

1.1 Fabrication et propriétés des ciments

Ce chapitre concerne essentiellement la fabrication et l'utilisation du ciment Portland. Il existe d'autres ciments élaborés suivant d'autres procédés, pour lesquels on trouvera des informations complémentaires au paragraphe 1.2.

1.1.1 - Un peu d'histoire

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolanique », qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux.

En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexploquée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Il donne

des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement: le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née. Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait les performances de la pierre de cette région.

■ Naissance de l'industrie cimentière

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux: four rotatif et broyeur à boulets en particulier.

Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse: en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes.



En France, avant la dernière guerre, la production était faible, comme l'indiquent les statistiques suivantes :

- en 1880: 100 000 t ;
- en 1920: 800 000 t ;
- en 1938: 3 800 000 t.

Le ciment s'est surtout développé à partir de 1950 (7,4 Mt) du fait de l'essor du béton et des besoins de la reconstruction. La production a progressé de façon régulière jusqu'en 1974, date à laquelle le niveau le plus haut a été atteint avec 33,5 Mt. En 2004, elle était de 21 Mt.



1.1.2 - La fabrication des ciments courants

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 %/20 %. Les différentes étapes de la fabrication sont décrites ci-après.

■ Extraction et concassage

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 150 mm.

■ Préparation de la matière première

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de la bauxite, de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

■ La voie sèche

C'est de très loin la technique la plus employée, aujourd'hui, en France. La matière première est préparée sous forme de poudre. La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des

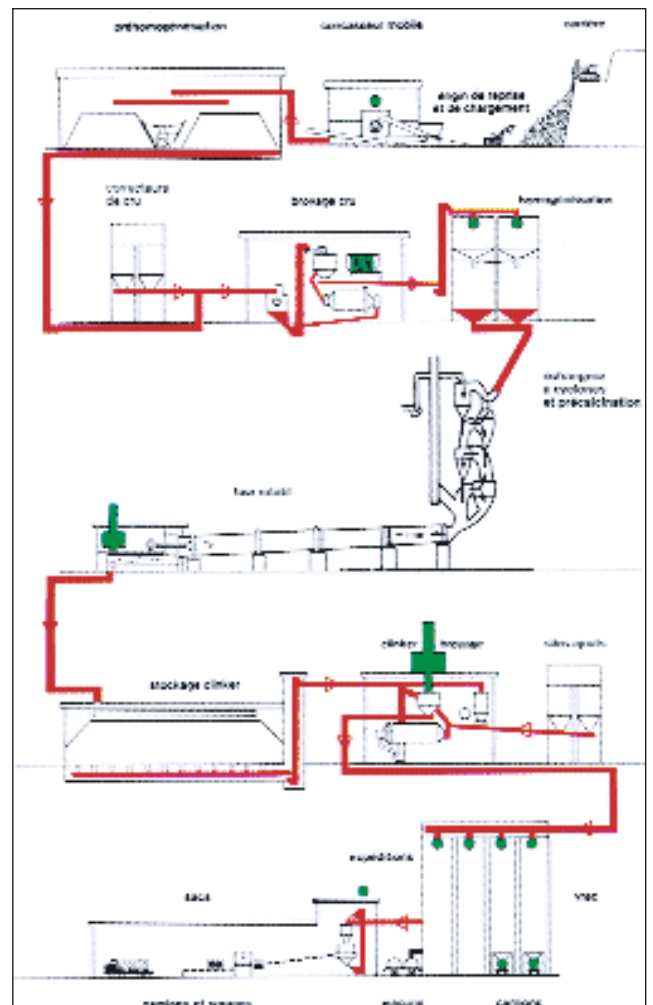


Schéma de fabrication du ciment (voie sèche).



constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

■ **Autres techniques de préparation de la matière**

D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide).

■ **Cuisson du cru**

Quelle que soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties.

• **Un échangeur de chaleur** comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds circulant à contre courant, en sortant de ce four, et se décarbonate en partie. Une décarbonation plus complète peut être obtenue par l'ajout

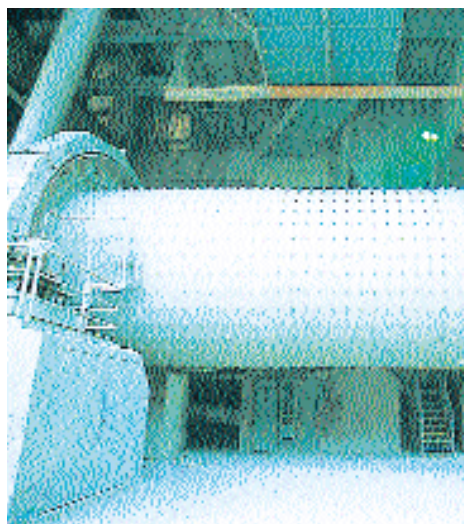
d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination). La poudre est ainsi portée à une température comprise entre 800 °C et 1 000 °C.

• **Un four horizontal rotatif cylindrique** en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) de 50 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute. La matière pénètre à l'amont du four (en partie haute) où s'achève la décarbonation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1 450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium.

Tout en améliorant la qualité des produits, les industriels ont fortement réduit au cours des dernières années la consommation d'énergie nécessaire à la cuisson, qui est de plus en plus apportée par des combustibles de substitution. En outre, l'industrie cimentière contribue aussi à la protection de l'environnement en valorisant les sous-produits industriels, inutilisables pour d'autres emplois. Les rejets des usines sont sensiblement inférieurs aux normes.

■ **Broyage du clinker**

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec



du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant d'autres constituants tels que du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des schistes calcinés, du calcaire, des fumées de silice ou encore des fillers.

1.1.3 - Prise et durcissement du ciment

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique $3 \text{ CaO}, \text{ SiO}_2$ (ou, par abréviation, C_3S) ; le silicate bicalcique $2 \text{ CaO}, \text{ SiO}_2$ (ou C_2S) ; l'aluminate tricalcique $3 \text{ CaO}, \text{ Al}_2\text{O}_3$ (ou C_3A) ; l'alumino-ferrite tétracalcique $4 \text{ CaO}, \text{ Al}_2\text{O}_3, \text{ Fe}_2\text{O}_3$ (ou C_4AF).

Ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise ». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures. Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives.

■ Phase dormante

La pâte de ciment – ciment + eau – reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du ciment et la température). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais elles sont ralenties par la présence du gypse.

■ Début et fin de prise

Après une à deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

■ Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

1.1.4 - Principales caractéristiques

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, de sable et d'eau défini par la norme NF EN 196-1).

■ Caractéristiques de la poudre

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 (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g .

La masse volumique apparente représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de $1\,000\text{ kg/m}^3$ (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

La masse volumique absolue représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de $2\,900$ à $3\,150\text{ kg/m}^3$ suivant le type de ciment.

■ **Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal »**

Le début de prise est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat – aiguille de 1 mm^2 de section pesant 300 g – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme NF EN 196-3. Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou à 1 heure.



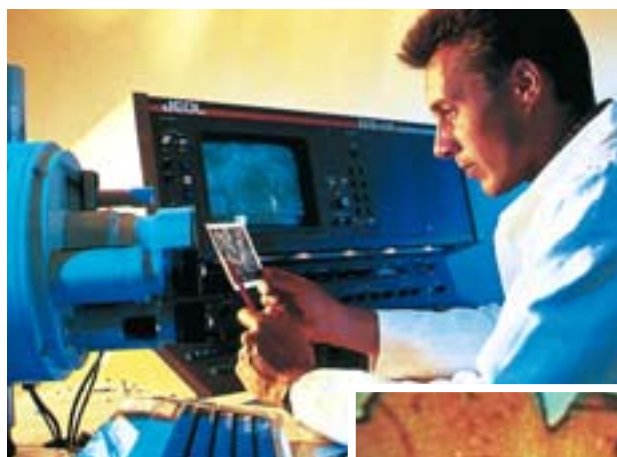
Aiguille VICAT

L'expansion se mesure suivant un essai normalisé (norme NF EN 196-3) et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments (conformément à la norme NF EN 197-1).

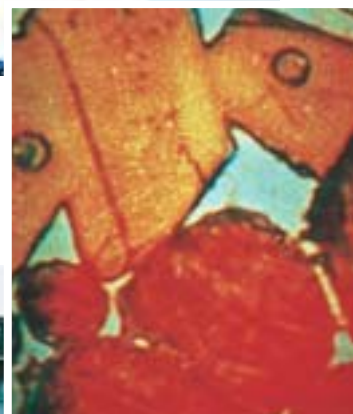
Les résistances mécaniques, mesurées sur éprouvettes de mortier normal, caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours. Les conditions précises de détermination de cette résistance sont fournies dans le chapitre 1.2.

1.1.5 - Le progrès grâce à la recherche

La recherche a pour but l'élaboration de ciments appropriés aux besoins, et permettant de satisfaire la demande des utilisateurs. Elle porte sur les produits normalisés dont l'évolution, servie par les procédés de fabrication modernes, va dans le sens de la qualité, de la régularité, de l'adaptation à la fonction, mais également de l'économie d'énergie, lors de la fabrication. La recherche est également orientée vers la mise au point de ciments ou de liants destinés à des applications particulières : pré-fabrication, travaux routiers, réparations, etc.



La recherche sur les ciments est servie par un appareillage très moderne.



Observation au microscope optique.



Préparation automatique des échantillons de cru sous forme de perles pour analyse par fluorescence X.

LES USINES (au 01/01/2004)



● Sites industriels

- ALLIER** - Crétat / Vicat
- ALPES-MARITIMES** - Cannes-la-Pine / Lafarge Ciments
- La Sierra-de-Pelle / Vicat
- ARDÈCHE** - Coaraze / Ciments Calcia
- La Tall / Lafarge Ciments
- La Tall / Lafarge Aluminate
- AUDE** - Port-la-Nouvelle / Lafarge Ciments
- BOUCHES-DU-RHÔNE** - Fos-sur-Mer / Lafarge Aluminate
- La Melle / Lafarge Ciments
- CALVADOS** - Beauville / Ciments Calcia
- CHARENTE** - La Couronne / Lafarge Ciments
- CHARENTE-MARITIME** - Bussac / Ciments Calcia
- CHER** - Beaulieu / Ciments Calcia
- FINISTÈRE** - Brest / Lafarge Ciments
- GARD** - Beauvoisin / Ciments Calcia
- HAUTE-GARONNE** - Marcellin / Lafarge Ciments
- HERAULT** - Gailhac / Lafarge Ciments
- INDRE-ET-LOIRE** - Villiers-sur-Beaulieu / Ciments Calcia
- ISÈRE** - La Pèze / Vicat
- Monestieu / Vicat
- Saint-Etienne-Vergape / Vicat

- JURA** - Pechfort-sur-Ménoon / Holcim France
- MARNE** - Courcel / Ciments Calcia
- MAYENNE** - Saint-Ferre-la-Osne / Lafarge Ciments
- MEURTHE-ET-MOSELLE** - Stavelot / Vicat
- MOSELLE** - Illange / Holcim France
- Hising / Holcim France
- Rasthain / Ciments Calcia
- NORD** - Desbaryes / Lafarge Aluminate
- PAS-DE-CALAIS** - Denain / Holcim France
- Lantiers / Holcim France
- PYRÉNÉES-ATLANTIQUES** - Basseau / Ciments de Bélar
- HAUT-RHIN** - Altkirch / Holcim France
- RHÔNE** - Val-d'Auxonne / Lafarge Ciments
- SAVOIE** - Chambéry / Vicat
- SEINE-MARITIME** - La Hève-Saint-Vigor / Lafarge Ciments
- DEUX-SEVRES** - Airvaux / Ciments Calcia
- YONNE** - Prangy / Lafarge Ciments
- YVELINES** - Saugerais / Ciments Calcia