

Ressources Educatives Libres

LE CIMENT ET SES CONSTITUANTS

Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey



Juin 2023

Objectifs

A la fin du cours, l'apprenant doit être capable de :

- Connaître les grandes étapes de fabrication du ciment.
- Reconnaître les composants chimiques du ciment et leur rôle.
- Décrire l'annotation cimentaire des constituants chimiques.
- Décrire le rôle des adjuvants du ciment.
- Reconnaître les différents ciments et leurs propriétés physico-chimiques.

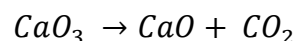
Introduction

Le ciment (du latin *Caementum*, signifiant pierre non taillée), d'une façon générale peut être défini comme étant un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. Cette définition très générale couvre une grande variété de liants hydrauliques. Dans la construction, le terme « ciment » est utilisé dans le cas des liants utilisés avec des pierres, des granulats, du sable des briques, des blocs préfabriqués, etc. Le ciment ou le liant hydraulique, un matériau formé à partir de refroidissement du clinker. Et fabriqué généralement en cuisant vers 1400°C un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment joue un rôle crucial dans la construction des infrastructures modernes, et comprendre sa composition et ses réactions chimiques est essentiel pour optimiser ses performances.

I. FABRICATION DU CIMENT

Les ciments hydrauliques sont principalement composés de silicates et d'aluminates de calcium. Ils peuvent être généralement classés dans l'une des catégories suivantes : ciments naturels, ciments Portland ou ciments alumineux.

Le ciment Portland est le plus fréquemment utilisé. Il est obtenu à partir du calcaire (CaCO_3) et de l'argile (constitué de silicates en général d'aluminium : SiO_2 et Al_2O_3), ce mélange homogène est appelé le cru. Le cru chauffé à très haute température à 1450°C donne le clinker, composant principal du ciment. Lors de la calcination du mélange, le carbonate de calcium (calcaire) se décompose en dioxyde de carbone et en oxyde de calcium selon la réaction :



Les différentes étapes de fabrication du ciment peuvent être résumées en six phases :

1. **Extraction et préparation des matières premières** : Prélever les matières premières (le calcaire et l'argile) sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique à partir de carrières. Les roches sont acheminées par des camions ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage.
2. **Phase d'homogénéisation** : rares sont les carrières homogènes c'est-à-dire la même teneur de calcaire sur l'ensemble du gisement. Pour cette raison on procède à l'harmonisation qualitative de la matière obtenue. Cette homogénéisation permet d'avoir une stabilité de la cuisson. Cette opération peut être réalisée : soit dans un hall où on obtient le mélange

homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle ; soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé.

3. **Séchage et broyage** : Ce sont l'étape visant à favoriser les réactions chimiques ultérieures. Les matières premières sont séchées et broyées (par des broyeurs à boulets ou verticaux à meules) très finement, les dimensions des particules à l'ordre du micron.
4. **Cuisson** : Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa lente progression dans le four, vers la partie basse, à la rencontre de la flamme. La température nécessaire à la clinkérisation est de l'ordre de 1450 °C. Il y a plusieurs sources pour alimenter cette chaleur. À la sortie du four, le clinker doit être refroidi, broyé et entreposé dans des silos.
5. **Refroidissement du clinker** : Après la sortie du clinker de four, la température est de l'ordre de 1400 °C. En utilise des refroidisseurs pour abaisser à environ 250 °C, le refroidissement après la cuisson du clinker dans cette très haute température joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker. Et a également une incidence sur la qualité du ciment. La vitesse de refroidissement, particulièrement à partir de hautes températures, affecte donc la texture de cristallisation des composés du clinker, et par là même, leur réactivité. Un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C3S en C2S qui entraîne une baisse des résistances
6. **Broyage** : Le but de broyage est, première le clinker est finement broyé en poudre, deuxième pour l'ajout du gypse de 3 à 5 % (dont le rôle est de clinker le réguler le phénomène de prise), on obtient le ciment portland. Et les autres ajouts cimentaires (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, pouzzolanes...), qui donnent les différentes catégories des ciments normalisés. Il y a quatre méthodes de broyage du ciment sont : humide, semi-humide, semi-sèche et sèche, qui est la voie la plus employée aujourd'hui.

II. DIFFERENTS PROCÉDES DE FABRICATION

Dans l'industrie cimentière, il existe différents procédés de fabrication du ciment. Parmi ces procédés on cite :

- Procédé par voie sèche.
- Procédé par voie humide.
- Procédé par voie semi-sèche.
- Procédé par voie semi-humide.

II.1 LE PROCÉDE PAR VOIE SECHE

Dans ce procédé, le mélange des matières premières est concassé dans un concasseur et si nécessaire dans un concasseur-sécheur où la matière rencontre les gaz chauds provenant d'un générateur (de gaz chauds) à contre-courant cédant ainsi leur chaleur à la matière.

Cette matière est envoyée dans un broyeur chauffé par les gaz provenant du générateur de gaz chauds (GGC), puis passe dans séparateur chauffé où il y a séparation des grosses particules des fines. Les grosses particules reviennent dans le broyeur. Les fins constituants le produit fini qu'on appelle farine avec un taux d'humidité ne dépassant pas 10/o sont envoyés dans des silos

d'homogénéisation où elles seront homogénéisées avec de l'air. Cette matière (farine) homogène est envoyée dans un four à préchauffer à cyclones.

II.2 LE PROCEDE PAR VOIE SEMI-SECHE

Dans le processus à voie demi-sèche : le mélange est broyé à sec, après son granulé par l'addition de l'eau. En ajoute 10 à 15% d'eau pour produire ces granules.

II.3 LE PROCEDE PAR VOIE HUMIDE

Dans le procédé par voie humide : le mélange des constituants principaux est broyé avec l'ajout de 30 à 40% d'eau. La pâte est envoyée dans des cuves où elle sera mélangée et homogénéisée. La pâte ainsi obtenue est envoyée dans un four très long, dans sa partie supérieure il y a des nombreuses chaînes qui transmettent à leur contact la chaleur des gaz qui les chauffe. Dans le processus à voie semi-humide : Dans cette voie, la pâte est filtrée, et l'envoyée au four. En éliminer par filtration une partie de la teneur en eau et non par évaporation.

III. COMPOSITIONS CHIMIQUES DU CLINKER

La composition chimique du clinker dépend des paramètres suivants :

- La nature des matières premières.
- La température de cuisson.
- Le mode de refroidissement.

Quatre oxydes appelés oxydes majeurs interviennent à plus de 95% dans la composition chimique du clinker sont : chaux vive (CaO), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

Tandis que les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont :

- La magnésie (MgO) qui provient de la dolomite qui est souvent présente avec le calcaire.
- Les oxydes alcalins K_2O et Na_2O qui proviennent en général, de l'argile et des feldspaths.

IV. CONSTITUANTS DU CIMENT

On distingue les constituants principaux (matériau minéral représentant une proportion supérieure à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires) et les constituants secondaires (matériau minéral représentant une proportion inférieure ou égale à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires).

IV.1 CONSTITUANTS PRINCIPAUX

Le clinker Portland est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile déterminé avec précision et contenant des proportions visées de : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et de Fe_2O_3 . Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants.

Au cours du refroidissement du clinker, les principaux composants anhydres obtenus sont :

- Le silicate tricalcique (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) (5-15% du clinker).

Sachant que le clinker contient de faibles quantités, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO) et diverses traces de métaux ; il faudrait que la teneur en alcalis et magnésie reste faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement à stabilité du ciment durci. Par une vue microscopique, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnèrent les noms suivants :

1. **Alite (A)** : Phase cristallisée, se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ . C'est le minéral le plus important et le composé le plus actif du ciment Portland. C'est une solution solide renfermant de nombreux éléments étrangers dans des proportions variables tels que : Al, Mg, Fe, K, Na.
2. **Bélite (B)** : Phase vitreuse, se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés). C'est le constituant qui est responsable sur l'augmentation de résistance à long terme.
3. **Célite (C)** : Phase vitreuse légèrement foncée et claire, se trouve dans le clinker sous forme impure. Il est responsable sur la prise la plus rapide et la chaleur d'hydratation la plus élevée. Par le mode refroidissement du clinker, les cristaux formés ils sont des formes variables.
4. Il existe dans la phase interstitielle du clinker l'Aluminoferrite tétracalcique (**Félite**). L'alluminoferrite de calcium ($4\text{CaO}.\text{Al}_2.\text{Fe}_2\text{O}_3$) est responsable de la coloration du ciment. Son élimination dans le cru de cimenterie permet d'obtenir le ciment blanc.

Tableau 1 : Principales phases du ciment Portland

Constituant	Autre nom	Formule chimique	Notation cimentière
Silicate tricalcique	Alite	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicate bicalcique	Bélite	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminate tricalcique	Célite	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrite tétracalcique	Félite	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3,\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Cette composition chimique garantit les qualités du ciment à terme, donc non seulement pendant la fabrication, mais aussi des mois, et des années après la commercialisation. Pour se là, des analyses sont effectuées sur des échantillons prélevés régulièrement tout au long du processus de fabrication. On analyse aussi les matériaux premiers et les combustibles pour connaître leur teneur des différents constituants et ainsi leur dosage. Ces analyses sont devenues plus importantes, à cause de l'utilisation des produits recycler dans la fabrication du ciment, soit dans les matières premières (par exemple le laitier) ou les combustibles (déchets ne dégageant pas de fumées toxiques). En plus de ça, cette analyse permet de contrôler le four : lorsque le taux de chaux libre (CaO) est très élevé, laisser entendre que le four n'est pas assez chaud.

La qualité finale est évaluée par des modules, c'est-à-dire des valeurs calculées à partir de la composition.

- Module hydraulique: $MH = \%CaO / (\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) = 1,5 - 2,7$
- Module silicique: $MS = \%SiO_2 / (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) = 1,9 - 3,2$
- Module aluminique : $MA = \%Al_2O_3 / \% Fe_2O_3 = 1,5 - 2,3$

Sulfate de calcium : Il est ajouté aux autres constituants du ciment pour réguler la prise (de 3 à 5% du poids du ciment). C'est en général du gypse (sulfate de calcium hydraté $CaSO_4 \cdot 2H_2O$), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre $CaSO_4$) ou de l'hémihydrate ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$).

IV.2 CONSTITUANTS SECONDAIRES

Les compositions secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou artificiels ajoutées aux constituants principaux du ciment, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux. Ils ne peuvent excéder 5% du poids total du ciment.

IV.3 ADDITIFS

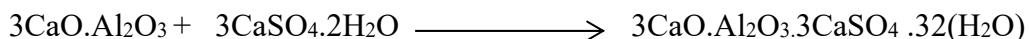
Des constituants ajoutés pour l'amélioration de fabrication du ciment et leur propriété, et ne doivent pas présenter une action nocive sur elle. Le pourcentage des additifs doit être toujours faible, ne dépasse pas 1% de la masse total, et pour certain cas d'additif organique ne doit pas être supérieur à 0.5%.

IV.4 ROLES DES COMPOSANTS DU CIMENT

- L'hydratation du silicate tricalcique ($3CaO \cdot SiO_2$) est responsable des résistances mécaniques à court terme.

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3CaO (H_2O)_2$$
- Le silicate bicalcique ($2CaO \cdot SiO_2$) qui s'hydrate beaucoup plus lentement donne des résistances mécaniques à long terme.

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + CaO(HO)_2$$
- L'aluminate tricalcique ($3CaO \cdot Al_2O_3$) s'hydrate très vite. On y ajoute du gypse comme régulateur de prise en masse. La réaction conduit à la formation des cristaux qui retardent la prise en masse du ciment.



- L'alluminoferrite de calcium ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) est responsable de la coloration du ciment. Son élimination dans le cru de cimenterie permet d'obtenir le ciment blanc.

L'ensemble de ces réactions traduit la solidification du ciment.

V. PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU CIMENT

La durabilité du ciment ou d'un béton est liée, dans un environnement donné, à ses propriétés physico-chimiques.

V.1 MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique pour un ciment Portland (anhydre), est entre 2900 à 3150 Kg/ m³, mesurée avec pycnomètre à alcool.

V.2 GRANULOMETRIE

Les particules du ciment ont des dimensions à l'ordre de 1 à 60 µm. Généralement, on utilise un granulomètre laser, pour leurs classements granulométriques, dont le principe repose sur la diffraction des rayons laser dans une cellule contenant la poudre en suspension.

V.3 INDICE D'HYDRAULICITE

L'indice d'hydraulicité ou l'indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique :

$$I = \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

Si l'indice d'hydraulicité est élevé, une meilleure résistance chimique :

- Quand $I > 0,5$ le ciment est dit basique (portland).
- Quand $I < 0,5$ le ciment est dit neutre (riche en laitier).
- Quand $I = 1$ le ciment est dit acide (conventionnellement), ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non de la chaux, mais de l'alumine (ciment alumineux).

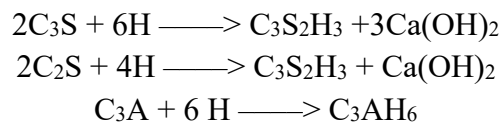
Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$0,45 < \frac{Al_2O_3}{SiO_2} < 0,50 \qquad 1,4 < \frac{CaO}{SiO_2} < 1,45$$

V.4 HYDRATATION DU CIMENT

Les réactions qui transforment le ciment Portland en un liant ont lieu dans la pâte en présence d'eau. En d'autres termes, en présence d'eau, les silicates et les aluminates énumérés dans le tableau 1 forment des produits d'hydratation qui donnent avec le temps une masse ferme et dure : la pâte du ciment hydraté.

Principales réactions avec l'eau :



NB : Pour les deux premières réactions, les coefficients stœchiométriques ne sont qu'à titre indicatif.

La libération d'hydroxyle de calcium ($Ca(OH)_2$) lors de la prise, donne au ciment un pH basique (13 à 13,5). Ce pH très élevé se traduit par la nécessité de se protéger la peau lors de la mise en

œuvre du ciment afin d'éviter ce qui était appelé la gale du ciment. Il présente par contre l'avantage de passiver l'acier utilisé dans le béton armé et donc de le protéger de la corrosion. Le pH élevé du ciment le rend sensible aux attaques acides : l'hydroxyde de calcium, mais aussi le silicate de calcium hydraté passe en solution. Cette solubilité en milieu acide peut être utilisée avec profit, par exemple, pour éliminer les traces de ciment après la réalisation d'un carrelage.

Lorsque le ciment est en contact régulier avec l'eau de pluie, l'hydroxyde de calcium, légèrement soluble dans l'eau (1,3 g/L à 20°C), sera au cours du temps entraîné et augmentera la porosité du ciment. Par ailleurs, également au cours du temps l'hydroxyde de calcium se carbonate au contact de l'atmosphère. Tous ces phénomènes de vieillissement se traduisent par une diminution du pH et si celui-ci devient inférieur à neuf, les armatures d'acier ne sont plus passivées, le fer s'oxyde en donnant des produits d'oxydation plus volumineux que le fer de départ tels que les oxydes de fer et cela se traduit par l'éclatement du ciment une altération de l'aspect esthétique de l'ouvrage et une corrosion accélérée du fer par conséquent une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

L'hydroxyde de calcium porté à une température élevée ($> 400^{\circ}\text{C}$) température qui peut être atteinte lors d'un incendie, se déshydrate en oxyde de calcium CaO après refroidissement, en présence de l'humidité atmosphérique, l'oxyde de calcium se réhydrate lentement avec une augmentation considérable de volume ce qui entraîne l'éclatement du matériau.

V.5 PRISE DU CIMENT

La prise est le terme utilisé pour décrire le raidissement de la pâte de ciment, bien que la définition du raidissement de la pâte ayant fait prise soit quelque peu arbitraire. Généralement, la prise fait référence au passage d'un état fluide à un état rigide. Il semble que la prise soit provoquée par une hydratation sélective des composés du ciment les deux premiers à réagir sont C_3A et le C_3S . Il existe des composés (adjuvants) retardateurs ou accélérateurs de prise du ciment. Les retardateurs sont utiles lors des travaux de bétonnage par temps chaud lorsque le temps de prise normal est diminué de la température élevée. C'est le cas du gypse par exemple qui retarde la formation d'hydrate d'aluminate de calcium et permet ainsi au C_3S de faire prise en premier, le méthanol, des sucres, des sels solubles du zinc sont aussi des retardateurs. Par contre les accélérateurs de prise, sont utilisés quand le béton doit être mise en œuvre à de faibles températures (2 à 4°C), ou lors des travaux de réparation d'urgence ou dans une finition rapide de la surface du béton. L'accélérateur le plus utilisé est le chlorure de calcium (CaCl_2) ; bien qu'il soit efficace et peu coûteux, il a un défaut : la présence d'ions chlore, au voisinage des armatures d'acier ou autre acier noyé dans le béton, contribue fortement à leur corrosion. Le temps de prise du ciment diminue avec l'augmentation de la température, mais, au-dessus d'environ 30°C , un effet contraire peut être observé. A basse température, la prise est retardée.

Fausse prise en général en ajoute un peu de gypse aux constituants des ciments. Par qu'au cours du broyage, il y a une possibilité de s'échauffent les clinkers trop, alors un peu de plâtre est se formée $[\text{SO}_4\text{Ca}, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}]$ dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la

« fausse prise », dans ce cas n'ajoute pas l'eau, mais il faut augmenter la période de malaxage. Les ciments les très sensibles sont ceux à très fine mouture ou à fort pourcentage de gypse.

V.6 LE DURCISSEMENT DU CIMENT

Le durcissement est la phase qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. La durée de durcissement est contenue des mois pendant que les résistances mécaniques continuent à augmenter. Comme la prise, le phénomène de durcissement est sensible à la température, ce qui conduit particulièrement en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

VI. LES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT

Les ciments sont classés en cinq catégories principales, qui sont repérées par des chiffres romains :

- Type I: ciments Portland
- Type II: ciments Portland composés
- Type III: ciments de haut fourneau
- Type IV: ciments pouzzolaniques
- Type V: ciments aux laitiers et aux cendres

Ces 5 ciments sont des ciments normalisés au niveau européen : il existe aussi d'autres liants comme :

- **Les ciments blancs** : ce sont des ciments de Portland, la matière première est exempte d'oxyde de fer et des divers autres oxydes métalliques susceptible de colorer le ciment
- **Les ciments à maçonner** : ils sont de propriétés proches, mais inférieures à celles du ciment le Portland.
- **Les ciments laitiers à chaux** : ce sont des ciments essentiellement de laitier granulé de haut fourneau et de chaux (ces dernières sont fabriquées à partir de calcaire contenant de 5 à 20% d'argile)
- **Les ciments prompts** : fabriqués à basse température que le ciment Portland, ils sont principalement constitués de silicate bicalcique, d'aluminate calcique et de sulfoamate de calcium. Ils sont à prise et à durcissement rapides.
- **Les ciments alumineux fondus** : ils sont obtenus par fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite ferrugineuse. Pauvres en SiO_2 (4 à 10%), ils sont riches en Al_2O_3 (40 à 45%). Ce sont des ciments à haute résistance mécanique, de prise très lente, mais un durcissement très rapide.