

Ciments

par Joseph ABDO

*Docteur ingénieur de l'École des mines de Paris et ingénieur de l'École nationale
des ponts et chaussées
Directeur délégué Routes, Cimbéton, Paris*

1. Ingrédients du ciment	C 920 - 2
2. Découverte du ciment.....	— 2
3. Naissance de l'industrie cimentière.....	— 2
4. Différents types de ciment.....	— 4
5. Fabrication	— 4
6. Composition, hydratation, prise et durcissement	— 6
7. Principales caractéristiques du ciment	— 7
8. Progrès issu de la recherche.....	— 8
9. Normalisations.....	— 8
10. Caractéristiques et emplois des ciments	— 12
11. Conclusion.....	— 16
Pour en savoir plus	Doc. C 920

Le ciment est un « liant hydraulique ». Par « liant », il est sous-entendu une matière susceptible d'en agglomérer d'autres. Le qualificatif « hydraulique » précise, d'une part, que ce liant durcit à froid par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif et, d'autre part, qu'il durcit, non seulement dans l'air, mais également dans l'eau.

Notons au passage qu'un liant « pouzzolanique » a besoin d'une activation pour acquérir ce caractère d'hydraulicité. La substance qui va jouer le rôle d'actif est le plus souvent de la chaux (chaux ajoutée ou libérée par la réaction de prise d'un liant hydraulique). En d'autres termes, un liant pouzzolanique activé à la chaux ajoutée est un liant hydraulique. Mais aussi, un liant pouzzolanique, mélangé à un liant hydraulique, devient-il un liant hydraulique du fait de la chaux libérée par la réaction de prise du liant hydraulique.

Mélangé à certains sols ou granulats, et en présence d'eau, le ciment crée progressivement une cohésion croissante au sein du mélange qui se traduit par l'obtention de matériaux rigides et durs à performances mécaniques élevées, compatibles avec les exigences souhaitées d'un matériau de construction. En fonction de la nature des constituants utilisés et de leurs proportions dans les mélanges réalisés, cette poudre magique qu'est le ciment permet la mise au point d'une grande variété de produits répondant ainsi aux besoins des concepteurs, des utilisateurs et des exploitants des ouvrages, ceci dans des domaines aussi divers que le bâtiment, les ouvrages d'art, le génie civil et les routes. À cet égard, on peut citer le béton (ou plutôt les bétons), matériau de construction le plus utilisé dans le monde, mais aussi tous les matériaux traités aux liants hydrauliques employés dans la construction des infrastructures de transport (routes, chaussées, terrassements, plate-formes industrielles ou aéroportuaires, etc.).

À ce stade, deux questions viennent naturellement à l'esprit du lecteur : « De quoi est fait un ciment ? » et « Comment l'homme a-t-il découvert le ciment ? »

1. Ingrédients du ciment

Minéralogiquement parlant, le ciment est fait essentiellement à partir de quatre constituants :

- la **chaux** CaO (désignation simplifiée « C ») plutôt basique ;
- la **silice** SiO_2 (désignation simplifiée « S ») ;
- l'**alumine** Al_2O_3 (désignation simplifiée « A ») ;
- l'**oxyde de fer** Fe_2O_3 (désignation simplifiée « F ») plutôt acide.

■ Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. En effet, la chaux CaO se carbonate facilement en absorbant le gaz carbonique de l'air, pour devenir de la roche calcaire, en abondance dans la nature. Les trois oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) abondent dans la nature sous forme cristallisée et stable (sable, argiles, etc.). Ils doivent donc subir un traitement approprié pour les amener dans un état de réactivité. Sans ce traitement, rien ne se passe ou, au mieux, peu de choses.

En effet, et le lecteur pourra en faire le test, un mélange de calcaire (source de chaux), de sable (source de silice) et d'eau ne durcira jamais. Un mélange de calcaire (source de chaux), d'argile (source de silice, d'alumine et d'oxyde de fer) et de l'eau donnera, certes, de la marne, mais aucune modification des propriétés physiques et mécaniques du mélange. En revanche, un mélange de chaux CaO (obtenue par décarbonation du calcaire CaCO_3 vers 900 °C) et d'argile réagit, car on note des modifications géotechniques du mélange et une lente montée des caractéristiques mécaniques dont le niveau final reste faible. Mieux encore, un mélange de chaux, de laitier ou de cendres volantes et d'eau voit une montée lente et progressive des résistances mécaniques qui, à long terme, peuvent atteindre des niveaux élevés.

En fait, pour que la réactivité du mélange soit effective, il faut que les quatre ingrédients de base aient subi un traitement thermique.

Le calcaire CaCO_3 se décarbonate à environ 900 °C pour donner de la chaux vive CaO , matière réactive ; les trois oxydes perdront leurs structures cristallines stables vers 1 450 °C au profit de structures amorphes plutôt réactives.

■ Pratiquement parlant, le **ciment portland artificiel** [1] résulte :

- de la cuisson à 1 450 °C d'un mélange de calcaire CaCO_3 (source de CaO) et d'argile (source de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3), qui donne ce que l'on appelle le « *clinker* » ;
- du broyage du *clinker* afin d'obtenir une poudre très fine et réactive.

On peut aussi fabriquer des ciments en effectuant des mélanges en proportions diverses de :

- *clinker* ; roches silico-calcaires activées thermiquement dans les fours cimentiers ;
- laitier, gangue silico-alumineuse du minerai de fer et fondant calcaire activé dans le haut-fourneau ;
- cendres volantes, cendres silico-alumineuses ultrafines, issues de la combustion des charbons schisteux brûlés en centrales thermiques. Activées également à haute température, la plupart des cendres volantes manque toutefois de chaux dans leur composition (les cendres volantes dites « sulfo-calciques » échappent à cette remarque).

■ La réactivité à l'eau de ces trois composants est fort différente. Le *clinker* est à cinétique rapide, le laitier est à cinétique normale, tandis que la cinétique des cendres volantes dépend de l'activant utilisé :

- très lente quand l'activant est un ciment car tributaire de la chaux libérée par le *clinker* durant son hydratation ;
- plus rapide dans le cas où l'activant est de la chaux.

Si la cinétique est différente, le résultat final, en matière de performances mécaniques, est quasiment le même, sauf qu'il sera atteint à des échéances différentes.

2. Découverte du ciment

À vrai dire, c'était une très longue histoire qui a duré des millénaires.

Si les premiers hommes s'abritaient dans les grottes ou les cavernes, l'homme préhistorique bâtissait déjà de vastes huttes avec des murs en torchis supportés par une armature en bois. L'argile qui durcit en séchant est, très probablement, le premier liant utilisé par l'homme, mais le caractère réversible de ses propriétés qui rend très sensible à l'eau les torchis obtenus a dû être l'un des premiers casse-tête de nos lointains ancêtres.

Vers le 4^e millénaire avant notre ère, les égyptiens gâchaient à l'eau le premier véritable liant minéral : un plâtre grossier obtenu par calcination du gypse.

Plus tard, les grecs, puis 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 vive CaO , obtenue par cuisson de calcaire, 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 [2].

Après les romains, la technologie des liants hydrauliques se perdit complètement jusqu'en 1756, lorsque John Smeaton découvrit que les chaux les plus hydrauliques, donc celles effectuant les meilleures prises, sont obtenues à partir d'un mélange de calcaire et d'argile et non, comme on le croyait depuis toujours, de calcaire pur. En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexplicée 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.

3. 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 :

- 1880 : 100 000 t ;
- 1920 : 800 000 t ;
- 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 2006, elle était de 24 Mt.

■ Le **ciment d'aujourd'hui** est un produit très élaboré, aboutissement de technologies très avancées.

La cimenterie de jadis a fait place, de nos jours, à des usines de plus en plus automatisées. En particulier, la préhomogénéisation du cru permet de reconstituer en quelque sorte une carrière idéale, gage de fabrication d'un produit toujours plus constant. Une salle

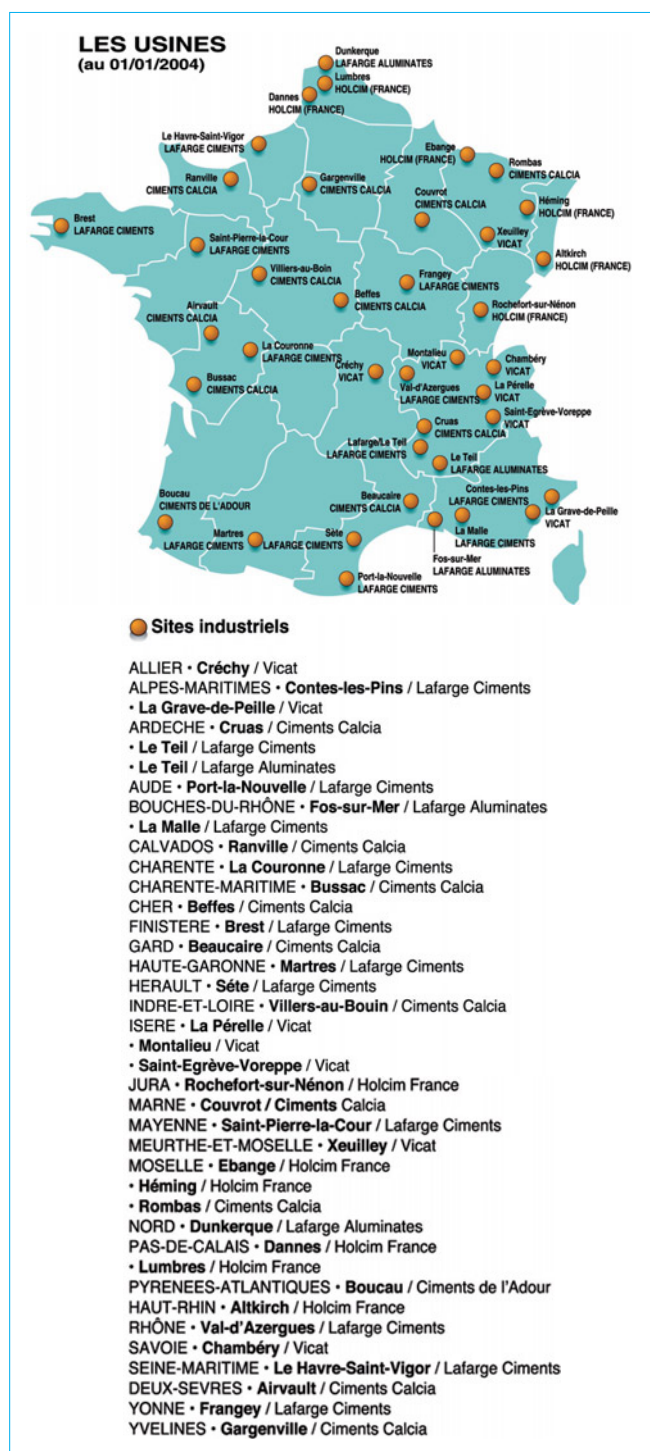


Figure 1 – Les sites industriels de production des ciments en France (Source SFIC 2004)

de contrôle centralisée perçoit la vie entière de la cimenterie. Tous les paramètres de fabrication sont enserrés dans des limites étroites et des organes de régulation viennent déclencher, si nécessaire, des séquences correctives.



Figure 2 – Vue aérienne d'une cimenterie

Parallèlement, les laboratoires de l'industrie cimentière disposent de moyens de recherche toujours accrus et d'instruments de contrôle toujours plus perfectionnés qui garantissent la régularité dans le temps de la qualité du ciment (figures 1 et 2).

■ En outre, l'industrie cimentière, consciente de l'enjeu stratégique et universel du développement durable, a été parmi les premières à mettre en œuvre, au niveau du processus de fabrication, un engagement volontaire de réduction des impacts environnementaux. En effet, produits industriellement à partir de ressources naturelles abondantes, l'argile et le calcaire, le ciment nécessite beaucoup d'énergie pour sa fabrication (1 450 °C). Pour minimiser les émissions de gaz à effet de serre, l'industrie cimentière a donc été parmi les premières à mettre en œuvre, au niveau national, un engagement volontaire de réduction des émissions, et poursuit son action à travers l'AERES (Association d'entreprises pour la réduction de l'effet de serre) fondée en octobre 2002. (*)

Nota (*) : pour la période 1990-2000, l'industrie cimentière s'est engagée à réduire de 10 % les émissions de CO₂ à la tonne de ciment, et de 25 % les émissions totales de CO₂ liées à la consommation de combustibles fossiles.

Cet objectif a été largement dépassé : plus de 20 % pour le premier objectif et, environ, 40 % pour le second.

Pour y parvenir, les gestionnaires de sites recourent, de plus en plus massivement, à des combustibles de substitution, déchets d'autres industries qui auraient été éliminés de toute façon sans être valorisés (pneus, huiles usagées, solvants, matières plastiques, cartons, boues d'épuration, farines animales, etc.), moyennant des adaptations très coûteuses, comme les filtres disposés sur les cheminées retenant les poussières et les polluants résiduels qui n'auraient pas été éliminés par la chaleur du four. L'efficacité énergétique des installations a également été améliorée (dispositif d'injection des combustibles plus performants, systèmes de régulation améliorant le rendement de la cuisson, préchauffage des matières premières avec les gaz de combustion).

■ Une autre contribution à un développement durable, et en particulier son volet social, est la mise en place au niveau des cimenteries de commissions de concertation avec les riverains, les élus, les associations, pour répondre aux interrogations, recueillir les requêtes et trouver des solutions pour y remédier.

Ces structures de concertation sont devenues indispensables pour accompagner, le mieux possible et dans la transparence vis-à-vis des populations, les projets d'extension, ainsi que de réhabilitation paysagère d'anciennes carrières. Ces dossiers gagnent en pertinence avec l'intervention d'associations spécialistes de la faune et de la flore. L'information du public et la concertation avec les riverains sur les choix industriels illustrent la politique de transparence de l'industrie cimentière.

4. Différents types de ciment

■ Le **ciment anhydre** est un mélange intime réalisé, soit avant, soit après broyage d'un ou de plusieurs constituants :

- des produits spécialement fabriqués à cet effet (*clinker*) ;
- des sous-produits d'autres industries (laitiers, cendres volantes) qui subissent, en vue de leur incorporation dans les ciments, une sélection et une préparation plus ou moins élaborée ;
- des produits naturels qui, en vue de leur incorporation dans les ciments, ne subissent pas d'autre traitement qu'un séchage et une pulvérisation (*fillers*, pouzzolanes naturelles).

Ces constituants apportent :

- soit des propriétés hydrauliques ;
- soit des propriétés pouzzolaniques ;
- soit des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité...).

Certains constituants peuvent avoir plusieurs de ces propriétés, à un degré plus ou moins développé.

■ Ainsi, en fonction de la nature des constituants utilisés et de leur dosage, **il existe une grande variété de types de ciments**. On peut citer :

- les **ciments courants** (§ 5.2) ;
- les **ciments adaptés à des usages spécifiques** (§ 5.3) ;
- les **ciments blancs** (§ 5.4) ;
- les **ciments spéciaux** [1] (§ 5.5) ;
- les **liants hydrauliques routiers** (§ 5.6).

5. Fabrication

5.1 Fabrication du *clinker*

Le constituant principal des ciments est le *clinker* obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % et 20 %.

Les différentes étapes de sa fabrication, illustrées sur la figure 3, sont décrites ci-après (voir aussi [3]).

5.1.1 Extraction et concassage

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

5.1.2 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.

5.1.3 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 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

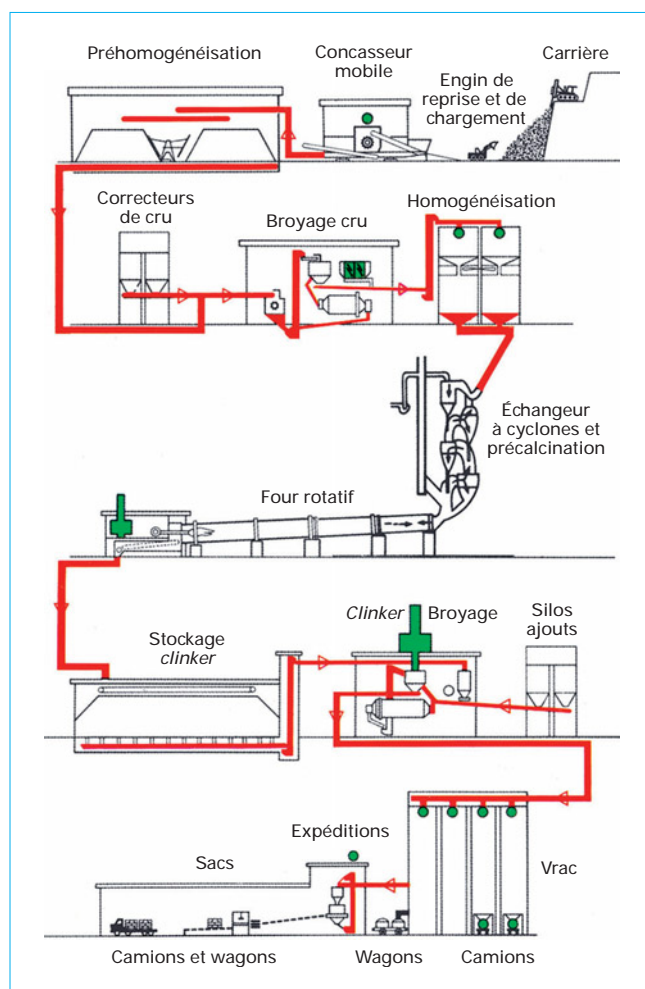


Figure 3 – Schéma de fabrication du ciment par voie sèche

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 présentant la finesse requise. Cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

5.1.4 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). Ces techniques, consommatrices d'énergie, ont été progressivement abandonnées en France au profit de la voie sèche.

5.1.5 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 provenant du four et circulant à contre

courant, 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 silice, d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium (figure 4).

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, 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.

5.1.6 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 (figure 5).

5.2 Fabrication des ciments courants

Le ciment courant est fabriqué par mélange et cobroyage de *clinker* et d'autres constituants minéraux avec une certaine quantité d'un sulfate de calcium, comme le gypse, nécessaire pour réguler la prise. Les constituants minéraux susceptibles d'entrer dans la composition des ciments courants sont :

- *clinker* « K » ;
- laitier granulé de haut-fourneau « S » ;
- fumée de silice « D » ;
- pouzzolanes naturelles « Z » ;
- cendres volantes siliceuses « V » ;
- cendres volantes calciques « W » ;
- schistes calcinés « T » ;
- calcaires « L » ;
- *fillers* (constituant secondaire) « F ».

Outre ces constituants, **les ciments courants peuvent contenir des constituants secondaires et des additifs.**

Les constituants secondaires peuvent être, soit l'un des constituants minéraux cités ci-dessus, soit une autre matière minérale (appelée « *filler* ») choisie et préparée pour améliorer les propriétés physiques du ciment. Leur teneur est inférieure à 5 % du total (sulfate de calcium et additifs exclus).

Les additifs sont ajoutés pour faciliter la fabrication du ciment, ou pour améliorer ses propriétés. Leur teneur est inférieure à 0,5 % en masse dans tous les ciments, à l'exception des ciments de type III et des liants hydrauliques routiers pour lesquels cette teneur est portée à 1 % (§ 5.6).

5.3 Ciments adaptés à des usages spécifiques

Pour certains types d'ouvrages, des propriétés complémentaires des ciments courants peuvent être requises et, en particulier, la résistance aux sulfates (en solution dans l'eau de mer, dans les eaux usées et dans les sols gypseux).

En l'absence de ciment adapté, les sulfates peuvent pénétrer dans le béton et réagir avec l'aluminat tricalcique hydraté et la chaux



Figure 4 – Vue d'un four horizontal rotatif

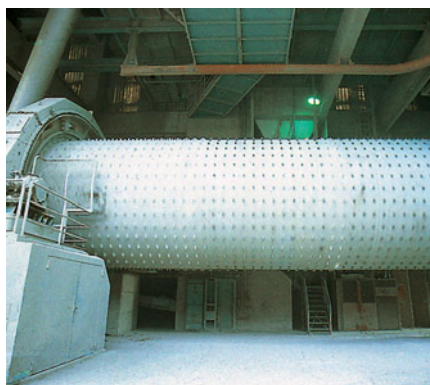


Figure 5 – Vue d'un broyeur

libre pour former un sel expansif « l'ettringite » capable de provoquer des dégradations dans le béton. Ces propriétés complémentaires des ciments courants font l'objet de normes spécifiques.

5.3.1 Pour travaux en mer (PM)

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux agressions chimiques liées à l'environnement marin. L'emploi de ciments présentant des caractéristiques adaptées de résistance à ces agressions est donc nécessaire.

Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

5.3.2 Pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES)

Les eaux séléniteuses constituent un milieu particulièrement agressif, qui nécessite l'emploi de ciments spécifiques. Ces ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

5.3.3 À teneur en sulfures limitée (CP)

Ces ciments se caractérisent par des teneurs en sulfures inférieures à une valeur donnée.

Ils sont destinés aux ouvrages en béton précontraint. Ils comportent la mention CP sur l'emballage et le bon de livraison.

5.4 Ciments blancs

Les ciments blancs sont des ciments courants, mais qui bénéficient en plus d'une garantie de blancheur de la part du fabricant. La blancheur est obtenue en réduisant les quantités d'oxydes colorants dans les ciments et, tout particulièrement, l'oxyde de fer.

La fabrication des ciments blancs nécessite donc des matières premières très pures (calcaire et kaolin).

5.5 Ciments spéciaux

5.5.1 Ciment d'aluminates de calcium

Le ciment d'aluminates de calcium, appelé en France « ciment alumineux fondu » [1], est un liant hydraulique riche en alumine dont le principal constituant est l'aluminat monocalcique CaO , Al_2O_3 (CA en désignation simplifiée).

Il diffère des ciments courants par :

- un développement rapide des résistances : son temps de prise est compris entre 2 h 30 et 3 h 30. Mais, dès la fin de prise, sa résistance à la compression, mesurée sur un mortier préparé avec un rapport E/C égal à 0,40, augmente très rapidement pour atteindre environ 40 MPa à 6 h ;
- une bonne tenue aux milieux agressifs car il ne libère pas de chaux pendant son hydratation, ce qui confère au béton une bonne tenue aux eaux pures, aux eaux sulfatées et à l'eau de mer.

5.5.2 Ciment prompt naturel

Le ciment prompt naturel (CNP) est un ciment siliceux, formé entre 800 et 1 200 °C, dont les phases hydrauliques sont le silicate dicalcique, un aluminat de calcium riche en alumine et un sulfoaluminat de calcium.

Le ciment prompt naturel résulte de la cuisson, à température modérée, d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin. Cette fabrication particulière entraîne la formation de constituants caractéristiques, avec la présence de silicates de calcium, essentiellement sous forme de silicate dicalcique actif, d'aluminat de calcium riche en alumine et de sulfoaluminat de calcium qui est une spécificité de ce ciment.

La composition minéralogique du ciment prompt naturel lui confère des propriétés particulières de prise rapide (de quelques minutes à une demi-heure), de durcissement rapide et de résistance aux eaux acides.

Pour que les phases minérales spécifiques du ciment prompt naturel se forment, la température de cuisson de la matière première, appelée « pierre », doit être comprise entre 800 et 1 200 °C, ce qui est possible en four droit. Ces températures sont bien en dessous de la température de clinkérisation des ciments Portland (1 450 °C). Il n'y a donc que peu de phase liquide lors de la cuisson de la pierre.

La recombinaison des éléments étant beaucoup moins facile à l'état solide qu'à l'état liquide, **tous les composants nécessaires à la formation des phases spécifiques doivent être présents en mélange intime dans la matière première et, ceci, dans des proportions bien définies.**

Cette spécificité de composition se retrouve dans le calcaire argileux d'un banc géologique du crétacé. Celui-ci est exploité dans deux endroits dénommés « La Pérelle », dans le massif de la Char treuse, et « Les Combes », à Saint-Martin-le-Vinoux, au nord de Grenoble (figure 1).

Les pierres cuites sont broyées à une finesse Blaine (cf. § 7.1.1) de 7 600 cm²/g. Du gisement au produit fini, aucun ajout n'est effectué, d'où son appellation de ciment naturel.

La production annuelle est de 140 000 tonnes, dont la moitié est exportée.

5.5.3 Ciments à maçonner

Mélangés avec du sable et de l'eau, sans addition d'autres matériaux, ces ciments produisent des mortiers à maçonner qui conviennent aux travaux d'enduits intérieurs et extérieurs, ainsi qu'aux travaux de montage par jointoiement de blocs et de briques. L'élément actif de ces ciments est le *clinker* Portland, comme pour les ciments courants.

5.6 Liants hydrauliques routiers

En dehors des ciments courants, se sont développés, depuis maintenant de nombreuses années, des liants dénommés « liants hydrauliques routiers » mis au point spécialement pour une utilisation en traitement des sols en place ou en centrale et pour la confection de matériaux d'assise de chaussée.

Ce sont des liants composites obtenus par mélange et/ou broyage de *clinker* ou de co-produits de l'industrie (laitiers, cendres volantes, etc.) et, éventuellement, d'activants. Ces liants ne conviennent pas à la confection des bétons.

6. Composition, hydratation, prise et durcissement

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux :

- le silicate tricalcique $3 CaO, SiO_2$ (ou, par abréviation, C_3S) ;
- le silicate bicalcique $2 CaO, SiO_2$ (ou C_2S) ;
- l'aluminat tricalcique $3 CaO, Al_2O_3$ (ou C_3A) ;
- l'alumino-ferrite tétracalcique $4 CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$ (ou C_4AF).

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont **extrêmement complexes**.

Par hydratation, les silicates tricalcique C_3S et bicalcique C_2S donnent du silicate monocalcique hydraté CSH, ainsi que de la chaux libre hydratée CH dite « portlandite », formant un gel micro-cristallin à l'origine du phénomène dit « de prise » (voir [4]).

Ce sont les cristaux de silicate monocalcique hydraté qui, en se fixant entre eux et aux constituants du matériau où ils ont pris naissance, confèrent à ce dernier sa résistance. C'est le développement

et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le matériau durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures.

L'aluminat tricalcique C_3A donne quant à lui, par hydratation, de l'aluminat monocalcique hydraté, ainsi que de la chaux libre hydratée. L'aluminat monocalcique hydraté joue un rôle important dans le développement des résistances. Il contribue, par la rapidité relative de sa réaction, à la montée des résistances aux jeunes âges. Mais, il a l'inconvénient d'être accompagné d'un fort dégagement de chaleur et, surtout, celui de pouvoir se combiner avec les sulfates (s'ils sont présents dans le milieu environnant) pour donner du sulfo-aluminat tricalcique sous forme d'**aiguilles d'ettringite** qui conduisent à des gonflements dans le béton et, par la suite, à des dégradations dans la structure.

Quant à l'alumino-ferrite tétracalcique, son hydratation ne joue aucun rôle dans le durcissement du ciment.

Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives.

6.1 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.

6.2 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.

6.3 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 de croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

7. Principales caractéristiques du ciment

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 européenne NF EN 196-1) (Voir [Doc. C 920]).

7.1 Caractéristiques de la poudre

7.1.1 Surface spécifique (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment et se caractérise par la surface spécifique, ou surface développée, totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme européenne 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 (7 600 cm^2/g pour le ciment prompt naturel).

7.1.2 Masse volumique apparente

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

7.1.3 Masse volumique absolue

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3 150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

7.2 Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal »

7.2.1 Début de prise

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat – aiguille de 1 mm^2 de section et pesant 300 g – ne s'enfonce plus complètement au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme européenne NF EN 196-3 (figure 6).

Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou à 1 heure.

7.2.2 Expansion

Elle se mesure suivant un essai normalisé (norme européenne 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 européenne NF EN 197-1).

7.2.3 Résistances mécaniques

Elles sont mesurées sur éprouvettes de mortier normal et 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.



Figure 6 – Aiguille de Vicat

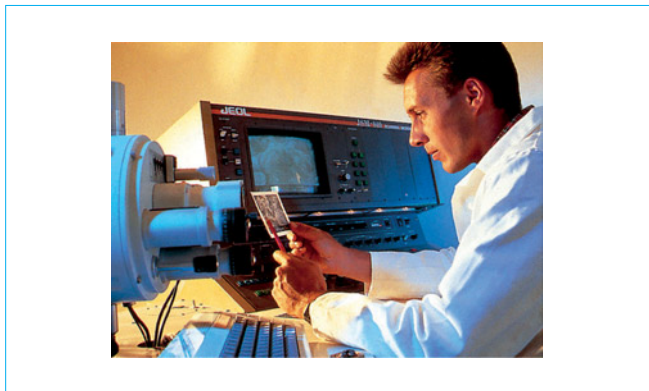


Figure 7 – La recherche sur les ciments fait appel à un appareillage très moderne

8. Progrès issu de 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, ciments à faible émission de poussière, ciments autonettoyants et dépolluants, etc. (figure 7).

9. Normalisation des ciments

9.1 Historique de la normalisation européenne

Les travaux de normalisation européenne dans le domaine des ciments ont débuté en 1969, de façon totalement volontaire, entre les six pays signataires du traité de Rome. À partir de 1973, les travaux ont été poursuivis dans le cadre du CEN, au sein du comité technique 51 (ciment et chaux de construction). L'objectif des travaux était double : élaborer des normes d'essais communes pour tous les pays membres et rédiger des normes de spécifications de produits.

Les normes d'essais ont été adoptées en 1987 et 1989. Dès 1990, les performances de tous les ciments ont donc été évaluées de la même façon dans tous les pays membres du CEN, ce qui a constitué un pas décisif pour la simplification des échanges transfrontaliers.

L'adoption, en 1989, de la directive produits de construction (DPC) a entraîné le rejet d'un projet de norme de spécifications qui ne s'appliquait pas à tous les ciments traditionnels et éprouvés.

Le CEN/TC 51 a ensuite repris ses travaux et inclut tous les ciments dans le texte qui a été adopté comme prénorme ENV 197-1, en 1992. De nombreux pays ont alors révisé leurs normes nationales pour reprendre très largement, voire totalement, les dispositions de cette prénorme. En particulier la France qui publia, en 1994, la norme NF P 15-301 relative aux ciments courants, laquelle reprenait le texte de la prénorme européenne en maintenant certains aspects de la norme française de 1981.

La même démarche, effectuée simultanément dans les différents pays de l'UE, a permis d'accomplir l'essentiel du chemin vers une norme européenne. Le dernier pas a été franchi avec l'adoption, le 21 mai 2000, du projet de norme EN 197-1 à l'unanimité des pays membres du CEN. La norme EN 197-1 est la première norme européenne harmonisée adoptée dans le cadre défini par la DPC.

Depuis le 1^{er} avril 2002, dans tous les états membres, les ciments courants mis sur le marché sont conformes à la norme EN 197-1 et portent le marquage CE sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac.

La norme européenne EN 197-1 est publiée par l'AFNOR sous la référence **NF EN 197-1** : « **Ciment – partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants** ».

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon leur composition (voir tableau 1) :

- CEM I – ciment Portland ;
- CEM II – ciment Portland composé ;
- CEM III – ciment de haut-fourneau ;
- CEM IV – ciment pouzzolanique ;
- CEM V – ciment composé.

9.2 Ciments de la norme européenne NF EN 197-1 (ciments courants)

La norme NF EN 197-1 concerne les ciments courants. D'autres normes existent relativement à, soit des propriétés particulières (prise mer, résistance aux eaux sulfatées ...), soit des ciments ayant des normes spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel et liants hydrauliques routiers. La norme NF EN 197-1 est subdivisée en trois rubriques :

- la **première partie est descriptive**, elle définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments courants ;
- la **deuxième partie fixe les classes de résistance**, les spécifications mécaniques et physico-chimiques ;
- la **troisième partie est consacrée aux critères de conformité**, aux fréquences d'essais et aux valeurs limites.

9.2.1 Définition d'un ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation. Après durcissement, elle conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituant(s).

9.2.2 Constituants du ciment

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- **hydrauliques**, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
- **pouzzolaniques**, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables ;
- **physiques**, qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.).

■ **Clinker Portland (K)**

Le *clinker* Portland est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile fixé avec précision et contenant des proportions visées de CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃. Le *clinker* entre dans la composition de tous les ciments courants.

Tableau 1 – Subdivision et composition des ciments courants (norme NF EN 197-1)

Princi- aux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) (a)											Consti- tuants secon- daires
			Constituants principaux (en %)											
			Clinker	Laitier de haut- four- neau	Fumée de silice (b)	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Natu- relle	Natu- relle calcinée	Sili- ceuse	Calcique					
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la pouzzo- lane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-V	67-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment Portland composé (c)	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →					← 21-35 →					0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →					← 6-20 →					0-5
CEM III	Ciment de haut- fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouz- zolanique (c)	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →			← 6-20 →			—	—	—	0-5
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →			← 21-35 →			—	—	—	0-5
CEM V	Ciment composé (c)	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →	—	—	—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

■ Laitier granulé de haut-fourneau (S)

Le laitier granulé de haut-fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment.

■ Pouzzolanes naturelles (P) ou naturelles calcinées (Q)

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses (ou une combinaison des deux) avec, parfois, la présence d'oxyde de fer.

Les **pouzzolanes naturelles** sont, en général, des matériaux d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriée.

Les **pouzzolanes naturelles calcinées** sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

■ Cendres volantes siliceuses (V) ou calcaires (W)

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

■ Schistes calcinés (T)

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

■ Fillers calcaires (L, LL)

Les **fillers calcaires** sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %.

■ Fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

■ Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

■ Constituants secondaires

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels, ou dérivés du processus de fabrication du *clinker*, ou bien des constituants décrits dans les paragraphes précédents (sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment).

Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment.

■ Additifs

Les additifs sont des constituants ne figurant pas dans ceux énumérés ci-dessus qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment.

La quantité totale des additifs (à l'exception des pigments éventuellement ajoutés) doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment.

9.3 Cinq types de ciments courants (tableau 1)

■ Ciment Portland CEM I

Il contient au moins 95 % de *clinker* et, au plus, 5 % de constituants secondaires.

■ Ciment Portland composé : CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de *clinker* et, au plus, 35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

■ Ciment de haut-fourneau : CEM III/A ou B

Il contient entre 36 et 80 % de laitier, et 20 à 64 % de *clinker*.

■ Ciment de haut-fourneau : CEM III/C (anciennement ciment de laitier au *clinker*)

Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de *clinker*.

■ Ciment composé : CEM V/A ou B (anciennement ciment au laitier et aux cendres)

Il contient de 20 à 64 % de *clinker*, de 18 à 50 % de cendres volantes, et de 18 à 50 % de laitier.

Nota : les ciments courants peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

9.4 Classes de résistance des ciments

■ Définition des classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 – 42,5 – 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La **résistance normale d'un ciment** est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa (1 MPa = 1 N/mm² = 10 bar).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau 2.

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R).

■ Valeurs limites applicables suivant les classes de résistance

La conformité d'un lot de ciment est appréciée pour ce qui concerne la résistance à la compression en fonction des valeurs du tableau 3 qui sont des limites absolues applicables à chaque résultat d'essai.

Tableau 2 – Classes de résistance des ciments à la compression (en Mpa) suivant NF EN 196-1

Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	à 2 jours	à 7 jours		
32,5 N	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10	–		
42,5 N	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	–		
52,5 N	≥ 20	–	≥ 52,5	–
52,5 R	≥ 30	–		

Tableau 3 – Valeurs limites applicables à chacun des résultats

Échéances	Classes de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
2 jours	–	8	8	18	18	28
7 jours	14	–	–	–	–	–
28 jours	30	30	40	40	50	50

■ Autres caractéristiques

La norme NF EN 197-1 retient également des critères de conformité autres que les résistances : temps de début de prise, stabilité, teneurs en sulfates ou en chlorures.

■ Exigences chimiques

Les exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques sont également explicitées dans le tableau 4.

9.5 Ciments courants à caractéristiques complémentaires normalisées

Pour certains types d'ouvrages, des propriétés complémentaires des ciments peuvent être requises ; elles font l'objet de normes spécifiques.

■ Ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15-317

Les ciments n'ont pas tous la même résistance face aux agressions chimiques liées à l'environnement marin. L'emploi de ciments présentant des caractéristiques adaptées de résistance à ces agressions est donc nécessaire. Ceux-ci possèdent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A), ce qui leur permet de

conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Les ciments pour travaux à la mer sont :

- des CEM I et des CEM II qui possèdent des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires ;
- des CEM III/A, B ou C et CEM V qui sont naturellement qualifiés pour cet usage ;
- des ciments prompts naturels (CNP) définis par la norme NF P 15-314 et des ciments alumineux fondus (CA) définis par la norme NF P 15-315, ayant présenté un bon comportement, soit lors d'essais de longue durée, soit en ouvrages dans le milieu considéré.

Ces ciments comportent la mention PM sur l'emballage et le bon de livraison.

■ Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15-319

Les eaux séléniteuses constituent un milieu particulièrement agressif qui nécessite l'emploi de ciments spécifiques. Ces ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A), ce qui confère au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate, au cours de la prise et ultérieurement. Ces ciments sont :

- des CEM I et des CEM II offrant des caractéristiques complémentaires ;
- des CEM III/A, B ou C et des CEM V naturellement qualifiés pour cet usage ;
- des ciments alumineux fondus (CA), définis par la norme NF P 15-315, ayant présenté un bon comportement, soit lors d'essais de longue durée, soit en ouvrages dans le milieu considéré.

Ces ciments comportent la mention ES sur l'emballage et le bon de livraison.

Tableau 4 – Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants

Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences (a)
Perte au feu	NF EN 196-2	CEM I CEM II	toutes classes	$\leq 5,0 \%$
Résidu insoluble	NF EN 196-2 (b)	CEM I CEM II	toutes classes	$\leq 5,0 \%$
Sulfate (SO_3)	NF EN 196-2	CEM I CEM II (c) CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	$\leq 3,5 \%$
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	$\leq 4,0 \%$
		CEM III (d)	toutes classes	
Chlorure	NF EN 196-2	Tous types (e)	toutes classes	$\leq 0,10 \%$ (f)
Puzzolanité	NF EN 196-5	CEM IV	toutes classes	satisfait à l'essai

(a) Les exigences sont données en pourcentage de masse du ciment produit fini.

(b) Détermination des résidus insolubles dans l'acide chlorhydrique et le carbonate de sodium.

(c) Le ciment de type CEM II/B-T peut contenir un maximum de 4,5 % de SO_3 quelle que soit la classe de résistance.

(d) Le ciment de type CEM III/C peut contenir un maximum de 4,5 % de SO_3 .

(e) Le ciment de type CEM III peut contenir plus de 0,10 % de chlorure mais, dans ce cas, la teneur maximale en chlorure doit figurer sur l'emballage et/ou le bon de livraison.

(f) Pour des applications en précontrainte, les ciments peuvent être produits selon une exigence plus basse. Dans ce cas, la valeur de 0,10 % doit être remplacée par cette valeur plus basse qui doit être mentionnée sur le bon de livraison.

■ Ciments à teneur limitée en sulfures (CP) NF P 15-318

Ces ciments sont des CEM I, CEM II, CEM III/A et B et CEM V dont la teneur en sulfures est inférieure à une valeur donnée. La norme prévoit deux classes notées CP₁ et CP₂ et ils sont destinés aux ouvrages en béton précontraint.

Ils comportent la mention CP sur l'emballage et le bon de livraison.

9.6 Autres ciments

D'autres ciments font l'objet de normes spécifiques.

■ Ciment prompt naturel (CNP) NF P 15-314

Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, résulte de la cuisson, à température modérée, d'un calcaire argileux de composition régulière extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin.

Le ciment prompt naturel est caractérisé par la présence de silicates de calcium, essentiellement sous forme de silicate bicalcique actif, d'aluminate de calcium riche en alumine, et de sulfo-aluminate de calcium qui est une spécificité du produit.

■ Ciment alumineux fondu (CA) NF P 15-315 (en cours de remplacement par NF EN 14647 ciments d'aluminates de calcium)

Le ciment alumineux fondu (ou ciments d'aluminates de calcium) est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à la fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme une masse d'alumine n'excédant pas 30 % de la masse de ciment.

■ Ciment à maçonner (MC) NF EN 413-1

Le ciment à maçonner est un liant hydraulique à base de *clinker* Portland adapté à la réalisation d'enduits intérieurs ou extérieurs, ainsi que de mortiers de maçonnerie.

■ Liants hydrauliques routiers

Dans l'attente de la publication des futures normes européennes NF EN 13282-1 « *Liants hydrauliques routiers à cinétique rapide – Composition, spécification et critères de conformité* » et NF EN 13282-2 « *Liants hydrauliques routiers à cinétique normale – Composition, spécification et critères de conformité* », en cours d'élaboration, ces liants bénéficient actuellement d'une norme française NF P 15 108.

9.7 Désignation et marquage

Les ciments courants doivent être identifiés au moins par les lettres CEM, suivies du type (chiffre romain) et d'un nombre indiquant la classe de résistance (par exemple 32,5).

Les lettres N ou R qualifient la résistance à court terme. Les caractéristiques complémentaires éventuelles sont rappelées par les notations PM/ES/CP (figure 8).

9.8 Certification des ciments

Depuis le 1^{er} avril 2002, les ciments courants doivent être marqués CE. Ce marquage atteste de leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et leur permet de circuler librement au sein de l'espace économique européen.

La marque NF volontaire, complémentaire du marquage CE, atteste que le ciment qui la porte est conforme au niveau de qualité requis par le marché français en fonction des conditions climatiques et environnementales, ainsi que des techniques de mise en œuvre. Elle implique que le niveau de contrôle des ciments est bien celui qui a fait la notoriété et le succès de la marque NF-Liants hydrauliques.



Figure 8 – Exemple de marquage de sac pour un ciment Portland

Il a été décidé de maintenir la marque « NF-Liants hydrauliques » donnée par AFAQ-AFNOR certification, en complément du marquage CE pour attester la conformité des ciments courants aux exigences de la norme NF P 15-301 de 1994 qui n'ont pas été reprises dans l'EN 197-1, en particulier :

- un critère de régularité de composition à ± 5 % par rapport à une valeur déclarée pour chaque constituant ;
- des temps de début de prise plus longs, pour les ciments des classes 32,5 N, 32,5 R, 52,5 N et 52,5 R ;
- des résistances à court terme plus élevées pour les ciments des classes 32,5 N, 32,5 R et 42,5 N.

Le contrôle des cimenteries correspondant à la délivrance de cette marque est assuré par le laboratoire d'essais des matériaux de la ville de Paris (LEM-VP).

10. Caractéristiques et emplois des ciments

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.

Exigences climatiques, résistance à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus approprié. Pour faire ce choix, il importe de connaître les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments prévus par la normalisation.

La formulation des bétons s'est renouvelée en profondeur au cours de ces dernières années, principalement du fait des performances des ciments mais surtout grâce à l'utilisation, d'une part, d'adjuvants spécifiques tels les plastifiants et les superplastifiants, et d'autre part, des additions fines (cendres volantes, additions calcaires, additions siliceuses, laitiers) et ultrafines (fumée de silice). C'est ainsi que l'on peut réaliser des Bétons à Hautes Performances dépassant 100 MPa de résistance à la compression à partir de CEM I 42,5 ou 52,5. ([5] et [6]).

L'objectif ici est de présenter les limites de composition de chaque type de ciment et les valeurs limites de résistance pour chaque classe. Les domaines d'emploi qui découlent de ces propriétés sont ensuite décrits, ainsi que les particularités liées à la mise en œuvre ou aux précautions d'emploi.

10.1 Ciments Portland CEM I norme NF EN 197-1

■ Composition

Les ciments Portland résultent du broyage de *clinker* et de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise, et éventuellement de constituants secondaires en faible quantité (inférieure à 5 %). La teneur en *clinker* est au minimum de 95 %.

■ Valeurs limites

En plus des valeurs caractéristiques des classes de résistance, la norme prévoit le respect de valeurs limites de résistance à la compression applicables à chaque résultat d'essai (tableau 5 et figure 9). Ces résistances sont mesurées sur « mortier normal » selon la norme NF EN 196-1.

Les propriétés chimiques, qui sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives, concernent la teneur en anhydride sulfurique (SO_3) inférieure à 4 % (4,5 % pour les classes 42,5 R et 52,5) et en ions chlorure inférieure à 0,10 %.

■ Principaux domaines d'emploi

Les CEM I conviennent pour le **béton armé** (coulé sur place ou préfabriqué), le **béton précontraint** (norme française NF P 15-318) et les **bétons étuvés**. En revanche, leurs caractéristiques mécaniques n'en justifient généralement pas l'emploi pour les travaux de maçonnerie courante et les bétons en grande masse ou faiblement armés.

Les CEM I de classe R permettent un décoffrage rapide, appréciable notamment en préfabrication. Les CEM I 52,5 N ou 52,5 R conviennent pour le béton armé ou précontraint pour lesquels est recherchée une résistance élevée.

Pour les travaux en milieu agressif, eaux de mer ou eaux sulfatées, on emploiera respectivement des ciments Portland pour travaux à la mer PM, ou pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES.

■ Précautions particulières

Pour les ouvrages massifs, on évitera l'utilisation des CEM I dont la chaleur d'hydratation risque de conduire à une élévation de température excessive lors de leur réalisation.

10.2 Ciments Portland composés CEM II norme NF EN 197-1

■ Composition

Les ciments Portland composés résultent du mélange de *clinker* en quantité au moins égale à 65 %, et d'autres constituants tels que laitiers de haut-fourneau, cendres volantes, pouzzolanes, fumée de silice, dont le total ne dépasse pas 35 %.

■ Valeurs limites

De même que pour les CEM I, des valeurs limites de résistances minimales sont fixées aux échéances 2, 7 et 28 jours. Des valeurs

Tableau 5 – Valeurs limites de résistance à la compression

Classe de résistance	Résistances minimales absolues (en Mpa)		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 N	–	14	30
32,5 R	8	–	30
42,5 N	8	–	40
42,5 R	18	–	40
52,5 N	18	–	50
52,5 R	28	–	50

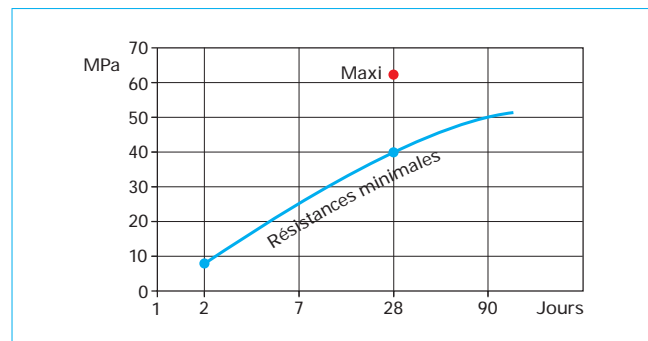


Figure 9 – Résistance à la compression d'un ciment CEM I 42,5 N

limites sont également fixées pour la teneur en SO_3 inférieure à 4 % (ou 4,5 %) et la teneur en ions chlorure inférieure à 0,10 % (cf. tableau 4).

■ Principaux domaines d'emploi

Les CEM II 32,5 N et 42,5 N sont adaptés aux travaux de toute nature en béton armé (béton en élévation-armé ou non-d'ouvrages courants), fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs, dallages, sols industriels, maçonneries, traitement des sols, etc.). Les CEM II 52,5 conviennent au béton précontraint et au béton armé.

De façon générale, les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée. La classe R sera préférée pour les travaux nécessitant des résistances initiales plus élevées. Pour les travaux en milieux agressifs, on emploiera les ciments pour travaux à la mer (PM) ou résistant aux eaux sulfatées (ES).

■ Précautions particulières

Lorsque l'aspect esthétique est important (béton brut, enduits), il convient d'éviter l'emploi de certains CEM II comportant des proportions importantes de constituants susceptibles d'entraîner des variations de teinte trop marquées, les cendres volantes notamment.

10.3 Ciments blancs

■ Composition et caractéristiques

La teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et kaolin) exemptes d'oxyde de fer. Les ciments blancs CEM II sont conformes à la norme NF EN 197-1.

Tableau 6 – Ciments comportant du laitier de haut-fourneau

Type de ciment	Notation	Clinker (en %)	Laitier de haut-fourneau (en %)	Puzzolanes naturelles ou naturelles calcinées ou cendres volantes siliceuses (en %)
Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	–
	CEM II/B-S	65-79	21-35	–
Ciment Portland au laitier	CEM III/A	35-64	36-65	–
	CEM III/B	20-34	66-80	–
	CEM III/C	5-19	81-95	–
Ciment composé*	CEM V/A	40-64	18-30	18-30
	CEM V/B	20-38	31-50	31-50

* Les constituants principaux, autres que le *clinker*, doivent être déclarés dans la désignation du ciment.

■ Domaines d'emploi

Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents. La pâte peut être elle-même colorée à l'aide de pigments, ce qui offre une grande variété de teintes, tant pour les bétons de structure, que pour les bétons architectoniques et les enduits décoratifs.

La composition du béton doit être bien étudiée en fonction des granulats, des effets recherchés et du traitement de surface.

10.4 Ciments comportant du laitier de haut-fourneau norme NF EN 197-1

■ Composition

Trois types de ciments comportent des pourcentages de laitier assez importants. Il s'agit du ciment Portland au laitier CEM II/A-S ou B-S, du ciment de haut-fourneau CEM III/A, B ou C, et du ciment composé CEM V/A ou B (tableau 6).

■ Valeurs limites

Les valeurs limites pour la résistance sont analogues à celles des CEM I. La teneur en SO_3 doit être inférieure à 5 % pour le CEM III/C, à 4,5 % pour les CEM III/A ou B, 4 % pour le CEM V (4,5 % pour la classe 42,5 R et 52,5).

■ Principaux domaines d'emploi

Ces ciments sont bien adaptés aux travaux suivants :

- hydrauliques, souterrains, fondations, injections ;
- en eaux agressives : eaux de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles et eaux pures ;
- ouvrages massifs : fondations et barrages ;
- milieu agricole : stockage, ensilage et fosse à lisier ;
- nécessitant une faible chaleur d'hydratation ;
- traitement des sols.

■ Précautions particulières

Les bétons employant ces types de ciment sont sensibles à la dessiccation ; il faut les maintenir humides pendant le durcissement et, pour cela, protéger au besoin leurs surfaces à l'aide d'un produit de cure. Pour cette raison, ces ciments sont à éviter dans les enduits. L'aspect rêche du béton ne doit pas inciter à augmenter la teneur en eau de gâchage.

Le ralentissement de la vitesse d'hydratation par le froid, plus marqué qu'avec le ciment Portland de même classe, conduit à éviter l'emploi de ce type de ciment par temps froid.

Tableau 7 – Désignation des ciments à maçonner

Type	Classe de résistance (en Mpa)	avec entraîneur d'air	sans entraîneur d'air
Ciment à maçonner	5	MC 5	–
	12,5	MC 12,5	MC 12,5 X(*)
	22,5	–	MC 22,5 X(*)

(*) La lettre « X » signale les liants ne contenant pas d'entraîneur d'air.

Tableau 8 – Valeurs limites résistance à la compression pour les ciments à maçonner

Type	Résistances (à court terme) à 7 jours (en Mpa)	Résistances (courantes) à 28 jours (en Mpa)	
MC 5	–	≥ 5	≤ 15
MC 12,5 MC 12,5 X	≥ 7	$\geq 12,5$	$\leq 32,5$
MC 22,5 X	≥ 10	$\geq 22,5$	$\leq 42,5$

10.5 Ciments à maçonner MC norme NF EN 413-1

■ Composition

Liant hydraulique fabriqué en usine et dont le développement de résistance est essentiellement dû à la présence de *clinker* Portland.

■ Classes de résistance

La nouvelle norme introduit trois classes de résistance à la compression à 28 jours (MC 5, MC 12,5, MC 12,5 X et MC 22,5 X) dont le tableau 7 précise la désignation en fonction de la présence, ou non, d'un entraîneur d'air.

■ Valeurs limites

Chaque classe de ciment implique le respect de valeurs limites de résistance à la compression, conformément aux indications du tableau 8.

Tableau 9 – Évolution de la résistance dans le temps (voir aussi figure 10)

Résistance (en Mpa)	15'	1 h	3 h	1 j	7 j	28 j	6 m	1 an
Compression	4,0	6,0	8,0	10,0	14,0	19,0	40,0	45,0
Flexion	1,4	1,8	2,3	2,5	3,0	3,5	5,0	5,5

Tableau 10 – Évolution de la résistance dans le temps d'un ciment alumineux fondu – Début de prise : 1 h 30 minimum

Résistance (en Mpa)	0 heure	21 heures	28 jours
Compression	30	50	60
Flexion	1	5,5	6,5

Le temps de début de prise ne doit pas être inférieur à 45 minutes. La teneur en SO_3 est limitée à 3 % pour les classes 12,5 et 22,5, et à 2 % pour la classe 5.

■ Principaux domaines d'emploi

Ces ciments, dont les résistances sont volontairement limitées par rapport aux ciments courants, conviennent bien pour la confection des mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduits, crépis, etc.). Ils peuvent être également utilisés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles.

Ces ciments ne conviennent pas pour les bétons à contraintes élevées ou les bétons armés. Ils ne doivent pas être employés dans les milieux agressifs.

10.6 Ciment prompt naturel CNP norme NF P 15-314

■ Composition

Ainsi qu'il a été dit précédemment, le ciment prompt naturel est obtenu par cuisson, à température modérée (1 000/1 200 °C), d'un calcaire argileux d'une grande régularité.

■ Caractéristiques

Le ciment prompt naturel est un produit à prise rapide et à résistances élevées à très court terme (tableau 9 et figure 10). La mouture est plus fine que celle des ciments Portland.

La résistance du « mortier 1/1 » (une partie de ciment pour une partie de sable en poids) à 1 heure est de 6 MPa.

Le début de prise commence à environ 2 minutes, s'achève pratiquement à 4 minutes, et est, de plus, réglable de 3 à 15 minutes, en utilisant l'adjuvant proposé par le fabricant qui ne modifie pas l'évolution du durcissement.

Le ciment prompt naturel est résistant aux eaux agressives (eaux séléniteuses, eaux pures, eaux acides). Il fait partie des ciments pour travaux à la mer : PM.

■ Principaux domaines d'emploi

Le ciment prompt naturel s'utilise en mortier (avec un dosage généralement de deux volumes de ciment pour un volume de sable) et, éventuellement, pour constituer un béton. Dans les cas d'urgence nécessitant une prise immédiate (aveuglements de voies d'eau), il est possible de l'employer en pâte pure.

Parmi ses nombreux emplois, on peut citer :

- scellements ;
- travaux spéciaux et travaux de réparation ;
- enduits de façade (en mélange avec des chaux naturelles) ;
- moulages ;

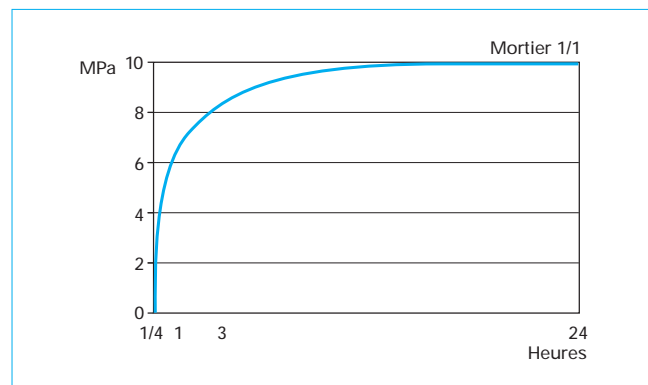


Figure 10 – Résistances à très court terme

– revêtements et enduits résistants aux eaux agressives et à bon nombre d'attaques chimiques, en particulier à l'acide lactique et aux déjections (bâtiments pour l'élevage, silos) ;

- colmatage et travaux à la mer ;
- bétons projetés, travaux souterrains.

■ Précautions d'emploi

Quelques précautions sont à prendre lorsqu'on emploie du ciment prompt naturel : ne pas rebattre un mortier ou lisser un enduit pour ne pas « casser » la prise, **éviter particulièrement l'excès d'eau**.

10.7 Ciment alumineux fondu CA norme NF P 15-315 (en cours de remplacement par la norme NF EN 14647 ciments d'aluminates de calcium)

■ Composition

Le ciment alumineux fondu, ou ciment d'aluminates de calcium, résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivie d'une mouture sans gypse à une finesse comparable à celle des ciments Portland.

■ Caractéristiques

Les résistances minimales garanties sur « mortier normal » sont données dans le tableau 10.

Le ciment alumineux fondu développe des résistances à court terme élevées grâce à un durcissement rapide. Il est très résistant aux milieux agressifs et acides (jusqu'à des pH de l'ordre de 4). Il fait partie des ciments pour travaux à la mer : PM et en eaux à haute teneur en sulfate : ES.

La chaleur d'hydratation élevée, liée à son durcissement rapide, permet au ciment fondu d'être mis en œuvre par temps froid (jusqu'à -10 °C). C'est également un ciment réfractaire (bon comportement jusqu'à 1 300 °C).

■ Principaux domaines d'emploi

Le ciment alumineux fondu est particulièrement adapté aux domaines suivants :

- travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels) ;
- sols résistant aux chocs, à la corrosion, au trafic élevé ;
- ouvrages en milieux agricoles, canalisations, travaux d'assainissement, fours, cheminées (bétons réfractaires) ;
- travaux de réparation et, en particulier, la réfection des revêtements béton dans le domaine routier pour une remise en circulation rapide ;
- scellements (en mélange avec du ciment Portland pour la préparation de mortiers à prise réglable).

■ Précautions d'emploi

Par temps très froid, il faut protéger le béton jusqu'au déclenchement de la phase de durcissement. Dans tous les cas, le mortier (ou le béton de ciment fondu) doit être maintenu humide (produit de cure ou protection), pendant toute sa période de durcissement, pour éviter sa dessiccation.

Le dosage minimum en ciment fondu est généralement de 400 kg/m³ de béton ; le rapport eau/ciment ne doit pas dépasser 0,4.

10.8 Caractéristiques et emplois des liants hydrauliques routiers

■ Composition

Un liant hydraulique routier est un liant hydraulique produit en usine, distribué prêt à l'emploi et dont les propriétés sont spécifiquement adaptées pour le traitement des granulats et des sols pour la réalisation d'assise de chaussées, de couches de forme et de terrassements.

Un liant hydraulique routier se présente sous forme d'une poudre obtenue en mélangeant différents constituants (*clinker*, laitier granulé de haut-fourneau, pouzzolanes naturelles, cendres volantes siliceuses ou calciques, schistes calcinés, calcaire, chaux, etc.) et dont la composition est statistiquement homogène.

Ce qui les différencie des ciments :

- leur teneur en *clinker* est généralement faible ou nulle ;
- leur cinétique de prise et de durcissement est lente, propriété très recherchée dans les travaux routiers pour des raisons de délai de maniabilité minimal des matériaux.

Les constituants d'un liant hydraulique routier ainsi que leur proportion moyenne dans le produit fini doivent être déclarés et enregistrés dans la fiche technique de chaque produit par le fabricant. Les constituants à déclarer sont les constituants principaux, ainsi que le sulfate de calcium si la teneur en sulfates (SO₃) du liant hydraulique routier est supérieure à 4 %.

Pour produire les liants hydrauliques routiers, il est essentiel de disposer des installations nécessaires pour contrôler et évaluer la qualité des produits, et procéder aux ajustements voulus.

■ Caractéristiques

La résistance courante d'un liant hydraulique routier est la résistance à la compression déterminée, conformément à la norme NF EN 196-1, à l'échéance de 56 jours (au lieu de 28 jours pour les ciments).

La norme française NF P 15-108 définit trois classes de résistance : la classe 10, la classe 20 et la classe 30 ; la résistance courante minimale étant retenue comme critère de classification. La norme définit deux classes de temps de début de prise : une classe courante et une classe « prise rapide » (PR).

■ Principaux domaines d'emploi

Le domaine d'emploi défini par la norme NF P 15 108 est :

- le traitement des sols (remblais, plate-formes support, couche de forme), conformément au guide technique SETRA/LCPC « *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* » ;
- la réalisation de couches d'assise de chaussée avec des graves traitées aux liants hydrauliques routiers, conformément à la norme NF EN 14227-5, ou des sols traités en assise de chaussée conformément à la norme NF EN 14227-13, ou des graves hydrauliques à hautes performances, selon la norme française NF P 98 128, et ce suivant les indications données par la norme NF P 98 115 « *Exécution des corps de chaussée* ».

■ Précautions particulières

L'utilisation des liants hydrauliques routiers pour le traitement des sols et le recyclage des matériaux nécessite de vérifier au préalable l'aptitude du sol ou du matériau au traitement. En effet, la présence, au sein du sol ou du matériau, de certains produits, tels que les matières organiques, les sulfures (pyrites), les sulfates (gypse), ou chlorures (sel gemme), est de nature à perturber ou empêcher la prise du liant hydraulique routier ou, plus gravement, à provoquer des gonflements importants du sol ou du matériau après traitement.

11. Conclusion

Le souci du respect de notre environnement et de la gestion responsable et optimale des ressources, la volonté de préserver la santé et d'améliorer le confort, le cadre de vie et la sécurité des hommes sont pour l'industrie du ciment une source d'inspiration constante pour l'innovation et la recherche de nouveaux produits et de nouvelles solutions constructives.

L'industrie du ciment et ses partenaires accompagnent cette nécessaire logique de progrès par une démarche volontaire et proactive, depuis plusieurs années, en développant de nombreuses innovations, tant sur leurs sites de production, que pour la conception, la mise en œuvre ou l'utilisation de leurs matériaux.

Elle s'engage pour les générations futures et apporte sa contribution au concept du développement durable grâce à :

- des **procédés industriels optimisés** réduisant les impacts environnementaux liés à l'exploitation des installations industrielles (réduction des émissions de gaz à effet de serre, réaménagement des carrières...) ;
- des **innovations** pour la fabrication des ciments qui se sont traduites par une diminution de la consommation des énergies fossiles : utilisation de déchets sélectionnés comme combustibles de substitution ;
- la mise en place de **systèmes de contrôle efficaces** permettant de garantir des conditions de sécurité sanitaire optimales dans l'environnement proche de leurs sites de production ;
- un recours systématique aux **études d'impact environnemental** (faune, flore, hydrologie, archéologie, etc.) préalables à chaque ouverture ou extension de carrière ;
- l'utilisation des **matériaux de substitution** (sous-produits d'autres secteurs d'activités) comme matières premières, ou en substituts pour la formulation de ciments composés ;
- des **sites de production bien répartis** sur l'ensemble du territoire, au plus près des matières premières et des utilisateurs, préservant ainsi les ressources naturelles et l'énergie, en limitant les transports ;
- des **produits innovants** et des solutions constructives répondant aux préoccupations de la société contemporaine.