

LE CIMENT

0. Définition

Le terme " ciment " est issu du latin *coementum* qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé ; il s'est toutefois restreint aux seuls liants dits hydrauliques – parce qu'ils sont capables de durcir sous l'eau –, dont le durcissement est dû aux réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de chaux.

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1 450 0C des mélanges de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland. D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles.

Il existe, en outre, des ciments spéciaux, tels les alumineux ou les sursulfatés. La principale utilisation du ciment est le béton, dont il est le composant actif, mais il entre aussi dans la composition des mortiers pour maçonneries ou pour enduits.

1. Historique

Dans la préhistoire et au début de l'Antiquité, les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélasgiques de Grèce ou les murs Incas. À Babylone, les maçonneries de briques étaient liées au bitume. Les Égyptiens utilisèrent pour les pyramides, notamment, un plâtre grossier produit par cuisson d'un gypse (sulfate de calcium) impur. Les Grecs furent parmi les premiers constructeurs employant la chaux obtenue par cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le Ier siècle avant J.-C., en l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendres volcaniques actives, soit artificielles comme les briques pilées. Ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Celui-ci permit de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports.

Aucun progrès ne fut accompli sur les liants pendant le Moyen Âge, dont les principales constructions – cathédrales, châteaux... – doivent leur réussite surtout aux progrès réalisés dans l'art de tailler et d'assembler les pierres.

C'est seulement au XVIIIe siècle, les procédés de cuisson s'améliorant, que des chaux hydrauliques, intermédiaires entre les chaux et les ciments, furent produites. En 1756, l'Anglais Smeaton, en mélangeant celles-ci avec des pouzzolanes, obtint un mortier aussi dur que la pierre de Portland. Cette élaboration fut reprise par ses successeurs. Ainsi fut introduite progressivement dans le langage l'appellation de ciment Portland.

En 1817, le Français Louis Vicat, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, les chaux hydrauliques, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur.

En 1824, l'Anglais Aspdin prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de Portland, mais celui-là comportait encore beaucoup de points obscurs. C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit. À la fin du XIXe siècle, en France, Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'Américain Bogue au XXe siècle.

En 1890, on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et, après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : le ciment alumineux fut découvert par Bied, en 1908.

2. Fabrication du ciment

Élaboration du clinker

Le constituant principal des ciments industriels actuels est le clinker, mot anglais signifiant " scorie ".

Le clinker est obtenu en cuisant, vers 1 450 0C, des mélanges appropriés de calcaire et d'argile, appelés crus. L'argile, principalement composée de silicates d'alumine, se scinde sous l'effet de la chaleur en ses constituants, silice et alumine, qui se combinent ensuite à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

La fabrication du ciment comporte tout d'abord une extraction du calcaire et de l'argile dans de grandes carrières, bien équipées mécaniquement. Des problèmes délicats sont parfois posés par les carrières peu homogènes ; dans les cimenteries modernes, ils sont résolus par la pré homogénéisation. Cette opération s'effectue dans de vastes hangars où le cru est rationnellement analysé et mélangé. Ce dernier est ensuite broyé très finement, les réactions chimiques qui se développent dans la zone de " clinkérisation " ne pouvant avoir lieu que pour des grains de quelques micromètres de grosseur. Le cimentier peut alors choisir entre quatre voies : humide, semi-humide, semi-sèche et sèche, voie la plus employée aujourd'hui.

Dans la voie humide, le cru est broyé et malaxé avec suffisamment d'eau (de 30 à 40 p. 100) pour constituer une pâte liquide. Ce procédé est simple et sûr, mais consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire ; c'est pourquoi on lui préfère, la fabrication par voie sèche. Le malaxage s'effectue mécaniquement dans de très grandes cuves cylindriques en béton, où le cru peut être corrigé chimiquement par des additions appropriées de calcaire ou d'argile et où une homogénéisation finale est assurée.

La voie semi-humide commence comme la précédente, puis le cru est débarrassé d'une partie de son eau dans des filtres-presses.

Dans la voie sèche, le cru est séché s'il y a lieu, puis broyé très finement après avoir été homogénéisé et, éventuellement, corrigé chimiquement dans de grands silos équipés pour un malaxage pneumatique ; il est introduit sous forme pulvérulente dans le four (figure). Dans la voie semi-sèche, il ne l'est qu'après avoir été aggloméré, sous forme de boulettes, dans de grands granulateurs.

On utilisait autrefois des fours droits dérivés des fours à chaux ; il en subsiste quelques-uns qui emploient la voie semi-sèche. Les fours modernes sont généralement tournants, constitués par de grands cylindres métalliques, tapissés intérieurement de réfractaires, ayant quelques mètres de diamètre et atteignant plus de 100 mètres de longueur. Ils sont légèrement inclinés et tournent lentement, de façon à faire progresser le cru introduit dans la partie haute. Une flamme alimentée au charbon pulvérisé, au fuel ou au gaz est allumée à l'autre extrémité du four. C'est à celle-ci qu'est recueilli le clinker, sous forme de nodules incandescents.

De profondes modifications chimiques des constituants du cru se produisent au fur et à mesure que la matière progresse dans le four. Le ferro-aluminate tétracalcique apparaît le premier, avec une consistance pâteuse ou liquide ; lorsque le fer est épuisé par cette réaction, il se forme de l'aluminate tricalcique fondu. Ces deux corps fondus constituent le liquide des fours à ciment. Celui-ci dissout la silice et la chaux qui se combinent alors et cristallisent sous forme de silicates de chaux ; ce phénomène progressif constitue la " clinkérisation ". Si la silice et la chaux existaient seules dans le cru, il faudrait chauffer bien davantage, au-dessus de la température de fusion de la silice (1 900 0C), pour obtenir la formation de silicates de chaux.

Des échangeurs de chaleur tant à l'amont qu'à l'aval du four permettent d'améliorer le bilan thermique de l'opération. Récemment, le processus de cuisson a été perfectionné par un apport de combustible, en amont du four rotatif. Ce procédé, dit de précalcination, permet de préchauffer la matière jusqu'à 800 0C et d'assurer une décarbonatation poussée, d'environ 85 p. 100. On peut ainsi réduire la taille des usines ou augmenter la production. Parallèlement, se poursuivent l'effort de réduction de la consommation de combustible et la conversion aux combustibles non pétroliers, tels le charbon ou les déchets de nature diverse. De puissants dépoussiéreurs électrostatiques, mis au point depuis quelques années, sont généralement installés à la base des cheminées d'évacuation des gaz, tandis que d'autres sont édifiés aux points critiques de l'usine ; l'industrie cimentière est maintenant devenue une industrie non polluante.

3. Obtention du ciment

Le clinker immergé n'est que très lentement attaqué par l'eau : la profondeur d'attaque est de l'ordre de 5 à 10 micromètres la première année et la vitesse de propagation de cette attaque diminue rapidement. Cela permet de stocker le clinker longtemps, même à l'air libre. Il faut que ce clinker soit broyé très finement pour obtenir un ciment actif.

Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, grands cylindres métalliques horizontaux, animés d'un mouvement de rotation autour de leur axe, et à moitié remplis de boulets d'acier.

Le clinker est introduit à l'une des extrémités avec un peu de gypse (de 3 à 5 p. 100), et l'on recueille le ciment, moulu par le choc des boulets, à l'autre extrémité. On distingue les broyeurs à circuit ouvert, dans lesquels le clinker n'effectue qu'un passage, et ceux à circuit fermé, dans lesquels le produit moulu est envoyé à la sortie dans un cyclone qui en sépare les éléments fins. Ceux-ci, qui constituent le ciment, sont envoyés au silo de stockage ; les autres éléments sont renvoyés à l'entrée du broyeur et recyclés.

La finesse de broyage du ciment est mesurée par sa surface spécifique, c'est-à-dire la somme des surfaces des grains contenus dans l'unité de masse. Elle est voisine de 3 200 cm²/g pour les ciments courants français ; elle atteint 3 700 cm²/g pour leurs équivalents américains.

La résistance des ciments hydratés, généralement exprimée par la résistance à la compression simple, est fortement influencée, surtout dans les premiers jours, par leur finesse. Mais les grandes finesesses présentent des inconvénients : le retrait après la prise est augmenté et le dégagement de chaleur est accentué dans les premiers jours.

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.

4. Prise et durcissement du ciment

Le mécanisme de durcissement du ciment est très différent de celui de la chaux. Le ciment durcit par hydratation des silicates et des aluminates de chaux, alors que la chaux durcit lentement à l'air en se carbonatant.

La chaux est obtenue par cuisson du calcaire, CO₃Ca, qui, vers 400 °C, perd son gaz carbonique et se transforme en chaux vive, CaO. Celle-ci doit d'abord être éteinte avec de l'eau, ce qui la transforme en chaux hydratée, Ca(OH)₂. Cette dernière réabsorbe alors lentement le gaz carbonique de l'air et reconstitue progressivement un calcaire tendre.

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique 3 CaO. SiO₂ ou, par abréviation, C₃S ; le silicate bicalcique 2 CaO. SiO₂ ou C₂S ; l'aluminate tricalcique 3 CaO. Al₂O₃ ou C₃A ; le ferro-aluminate tétracalcique 4 CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃ ou C₄AF.

L'élément noble du ciment est le silicate tricalcique, qui lui donne ses fortes résistances. La proportion de silicate tricalcique dans le ciment Portland, qui était de 50 p. 100 avant guerre, s'est progressivement accrue jusqu'à 60 p. 100, et atteint même actuellement 70 p. 100 dans certains ciments très résistants.

Par hydratation, les silicates tri- et bicalciques donnent du silicate monocalcique hydraté et dégagent de la chaux libre hydratée. Ce sont les cristaux de silicate monocalcique hydraté qui, en se fixant entre eux et aux granulats, confèrent au ciment sa résistance.

L'aluminate tricalcique donne, par hydratation, de l'aluminate monocalcique hydraté et dégage de la chaux libre hydratée. C'est aussi un élément actif de la résistance des ciments ; il contribue notamment beaucoup, par la rapidité relative de sa réaction, aux résistances dans les premiers temps. C'est également la première cristallisation du trisulfo-aluminate (ou ettringite) produite par l'hydratation de C₃A en présence de gypse, ainsi que des réactions physico-chimiques complexes qui sont à l'origine du raidissement de la pâte de ciment : ce qu'on appelle la prise du ciment (entre 1 h 30 et 6 h après le malaxage). L'hydratation de C₃A a, en revanche, l'inconvénient de dégager beaucoup de chaleur, et celui de favoriser sa combinaison avec les sulfates pour donner du sulfo-aluminate tricalcique ou sel de Candlot, dont la formation très expansive provoque la dégradation des bétons durcis. C'est là l'explication de l'attaque des bétons par l'eau de mer ou par les eaux séléniteuses, c'est-à-dire contenant du sulfate de calcium. Aussi, les ciments résistant à l'eau de mer sont-ils des ciments à faible teneur en aluminate de chaux.

Quant au ferro-aluminate tétracalcique, il s'hydrate, mais ne joue aucun rôle dans le durcissement du ciment. Le développement de ces réactions chimiques, qui vont se poursuivre durant plusieurs mois, assure le durcissement de la pâte de ciment et lui confère sa résistance mécanique.

Les différents types de ciment

Les principaux types de ciments (dans la classe 45) sont :

le ciment Portland pur	C.P.A.	contenant au moins 65 p. 100 de clinker, le reste étant du laitier, des cendres, de la pouzzolane ou du " filler "
le ciment Portland Composé	C.P.J.	
le ciment de hauts fourneaux	C.H.F	contenant entre 60 et 75 p. 100 de laitier
le ciment au laitier et aux cendres	C.L.C	qui contient de 25 à 60 p. 100 de clinker
le ciment de laitier au clinker	C.L.K	contenant au moins 80 p. 100 de laitier

Le C.L.K. est un ciment plus rustique que les autres, employé surtout pour les bétons de fondation ou faiblement sollicités. Il résiste très bien à l'action des eaux sulfatées.

D'autres types encore sont le ciment de laitier à la chaux (C.L.X.), le ciment à maçonner (C.M.), le ciment naturel (C.N.), le ciment sursulfaté (C.S.S.), les chaux hydrauliques naturelle (X.H.N.) et artificielle (X.H.A.), le ciment pouzzolanique, le ciment au laitier et à la pouzzolane, le ciment prompt (à prise très rapide).

5. Normalisation

L'Association française de normalisation (Afnor) a homologué de nombreuses normes concernant les ciments français. Elle a procédé à un classement des ciments, d'une part, par classe de résistance, d'autre part, par type de ciment (norme NF P 15-301).

Les classes de résistances sont fondées sur la résistance à la compression d'éprouvettes de mortier de ciment, conservées et essayées selon un processus d'essai défini. Trois classes principales sont fixées, désignées par leur résistance moyenne à 28 jours : 35, 45 et 55 mégapascals, plus une classe de haute performance H. P. Sauf la classe H. P., qui ne comporte que le seuil minimal de 55 mégapascals, les classes de résistance sont caractérisées par leurs limites inférieure et supérieure, de A 10 MPa par rapport à la valeur nominale moyenne.

Ainsi, la classe de résistance 45 correspond à des résistances comprise entre 35 et 55 mégapascals. Les sous-classes 45 R, 55 R et H.P.R. sont des ciments à durcissement rapide. Les caractères garantis les plus importants sont les valeurs minimales de résistances mécaniques à 28 jours et à 2 ou 7 jours (selon les classes).

Les ciments des classes 55 et H.P. sont surtout utilisés lorsque des résistances mécaniques élevées sont exigées. Les ciments 45 R, 55 R et H.P.R., sont employés lorsque des résistances initiales élevées sont nécessaires.

Un projet de norme européenne est l'objet de travaux du Comité européen de normalisation (C.E.N.). Ce projet comprend trois parties :

– types de ciments par composition ;

– spécifications ;

- vérification de la conformité aux normes.
- L'esprit des normes européennes est axé sur l'obtention de performances plus que sur la composition, qui ne diffère pas sensiblement de ce qui existe dans la norme Afnor. En ce qui concerne les résistances, le projet prévoit deux classes correspondant sensiblement aux classes 45 et 55 de la norme française, avec une sous-classe R garantissant des résistances à 2 jours : 10 et 20 mégapascals respectivement. Ces normes sont complétées par les spécifications physiques – temps de prise, expansion – et chimiques peu différentes de celles de la norme française.

Il faut enfin préciser que les normes étrangères les plus utilisées actuellement sont les normes américaines A.S.T.M., les normes allemandes D.I.N., et les normes anglaises B.S.A.

6. Utilisations

Le domaine essentiel d'utilisation du ciment est constitué, nous l'avons dit, par le béton et ses applications et, dans une bien moindre mesure, par les mortiers. Nous considérerons donc ici seulement le béton.

À partir des différentes catégories de ciment et de leur dosage, il est possible d'obtenir une infinité de bétons aux caractéristiques pouvant varier en fonction de la nature des granulats, de leur mélange, des colorants, des adjuvants, de la mise en œuvre, des traitements ultérieurs, etc. Ainsi, le béton s'adapte aux exigences de chaque réalisation par ses performances comme par son aspect : on peut lui demander une résistance mécanique aux chocs, à l'usure, aux agents agressifs, ainsi que des caractéristiques de légèreté, lourdeur, isolation thermique et/ou phonique, étanchéité, durabilité, bel aspect...

À côté des bétons " courants ", que l'on utilise pour de très nombreux ouvrages : fondations, structures, murs, ouvrages industriels, ponts... on peut disposer de bétons " légers ", de 0,400 à 1,700 t/m³, qui ont des propriétés isolantes, ou de bétons " lourds ", de 2,8 à 6,0 t/m³ que l'on emploie dans des fonctions de lestage ou de protection, aussi bien mécanique pour des chambres fortes que vis-à-vis des rayonnements nucléaires. Les bétons peuvent aussi être conçus pour rester " apparents " ; leur composition est alors soigneusement étudiée, et ils reçoivent généralement un traitement de surface pour mettre en valeur les teintes des ciments ou l'éclat des granulats.

Répondant à la fonction d'étanchéité, des bétons peuvent être " étanches " pour les travaux dits hydrauliques : canaux, châteaux d'eau, piscines, stockage, etc. L'évolution des techniques a conduit à l'apparition des bétons de hautes performances, dont les résistances peuvent être de trois à cinq fois, ou plus, supérieures à celles des bétons classiques ; leur intérêt réside alors dans l'allègement des grandes structures – immeubles de grande hauteur ou franchissement –, là où le poids propre joue un rôle prépondérant. Les " bétons de fibres " constituent également un champ d'application qui fait partie du vaste domaine des matériaux composites. Les fibres sont de verre, d'acier, de polypropylène, voire de carbone, apportant chacune des caractéristiques particulières qui font l'objet de nombreuses études.

Le béton, application majeure du ciment, fait partie de notre cadre de vie. Il est présent dans tous les types de construction, qu'il s'agisse de logements, d'écoles, d'hôpitaux, de bureaux, d'usines, d'ateliers, de commerces... Il est aussi présent dans de nombreuses applications routières ou d'aménagement – routes à faible trafic, autoroutes, glissières de sécurité, sols urbains, zones piétonnes – et aussi, bien entendu, dans de grands ouvrages tels que les ponts, les grands complexes industriels et de production d'énergie, ou les grandes édifices publics.

7. Aspects économiques

Distribution

L'industrie du ciment est une industrie lourde, qui fabrique en grandes quantités un produit pondéreux et bon marché : le prix, en 1987, suivant la qualité, varie de 450 à 550 francs la tonne au départ de l'usine, en France. Le ciment ne peut donc pas supporter de gros frais de transports, au maximum ceux qui correspondent à 100 km par camion ; aussi, dans un pays comme la France, les cimenteries ont-elles dû être réparties dans tout le pays, en tenant compte des gisements de matériaux et, surtout, des marchés de consommation. Les gisements de calcaire sont heureusement bien répartis sur la plus grande partie du territoire, notamment près des centres de forte consommation.

Cependant, le progrès industriel conduit à construire des cimenteries de plus en plus puissantes. La taille minimale, du point de vue économique, semble se situer, en France, au voisinage de 300 000 tonnes de production annuelle. Les plus grosses cimenteries françaises ne dépassent pas 2 millions de tonnes, contre 6 millions au Japon.

Le ciment est stocké dans des silos, généralement installés dans les cimenteries et alimentés depuis les broyeur par voie pneumatique. Il existe en outre, en France, quelques postes de distribution intermédiaires qui reçoivent, par chemin de fer, leur ciment venant des cimenteries.

Depuis les silos de stockage, le ciment peut être livré en sacs ou en vrac. L'ensachage, dans des sacs en papier spéciaux, s'effectue mécaniquement. Les sacs remplis sont alors chargés mécaniquement aussi, soit sur des camions, soit sur des wagons, ou encore sur des péniches. Les sacs ont une masse uniforme de 50 kilogrammes, ce qui facilite leur manipulation à l'arrivée.

Sur les chantiers assez importants, le ciment est apporté en vrac, dans des conteneurs, des camions ou des wagons spéciaux ou encore dans des bateaux étanches. Les manipulations du ciment s'effectuent alors pneumatiquement, par des conduites rigides ou flexibles. En France, la proportion de ciment livré en vrac, après avoir atteint près de 70 p. 100, se stabilise maintenant à environ 60 p. 100, du fait de la multiplication des petits chantiers.

Le transport du ciment en vrac par voie maritime est assez rare, malgré le faible coût du fret, parce qu'il nécessite des bateaux spécialement équipés et, surtout, des installations portuaires importantes. En revanche, le transport des clinkers bruts, qui ne nécessite aucune précaution particulière, semble prendre une certaine extension.

L'évolution de la production du ciment, exprimée en millions de tonnes, entre 1974 et 1990, dans les dix pays producteurs les plus importants (cf. tableau) met en évidence la place prépondérante de la Chine et de l'Union soviétique, dans la production mondiale. Par ailleurs, on ne peut que remarquer la très forte progression de pays dont les besoins sont considérables, tels la Chine et l'Inde, et, dans le même temps, des croissances significatives pour des pays industrialisés, comme le Japon et l'Italie, dont les besoins sont différents. D'une manière générale, il ne s'avère pas possible de relier les

évolutions à des phénomènes économiques ou sociaux précis.

Évolution des techniques de fabrication

Les consommations (en kilogrammes par tête) varient en 1986 entre 250 et 800 dans les pays industriels ; elles restent très faibles dans certains pays : 30 en Inde, par exemple.

Pendant longtemps, la fabrication du ciment a relevé d'une technique rustique et manuelle, exigeant donc une main-d'œuvre abondante. Depuis la Seconde Guerre mondiale, une forte évolution a conduit à la mécanisation des cimenteries et, même, à l'automatisation des plus modernes. Dans ces dernières, toutes les manœuvres, les réglages des fours, des broyeurs et de tous les organes tendent à être faits mécaniquement et commandés automatiquement par des dispositifs électroniques. Dans certaines cimenteries, ce sont même des ordinateurs qui règlent le fonctionnement des appareils, en fonction, d'une part, des programmes fixés, d'autre part, des renseignements fournis par des capteurs disposés en certains points des machines et mesurant les températures, les pressions, les débits, les compositions chimiques.

Cette évolution vers l'automatisation a entraîné une amélioration de la qualité et, surtout, de la régularité des ciments. Elle a causé aussi un accroissement important de la productivité : si, avant la Seconde Guerre mondiale, la production annuelle française de 4 millions de tonnes exigeait l'emploi de 30 000 travailleurs, en 1990 un tonnage de 26,4 millions de tonnes est produit par 7 500 salariés. Les cimenteries automatisées emploient un personnel peu nombreux, mais hautement spécialisé.

Les pays en voie de développement cherchent à créer sur leur territoire une industrie cimetièrre. Cette tendance s'explique par l'importance des frais de transport par rapport au prix du ciment ; toutefois, une telle création ne peut se justifier économiquement que pour des consommations annuelles supérieures à un certain seuil, qui est de l'ordre de 100 000 tonnes dans des conditions favorables ; c'est le cas du Sénégal ou du Niger, par exemple.

Une solution intermédiaire, souvent plus économique consiste à importer le clinker et à créer sur place des installations de broyage, de stockage et de distribution.