



# Fiches détaillées

## Le Ciment<sup>1</sup>

**Éric Mathieu,**  
**Directeur des Ressources & Projets, Ciments Vicat**

Contrairement aux autres matériaux présentés dans les fiches techniques, il ne s'agit pas d'un matériau naturel mais d'un matériau artificiel créé après transformation (cuisson, broyage, ajouts d'adjuvant) à partir de mélanges de matières naturelles, ce mélange étant caractérisé non pas par sa minéralogie mais essentiellement par sa composition chimique.

Le ciment se présente sous forme d'une poudre minérale fine qui mélangée à l'eau se fige et durcit, même sous l'eau et sans changement de volume.

Il s'agit d'un composant essentiel du béton auquel et en tant que liant, il confère un certain nombre de propriétés, notamment sa résistance mécanique. Le béton est le matériau manufacturé le plus utilisé par l'homme soit environ 6 milliards de m<sup>3</sup> par an. La production de ciment en 2012 a été de 3,7 milliards de tonnes dans le monde et de 18 millions de tonnes en France.



Figure 1 –  
cimenterie de Montalieu.

© Vicat

### Composition et classification des ciments

Nous considérerons dans cette fiche uniquement Les ciments « Portland » qui sont les plus consommés.

Ces ciments sont constitués par des mélanges broyés finement de plusieurs composants :

- le clinker : composant principal qui confère au ciment ces propriétés hydrauliques. C'est le produit de la cuisson d'un mélange de matériaux naturels (essentiellement calcaires, marnes ou argiles, plus rarement sables, bauxite, minerai de fer..) complété éventuellement de produits de substitution (sables industriels, terres polluées, mâchefers, déchets alumineux ou de la sidérurgie...);
- du gypse qui sert de régulateur de prise : gypse naturel, anhydrite ou phospho-gypse issu de l'industrie ;
- d'ajouts de natures diverses soit d'origine naturelle : calcaire, pouzzolanes, ou artificielle : cendres volantes, laitiers de haut fourneaux...

La proportion et la nature des ajouts est une des clés de la classification des ciments.

La fabrication du ciment, notamment pour la cuisson du clinker, nécessite de grandes quantités d'énergies et donc la consommation de combustibles naturels (charbon, pétrole, gaz) ou secondaires (huiles usagés, coques de pétroles, pneus usagés, déchets organiques, déchets plastiques etc.). La consommation d'énergie est d'environ 3 000 Mégajoules par tonne de clinker (uniquement pour l'énergie de cuisson). Les cendres des combustibles contribuent à la composition chimique du clinker. A ceci il faut rajouter les énergies de broyage des composants du ciment et notamment du clinker. Une autre caractéristique de la fabrication du ciment est son fort dégagement de CO<sub>2</sub> : environ 35 % en masse du clinker par décarbonatation des matériaux auquel il faut rajouter la production liée à l'usage des combustibles.

<sup>1</sup> Rédaction 2017

## Nomenclature des ciments (norme européenne NF EN 197-1)

La nomenclature des ciments se fait suivant deux critères principaux :

- la résistance mécanique à 28 jours
- la teneur en clinker

D'autres éléments interviennent comme la résistance à court terme (2 jours), la composition des ajouts, la résistance aux eaux agressives...

On distingue ainsi 3 classes de résistances à 28 jours (résistance en compression sur éprouvette normée):

- supérieure à 52,5 MPa
- supérieure à 42,5 MPa
- supérieure à 32,5 MPa

Les ciments sont aussi qualifiés de « R » pour une résistance à 2 jours supérieure à un seuil limite ou de « N » dans le cas contraire.

On distingue également plusieurs classes de ciment en fonction de la teneur en clinker et de la nature des ajouts. Le tableau 1 présente ces classes en fonction de la teneur en clinker, de la nature et des proportions des ajouts.

Exemples de nomenclature de ciment :

- CEM I 52.5 R
- CEM II/B 42.5 N

Tableau 1 – Nomenclature des ciments sur la base de leur teneur en clinker, de la nature et des proportions des différents ajouts

	CEM I	CEM II /A	CEM II /B	CEM II /A-M	CEM II /B-M	CEM III /A	CEM III /B	CEM III /C	CEM IV /A	CEM IV /B	CEM V /A	CEM V /B
Clinker portland (K)	95-100	80-94	65-79	80-94	65-79	35-64	20-34	5-19	65-89	45-64	40-64	20+48
Calcaire (LL)		6-20	21-35									
Laitier de haut fourneau (S)						36-65	66-80	81-65			18-30	31-50
Fumée de silice (D)				6-20	21-35							
Pouzzolanes naturelles (P)									11-35	36-55	18-30	31-50
Cendres volantes siliceuses (V)												
Schistes calcinés (T)												
Gypses (CS)	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5

## La fabrication du ciment

Il existe plusieurs procédés de fabrication du ciment différant notamment par le mode de préparation des matières premières. On distingue ainsi les procédés en voie humide où les matières premières sont mélangées à de l'eau pour faire une pulpe, les procédés en voie demi-sèche ou ces mêmes matières premières sont agglomérées en granules grâce à l'ajout de plus faible quantité d'eau et la voie sèche. C'est cette dernière technique que nous allons présenter car elle est de loin la plus développée à l'heure actuelle. Elle a pour avantages de minimiser la consommation d'énergie et d'économiser l'eau.

Figure 2 – Hall de pré-homogénéisation du cru.



© Jean-Luc Mége, 2007

- atelier de préparation du cru. La première phase consiste au concassage, mélange et éventuellement à la pré-homogénéisation des différents matériaux de carrières : calcaires, marnes, argiles, complétés par divers ajouts naturels ou artificiels : sables, bauxite, latérites et/ou oxydes de fer. Ce mélange avant cuisson est appelé « le cru » ; ce dernier est finement broyé pour donner « la farine » en ajustant la composition chimique à l'aide d'ajouts de chimie connue qui

peuvent être du sable, de la bauxite, de l'oxyde de fer, et/ou du calcaire pur. Pour ce faire, des analyses chimiques sont réalisées en continu en sortie du broyeur. Cette farine est homogénéisée en passant par une série de silos d'homogénéisation.

Figure 3 – Extraction des matières premières et préparation du cru.

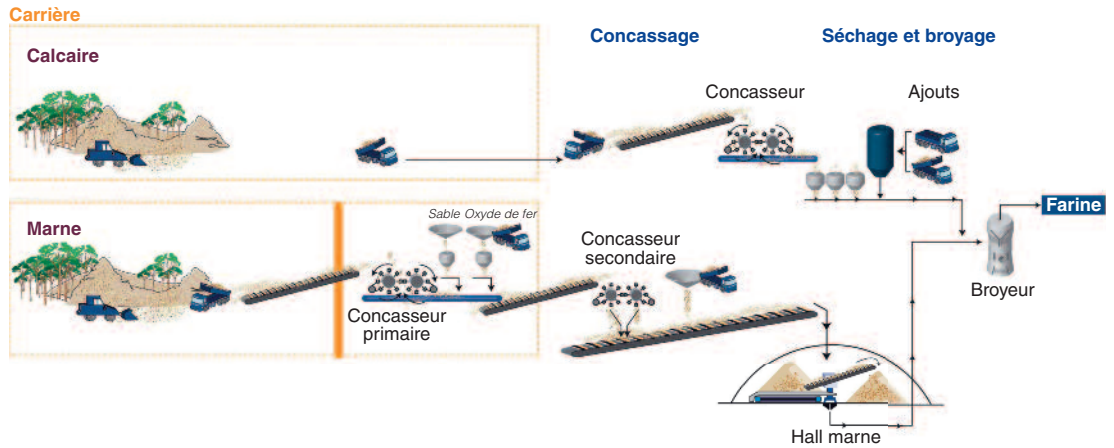


Figure 4 – Atelier de cuisson pour l'obtention du clinker.

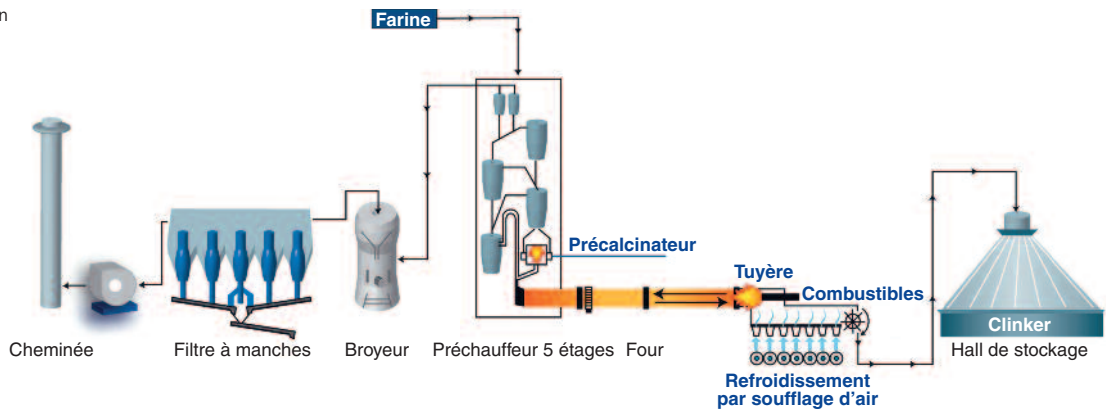
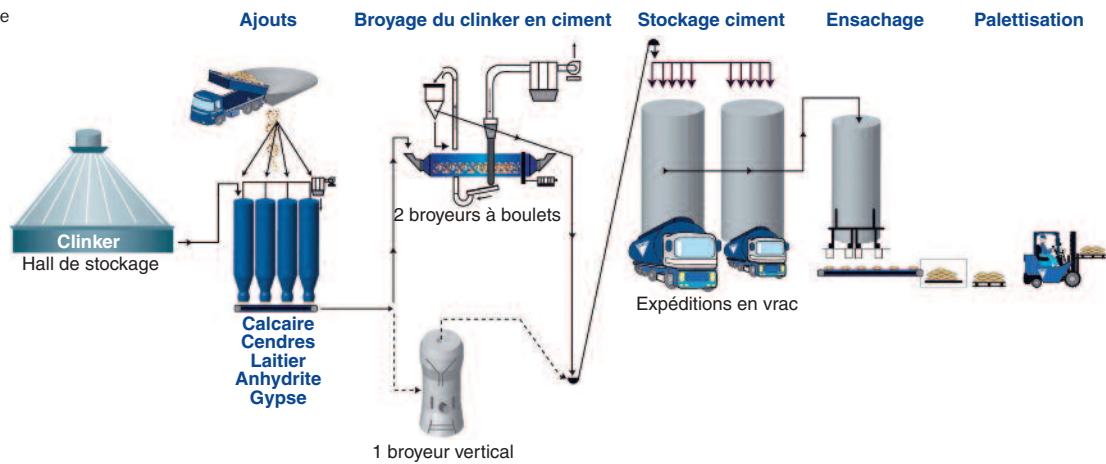


Figure 5 – Atelier de broyage et de mélange pour la préparation du ciment.



- atelier de cuisson. La farine est portée progressivement à une température d'environ 1 450 °C. Cette montée en température se fait en deux étapes : Passage par une série de cyclones à contre-courant des gaz chauds dans la tour de décarbonatation où les matériaux sont portés à environ 950 °C et perdent leur CO<sub>2</sub>. Puis passage dans le four rotatif où s'effectue la clinkerisation. Les matériaux perdent environ 35% de leur masse sous forme de gaz carbonique, et les éléments chimiques se réorganisent dans de nouveaux minéraux : silicate bicalcique (C2S : 20 à 25 %), Silicate tricalcique (C3S : 60 à 65 %), Aluminate tricalcique (C3A : 5 à 10 %), Ferro-aluminate tétracalcique (C4AF : 5 à 10 %). Ce sont ces minéraux qui en réagissant avec l'eau à température ambiante forment des silicates de chaux hydratées qui confèrent au ciment ses propriétés de prise. En sortie du four, le clinker tombe dans le refroidisseur où il subit une trempe grâce à un courant air froid pour éviter sa transformation minéralogique. Le foyer principal est constitué par une flamme très oxydante à 2 000 °C dans l'axe du four et il existe très souvent un foyer secondaire à la base de la tour de décarbonatation. La nature très chaude et oxydante de la flamme du four en fait un excellent incinérateur de déchets et l'utilisation de combustibles secondaires est un enjeu économique important.
- atelier de préparation du ciment. Le clinker, stocké, est repris pour être finement broyé en mélange avec les ajouts en fonction de la qualité du ciment produit. Ce broyage demande une énergie importante et la finesse du matériau obtenue joue beaucoup sur la résistance à court et long terme du ciment. Le ciment est homogénéisé dans des silos et conditionné soit sous forme de sacs papier, soit livré en vrac dans des camions pour alimenter notamment les centrales à béton BPE et les usines de préfabrication.

### Chimie du cru de cimenterie

Un paramètre important de la qualité du clinker et donc du ciment est la chimie du cru.

La composition du cru, demande des proportions précises entre ses composants principaux à savoir : Chaux (CaO), Silice (SiO<sub>2</sub>), Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Le contrôle de ces différents éléments se fait à partir d'indices chimiques variés dont les principaux sont :

- la saturation en chaux (CaO / (2,8\*SiO<sub>2</sub> + 1.18\*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,65\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) dont la valeur est comprise entre 95 et 100 % ;
- l'indice silicique (SiO<sub>2</sub> / (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) variant en général entre 2,2 et 3 ;
- le module alumino-ferrique (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) variant entre 1 et 2.

Les valeurs de ces trois indices ne sont pas indépendantes. En outre, elles peuvent varier entre cru et clinker à cause de l'apport en cendre des combustibles.

À titre d'exemple, une saturation en chaux trop élevée entrainera la formation de chaux libre qui provoquera un gonflement des ciments et une saturation trop basse impliquera une résistance des ciments moins élevée.

D'autres éléments chimiques auront une influence sur la qualité du clinker, le bon déroulement du procédé cimentier ou de l'émission de gaz nocifs à la cheminée (SO<sub>2</sub>, Chlore, matières organiques, oxydes d'azote, mercure etc.). Il s'agit notamment :

- des alcalins et surtout du potassium impliqués dans le déroulement du processus de fabrication (bouchage des tuyauteries) et dans l'alcali-réaction (réaction chimique destructive entre ciments et certains granulats). La teneur en Na<sub>2</sub>O équivalent (Na<sub>2</sub>O + 0,667K<sub>2</sub>O) doit être inférieure à 1 % ;
- du soufre (SO<sub>3</sub>) pour éviter les rejets à la cheminée d'acide sulfurique et le bouchage des tuyauteries ;
- de la magnésie (MgO) entraînant le gonflement des ciments ; elle doit être inférieure à 5 % dans les ciments ;
- des phosphates diminuant la résistance des ciments ;
- de certains métaux lourds comme le mercure, le chrome etc.

D'autres contraintes doivent être respectées pour les ajouts ciments (fillers), notamment la teneur en matière organique et en argiles (valeur au bleu).

Toutes ces spécifications doivent être respectées dans la fabrication du cru, du clinker et du ciment et auront des conséquences sur la qualité des matériaux recherchés et extraits en carrière et sur la manière de les exploiter (phasage d'exploitation).

### Industrie minérale extractive et cimenterie

Le ciment est un matériau complexe, fabriqué à partir de matériaux minéraux naturels indispensables pour la fabrication du clinker mais aussi présents sous forme d'ajout dans le ciment. Il permet également d'utiliser de nombreux matériaux artificiels notamment des déchets aux différents stades de sa fabrication.

Parmi les matériaux naturels utilisés en cimenterie, on peut distinguer les ajouts (cru ou ciment) utilisés en quantité relativement restreintes, pouvant faire l'objet d'exploitations extérieures à la cimenterie. Il s'agit par exemple de sables siliceux, de bauxite comme correcteur chimique pour le cru, de gypse et pouzzolane pour le ciment. Des déchets et sous-produits industriels peuvent également jouer des rôles similaires (sables de fonderies, déchets d'aluminium, terres polluées, sulfo-gypses, laitiers de haut fourneaux...).

Figure 6 – Transport du calcaire à la station de concassage.



L'essentiel de la production du cru est en revanche assuré par des carrières liées à la cimenterie. Les caractéristiques principales des matériaux exploités sont de nature chimique en termes d'éléments majeurs (chaux, silice, alumine, oxydes de fer) et d'éléments en moindres quantités polluants (alcalins, soufre, phosphate, magnésie...).

Les qualités mécaniques et minéralogiques des matériaux utilisés ont une importance marginale mais peuvent néanmoins avoir une influence sur le procédé de fabrication. Ainsi des matériaux sensibles à l'eau et humides peuvent provoquer des bourrages dans les circuits de l'atelier de cru. Autre exemple : la présence de minéraux difficiles à broyer et réfractaires, comme le quartz grossier, peut contraindre la cuisson et la combinaison des éléments chimiques lors de la clinkérisation.

En outre les matériaux exploités ont une faible valeur ajoutée. Il faut donc minimiser les coûts : transport des matériaux, décapage des morts-terrains réduit.

Enfin les investissements pour la construction d'une cimenterie étant élevés, il est donc nécessaire de disposer de réserves importantes (de l'ordre du siècle), de qualité adéquate pour rentabiliser ces investissements. Pour ces mêmes raisons, les carrières de cimenteries sont en général exploitées sur de longues durées.

A partir de simulations de constitutions du cru, de l'expérience, de la chimie des matériaux de carrière, des ajouts, des cendres, des combustibles et de la qualité du clinker à produire, on définit la proportion des différents composants à la base de la constitution du cru. Ces proportions peuvent varier au cours du temps en fonction des matériaux de carrière disponibles, des combustibles mis en œuvre, des ajouts utilisés, de la qualité du clinker produit et des contraintes environnementales (émissions à la cheminée). C'est le laboratoire de l'usine qui sur la base d'analyses en continu sur le broyeur de cru, oriente précisément le mélange à réaliser en carrière.

Au niveau de la carrière, l'exploitant doit fournir des matériaux de qualités chimiques précises et constantes dans le temps tout en ménageant les réserves sur le long terme. Un tel objectif est atteint en réalisant des mélanges, souvent à partir de plusieurs carrières, permettant de consommer les matériaux de « moindre qualité » avec les matériaux de « bonne qualité ». Ces opérations permettent d'éviter « l'écrémage » des gisements, avec pour conséquence leur épuisement à plus brève échéance.

De telles contraintes nécessitent une étude minutieuse du phasage de l'exploitation prenant en compte une connaissance géologique approfondie du gisement et les paramètres techniques du projet minier, elle permet d'établir plusieurs scénarii possibles de production de clinker. Il faut aussi périodiquement réestimer les réserves par qualité et vérifier si les prévisions initiales ont bien été suivies.

Ceci nécessite une reconnaissance préalable du gisement avec une densité de sondages suffisante qui dépend du degré de complexité de la géologie (mode de dépôt et déformation tectonique) pour aboutir à une modélisation. Cette reconnaissance peut être enrichie en cours d'exploitation par des analyses par exemple des cuttings de foration.

## Les gisements exploités

Etant donné la chimie du clinker, les roches exploitées sont majoritairement des roches carbonatées, calcaires et marnes, éventuellement complétées par des argiles et des sables. Il s'agit surtout de roches sédimentaires, éventuellement de roches métamorphiques (marbres) et exceptionnellement et de manière très marginale de roches ignées. Ces roches sont en général abondantes dans les terrains sédimentaires relativement récents (ères secondaire et tertiaire) et deviennent plus rares dans les terrains plus anciens (primaires et surtout précambriens).

Les techniques d'exploitations sont classiques et non spécifiques (minage fréquent, chargement par pelles ou chargeuses, transport par tombereaux et convoyeurs à bandes...).

Un cas très répandu consiste en l'exploitation simultanée de deux carrières, l'une de calcaire (saturation en chaux  $\gg 100$ ), l'autre d'argile ou de marnes (saturation en chaux  $\ll 100$ ). Le mélange des deux permet d'ajuster la saturation en chaux du cru. Dans certains cas, il existe plusieurs qualités de marnes d'indices siliciques différentes : le mélange de ces qualités permet de régler l'indice silicique du cru. Il est également possible de rajouter du sable (indice silicique élevé) aux marnes et argiles (indice silicique bas) ou si l'indice silicique des marnes ou argiles est trop élevé de rajouter de la bauxite ou de la latérite.

Figure 7 – Exemple de carrière de marne.





La présence d'alcalins, de soufre, de magnésium, de chlore, de phosphore dans les gisements va également intervenir dans la définition des matériaux exploitables et de leurs proportions.

Pour les gisements de calcaires, il n'est pas nécessaire d'avoir un gisement très pur. La présence d'argile (apport notamment de silice et d'aluminium) n'est pas pénalisant à condition que la saturation en chaux reste élevée et surtout assez constante. En revanche la présence de dolomie (carbonate de chaux et magnésie) peut être très pénalisante et condamner un gisement. Les teneurs en soufre et en phosphore doivent également être surveillées. Pour les ajouts ciment d'autres critères comme la teneur en matières organiques ou la richesse en argile ne doivent pas dépasser certains seuils.

Pour les gisements de marnes ou argiles, la constance de la chimie avec éventuellement une séparation à l'extraction des différents faciès chimiques sont également très importants. Il faut surveiller la présence d'éléments pénalisants notamment les alcalins et le soufre.

Pour les gisements de sables, de bauxites :

Les quantités sont faibles (moins de 5 % du cru en général) mais ces matériaux servant de correcteurs chimiques du cru, leurs compositions doivent être bien connues et constantes. De même pour le gypse pour l'ajout ciment : s'il peut contenir de l'anhydrite, le ratio anhydrite sur gypse doit en général être assez constant.

### Références bibliographiques

- Friedrich W Locher : Cement principle of production and use (2006)  
Edition Verlag Bau + Technik, ISBN 3 7640 0420 7
- G. C. Bye: Portland Cement composition production and properties (1999) 2nd edition  
Edition Thomas Telford, ISBN 0 7277 2766 4
- LEA's chemistry of cement and concrete (1998) 4<sup>e</sup> edition  
Editor: Peter C. Hewlett - Elsevier, ISBN 0 7506 6256 7
- H. F. W. Taylor : Cement chemistry (1997) 2<sup>e</sup> edition  
Editor: Thomas Telford, ISBN 0 7277 2592 0