsi obtenus sont charriés par des pelles mécaniques et déposés dans des camions chargeurs. Ils sont acheminés vers les ateliers de préparation, où débute leur transformation (concassage, criblage et calibrage).

D'autres gisements comme les matériaux calcaires maritimes (coquillages, coraux) ont été exploités par le passé, et le sont parfois encore de nos jours³.

III.3.2. Préparation de la pierre extraite

Une fois cette matière première est extraite, il est nécessaire de la débarrasser de ses impuretés, c'est à dire d'éliminer le mieux possible les fines particules chargées d'impuretés. Suivant la géologie des carrières, il est parfois même nécessaire de laver les pierres.

Suivant le type de four utilisé, les pierres doivent être concassées puis calibrées en différentes granulométries : de façon générale, de 30 à 120 mm pour les fours droits et de 5 à 40 mm pour les fours rotatifs.

Le challenge du chauxfournier⁴ consiste à :

- Optimiser au mieux le rendement de sa carrière ce qui se réalise par le choix du mode d'extraction, de concassage, de calibrage et de fonctionnement de ses fours ;
- Chercher des carrières permettant d'obtenir les carbonates les plus purs.

³ C'est toujours le cas en Inde, et jusqu'à récemment dans l'île de la Réunion.

⁴ Chauxfournier désigne aussi l'exploitant industriel d'une entreprise de production de chaux.

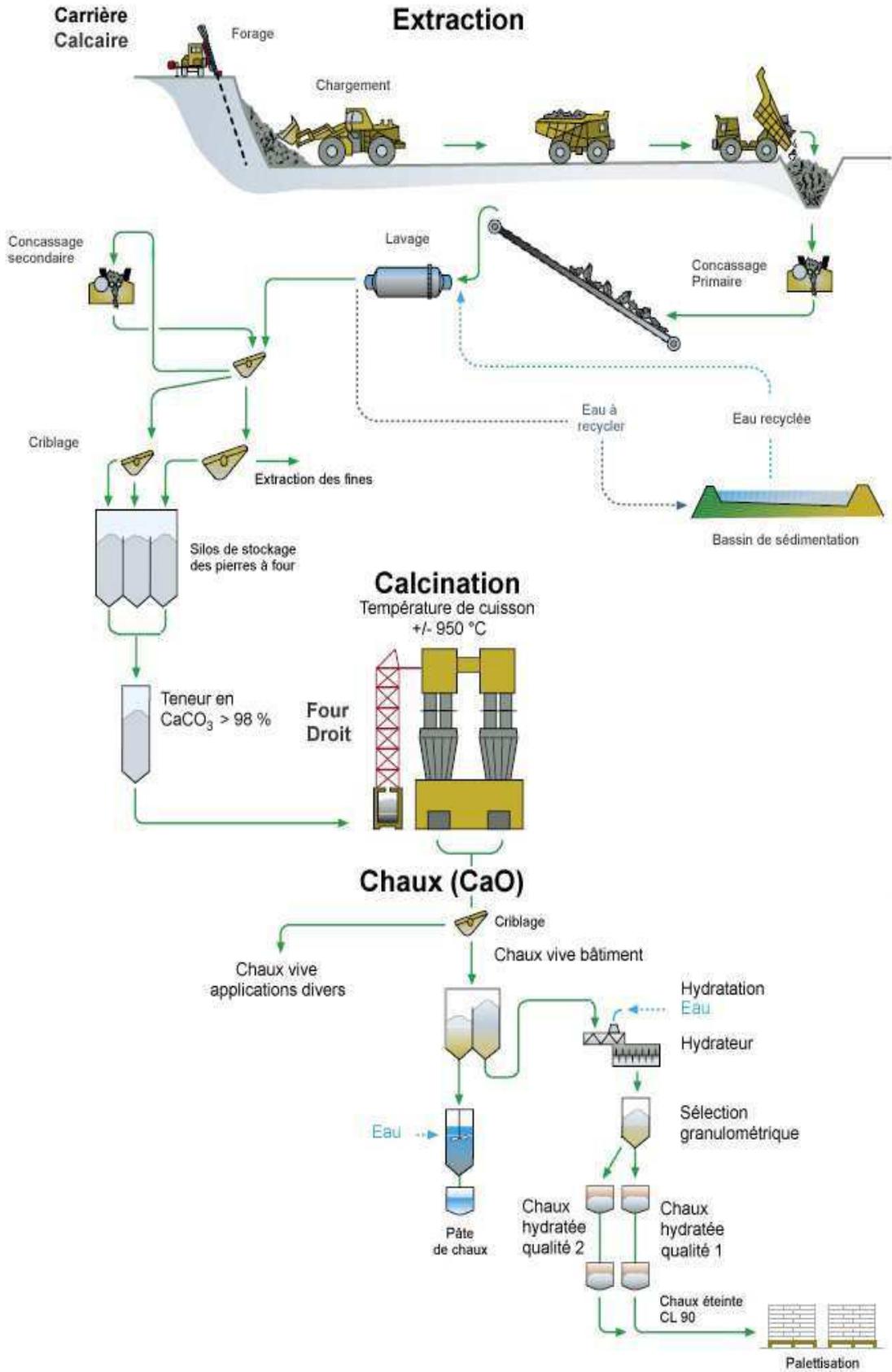


Figure III.1. Processus de fabrication des chaux aériennes.

III.3.3. Calcination « cuisson » de la pierre préparée

Lors de cette étape, la fabrication de la chaux aérienne est relativement semblable à celle de la chaux hydraulique du fait que la matière première ne se trouve pas sous forme de poudre mais de blocs calibrés. Le type de four utilisé est en général, pour des questions d'économie d'énergie, vertical. La consommation énergétique d'un four vertical peut être d'au moins 40 % inférieure à celle d'un four rotatif. Le choix d'un four rotatif peut s'expliquer par un besoin de capacité de production supérieur ou par l'utilisation de pierre plus fine ce qui permet d'améliorer le rendement de la carrière.

La différence entre la fabrication de chaux aérienne et celle de chaux hydraulique se situe au niveau de la température de cuisson. En effet, la cuisson de la chaux aérienne consiste simplement en une décarbonatation et se fait à plus basse température que celle de la chaux hydraulique. La cuisson de cette dernière consiste en une décarbonatation partielle ajoutée d'une réaction chimique permettant la constitution des composés hydrauliques.

D'une façon générale, une chaux aérienne est cuite aux alentours de 900 °C et une chaux hydraulique aux alentours de 1000 °C à 1200 °C, suivant les caractéristiques finales recherchées des produits.

La cuisson s'effectue en général dans des fours verticaux à marche continue (figure III.2), dans lesquels sont introduits dans la partie supérieure, par couches successives, la pierre calcaire et le combustible.

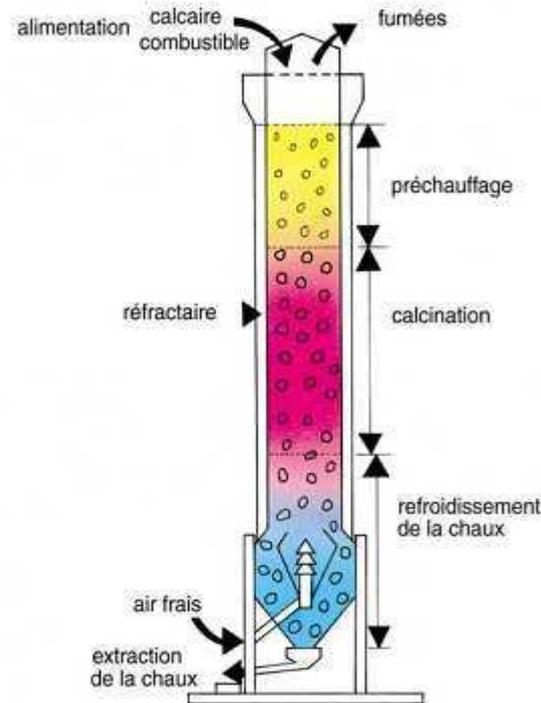
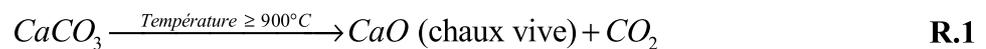


Figure III.2. Vue en coupe d'un four vertical.

La matière première descend lentement, en traversant d'abord une zone de préchauffage. Cette opération permet de l'évaporation de l'eau libre (vers 200°C) contenue dans le calcaire et pour éviter l'éclatement des blocs, puis, elle subit une opération de calcination où elle est décarbonatée à partir de 900 °C selon l'équation R.1. Dans le cas des dolomies, la décarbonatation se fait à une température inférieure (400°C) pour donner de la magnésie (MgO) suivant la réaction R.2.



Les vapeurs d'eau produites sont évacuées avec les fumées et participent à la bonne décarbonatation du calcaire, du fait de la grande affinité de la vapeur d'eau avec le gaz carbonique.

La chaux vive ainsi produite continue sa descente vers une troisième zone de refroidissement, avant d'être extraite. L'arrivée d'air frais au bas du four provoque un courant

d'air qui parcourt le four en sens inverse et intervient dans les différentes étapes de fabrication de la chaux : refroidissement, combustion du combustible.

III.3.3. Extinction

C'est l'opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte (voir R.3); elle s'accompagne d'une augmentation de volume : le « foisonnement ». Elle résulte d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux. Au moment de son utilisation, la chaux doit être entièrement hydratée, sous peine de voir des gonflements destructeurs se manifester dans les ouvrages.



L'extinction est obtenue par adjonction d'eau et peut s'effectuer selon diverses méthodes :

- ***L'extinction spontanée*** est obtenue en soumettant la chaux vive à l'action lente et continue de l'air. L'humidité présente dans l'atmosphère assure le rôle de l'eau d'extinction ;
- ***La méthode par arrosage manuel*** consiste à apporter la juste quantité d'eau nécessaire à l'extinction (10 à 15%). La réaction est exothermique (dégagement de chaleur) et engendre des projections dans le cas de blocs de chaux ;
- ***La méthode traditionnelle par immersion*** comporte le trempage de blocs dans l'eau, puis l'égouttage et enfin le stockage pour laisser se poursuivre l'extinction. Cette opération est exothermique (15500 cal/mol.g; T= 150 °C). L'incorporation de la chaux doit se faire avec précaution, car la réaction peut entraîner des projections et des bouillonnements.

Ces trois premiers procédés fournissent de **la chaux en poudre.**

L'extinction par fusion, dite extinction ordinaire, consiste à mettre la quantité d'eau utile, pour obtenir une bouillie épaisse (chaux en pâte). Cette méthode implique une bonne

maîtrise de la quantité d'eau car il faut éviter de brûler (formation de grumeaux⁵) ou de noyer (mauvaise consistance) la chaux.

Pour s'assurer du bon degré d'extinction de la chaux, il suffit d'enfoncer un bâton dans le bassin :

- Si la chaux qui s'y attache est gluante, l'opération est bonne ;
- Si elle ne s'y attache pas, si elle coule, la chaux est noyée ;
- Si une espèce de fumée ou de poudre tient au bâton, la chaux a probablement été brûlée.

Remarque

La méthode utilisée dans les procédés industriels modernes produit de la chaux éteinte sous forme de poudre. Les chaux dolomitiques sont plus difficiles à éteindre.

III.3.4. Broyage et obtention du produit final

Les granulats de chaux vive sont broyés et passent par un hydrateur (vis sans fin aspergé d'eau). L'eau introduite (7 à 10%) permet l'hydratation de la chaux vive, mais elle aide également à l'évacuation de la chaleur dégagée lors de la réaction ($T = 150\text{ °C}$).

Les particules qui n'ont pas réagi appelés « grappiers⁶ » (impuretés, surcuits, incuits,...) sont éliminées par tamisage. La chaux éteinte pulvérulente est tamisée, conditionnée en sac de 25 kg ou 50 kg ou en vrac.

III.4. TYPES DE CHAUX AERIENNES

III.4.1. Classification selon le pourcentage d'argile

Selon le pourcentage d'argile on distingue ce qui suit (tableau III.1) :

Tableau III.1. Classification de chaux selon le pourcentage d'argile.

Pourcentage de l'argile (%)	Désignation
0 %	Chaux grasse
< 5%	Chaux maigre
> 5%	Chaux hydraulique

⁵ Petite boule formée par un liquide coagulé (lait) ou une substance pulvérulente (farine) mal délayée.

⁶ Fragment de chaux qui ne se pulvérise pas entièrement après le passage dans le four à chaux.

III.4.2. Classification selon l'indice d'hydraulicité « *i* »

Comme l'avait proposé Vicat, les chaux peuvent être classées selon leurs indice d'hydraulicité « *i* » qui est donné par le rapport des éléments les plus acides aux éléments les plus basiques (voir l'équation R.4).

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad \text{R.4}$$

Suivant les valeurs de « *i* », les chaux sont plus ou moins hydrauliques (tableau III.2).

Tableau III.2. Classification de chaux selon l'indice d'hydraulicité « *i* ».

Type de chaux	Indice d'hydraulicité « <i>i</i> »
Chaux grasse	~ 0
Chaux maigre	< 0.10
Chaux hydraulique	> 0.10

III.4.3. Classification selon la teneur en (CaO + MgO)

On distingue plusieurs types de chaux aériennes selon la teneur d'oxyde de calcium et d'oxyde de Magnésium (CaO + MgO), comme indiqué dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Classification de chaux selon la teneur en (CaO + MgO).

Désignation	Notation	Teneur en (CaO + MgO) en %
Chaux calcique 90	CL ⁷ 90	≥ 90
Chaux calcique 80	CL 80	≥ 80
Chaux calcique 70	CL 70	≥ 70
Chaux dolomitique 85	DL ⁸ 85	≥ 85
Chaux dolomitique 80	DL 80	≥ 80

En outre, les chaux aériennes sont classées selon la forme distribuée : chaux vive (Q) ou chaux hydratée (S). Dans le cas particulier de chaux dolomitiques hydratées, le degré d'hydratation est identifié comme suit : S1 : semi-hydratée ; S2 : totalement hydratée.

III.5. PROPRIETES DES CHAUX AERIENNES

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

⁷ CL : Calcium Lime

⁸ DL : Dolomitic Lime

III.5.1. Exigences chimiques

La composition de la chaux de construction, déterminée selon la norme NA 5011 (EN 459-2:2001), doit être conforme aux valeurs du Tableau III.4. Tous les types de chaux cités dans le Tableau III.4 peuvent contenir des adjuvants en faibles quantités pour améliorer la fabrication ou les propriétés de la chaux de construction. Quand ces teneurs dépassent 0,1 %, la quantité réelle et le type doivent être déclarés.

Tableau III.4. Exigences chimiques pour la chaux aérienne.

Désignation	Notation	(CaO + MgO) en %	MgO (%)	CO ₂ (%)
Chaux calcique 90	CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4
Chaux calcique 80	CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7
Chaux calcique 70	CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12
Chaux dolomitique 85	DL 85	≥ 85	≥ 30	≤ 7
Chaux dolomitique 80	DL 80	≥ 80	≥ 5	≤ 7

III.5.2. Exigences physiques

La norme NA 5011 (EN 459-2:2002) fixe des valeurs inférieures ou supérieures pour un certain nombre de caractéristiques physiques (Voir tableau IV.5), à savoir : la finesse de mouture, la surface spécifique de Blaine SSB, la teneur en air, la masse volumique, l'eau libre et la valeur de pénétration.

Tableau III.5. Exigences physiques pour les chaux aériennes.

Type de chaux de construction	Finesse selon EN 459-2:2001 (% refus en masse)		Surface Spécifique Blaine en (cm ² /g)	Rendement selon la norme EN 459-2:2001	Teneur en SO ₃ (%)
	90 µm	200 µm			
CL 90 CL 80 CL 70 DL 85 DL 80	≤ 7%	≤ 2%	De 8000 cm ² /g à 20000 cm ² /g	≥ 2.6 dm ³ /kg.	≤ 2%
Type de chaux de construction	Masse volumique (kg/dm ³)	Teneur en air (CO ₂)	Eau libre (%)	Valeur de pénétration en (mm)	Stabilité (mm) selon la norme EN 459-2:2001
CL 90 CL 80 CL 70 DL 85 DL 80	0,3 à 0,6 0,4 à 0,6	≤ 12%	≤ 2	≥ 10 et ≤ 50	≤ 2 mm Non applicable

Remarque :

Le rendement « R » est le volume de chaux en pâte pour 1 kg de chaux vive.

III.5.3. Exigences de conditionnement, emballage et marquage.

L'emballage, le marquage et le conditionnement des chaux doivent répondre aux exigences définies dans la norme NA 5011 (EN 459-1:2002). La masse nette de la chaux contenue dans le sac ne doit pas différer de plus ou moins 1% de la masse indiquée sur le sac. Exemple sac de 20 kg : la masse nette doit être égale à $20 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$.

Les chaux de construction doivent être identifiées par leur type spécifié dans le Tableau III.3. De plus, les chaux aériennes doivent aussi être identifiées selon la forme distribuée (chaux vive ou chaux hydratée, voir exemples ci-dessous).

- **Exemple 1** : La chaux calcique 90 sous forme de chaux vive est identifiée par : **EN 459-1 CL 90-Q**
- **Exemple 2** : La chaux calcique 80 sous forme de chaux hydratée (éteinte) est identifiée par : **EN 459-1 CL 80-S**
- **Exemple 3** : La chaux dolomitique 85 sous forme de chaux semi-hydratée est identifiée par : **EN 459-1 DL 85-S1**

Société	Nom ou identification du fabricant
Adresse	Adresse enregistrée du fabricant
Usine	Nom ou identification de l'usine dans laquelle la chaux de construction a été produite
Année 01 (ou date)	Deux derniers chiffres de l'année au cours de laquelle le marquage a été apposé
EN 459-1	Numéro de la norme
CL 90-Q	Exemple de désignation : par exemple, pour une chaux de construction à teneur en CaO + MgO (90), sous forme de chaux vive Q, conformément à l'article 4.2 de l'EN 459-1:2001+AC:2002

Figure III.3. Marquage et étiquetage de chaux.

Il convient que le marquage soit effectué soit lorsque la chaux de construction est conditionnée en sacs soit lorsqu'elle est distribuée.

Pour la chaux de construction en vrac, il convient que le marquage de conformité et les informations supplémentaires, tel que spécifié ci-dessus pour la chaux de construction conditionnée en sacs, soient inclus dans la documentation d'accompagnement, sous une forme pratique appropriée.

III.5.4. Cycle de la Chaux grasse

La chaux éteinte durcit en fixant le gaz carbonique de l'air pour redonner du carbonate de calcium, voir la figure III.4 et la réaction R.5 :

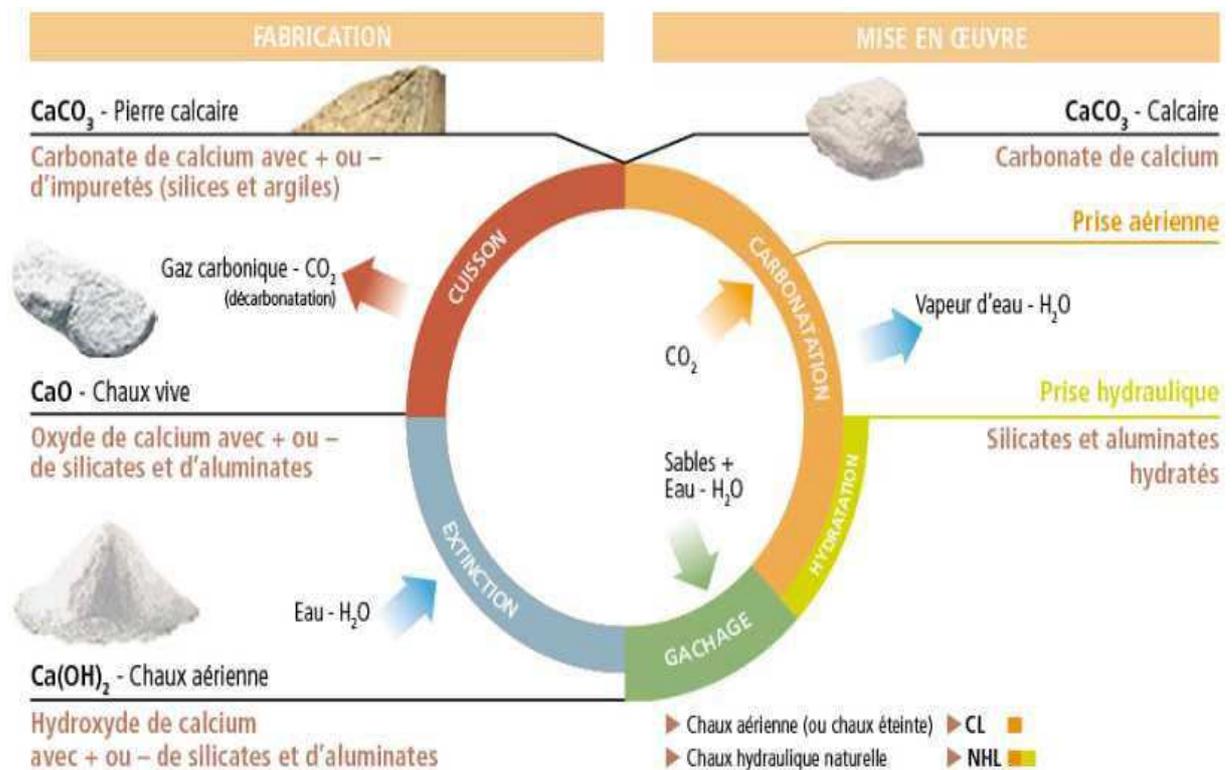


Figure III.4. Cycle de la chaux aérienne.

Selon l'humidité du milieu, cette réaction se produit sur plusieurs mois ou siècles: 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 et se transforme en calcaire. Le résultat de cette opération est à nouveau du calcaire (CaCO₃). La prise aérienne a pour effet de limiter le retrait et développer des résistances sur le long terme

III.5.5. Avantages de la chaux aérienne

- La chaux aérienne présente un indice de clarté proche de 100 (indice qui varie de 0 à 100). Ce qui permet de révéler la coloration de l'agrégat ;
- La chaux aérienne résiste bien au feu. Sa résistance réfractaire varie entre 1800°C à 2000°C ;
- La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10 heures) ;
- La solubilité est faible (1 à 1,5 g/l), ce qui permet de fabriquer des laits de chaux ;
- L'eau de gâchage pour l'obtention d'une pâte de chaux est de 8 à 15% ;
- La chaux grasse est fortement basique, ce qui permet de neutraliser les acides du sol ou les eaux usées (produit bactéricide) ;
- La chaux grasse constitue un bon isolant à la fois phonique et thermique.

III.6. DOMAINE D'EMPLOI DE CHAUX AERIENNES

Dotée de nombreuses propriétés physico-chimiques (basicité, surface spécifique élevée, réactivité, propriétés biocides, ...), la chaux est devenue indispensable dans des domaines aussi multiples que diversifiés (tableau III.6).

Tableau III.6. Domaines d'application de la chaux aérienne.

Domaine	Principales fonctionnalités recherchées
Agriculture	Correction d'acidité et amélioration de la structure des sols, apport d'éléments nutritifs
Agro-alimentaire	Elaboration, transformation, conservation des aliments
Chimie	Neutralisation, agent réactif
Génie civil	Réactivité à l'eau, floculation des argiles, action physico-chimique
Industrie du papier	Recaustification et blanchiment, production de charge blanche opacifiante (carbonate de calcium précipité), neutralisation des boues
Industrie du verre	Agent fondant, stabilisation du verre et amélioration de la résistance
Métaux non ferreux	Flottation des minerais, agent fondant, purification des métaux, correction d'acidité
Réfractaire	Tenue à haute température (chaux magnésienne)
Sidérurgie	Agent fondant, purification de la fonte et de l'acier
Traitement de l'eau potable	Correction de dureté, floculation des matières organiques
Traitement des eaux usées	Purification, précipitation des phosphates, bactéricide
Traitement des gaz	Neutralisation des polluants (chlore, dioxyde de soufre, ...)
Traitement des boues	Déshydratation, hygiénisation, traitement des odeurs
Traitement des déchets	Précipitation de métaux lourds, neutralisation

III.6.1. Utilisation dans le domaine de construction (neuf, rénovation, réhabilitation)

Les chaux aériennes trouvent leurs applications les plus anciennes dans le bâtiment dans la préparation de mortiers et de badigeons.

Enduits :

Les enduits ont principalement deux fonctions: protection et esthétique. Les mortiers de chaux présentent une grande élasticité, ce qui permet d'éviter les fissures de retrait et faïençage⁹.

Les mortiers de chaux, une fois durcis, ont la propriété d'être imperméable à l'eau tout en étant perméable à l'air. On dit que le mur respire. Le durcissement des enduits à base de chaux est lent; par conséquent, il est déconseillé de les utiliser à l'extérieur par période hivernale. Aussi, il faut protéger l'enduit frais contre le soleil et les vents violents.

L'association de la chaux aérienne et du ciment constitue un liant privilégié pour les enduits (mortier bâtard).

Le mortier à la chaux respecte la couleur du sable. Il permet de retrouver l'aspect d'origine des constructions anciennes et des monuments historiques.

La couleur finale de l'enduit réalisé avec de la chaux dépend essentiellement du sable utilisé. On peut, quand de besoin y ajouter des oxydes métalliques en poudre pour accentuer la coloration en s'assurant de le doser parfaitement et de bien le mélanger. Le temps de séchage à observer entre chaque couche peut varier entre un à plusieurs jours selon les conditions climatiques et de mise en œuvre.

La couche de finition peut être talochée, jetée à la truelle, projetée à la machine... Mais en général, il est recommandé de la gratter ou de la broser, quelques heures à quelques jours après application.

⁹ Phénomène de fissuration plus ou moins superficielle de corps rigides

Mortiers de pose et de jointement :

La force de liaison d'un mortier de pose est plus importante que sa résistance à la compression.

Les mortiers de chaux qui développent cette adhérence grâce à leur plasticité, sont ainsi bien adaptés à cet emploi. Ils sont de surcroît peu perméables à l'eau et peu fissurables. Ils ne provoquent pas d'efflorescences.

Les mortiers de chaux constituent de très bons mortiers de jointement de maçonneries en pierres tendres, en béton cellulaire ou en briques. Ils sont également très utilisés dans les travaux de bâtiments anciens.

Badigeons :

Sont obtenus en mettant la chaux éteinte en suspension dans l'eau à raison de 40 litres d'eau par sac de 25 kg. Ils sont réalisés à deux ou trois couches.

Les badigeons sont réalisés sur des supports enduits, lissés, frottés ou décoratifs, pour donner un aspect uniforme aux couleurs et aux matériaux. Ils peuvent avoir un effet curatif de bouchage sur des enduits microfissurés ou faïencés, et rattraper des défauts d'aspect.

Matériaux de construction :

La chaux intervient aussi dans la fabrication de matériaux de construction : Les briques silico-calcaires, sont fabriquées avec un mélange intime de chaux et de sable siliceux, compacté et étuvé. Ce matériau est très utilisé en Allemagne et en Russie. Cinq grandes usines sont installées en Algérie (EPRO Oran, SOPRESICAL Oran, SOPRESICAL - briqueterie d'AIN SEFRA Saïda, SOPRESICAL - briqueterie de BOUSAADA M'Sila, SOPRESICAL - briqueterie de RELIZANE Relizane).

Les Bétons cellulaires, matériaux légers et isolants. Sont fabriqués à base de sable siliceux et de chaux dans lequel on provoque la formation de bulles de gaz, souvent par action de la chaux sur l'aluminium en poudre.

III.7. CHAUX OU CIMENT, QUELLES DIFFERENCES ?

Les tableaux III.7 et III.8 et la figure III.5 regroupent les points de divergences entre la chaux hydraulique, la chaux aérienne et le ciment.

Tableau III.7. Points de divergences entre la chaux hydraulique, la chaux aérienne et le ciment - de la cuisson à la mise en sac.

Matière première	Avant la cuisson	Température de cuisson	Après la cuisson	Sac (kg)
Un calcaire pur	Concassage grossier	1000 °C	Chaux aérienne Elle fuse (réaction à l'eau)	25 kg en poudre
Un calcaire argileux	Concassage grossier	1000 °C	Chaux hydraulique Fusion et broyage	40 kg en poudre
Un calcaire Une argile	Concassage et ajouts	1450 °C	Ciment : aucune fusion à l'eau. Broyage des nodules pour avoir une réaction de prise hydraulique	50 kg en poudre

Tableau III.8. Points de divergences entre la chaux hydraulique, la chaux aérienne et le ciment - en termes de composition chimique.

Matière première	Chaux libre	Bélite C2S	Alite C3S
Chaux aérienne	100 %	0%	0%
Chaux hydraulique	# 30%	Oui	-
Ciment	< 2 %	Oui	Oui
	(1)	(2)	(3)
(1) La chaux libre caractérise les chaux naturelles. Elle est faible dans les ciments. (2) "C2S" désigne en abrégé le silicate bicalcique $2CaO \cdot SiO_2$. C'est un composant commun à la chaux hydraulique et au ciment. (3) "C3S" désigne en abrégé le silicate tricalcique $3CaO \cdot SiO_2$. Le C3S caractérise le ciment. Il apparaît si on fond la pierre. Elle se transforme en nodules.			

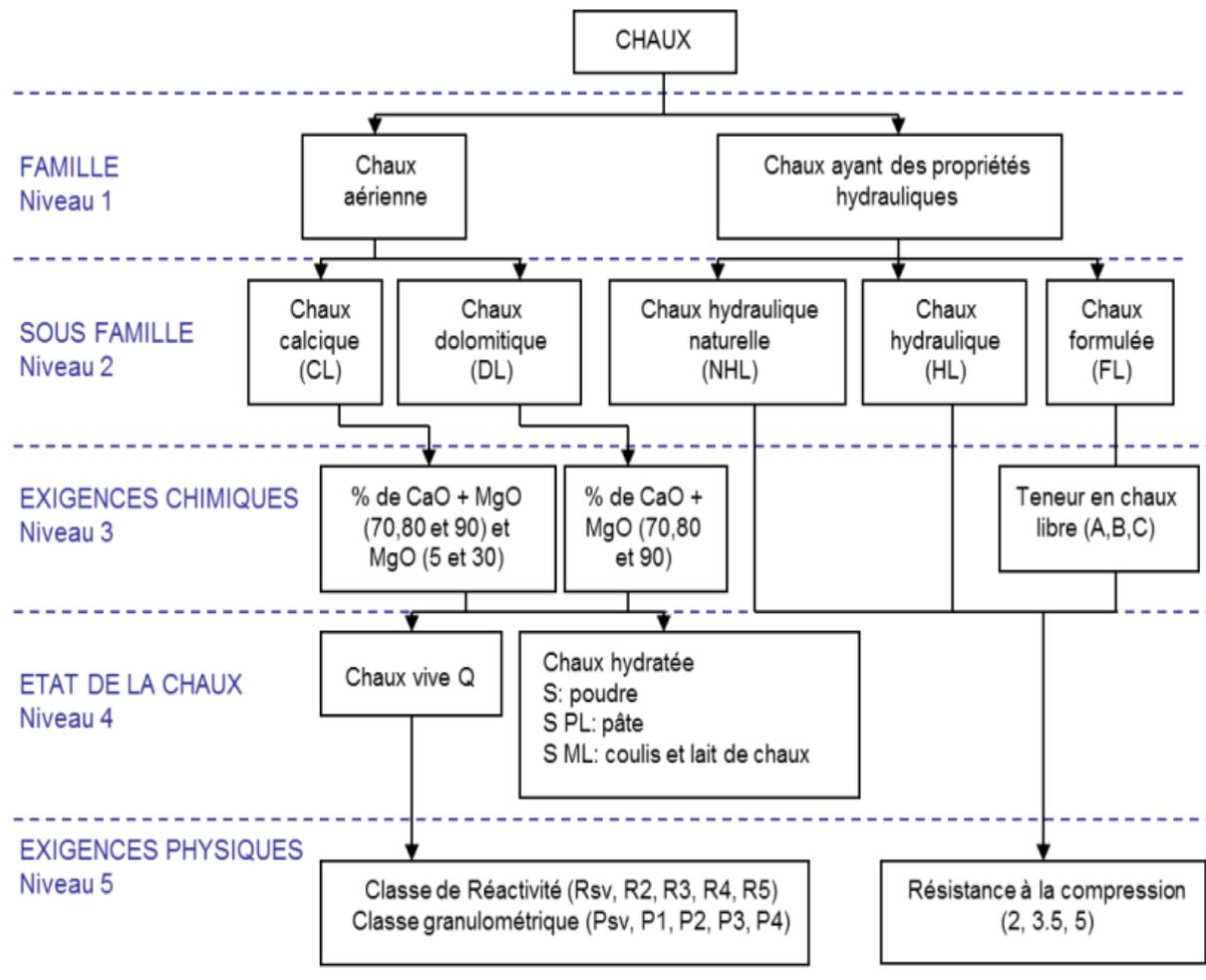


Figure III.5. Classification de la chaux proposée par la norme NA 5011 (NF EN 459-1).

III.8. PRECAUTIONS LORS DE LA MANUTENTION

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 éternuement et toux, et son ingestion en fortes doses peut irriter le système gastro-intestinal.

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 et des lunettes.

Éviter le séchage rapide aux températures ambiantes élevées (faire de l'ombre avec de la toile humide), le temps idéal pour façonner enduits de chaux est le printemps et l'automne (au sens de glace). En extérieures ne pas appliquer juste avant les glaces.

Humecter très bien la maçonnerie avant enduire, ne pas humecter de façon irrégulière (lance). Utiliser outils et techniques adaptés, pour améliorer la carbonisation. Éviter les ambiants agressifs et les eaux ne pas potables.

La chaux aérienne ne tienne pas de propriétés adhérentes, donc son fixation dans le support est mécanique. C'est pourquoi elle a besoin d'espaces vides pour saisir (ne pas appliquer dans un surface lisse, sans piquer)

III.8. LISTE DES REFERENCES ET DES SITES INTERNET A CONSULTER

NA 5011 (EN 459-1 :2002) Chaux de construction - Définitions, spécifications et critères de conformité

NA 5012 (EN 459-2 :2002) Chaux de construction - Méthodes d'essai

NA 5013 (EN 459-3 :2002) Chaux de construction - Evaluation de la conformité

EN 196-3 (PrNA 230), Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.

Festa Jean & Dreux Georges (2007) Nouveau guide du béton et ses constituons, 8 ème édition. Eyrolles, Paris.

Laurence Patourel (2010) « Chaux aérienne et génie civil » Secrétaire général, Union des producteurs de chaux (UP'Chaux)

GHOMARI Fouad (2003) Cours de « Science des matériaux de construction », Université Aboubekr Belkaid- Tlemcen

Gontran HERRIER, Marc PELLETIER, Daniel PUIATTI (2010) « chaux aérienne-contexte, fabrication, domaines applicatifs » Les techniques de l'ingénieur, C923, V1.

Techniques et pratique dev la chaux. Ecole d'Avignon, Groupe Eyrolles, 2^{ème} édition 2003,
ISBN 2-212-11265-3 »

La Chaux, site internet

- « <http://www.infociments.fr> »
- « www.la-chaux.net »
- « www.ateliers-du-paysage.com »

CHAPITRE IV.
LE PLATRE
FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

CHAPITRE IV.

LE PLÂTRE

FABRICATION, PROPRIETES, NORMES ET EMPLOIS

IV.1. INTRODUCTION

Connu depuis l'Antiquité, le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction.

IV.2. DEFINITION

Le plâtre est un liant hydraulique connu depuis l'Antiquité. Il s'obtient par déshydratation d'une roche blanche et tendre à l'aspect de sucre : le gypse – roche naturelle ou sous-produit de certaines industries – qui est un sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. L'eau représente environ 21 % de cette pierre et c'est par sa déshydratation partielle lors d'une cuisson qu'on obtient le plâtre.

IV.3. GYPSES ET ANHYDRITE

Le sulfate de calcium se rencontre dans la nature principalement sous les deux formes suivantes :

- Hydraté avec deux molécules d'eau par molécule de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : c'est le gypse ;
- Anhydre (CaSO_4) : c'est l'anhydrite.

On peut également le rencontrer, dans certaines situations géologiques particulières, hydraté avec une fraction de molécule d'eau par molécule de sulfate de calcium : c'est la

bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), métastable dans les conditions normales et qu'on ne trouve qu'en faible quantité (moins de 1 % en masse) dans le gypse.

Le gypse et l'anhydrite existent également comme sous-produits de certaines industries chimiques ou comme produits de désulfuration des fumées qui peuvent être utilisés, au même titre que les sulfates de calcium naturels, pour la fabrication des plâtres et produits en plâtre

IV.3.1. Gypse naturel

Le gypse appartient à la famille des évaporites¹ qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Plusieurs théories s'affrontent cependant à propos des conditions qui ont permis le dépôt de bancs de gypse très pur d'épaisseur importante (pouvant atteindre 18 à 20 m). Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire (trias et jurassique) ou tertiaire (éocène et oligocène). Le gypse est présent en quantités relativement importantes dans la nature, mais inégalement réparties à la surface du globe.

Le gypse naturel présente les caractéristiques physico-chimiques suivantes :

- Formule chimique : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- Masse volumique : 2310 kg/m^3 ;
- Système cristallin : monoclinique ;
- Solubilité² (en grammes de sulfate de calcium par kilogramme d'eau) :
 - à 3°C : 1,81 ;
 - à 20°C : 2,04 ;
 - à 38°C : 2,10 (solubilité maximale) ;
 - à 100°C : 1,69 ;

¹ Dépôt riche en chlorures (sel gemme, sylvine, carnallite, etc.) et sulfates (gypse, anhydrite) alcalins, qui précipitent, par sursaturation due à l'évaporation, dans les lagunes et les bassins au bilan hydrologique très déficitaire.

² Nota : La solubilité du gypse est sensiblement plus forte dans l'eau salée (eau de mer par exemple).

- Dureté (échelle de Mohs) : 1,5 à 2 suivant l'orientation de la face cristalline.

IV.3.2. Anhydrite

L'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les formations gypseuses et salifères, ou dans certains gîtes métallifères.

On considère qu'elle s'est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet d'une pression importante lors de plissements géologiques.

Dans certains pays, l'anhydrite naturelle, exploitée essentiellement, est destinée soit à la fabrication du ciment, soit à la fabrication d'un liant employé pour la confection de murs de sécurité dans les anciennes galeries de mines.

Des liants d'anhydrite naturelle ou chimique sont également fabriqués en Allemagne, en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et en France pour la réalisation de chapes de revêtements de sols.

L'anhydrite chimique est un sous-produit de la fabrication de l'acide fluorhydrique principalement et de l'acide phosphorique accessoirement.

IV.3.3. Gypse de synthèse

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

- La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) par attaque sulfurique du phosphate naturel. Le phosphogypse est un sous-produit de l'industrie des engrais phosphates. L'acide phosphorique nécessaire à leur fabrication est obtenu par attaque du phosphate de calcium naturel par de l'acide sulfurique en excès. On obtient alors un mélange d'acide phosphorique et de sulfate de calcium (phosphogypse) que l'on sépare par filtration. Le résidu de filtration contient le phosphogypse mais aussi de nombreuses impuretés, telles que le fluorure de calcium, des composés phosphates

non décomposés, de la matière organique etc. La synthèse d'une tonne d'acide phosphorique produit cinq tonnes de phosphogypse. Le phosphogypse pose un problème de stockage ou d'évacuation, car son utilisation est très réduite, du moins en France. Parmi les nombreuses possibilités de valorisation, employées dans des pays comme i.e. Japon et l'Allemagne, on trouve naturellement la plâtrerie, mais il est nécessaire dans ce cas de traiter le phosphogypse pour éliminer les impuretés (P_2O_5 , F, Si, Fe, Al, C et produits radioactifs) par filtration, cyclonage, flottation ou neutralisation. Avec les opérations de séchage et calcination, la consommation en énergie est pratiquement le double de celle du plâtre obtenu de façon classique ;

- La fabrication d'autres acides minéraux (acide borique : borogypse, acide fluorhydrique : fluorogypse) ou organiques : organogypses (acide citrique, tartrique, etc.) La fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2) conduit également à une production de gypse appelé titanogypse. Le titanogypse est produit par la neutralisation de l'acide sulfurique nécessaire à la production de dioxyde de titane, utilisé comme pigment. Une tonne de TiO_2 produit ainsi 2,4 tonnes de titanogypse. Celui-ci est fortement coloré par des oxydes. Les autres gypses résiduels sont produits en moindre quantité (60 000 tonnes de borogypse). Les utilisations sont les mêmes que celles du phosphogypse ;
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux en anhydride sulfurique puis sa réaction avec de la chaux, provoquée dans le but d'éliminer le soufre des gaz de combustion des centrales thermiques, produit un gypse appelé désulfogypse (FGD gypsum en anglais, REA Gips en allemand).

Des quantités importantes de phosphogypse et de désulfogypse sont ainsi produites annuellement dans le monde.

Le développement de l'urbanisation de certaines régions et l'importance croissante des préoccupations d'environnement sont autant de contraintes pesant sur l'exploitation du gypse naturel.

Dans les pays d'Europe occidentale, les gisements de gypse seront à terme soit inexploitable (par exemple en Île-de-France où une très faible partie des réserves de gypse existantes pourra être exploitée du fait de contraintes diverses), soit en voie d'épuisement.

C'est une des raisons pour lesquelles l'utilisation de certains gypses de synthèse comme matière première pour la fabrication du plâtre s'avère une solution intéressante.

L'utilisation du phosphogypse dans l'industrie du plâtre a été tentée dans de nombreux pays dans les années 1960-1970 mais a dû être abandonnée progressivement pour des raisons économiques et parfois techniques. En effet, l'élimination nécessaire des impuretés provenant des phosphates naturels, présentes dans le phosphogypse et parfois sous forme syncristallisée, exige des épurations chimiques coûteuses. Par ailleurs, le phosphogypse se présente toujours sous forme humide (17,5 à 25 % d'eau par rapport à la masse du produit sec) et cela implique un traitement thermique plus important que celui du gypse naturel qui ne contient que quelques pourcent en masse d'humidité.

Si l'utilisation du phosphogypse s'est révélée techniquement et économiquement inadaptée, il n'en est pas de même de celle du gypse de désulfuration des fumées de centrales thermiques, le désulfogypse. Toutefois, l'utilisation du désulfogypse présente encore certains inconvénients par rapport à l'utilisation de gypses naturels. En effet, il contient des impuretés qui le rendent, en général, impropre à la fabrication des plâtres pour enduits et surtout des plâtres à mouler. Ces impuretés entraînent aussi parfois une légère coloration du plâtre.

Par ailleurs, la fabrication du lait de chaux nécessaire à la fabrication du désulfogypse demande l'ouverture de carrières de calcaire. Ainsi, la fabrication du désulfogypse passe par l'exploitation de deux types de carrières, au lieu d'une seule dans le cas du gypse naturel.

L'industrie européenne du plâtre (Eurogypsum, association européenne des producteurs de gypse et fabricants de plâtre et produits en plâtre) et les sociétés productrices d'électricité ont défini un cahier des charges fixant les critères de pureté rendant les désulfogypses propres à l'emploi comme matière première (tableau IV.1). Elles ont demandé de les cataloguer comme sous-produits à usage industriel et non comme déchets.

Tableau IV.1. Critères de qualité pour le gypse de désulfuration comme matière première.

Paramètre	Formule chimique ou symbole	Unité	Critère de qualité
Humidité libre	H	% en masse	< 10
Sulfate de calcium dihydraté	CaSO ₄ . 2 H ₂ O	% en masse	> 95
Oxyde de magnésium soluble dans l'eau	MgO	% en masse	< 0,10
Oxyde de sodium	Na ₂ O	% en masse	< 0,06
Chlorure	Cl	% en masse	< 0,10
Dioxyde de soufre	SO ₂	% en masse	< 0,25
pH			5 à 9
Couleur		Ry	Blanc mais d'autres colorations sont admises en fonction de l'utilisation
Odeur			Neutre
Toxicité			Non toxique

D'ores et déjà, une partie importante du plâtre est produit en Europe (Allemagne, Benelux...), aux États-Unis et au Japon à partir de gypse de désulfuration et cette technique est amenée à se développer dans les années à venir.

IV.4. PRODUITS DE DESHYDRATATION DU GYPSE

La fabrication du plâtre repose sur un principe relativement simple : l'élimination totale ou partielle de l'eau de constitution du gypse. Cependant, dans la pratique, cette opération a des implications complexes mettant en jeu des phénomènes de cristallisation difficiles à maîtriser.

Soumis à la chaleur, le gypse conduit à une série de produits partiellement hydratés ou anhydres. Aux environs de 100 °C, on obtient les semi-hydrates α ou β (selon que l'on opère respectivement sous pression de vapeur d'eau ou à l'air libre) suivant la réaction R.IV.1 :



Vers 200 °C, on obtient l'anhydrite III ou anhydrite soluble (instable) qui se réhydrate très rapidement en semi-hydrate au contact de l'eau en phase vapeur :



Vers 220 °C pour le semi-hydrate α , et 350 °C pour le β , l'anhydrite III se transforme en anhydrite II stable (surcuit) :



L'anhydrite II se réhydrate lentement au contact de l'eau liquide. Vers 1230 °C se produit à nouveau une réaction de transformation :



Le tableau IV.2 et la figure IV.1 résument les caractéristiques des différentes phases de déshydratation du gypse.

Tableau IV.2. Critères de qualité pour le gypse de désulfuration comme matière première.

Phase	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$		CaSO_4		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
Appellation	Gypse	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β	Anhydrite III ou anhydrite soluble	Anhydrite II ou anhydrite insoluble	Anhydrite I
Système cristallin	monoclinique	rhomboédrique		hexagonal	orthorhombique	cubique à faces centrées
Teneur en eau (% en masse)	20,92	6,20	6,20	0	0	0
Masse volumique (kg/m^3)	$2,31 \cdot 10^3$	$2,76 \cdot 10^3$	$2,63 \cdot 10^3$	$2,58 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^3$ à $2,97 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^3$ à $3,0 \cdot 10^3$
Masse molaire (g/mol)	172,20	145,15	145,15	136,10	136,10	136,10
Volume molaire (cm^3/mol)	74,50	52,40	55,20	52,80	45,8 à 46,4	

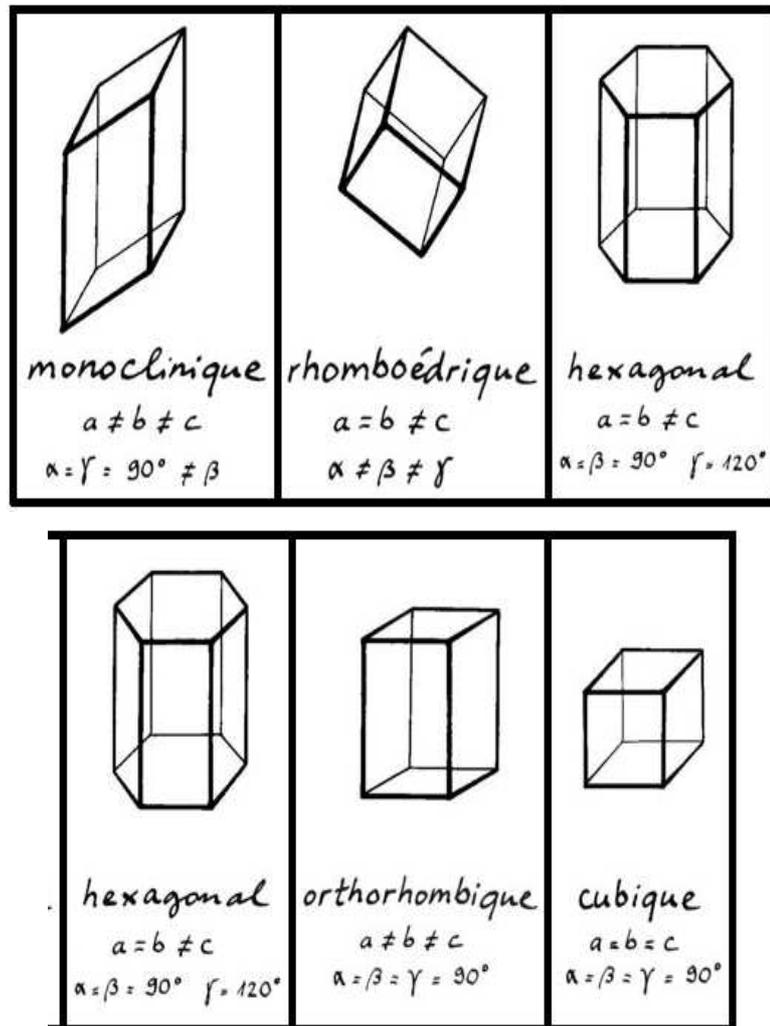


Figure IV.1. Les systèmes cristallins des différentes phases de déshydratation du gypse.

Les différents produits de la déshydratation du gypse ayant une application industrielle dans la fabrication des plâtres sont : le semi-hydrate α , le semi-hydrate β et l'anhydrite II (anhydrite insoluble ou surcuit). En outre, l'anhydrite III (ou soluble) peut être présente en quantités variables.

Le semi-hydrate α est compact et cristallin. Sa solubilité dans l'eau est inférieure à celle du composé β . Il donne avec l'eau des mélanges fluides. Le semi-hydrate β est floconneux et présente des fissures écailleuses. Sa solubilité dans l'eau est supérieure à celle du composé α . Il donne avec l'eau des mélanges plus épais. Il demande donc une plus forte quantité d'eau de gâchage et il a un temps de prise plus long. Le tableau IV.3 donne les propriétés caractéristiques de deux variétés usuelles de semi-hydrate.

Tableau IV.3. Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate.

Propriétés	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Masse volumique (kg/m ³)	2,76 . 10 ³	2,63 . 10 ³
Temps de prise (min)	15 à 20	25 à 35
Expansion (mm/m)	2,8	1,6
Résistance à la traction (1)(MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression (1) (MPa)	56	5,6
Solubilité dans l'eau à 20 °C (en g de CaSO ₄ pour 100 cm ³)	0,63	0,74
(1) à l'état sec		

Toutes les formes intermédiaires existent entre les formes α et β . Les conditions de formation de l'une et l'autre de ces variétés sont les suivantes :

Le semi-hydrate α est produit par déshydratation en atmosphère de vapeur saturée (ou en solution saline au-dessus de 45 °C), c'est-à-dire une atmosphère dans laquelle le semi-hydrate a la possibilité de cristalliser sous forme compacte. C'est le procédé dit de cuisson humide.

Le semi-hydrate β est produit par déshydratation du gypse dans les marmites, fours rotatifs ou installations diverses. C'est le procédé dit de cuisson à sec, dans lequel les circonstances particulières de construction de certains matériels permettent également de produire une certaine proportion de semi-hydrates de formes intermédiaires.

Le semi-hydrate α est le constituant essentiel des plâtres à mouler de très haute qualité (plâtres dentaires en particulier).

Le semi-hydrate β entre dans la composition des plâtres pour enduits en proportions variables avec l'anhydrite soluble III et l'anhydrite insoluble II. Les plâtres à mouler et les plâtres pour préfabrication sont constitués uniquement de semi-hydrate β .

IV.5. FABRICATION DU PLÂTRE

IV.5.1. À partir de gypse naturel

La fabrication du plâtre à partir du gypse naturel comporte trois étapes essentielles :

- L'extraction et la préparation du gypse ;
- La cuisson ;
- L'obtention des produits finis

IV.5.1.1. Extraction et préparation du gypse

L'extraction se pratique en carrières souterraines ou à ciel ouvert.

Extraction en galeries souterraines : Lorsque l'épaisseur des terres de recouvrement est importante (supérieure à 5 fois l'épaisseur de gypse) ou que la couche de gypse se trouve sous un site classé ou protégé, l'extraction se fait en galeries souterraines par la méthode des chambres et piliers abandonnés.

Selon les caractéristiques du gypse et des terrains encaissants, l'exploitant peut être amené à laisser en place une partie importante de la masse de gypse, c'est pourquoi cette technique est de moins en moins pratiquée.

Extraction à ciel ouvert : Ce mode d'exploitation permet l'enlèvement total du gypse mais présente des inconvénients en cas d'intempéries (difficulté d'accès, humidification du gypse).

Préparation du gypse : Avant d'être introduit dans les fours, le gypse subit un concassage et un criblage avec recyclage en fonction du procédé de cuisson. Le gypse peut éventuellement être séché dans des cylindres rotatifs avant d'être cuit. Des stocks sont constitués pour éviter de créer des discontinuités dans l'approvisionnement des fours.

IV.5.1.2. Cuisson

Il existe de nombreux appareillages de cuisson que l'on classe habituellement suivant :

- Le mode de cuisson : atmosphère sèche ou humide ;

- Le type de four : fixe, rotatif ou autre.

En atmosphère sèche

Les gaz de combustion viennent en contact avec le gypse à traiter. Plusieurs types de fours sont utilisés.

Fours fixes : four culé et four droit, analogue au four à chaux, ils sont abandonnés aujourd'hui.

Fours rotatifs : il existe de très nombreux types de fours rotatifs constitués par des cylindres en tôle de 1 à 2,50 m de diamètre et de 10 à 30 m de long. Ils peuvent être ou non revêtus intérieurement, et sur une certaine longueur, de briques réfractaires (c'est le cas pour la fabrication du plâtre surcuit). Le four comporte à l'intérieur un système de pales permettant le brassage et le relevage de la matière. Les gaz peuvent suivre la marche du gypse ou au contraire suivre un chemin inverse. Ces fours permettent la fabrication, suivant les températures, soit du semi-hydrate (entre 110 et 180 °C), soit du plâtre surcuit anhydrite II (au-delà de 500 °C). Les fours modernes sont automatisés et munis de dépoussiéreurs très efficaces (cyclones, filtres à manches, électro-filtres). Ils peuvent traiter de 5 à 30 t de gypse à l'heure suivant leurs caractéristiques et la variété de sulfate à obtenir.

Grilles de cuisson : elles sont utilisées principalement en Allemagne.

En atmosphère humide

Les gaz de combustion viennent en contact avec le gypse à traiter. Plusieurs types de fours sont utilisés.

Fours à cuisson indirecte : il existe également de très nombreux fours à cuisson indirecte, où le combustible ou les gaz ne sont pas en contact direct avec la matière. Parmi ceux-ci, mentionnons :

- Les fours fixes du type four de boulanger (abandonnés) ;

- Les fours autoclaves : chauffés à la vapeur sous pression de 2×10^5 à 12×10^5 Pa. On obtient des plâtres (semi-hydrate α) de très bonne qualité, très durs et utilisés comme plâtre de moulage ;
- Les marmites : le gypse finement broyé est déversé dans une marmite en tôle fixe ou rotative placée au-dessus d'un foyer. La vapeur d'eau est évacuée par une cheminée. La marmite contient un agitateur vertical brassant continuellement le gypse (marmite fixe). La marmite peut également tourner et le gypse est alors homogénéisé par des palettes fixées à l'intérieur de la marmite. La vidange se fait par une trappe, la température peut atteindre 180°C . Le produit obtenu est très homogène, mais cette cuisson ne permet pas une grande production ; le procédé est, de plus, assez onéreux. Les marmites américaines peuvent contenir jusqu'à 15 ou 20 t de gypse finement moulu. La cuisson, à 180°C , dure 2 h environ et le fioul ou le gaz naturel sont souvent utilisés comme combustibles. Les marmites coniques anglaises à cuisson immergée, qui ont d'excellents rendements énergétiques, sont employées pour la production de semi-hydrate de préfabrication pour plaques de plâtre.

Fours rotatifs : le gypse broyé finement est déversé dans un four rotatif fermé et chauffé extérieurement. Les fours les plus utilisés sont les fours Beau ou leurs variantes, véritables marmites allongées, tournantes, à chargement et vidange pratiquement automatiques (diamètre de l'ordre de 2 m, longueur de 8 à 10 m). Après cuisson, la moitié de la matière est déversée grâce à une inversion du sens de rotation du tube muni de releveurs intenses et l'on complète la charge avec du gypse froid à traiter qui peut ainsi se réchauffer rapidement. La température à l'intérieur est de 150 à 180°C et le débit de ces fours de 4 à 8 t/h.

Autres types de fours : il existe encore différents types de fours utilisés en Europe.

Citons par exemple :

- Les fours broyeurs cuiseurs utilisés pour la production du plâtre à préfabrication ;
- Les fours à lit fluidisé ;
- Les vis Holoflites (sorte de vis creuse sans fin parcourue par un fluide chauffant) ;
- Les cuiseurs Flash.

Des recherches menées par les sociétés plâtrières se poursuivent en vue d'utiliser l'énergie solaire pour la cuisson du gypse. En l'état actuel de ces recherches, les rendements restent insuffisants pour une production industrielle. En règle générale, dans les fours couramment utilisés, les consommations de fioul pour la cuisson sont de l'ordre de 25 à 35 kg/t pour le semi-hydrate et de 35 à 50 kg/t pour le surcuit (anhydrite).

IV.5.1.3. Moutures, mélange, distribution

Autrefois, le gypse était cuit en morceaux assez gros qui renfermaient, à la fin du traitement, à la fois du semi-hydrate et de l'anhydrite. Les morceaux étaient ensuite broyés pour obtenir, en une seule opération, le plâtre de construction. Ce dernier s'obtient actuellement par mélange en proportions convenables de semi-hydrate et d'anhydrite.

La finesse des plâtres est un facteur important à considérer. Après la cuisson, la matière est broyée dans des appareils de types assez différents d'une plâtrière à l'autre.

Le plâtre peut ensuite être bluté, c'est-à-dire séparé en classes granulométriques différentes à l'aide de :

- Bluteries rotatives ;
- Prisme hexagonal creux incliné sur lequel est tendue une tôle métallique au travers de laquelle passe le plâtre ;
- Tube cylindrique rotatif revêtu d'une toile métallique (trommel) ;
- Tamis vibrants ;
- Séparateurs à air.

Des ajouts de produits destinés à modifier les caractéristiques de la pâte de plâtre gâché ou les qualités finales de l'enduit sont alors effectués. Le plâtre ainsi parvenu à l'état de poudre d'une granulométrie bien déterminée est entreposé dans des silos. Il peut être expédié directement en vrac dans des camions conteneurs, ou mis en sacs kraft de 40 kg par des machines automatiques rapides (60 t à l'heure) et précises. Le chargement est effectué directement sur camion ou wagon à l'aide de transporteurs munis d'un tapis télescopique. Le plâtre stocké quelques jours parfait son homogénéisation et subit un vieillissement favorable à sa qualité.

IV.5.1.4. Contrôles de fabrication

La marche des appareils de production est contrôlée en permanence et régulée par des cabines de télécommande. Au sortir des fours et avant la mise en silo, les caractéristiques chimiques et physiques du produit sont contrôlées 24 h sur 24h. Ces contrôles portent notamment sur la granulométrie, les temps de prise et les résistances mécaniques en flexion et en compression. Les contrôles effectués varient selon la nature des plâtres fabriqués. Ils sont destinés à garantir, dans tous les cas, le respect des caractéristiques souhaitées par l'utilisateur

IV.5.2. À partir de gypses de synthèse

Le gypse de désulfuration constitue la principale matière première pour la fabrication de plâtres et produits en plâtre. Les phosphogypses sont en voie d'abandon en raison des problèmes techniques et économiques qu'ils posent et les autres variétés de gypse chimique (borogypse, titanogypse...) sont produites en quantité trop faible pour justifier un investissement relativement lourd.

Il existe une douzaine de procédés de désulfuration des gaz et fumées qui conduisent à des gypses utilisables par l'industrie plâtrière. Le gypse de désulfuration se présente sous la forme d'une boue qui doit être séchée puis agglomérée en morceaux de quelques millimètres.

Le désulfogypse peut ensuite être traité comme un gypse naturel : déshydratation, broyage à la finesse désirée, etc.

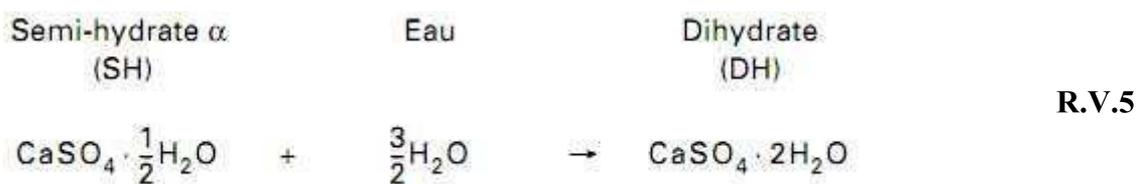
IV.6. PROPRIETES DU PLATRE

IV.6.1. Retardateur

Le plâtre est commercialisé en vrac ou en sacs de papier aux poids standardisés 25 ou 40 kg. Le plâtre de construction courant est un mélange de semi-hydrate et d'anhydrite de classe II (2/3 : 1/3). L'anhydrite est un régulateur de prise; plus le % d'anhydrite est élevé et plus le temps de durcissement est lent. Additionné d'eau, ce mélange fait prise en s'hydratant pour donner un gypse reconstitué au cours d'une réaction fortement exothermique et rapide. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives :

- Reprise de l'eau pour reformer le dihydrate ;
- Cristallisation (qui constitue la prise proprement dite) ;
- Durcissement.

Si on considère le cas du semi-hydrate, la réaction d'hydratation est donnée par la réaction suivante (R.V.6) :



Le début de prise : moment où le plâtre commence à cristalliser (le sillon tracé par une lame de couteau dans une galette de plâtre ne se referme plus).

La fin de prise : moment où la pâte de plâtre n'est plus utilisable, le plâtre achève son durcissement (un pouce fermement appliqué sur la surface ne laisse plus de trace).

Dans la pratique, on définit également une durée d'emploi correspondant au temps pendant lequel la pâte de plâtre peut être utilisée. Ce temps est variable selon le procédé de mise en œuvre (application d'un enduit, coulage, moulage, etc.).

L'addition de certains produits minéraux ou organiques, agissant sur la solubilité des phases anhydres ou les vitesses de dissolution, permet d'intervenir sur les temps de prise et les durées d'emploi.

IV.6.1.1. Accélérateurs

Dans le cas notamment de la préfabrication, il peut être nécessaire d'accélérer la prise du plâtre pour procéder à un démoulage plus rapide. On fait donc appel à des accélérateurs qui sont des produits minéraux formant des germes de cristallisation (gypse broyé par exemple) ou diminuant la solubilité du sulfate de calcium dihydraté (sulfates – sauf sulfate de fer–, acides sulfurique, chlorhydrique ou nitrique, chlorures, bromures et iodures alcalins, bichromate de potassium).

IV.6.1.2. Hydratation et prise

Pour de nombreuses utilisations dans le bâtiment, l'art ou l'industrie, il est nécessaire de retarder la prise du plâtre pour permettre un travail plus facile. Plusieurs mécanismes peuvent être mis en jeu :

- Diminution de la vitesse de dissolution des phases anhydres ;
- Diminution de la solubilité des phases anhydres ;
- Adsorption d'ions à la surface des cristaux de gypse en cours de croissance et incorporation de ces ions dans leur réseau ;
- Formation de complexes limitant la diffusion vers les cristaux de gypse.

Les principaux retardateurs sont les phosphates alcalins et d'ammonium, les acides organiques et leurs sels solubles (par exemple l'acide citrique et les citrates), les protéines

dégradées. En général, l'efficacité des sels d'acides organiques suit la séquence : le H^+ > le K^+ > le Ca^{2+} .

IV.6.1.3. Épaississeurs et rétenteurs d'eau

Les épaississeurs, en augmentant la consistance de la pâte de plâtre, permettent d'avancer le début d'emploi du plâtre. Un épaississeur bien connu est l'amidon.

Généralement, ces produits ont aussi un effet retardateur de prise limité ; associés à des retardateurs plus puissants, ils permettent d'utiliser la pâte dès la fin du gâchage et d'augmenter la durée d'emploi. Ils facilitent en outre la mise en œuvre. Épaississeurs et retardateurs ont permis le développement des plâtres modernes à long temps d'emploi et des plâtres projetés.

Certains épaississeurs sont également rétenteurs d'eau, c'est-à-dire qu'ils retiennent dans la pâte, en empêchant son évaporation ou son absorption par le support, une certaine quantité d'eau qui permet au plâtre de s'hydrater normalement durant la prise.

Parmi les produits épaississeurs, rétenteurs d'eau, citons les éthers celluloses employés depuis les années 1960 : méthylcellulose (MC), carboxyméthylcellulose (CMC), et les autres dérivés hydroxyéthylcellulose (HEC), hydroxypropylcellulose, etc.

L'action des éthers celluloses dépend de la masse molaire du produit, de la concentration, de la température. Ils sont employés seuls ou en mélange à très faible concentration, de l'ordre du millième de gramme par gramme.

IV.6.2. Propriétés physico-chimiques du plâtre (Finesse, masse volumique, temps de prise, surface spécifique ... etc.)

Les normes suivantes : NB.F. 12.300 et NB.F. 12.301 classent les plâtres en fonction de quatre critères. Elle sont présentées comme suit :

- La granularité : grosse (G) ou fin (F) ;
- Le mode d'application : manuel (M) ou mécanique (P) ;

- Le temps d'emplois : (n°1) court ; (n°2) allongé ou (n°3) très long ;
- La dureté : normale (N) ou Très haute dureté (THD)

IV.6.2.1. Plâtre Gros

- Le refus au tamis de 800 μ m varie entre 5 et 20% ;
- Eau de gâchage : 75 à 100% ;
- Temps de prise : 8 à 25 minutes ;
- Consommation : 8kg/m² (5 m²/ sac de 40 kg),
- Composition mortier :
 - Mortier normal : 1 : 3 pondéral (sable fin 0/2) ;
 - Mortier bâtard : 3 volumes de plâtre, 1 volume de chaux grasse, 2 volumes de sable lavé (0/2) et 1,5 volume d'eau.

IV.6.2.2. Plâtre Fin

- Le refus au tamis de 800 μ m < 1%, et le refus à 200 μ m = 25% ;
- Eau de gâchage : 40 à 100% ;
- Temps de prise : 30 à 60 minutes ;
- Consommation : 8 à 12 kg/m².

IV.6.2.3. Taux des impuretés nuisibles contenus dans le plâtre

Parmi les impuretés, les plus nuisibles sont :

- MgO < 2% ;
- K₂O < 0.1% ;
- Na₂O < 0.1%.

IV.6.2.4. Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie

Du fait de sa faible conductivité thermique λ , le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois. Le tableau IV.4 donne les caractéristiques thermiques du plâtre.

Tableau IV.4. Caractéristiques thermiques du plâtre.

Matériau ou application	Masse volumique sèche ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique utile λ (W . m ⁻¹ . K ⁻¹)	Capacité thermique massique c_p (J . kg ⁻¹ . K ⁻¹)	Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	
				sec	humide
Plâtre	600	0,18	1 000	10	4
Plâtre	900	0,30	1 000	10	4
Plâtre	1 200	0,43	1 000	10	4
Plâtre	1 500	0,56	1 000	10	4
Plaque de plâtre	900	0,25	1 000	10	4
Enduit isolant au plâtre	600	0,18	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 000	0,40	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 300	0,57	1 000	10	6
Plâtre et sable	1 600	0,80	1 000	10	6

Un enduit plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique. Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agrégats légers qui ont des conductivités thermiques de l'ordre de 0,18 à 0,20 W.m⁻¹.K⁻¹ sont particulièrement destinés à cet usage. En outre, du fait de sa forte inertie thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre élimine le phénomène de paroi froide.

Le plâtre permet de plus – en association avec des matériaux isolants minéraux ou de synthèse ayant des conductivités thermiques très faibles (0,03 à 0,04 W.m⁻¹.K⁻¹), qui sont des matériaux spécifiques de l'isolation mais qui ne constituent pas comme lui des matériaux de construction – de réaliser des systèmes d'isolation efficaces.

IV.6.2.5. Humidité des locaux

Le plâtre est un matériau poreux et, bien qu'il soit rarement laissé nu et qu'il soit le plus souvent recouvert de peinture, de papier ou de tissu, il doit très généralement être examiné comme tel du point de vue des échanges hygrométriques avec l'atmosphère ambiante, car, mis à part les peintures laquées des salles d'eau ou certains revêtements plastifiés, les couches minces de peinture ou de papier, comme les tissus, sont perméables.

Ainsi, dans une atmosphère maintenue à 20 °C et à 85 % d'humidité relative, le plâtre perd la totalité de son eau non combinée, soit sensiblement 50 % de sa masse, en moins de 30 jours. Des mesures de laboratoire ont prouvé que ce résultat est identique à celui qui peut être obtenu par un traitement en étuve à 50 °C poursuivi jusqu'à masse constante. Ce séchage s'effectue d'ailleurs quelle que soit l'humidité relative de l'air ambiant et le plâtre continue à perdre son eau non combinée même lorsque l'humidité relative devient très élevée, de l'ordre de 95 %.

Il résulte encore d'essais de laboratoire que le plâtre séché, maintenu en milieu isotherme mais placé en ambiance saturée, reprend après un temps comparable à celui du séchage, une humidité d'environ 1 % en masse.

Des essais ont été effectués sur des plâtres préalablement séchés, puis maintenus à une humidité relative constante élevée (95 %) et soumis à des cycles de température de 12 °C d'amplitude (entre 12 et 24 °C) et de durée variable de 4, 6, 12 et 24 h. Les mesures faites, en pesée continue, établissent que le plâtre absorbe l'eau lorsque la quantité d'eau vapeur dans l'atmosphère augmente, c'est-à-dire quand la température croît. De plus, le plâtre perd sensiblement la masse d'eau absorbée dans le cas contraire ; la masse d'eau échangée entre le plâtre et l'atmosphère (qui augmente avec la durée du cycle) représente de 0,1 à 0,2 % de la masse du plâtre. Le plâtre est donc capable de jouer un rôle important, même en tenant compte du fait que la vitesse des échanges dépend évidemment de la nature du plâtre, de sa compacité, de son taux de gâchage, de sa surface de contact avec l'ambiance, comme des conditions hygrométriques de celle-ci.

Bien entendu, le plâtre, par la contribution qu'il apporte par ailleurs à l'isolation thermique, favorise l'élimination des phénomènes de paroi froide. Mais il reste qu'en cas de condensation d'eau à sa surface, le plâtre est capable de l'absorber – et de s'opposer ainsi au ruissellement – pour la rejeter ensuite dès que les conditions hygrométriques s'y prêtent.

Le plâtre intervient comme un réel amortisseur des variations hygrométriques de l'ambiance dans laquelle il est utilisé.

IV.6.2.6. Isolation acoustique

Le plâtre, grâce à son aptitude au moulage, à la préfabrication comme à la constitution d'éléments décoratifs à reliefs, se prête à la réalisation de panneaux, de structures architecturales ou ornementales capables de supprimer ou d'atténuer les réverbérations gênantes des bruits ou des sons émis dans une pièce.

IV.6.2.7. Résistance au feu

L'une des propriétés les plus caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu, qui a été reconnu et éprouvé de tout temps. Cette protection a pu autrefois être obtenue grâce à de larges garnissages de plâtre remplissant complètement les intervalles séparant les éléments de construction. Elle peut aussi consister en enduits projetés de plâtres spéciaux (spécial feu) ou en enduits traditionnels comportant, de préférence, une armature légère de solidarisation ancrée sur l'ouvrage.

Le plâtre est incombustible. Il est classé A1 sans essai par décision de la Commission européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits appartenant aux classes à « aucune contribution à l'incendie » lorsqu'il ne contient pas plus de 1 % en masse ou en volume de matière organique répartie de manière homogène.

Il est mauvais conducteur de la chaleur. Il a une conductivité thermique relativement faible pour un matériau de construction qui, de plus, prend ses valeurs minimales dans la zone des températures allant de 400 à 500 °C, la plus critique pour les éléments porteurs.

Le plâtre, après son application, après avoir pris, est un sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, c'est-à-dire qu'à l'état sec, il contient environ 20 % en masse d'eau chimiquement liée. Pour libérer cette eau, ce qui se produit en cas d'incendie, il faut rompre la liaison moléculaire et, pour cela, fournir sous forme de chaleur

une énergie importante, environ 711 kJ par kilogramme de plâtre. Il faut ensuite vaporiser cette eau, et pour cela, dépenser encore une énergie d'environ 544 kJ pour 200 g d'eau contenus dans 1 kg de plâtre initial, soit en tout quelque 1 255 kJ par kilogramme de plâtre. Tant que toute l'eau n'est pas libérée et vaporisée, la température du plâtre reste, bien entendu, inférieure à 140°C, température caractéristique du critère d'isolation I (anciennement coupe-feu) défini par la réglementation.

En outre, même après sa déshydratation, le plâtre continue à former une couche assurant à l'élément de construction qu'elle recouvre une isolation thermique notable du fait de sa faible conductivité thermique.

Enfin, sous l'action du feu, le plâtre ne donne naissance à aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant, aucune fumée, ni aucun produit de décomposition combustible ou susceptible d'activer la combustion.

IV.7. DOMAINE D'UTILISATION DU PLATRE

Plâtres destinés au bâtiment sous formes des enduits intérieurs, on distingue trois familles de plâtres pour enduits intérieurs pour :

- enduits manuels ;
- projection mécanique ;
- enduits spéciaux appliqués soit manuellement, soit par projection mécanique.

Plâtres à mouler pour l'art et l'industrie, Ce sont des plâtres constitués, en général, essentiellement de semi-hydrates préparés à partir de gypse sélectionné, selon des techniques particulièrement élaborées, et capables de manifester, avec toute la régularité industriellement requise, les plus hautes performances :

- résistances mécaniques très élevées ;
- état et dureté de surface exceptionnels ;
- porosité et pouvoirs d'absorption contrôlés et strictement adaptés ;

- variations dimensionnelles maîtrisées et rigoureusement régularisées.

Produits pour chapes auto-lissantes : Les produits destinés à la réalisation de chapes coulées à base de sulfate de calcium se présentent sous différentes formes : poudre destinée à être mélangée sur chantier avec un granulat, mortier sec prêt à l'emploi ou pâte gâchée prête à être coulée.

Produits préfabriqués : Carreaux, Carreaux spéciaux, Plaques spéciales : pare-vapeur, Produits préfabriqués pour plafond.

Le gypse utilisé en construction est totalement recyclable car mis en œuvre sous forme de plâtre (gypse partiellement déshydraté) il est réhydraté en gypse. Les chutes de fabrication et d'installation des plaques de plâtre sont récupérées et recyclées dans la fabrication de nouvelles plaques. Le plâtre provenant de la démolition d'immeubles est également, en partie, recyclé en agriculture

Il n'existe pas de données statistiques précises sur l'ensemble de la production à travers le monde, le nombre de pays producteurs étant grand, plus de 80, et les consommations souvent locales. La production a été estimée à plus de 140 millions de tonnes en 2019, y compris le gypse de synthèse sous-produit de nombreuses industries chimiques et de la désulfuration des fumées dans les pays industrialisés. Les réserves mondiales sont considérables, probablement de plus d'un milliard de tonnes, avec en particulier 700 millions de t aux États-Unis, 450 millions de t au Canada, 340 millions de t au Brésil, 200 millions de t en Turquie. La figure IV.2 présente les principaux pays producteurs de gypse dans le monde de 2013 à 2019 (en milliers de tonnes)

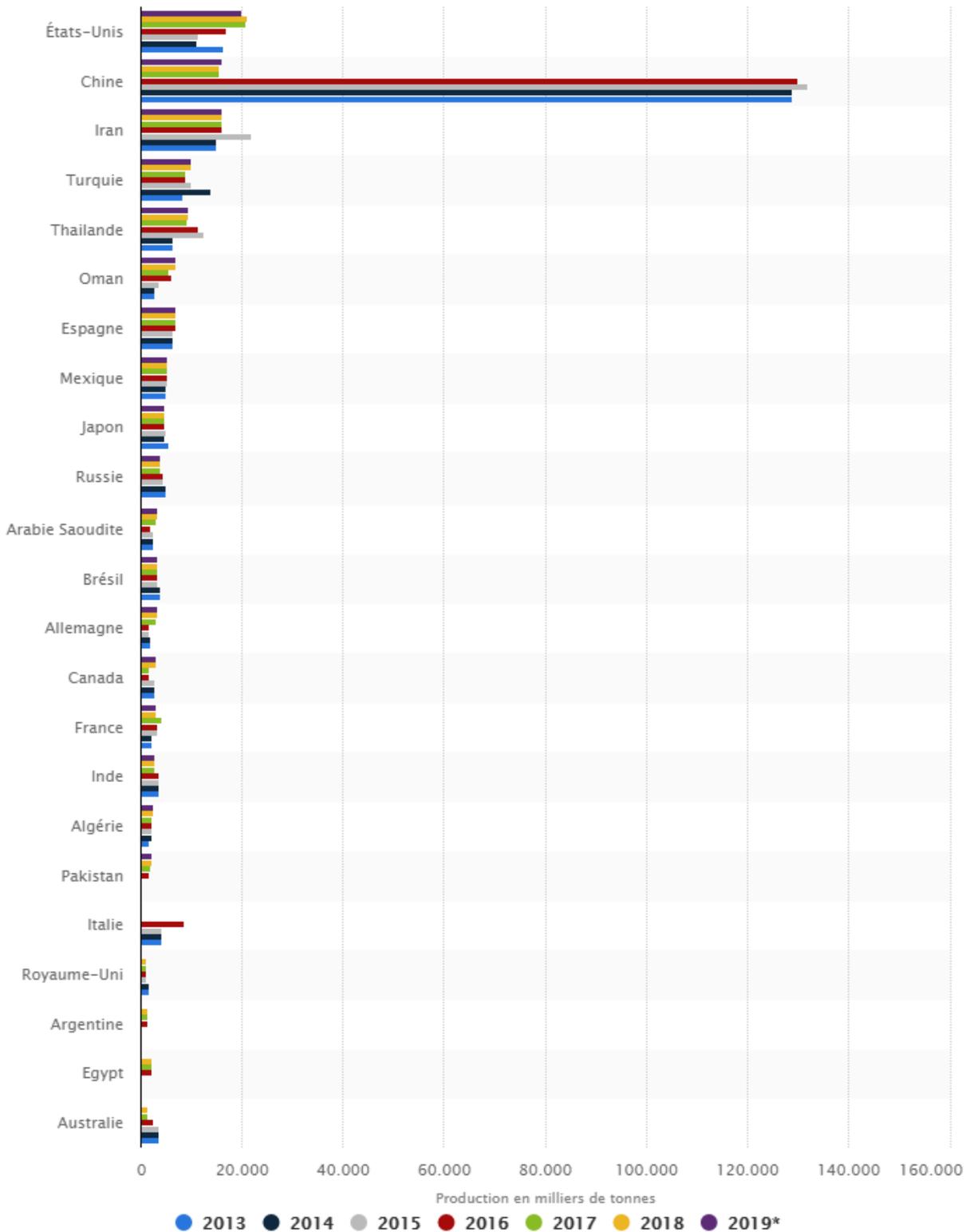


Figure IV.2 présente les principaux pays producteurs de gypse dans le monde de 2013 à 2019 (en milliers de tonnes)

IV.8. LISTE DES REFERENCES ET DES SITES INTERNET A CONSULTER

Festa Jean & Dreux Georges (2007) Nouveau guide du béton et ses constituons, 8 ème édition. Eyrolles, Paris.

GHOMARI Fouad (2003) Cours de « Science des matériaux de construction », Université Aboubekr Belkaid- Tlemcen

P. Marteau (1993) Mémento roches et minéraux industriels – Gypse et anhydrite. Rapport BRGM R37722 SGN-GEO93

Daniel DALIGAND (2008) Plâtre, les Techniques de l'ingénieur. C 910

Sites internet :

- « http://www.cocorel.com/ressources/unt/unit/sciences-de-l-ingenieur/398-RMDI/RMDI6/co/grain3_4.html »
- « <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mine/caso/texcaso.htm> »
- « <http://www.universalis.fr/encyclopedie/anhydrite/> »
- « <http://www.jeanduperrex.ch/Site/Gypse.html> »
- « <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/platre.pdf> »

CHAPITRE V.
ESSAIS SUR LES LIANTS

CHAPITRE V.

ESSAIS SUR LES LIANTS

V.1. DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES CIMENTS

1. Introduction

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (rhô)

2. Objectif

Cet essai a pour objectif de permettre de connaître la masse volumique absolue d'un ciment contenant un déchet qui provient des matériaux de recyclage (matériaux de construction / démolition). Il existe deux méthodes pour la détermination de la masse volumique, l'une est réalisée à l'aide d'une éprouvette graduée et, l'autre est réalisée par mesure à l'aide d'un pycnomètre.

Nb: La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le solide, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

3. Appareillages et matériels

- Un pycnomètre (figure V.1);
- Une éprouvette graduée (figure V.2);
- Une balance de précision (g);
- Ciment CEM II;
- L'essence (ml);



Figure V.1. Pycnomètre.



Figure V.2. Eprouvette graduée

4. Mode opératoire

4.1. Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide. Toutefois sa précision est faible.

- ❖ Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'essence ;
- ❖ Peser un échantillon sec M de ciment et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air ;
- ❖ Lire le volume de l'essence volume V_2 ;

La masse volumique absolue est donnée par la relation suivante : $\rho_s = (M/V_2 - V_1)$

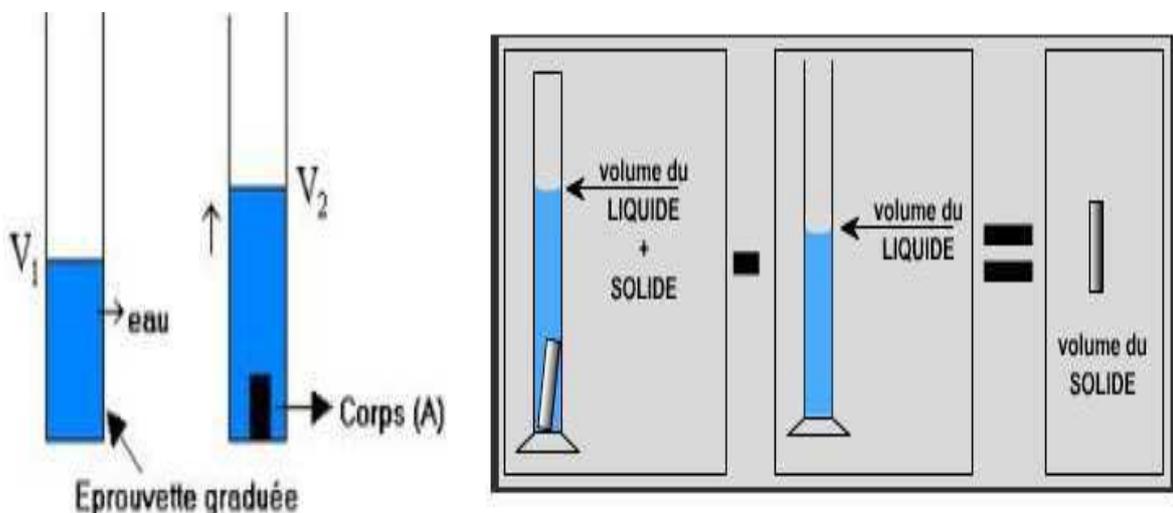


Figure V.3. Schéma expliquant la méthode de l'éprouvette graduée.

4.2. Méthode de mesure par pycnomètre

Le pycnomètre qui est un ballon, fermé dans sa partie supérieure par un bouchon rodé, ce qui permet d'isoler un volume d'essence caractéristique de l'appareil identique à chaque utilisation. Voir figure 1.

La mesure se fait comme suit :

- ❖ Déterminer avec précision la masse M_1 du pycnomètre rempli d'essence jusqu'à niveau du trait repaire;
- ❖ Déterminer avec précision la masse M_2 d'un échantillon du ciment anhydre ;
- ❖ Introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre, remplir d'essence, fermer le bouchon et amener le niveau d'essence au trait repère. Vérifier que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air ;
- ❖ Peser le pycnomètre qui contient l'échantillon, la masse déterminée est M_3 .

Ecrire la relation entre les différent poids mesurés : $M_3 = M_1 + M_2 - (M_2/\rho_s) * \rho_w$, On déduit la masse volumique ρ_s du matériau, connaissant la masse volumique de l'essence ρ_w qui égale à 0.73 g/cm^3 .

V.2. DETERMINATION DE LA CONSISTANCE & LE TEMPS DE PRISE DU CIMENT

V.2.1. DETERMINATION DE LA CONSISTANCE

1. Définition et But de l'essai

La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur pâte à quantités d'eau différentes, L'état pâteux intermédiaire entre liquide et solide est caractérisé par sa consistance qui peut être molle, plastique ou bien ferme. L'essai de consistance doit être réalisé suivant les prescriptions ordinaires, c'est à dire à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et à une hygrométrie supérieure à 65%.

2. Objectif de l'essai

L'essai de consistance permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant afin d'obtenir une pâte normale. La pâte obtenue a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée.

3. Principe de l'essai

L'essai est réalisé pour trouver la quantité d'eau qui doit être mélangé toujours suivant le même processus avec une masse de liant, dans laquelle la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de (6 ± 1) mm du fond du moule.

4. Appareillage

- Balance, permettant de peser à 1g près ;
- Malaxeur conforme à l'EN 196-1 et une spatule ;
- L'appareil de Vicat avec sa sonde cylindrique de diamètre $(10 \pm 0,05)$ mm et de longueur effective (50 ± 1) mm. (La masse totale des parties mobiles doit être de (300 ± 1) g.
- Le moule Vicat destiné à contenir la pâte pendant l'essai doit être en caoutchouc dur de la forme tronconique, d'une profondeur $(40 \pm 0,2)$ mm e de diamètre inférieurs et supérieurs de (70 ± 05) mm et (80 ± 05) mm respectivement. Ce tronc de cône doit reposer sur une plaque en verre d'au moins 2,5 mm.

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur pour obtenir les résultats estimés.

- Peser $500g \pm 1g$ de ciment et le verser dans le godet du malaxeur ;
- Gâcher le ciment avec une quantité d'eau (on commence avec un rapport de masse $E/C = 0.25$) selon le protocole décrit dans le tableau suivant :

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

- Remplir le moule tronconique avec la pâte obtenue, et araser la surface en prenant appui sur le bord du moule.
- Porter le moule plein sur l'appareil de Vicat, et régler le niveau zéro de la sonde (la sonde est tangente avec le bord du moule).
- Centrer le moule dans l'axe de la sonde, abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, et desserrer la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.
- 4 minutes après le temps zéro, lâcher la sonde sur la pâte, après 30 secondes, noter la valeur de l'enfoncement « d » lue sur l'index de l'appareil (voir figure V.4).

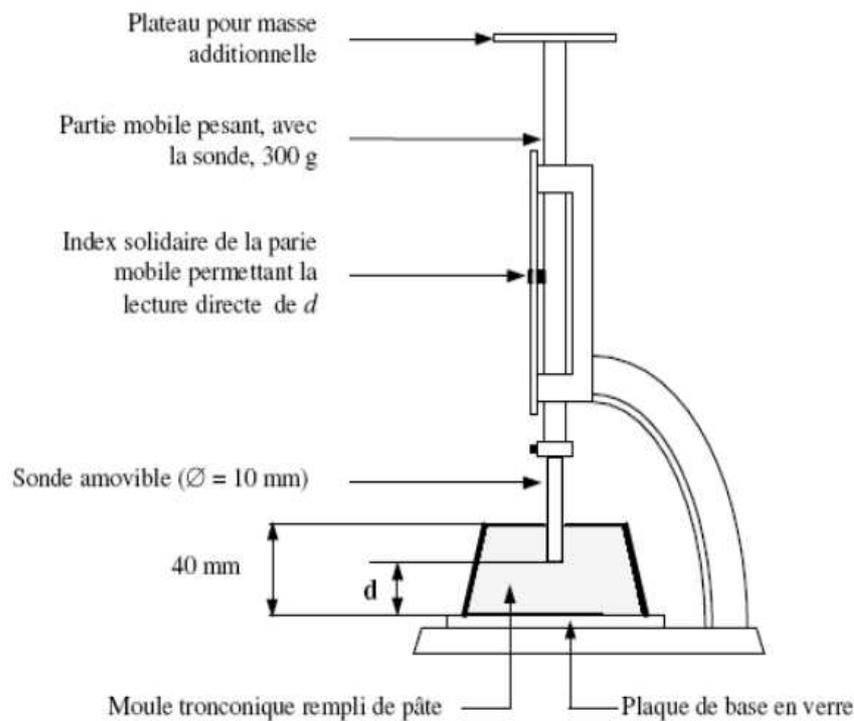


Figure V.4. Mesure la consistance de la pâte de ciment.

1. Si $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, l'essai est concluant et la consistance est normale.
 2. Si $d < 5 \text{ mm}$, la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.
 3. Si $d > 7 \text{ mm}$, la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.
- Renouveler l'opération jusqu'à l'obtention de $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

Travail demandé :

Effectuer une série d'essais en partant de $E/C=0.15$ et en allant de 0.05 en 0.05 jusqu'à l'obtention de $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (Maximum $E/C = 0.35$). Noter les valeurs de C/E et de « d » puis entamer le test de temps de prise sur la pâte normalisée.

V.2.2. DETERMINATION DU TEMPS DE PRISE DU CIMENT

1. Définition et But de l'essai

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : le début de prise et la fin de prise.

2. Principe

L'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler).

3. Appareillages et matériels

- Un malaxeur à deux vitesses : lente et rapide - figure V.5 ;
- Appareil de Vicat équipé d'une aiguille de diamètre 1.13 mm – Figure V.6 ;
- Un accessoire annulaire adaptable sur l'aiguille normalisée (fin de prise) ;
- Une balance avec grade précision (g) ;
- Salle climatisée de température 20°C et dont l'humidité est supérieure à 90% ;
- Ciment de type CEM II/A 42,5 MPa ;
- L'eau distillée (ml);
- Chronomètre.



Figure V.5. Malaxeur pour mortier.

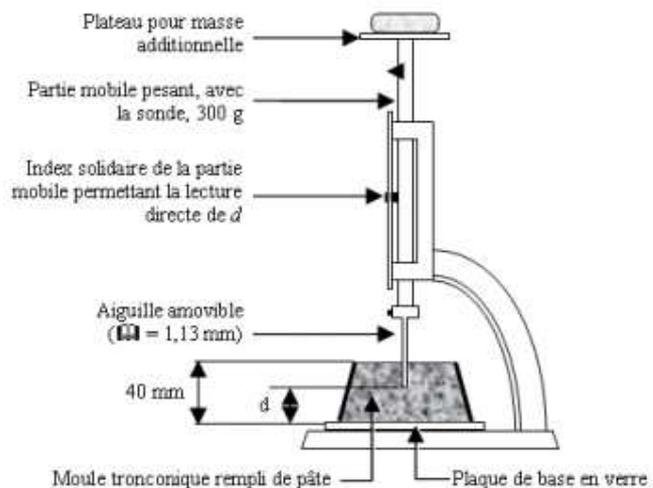


Figure V.6 Appareil de Vicat

4. Mode opératoire

La quantité d'eau choisie est pesée de préférence dans la cuve du malaxeur. Puis on pèse 300 g de ciment qui seront ajoutés à l'eau en temps compris entre 5 et 10 s. Si par exemple la quantité d'eau pesée est 125g, alors $E/C = 0.25$.

Mettre immédiatement le malaxeur en route à vitesse lente pendant 90 s. Arrêter le malaxeur pendant 15 s et ramener, dans la gâchée, avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une

durée de 90 s à vitesse lente. Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Raclage de la cuve	
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs ; il faut enlever l'excès de la pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule ; puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

Régler le niveau zéro de l'aiguille puis centrer le moule dans l'axe de l'aiguille. Relâcher l'aiguille sans vitesse initiale. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance « d (voir figure V.7) » séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base. Recommencer l'opération à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que « $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ». Cet instant mesuré à 5 min est le temps de début de prise pour le ciment concerné.

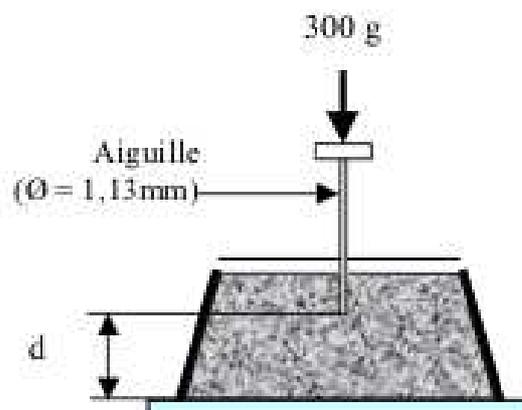


Figure V.7. Mesure du temps de début de prise

Munir l'aiguille d'un accessoire annulaire pour faciliter l'observation précise des faibles pénétrations (figure V.8).

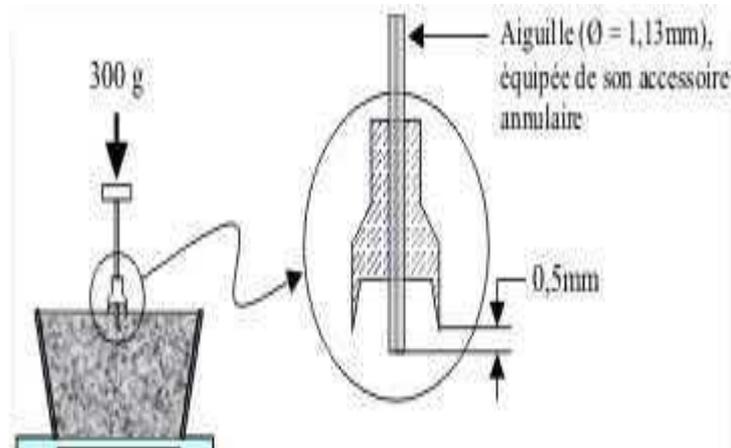


Figure V.8.

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus que 0.5 mm par rapport au sommet du moule tronconique (figure V.8).

V.3. ESSAIS D'EXPANSION A CHAUD ET A FROID (STABILITE DU CIMENT)

1. Introduction

Les expansifs des ciments sont le gypse ajouté au moment du broyage afin de régulariser la durée de prise, la chaux libre et la magnésie libre. Les ciments commerciaux actuels sont pratiquement stables, mais en cas de doute certains essais de laboratoire permettent de s'en assurer.

2. Objectif de l'essai

Ces essais permettent de découvrir la présence de matières expansives dans un liant, en particulier le gypse et la magnésie contenu dans le ciment. Ces éléments indésirables peuvent conduire à de graves menaces pour la pérennité des constructions car elles peuvent provoquer l'éclatement du béton.

3. Principe de l'essai

Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 3cm de hauteur et de 3cm de diamètre contenus dans des moules déformables. Sur la périphérie du moule sont soudées deux aiguilles qui amplifient la déformation.

La mesure de l'écartement des deux aiguilles se fait au début et à la fin de l'expérience. Pour accélérer la réaction d'hydratation, on précède avec un traitement thermique dans un bouilloire Le Chatelier.

4. Appareillage

- Balance, permettant de peser à 1g près ;
- Malaxeur conforme à l'EN 196-1 et une spatule ;
- L'appareil de Le Chatelier (voir la figure V.9)

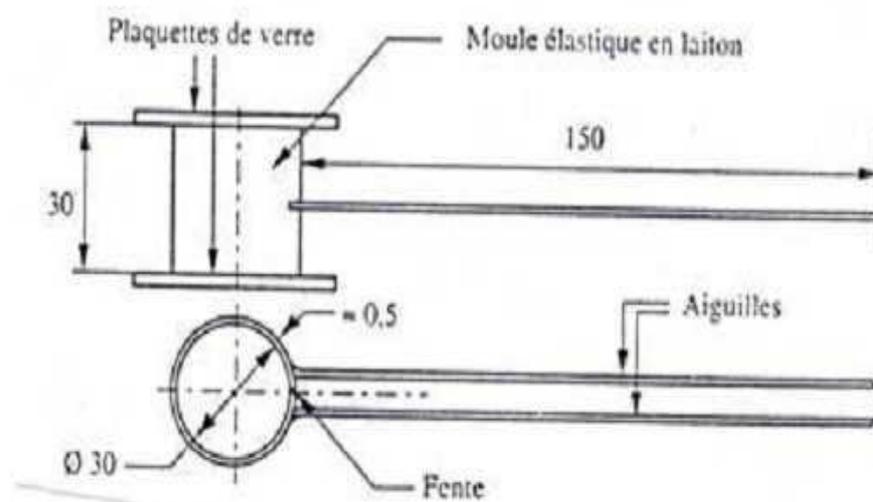


Figure V.9. Aiguille de Le Chatelier.

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur pour obtenir les résultats estimés.

- Peser $500\text{g} \pm 1\text{g}$ de ciment et le verser dans le godet du malaxeur ;
- Gâcher le ciment avec une quantité d'eau E/C, permettant de confectionner une pâte normale, selon le protocole décrit dans le tableau suivant :

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

- Remplir le moule avec la pâte obtenue, et araser la surface en prenant appui sur le bord du moule.
- Procéder au mesure des expansions à chaud et à froid

5. Conduite de l'essai

- 1) Vérifier avant l'essai que les moules sont libres dans le sens de l'expansion, propres et les aiguilles droites et indépendantes.
 - 2) Placer les moules sur des plaques de verre, les remplir de pâte normale et les recouvrir chacun d'une autre plaque de verre légèrement lestée.
 - 3) Immerger aussitôt les moules dans le bain provisoire à 20°C et mesurer l'écartement initiale des aiguilles « A » (voir figure V.10).
 - 4) Après 24 heures du temps de moulage, enlever les plaques de verre avec précaution et porter les moules dans leurs bains.
- **Essai d'expansion à chaud** : les moules sont immergées dans le bain thermostatique dont on porte l'eau à l'ébullition pendant 3 heures. Puis mesurer de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles « B » voir figure V.10.
 - **Essai d'expansion à froid** : les moules sont immergées dans un bain d'eau froide maintenue à une température de 20°C pendant 7 jours. Puis mesurer alors la valeur de l'écartement final des pointes des aiguilles « C » voir figure V.10.

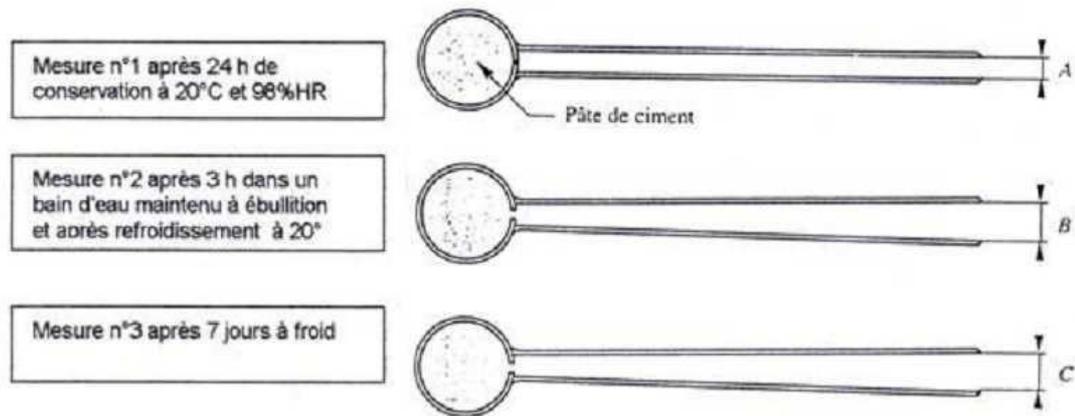


Figure V.10. Mesure de l'expansion de la pâte de ciment.

NB : Trois moules à aiguilles de le Chatelier sont confectionnées pour mesurer la stabilité aux expansifs d'un ciment CEM I sur pâte normale.

NB 2 : Dans les deux cas l'ouverture des aiguilles ne doit pas dépasser 10 mm. Si les conditions sont vérifiées, on peut dire que ce ciment est vérifié à l'égard de la norme PrNA 230.

V.4. COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT

1. Critères chimiques et minéralogiques du clinker

De nombreux savants ont étudié la chimie du clinker Portland et la composition chimique est maintenant bien connue. Par contre, la minéralogie du clinker n'a pas encore livré tous ses secrets. Des travaux de Le Chatelier, Michaelis, Lea et Parker, Rankin et Wright, Kühn, Bogue, ..., il est établi que le clinker est principalement constitué en proportions variables de : C2S, C3S, C3A et C4AF

Le pourcentage des oxydes minéraux contenus dans le ciment est déterminé par la technique de la fluorescence X. Le rayonnement de fluorescence X collimaté en un faisceau de rayons parallèles tombe sur le cristal analyseur. Celui-ci diffracte ces rayons selon des angles liés à la longueur d'onde de chaque raie par la loi de Bragg : $2d \sin \theta = n\lambda$.

L'électronique de mesure permet de séparer les raies de premier ordre des raies de second ordre.

Les formules de Bogue sont utilisées mondialement pour calculer la composition minéralogique d'un clinker ou d'un ciment Portland. Ce calcul fait l'hypothèse de la formation de réseaux cristallins bien définis, sans aucune inclusion étrangère, et ne tient pas compte des oxydes secondaires apportés par les matières premières. Pour un clinker Portland ordinaire, la composition minéralogique est définie par les formules suivantes et calculée à partir de la composition chimique.

$$C^3S = 4.07 \times CaO - 7.6 \times SiO^2 - 6.72 \times Al^2O^3 - 1.43 \times Fe^2O^3$$

$$C^2S = 2.87 SiO^2 - 0.75 \times C^3S$$

$$C^3A = 2.65 \times Al^2O^3 - 1.69 \times Fe^2O^3$$

$$C^4AF = 3.04 \times Fe^2O^3$$

Performances des ciments et composition chimique du clinker

En pratique, la proportion des principaux constituants du clinker se calcule sous la forme de rapports, de modules ou d'indices chimiques, résultats des études de nombreux savants sur les mécanismes de formation et de réaction du clinker Portland.

Module hydraulique de Michaelis

$$HM = CaO / (SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3)$$

Le Module hydraulique de Michaelis est compris entre 1.7 et 2.3

Module silicique de Kühl

$$SM = SiO^2 / (Al^2O^3 + Fe^2O^3)$$

Le module silicique de Kühl est compris entre 1.5 et 5.

Une valeur élevée correspond à une valeur élevée de silice au détriment des agents fondants. Une valeur faible provoque un croûtage excessif dans la zone de clinkérisation et nuit à la bonne marche du four.

Module aluminoferrique de Kühl

$$TM = Al^2O^3 / Fe^2O^3$$

Le module aluminoferrique de Kühl est compris entre 1.5 et 2.5.

Indice d'hydraulicité de Vicat

$$HI = ([SiO^2] + [Al^2O^3]) / ([CaO] + [MgO])$$

Les composants sont exprimés en moles et non en pour-cent. L'indice d'hydraulicité de Vicat est compris entre 0.4 et 0.5.

Indice de saturation de Kühl

$$LSI = CaO / (2.8 \times SiO^2 + 1.1 \times Al^2O^3 + 0.7 \times Fe^2O3)$$

L'indice de saturation de Kühl est compris entre 0.85 et 1.

Facteur de saturation de Lea Parker

$$LSF = CaO / (2.8 \times SiO^2 + 1.18 \times Al^2O^3 + 0.65 \times Fe^2O^3)$$

Le facteur de saturation de Lea et Parker est compris entre 0.85 et 1.0. Il se présente aussi sous la forme

$$LSF = 100 \times CaO / (2.8 \times SiO^2 + 1.18 \times Al^2O^3 + 0.65 \times Fe^2O^3)$$

Il est alors compris entre 85 et 100.

NB : Pour un ciment résistant aux sulfates la teneur en C3A doit être inférieur ou égal à 5%

Travail demandé : Vérifier la conformité du ciment suivant.

Tableau .1. Caractéristiques chimiques et physiques du ciment portland CEM I.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
Pourcentage	22.53	5.32	5.53	62.77	1.86	1.15	0.21	0.10	0.02
Perte Au Feu (PAF) = 0.95 SSB = 3510 cm ² /g Masse volumique = 3.34g/ml									

V.5. LISTE DES REFERENCES ET DES SITES INTERNET A CONSULTER

Festa Jean & Dreux Georges (2007) Nouveau guide du béton et ses constituons, 8 ème édition. Eyrolles, Paris.

GHOMARI Fouad (2003) Cours de « Science des matériaux de construction », Université Aboubekr Belkaid- Tlemcen