

Glossaire

| | |
|-----------------------|--|
| Moulable | Qui peut être moulé, se prête au moulage, en parlant d'une matière |
| La silice | C'est la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2) qui entre dans la composition de nombreux minéraux |
| La chaux | C'est un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium de formule brute CaO |
| La ferrite | C'est une solution solide de carbone dans l'allotrope α du fer. Le terme ferrite désigne en effet l'acier à très faible teneur en carbone |
| L'alumine | Ou oxyde d'aluminium de formule Al_2O_3 est le plus abondant oxyde métallique de la croûte terrestre après la silice. Elle existe sous forme hydratée dans un minerai naturel, la bauxite. |
| La magnésie | C'est simplement l'oxyde de magnésium dans l'ancienne nomenclature chimique et minéralogique |
| Le trioxyde de soufre | Le trioxyde de soufre, jadis également appelé anhydride sulfurique, est un composé chimique de formule SO_3 . Cet oxyde du soufre, élément non métallique, est un solide cristallisé incolore fondant dès $16,9^\circ\text{C}$. |
| L'oxyde de sodium | C'est un composé de formule Na_2O . Il réagit avec l'eau pour donner de l'hydroxyde de sodium. Il est utilisé dans la fabrication du verre. |
| L'oxyde de potassium | C'est un composé chimique de formule brute K_2O . Il se présente sous la forme d'un solide cristallisé ionique jaune pâle très réactif et par conséquent très rare dans le milieu naturel. Qu'on appelle aussi agrégat, est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm, destiné à entrer dans la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics |
| Le granulat | |
| Mortiers | C'est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et d'agréats avec de l'eau |
| Le béton | Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de granulats, de sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (le plus souvent du ciment) qui sert de « colle ». |
| Les scories | Ce sont des sous-produits solides issus de la fusion, de l'affinage, du traitement ou de la mise en forme des métaux à haute température. |

| | |
|----------------|--|
| Gypse | Le gypse, dénommé aussi gypsite ou pierre à plâtre, est une roche tendre saline ou une évaporite commune, voire abondante, entièrement cristallisée, composée principalement du minéral gypse, un sulfate doublement hydraté de calcium, décrite par la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ |
| Slurry | C'est une boue est un mélange de solides plus denses que l'eau, en suspension dans un liquide, généralement de l'eau. |
| La lave | C'est une roche, en fusion ou solidifiée, émise par un volcan lors d'une éruption |
| Le gâchage | Le gâchage du mortier consiste à mélanger une certaine quantité d'eau, de sable, et de liant tel que le ciment ou la chaux. |
| La portlandite | C'est un corps chimique minéral, l'hydroxyde de calcium de formule brute $\text{Ca}(\text{OH})_2$ |
| L'ettringite | C'est une espèce minérale, composée de sulfate de calcium et d'aluminium hydraté, |

RESUME

L'objectif de notre travail est d'étudier les différentes voies et processus de fabrications du ciment et leurs applications dans les différents ouvrages afin d'identifier les différents axes de recherches liés à l'industrie cimentière. Car, l'industrie du ciment occupe une place prépondérante dans les économies de toutes les nations, nécessaire pour la réalisation des projets de construction dans les domaines industriels, économiques, sociaux et culturels tout en essayant de répondre aux exigences futures de la conservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement. Par ailleurs, ces dernières décennies se sont souvent accompagnés par la valorisation des produits secondaires ou des déchets qui ont une incidence directe et néfaste sur notre environnement mettant en place une variété de ciments qui ont des résistances, de vitesses de prise et de durcissement qui est à l'attente des utilisateurs et adaptées au domaines d'employabilité.

Mots clés : Ciment, construction, ressources naturelles, résistances, prise, durcissement

ABSTRACT

The objective of our work is to study the different ways and processes of cement manufacturing and their applications in different structures in order to identify the different lines of research in the cement industry. Because, the cement industry occupies a preponderant place in the economies of all nations, necessary for the realization of construction projects in the industrial, economic, social and cultural fields while trying to meet the future requirements of the conservation of resources natural and environmental protection. In addition, these last decades have often been accompanied by the valuation of secondary products or waste which have a direct and harmful impact on our environment, setting up a variety of cements which have strengths, setting speeds and hardening which is to the expectations of users and adapted to the areas of employability.

Keywords: Cement, construction, natural resources, resistance, setting, harde

Liste des figures :

| | |
|---|-----------------------------|
| Figure 1: Le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure2: Le Colisée à Rome | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 3: Le Pont du Gard | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 4: Composition des différents constituants du ciment dans un diagramme ternaire: silice-calcium-alumine | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 5: Le profil d'un haut-fourneau | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 6: Les pouzzolanes | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 7: Les cendres volantes | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 8 : Le calcaire issu de la carrière et broyé | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 9: Fumée de silice vue au Microscope électronique à balayage (a) | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 10: Etape de fabrication du ciment | 15 |
| Figure 11: Exemple de composition du cru | 16 |
| Figure 12: Etape de la cuisson [W8] | 18 |
| Figure 13: Etape de broyage [W8] | 18 |
| Figure 14: Stockage, conditionnement, expédition [W8] | 19 |
| Figure 15: Diagramme chaux-silice montrant l'évolution de la solution lors de l'hydratation | 35 |
| Figure 16: Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment d'après Bensted [VERNET, 1992] | 40 |
| Figure 17: Illustration de la contraction le Chatelier dans une pâte de ciment et de l'auto dessiccation qui en résulte [C. Richet, 2004] | 42 |
| Figure 18: Représentation schématique de la pâte de ciment [Pigeon, 1981] | 43 |

Liste des tableaux :

| | |
|--|---------------------------------------|
| Tableau 1: Evolution de l'industrie du ciment : | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 2: Nomenclature cimentière..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 4: Temps de début de prise et stabilité des ciments..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 5: Désignation normalisée d'un ciment courant bénéficiant du marquage CE et de la marque NF | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 6: Valeurs limites de résistance à la compression | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 7: Ciments comportant du laitier de haut fourneau | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 8: Désignation du ciment à maçonner | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 9: Résistance à la compression : | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 10: Evolution de la résistance dans le temps | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 11: Exigences mécaniques et physiques données comme valeurs caractéristiques..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 12: Principaux hydratés | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 1: Evolution de l'industrie du ciment : | 4 |
| Tableau 2: Nomenclature cimentière..... | 5 |
| Tableau 3: Classes de résistance des ciments courants | 22 |
| Tableau 4: Temps de début de prise et stabilité des ciments..... | 23 |
| Tableau 5: Désignation normalisée d'un ciment courant bénéficiant du marquage CE et de la marque NF | 24 |
| Tableau 6: Valeurs limites de résistance à la compression | 25 |
| Tableau 7: Ciments comportant du laitier de haut fourneau | 28 |
| Tableau 8: Désignation du ciment à maçonner | 29 |
| Tableau 9: Résistance à la compression : | 30 |
| Tableau 10: Evolution de la résistance dans le temps | 31 |
| Tableau 11: Exigences mécaniques et physiques données comme valeurs caractéristiques..... | 32 |
| Tableau 12: Principaux hydratés | 41 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| I. DEFINITION ET HISTORIQUE DU CIMENT : | 2 |
| II. NOMENCLATURE CIMENTIERE :..... | 5 |
| III. CONSTITUANTS DU CIMENT | 6 |
| III.1. DEFINITION DES CONSTITUANTS : | 6 |
| III.2. PROPRIETES DES CONSTITUANTS :..... | 6 |
| III.2.1. CLINKER (K) : | 7 |
| III.2.2. LAITIER POUR CIMENTERIE (S) : | 7 |
| III.2.3. POUZZOLANE (P) :..... | 8 |
| ➤ POUZZOLANE NATURELLE :..... | 9 |
| ➤ POUZZOLANE ARTIFICIELLE :..... | 9 |
| III.2.4. CENDRES VOLANTES (V OU W) : | 9 |
| III.2.5. CENDRE VOLANTE DE HOUILLE (V) : | 10 |
| III.2.6. CENDRE VOLANTE DE LIGNITE (W) : | 10 |
| III.2.7. SCHISTES CALCINES (T) : | 10 |
| III.2.8. CALCAIRES (L) : | 11 |
| III.2.9. FUMEEES DE SILICE (D) : | 12 |
| III.2.10. FILLERS OU CONSTITUANTS SECONDAIRES : | 13 |
| III.3. ADDITIFS :..... | 13 |
| III.3.1. SULFATE DE CALCIUM : | 13 |
| III.3.2. SELS SOLUBLES :..... | 13 |
| III.3.3. AGENTS DE MOUTURE | 14 |
| IV. FABRICATION DU CIMENT :..... | 14 |
| IV.1. PROCEDE DE FABRICATION : | 14 |
| IV.2. PROCESSUS DE FABRICATION : | 14 |
| IV.2.1. ÉTAPE 1 : FABRICATION D'UN CRU : | 16 |
| IV.2.2. ÉTAPE 2 : LIGNE DE CUISSON :..... | 17 |
| IV.2.3. ÉTAPE 3 : PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT :..... | 18 |
| IV.2.4. CONTROLE DE FABRICATION ET DE QUALITE :..... | 19 |
| V. PROPRIETES DES CEMENTS | 19 |
| V.1. PROPRIETES MECANIQUES..... | 19 |
| V.2. PROPRIETES CHIMIQUES : | 19 |
| VI. TYPES DE CEMENTS, COMPOSITION ET DESIGNATION NORMALISEE | 20 |

| | |
|---|----|
| VI.1. NORMALISATION, MARQUAGE CE ET MARQUE NF DES CEMENTS | |
| COURANTS : | 21 |
| VI.1.1. CLASSES DE RESISTANCE : | 22 |
| VI.1.2. EXIGENCES PHYSIQUES : | 22 |
| VI.1.3. Exigences chimiques | 23 |
| VI.1.4. EXEMPLE DE DESIGNATION D'UN CIMENT COURANT : | 23 |
| VI.2. LES CEMENTS PORTLAND CEM I - NORME NF EN 197 – 1 : | 24 |
| a) COMPOSITION : | 24 |
| b) VALEURS LIMITEES : | 24 |
| c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI : | 25 |
| d) PRECAUTIONS PARTICULIERES : | 26 |
| VI.3. LES CEMENTS PORTLAND COMPOSES - CEM II NORME NF EN 197 – 1 :.... | 26 |
| a) COMPOSITION : | 26 |
| b) VALEURS LIMITEES : | 26 |
| c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI : | 26 |
| d) PRECAUTIONS PARTICULIERES : | 26 |
| VI.4. LES CEMENTS BLANCS : | 26 |
| a) COMPOSITION et CARACTERISTIQUES : | 27 |
| b) DOMAINES D'EMPLOI : | 27 |
| VI.5. LES CEMENTS COMPORTANT DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU NORME NF EN 197 - 1 | 27 |
| a) COMPOSITION : | 27 |
| b) VALEURS LIMITEES : | 28 |
| c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI : | 28 |
| d) PRECAUTIONS PARTICULIERES : | 29 |
| VI.6. LES CEMENTS MACONNIER MC - NORME NF EN 413 - 1 | 29 |
| a) COMPOSITION | 29 |
| b) CLASSES DE RESISTANCE : | 29 |
| c) VALEURS LIMITEES : | 29 |
| VI.7. LE CIMENT PROMPT NATUREL CNP - NORME NF P 15 - 314 | 30 |
| a) COMPOSITION | 30 |
| b) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI : | 30 |
| c) CARACTERISTIQUES : | 30 |
| d) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI : | 31 |
| e) PRECAUTIONS D'EMPLOI : | 31 |
| VI.8. LE CIMENT D'ALUMINATE DE CALCIUM CA NORME NF EN 14647 | 32 |

| | |
|--|----|
| a) COMPOSITION : | 32 |
| b) CARACTERISTIQUES : | 32 |
| c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI : | 32 |
| d) PRECAUTIONS D'EMPLOI : | 33 |
| VII. HYDRATATION DU CIMENT : | 33 |
| VII.1. HYDRATATION DES PHASES PURS : | 33 |
| a) HYDRATATION DES PHASES SILICATES : | 33 |
| b) HYDRATATION DES PHASES ALUMINATES : | 36 |
| c) HYDRATATION DU FERROALUMINATE TRICALCIQUE : $C_2(Ax, F1 - x)$ | 38 |
| VII.2. EFFET DES SULFATES SUR L'YDRATATION DU CIMENT : | 38 |
| a) EFFET DES SULFATES SUR L'HYDRATATION DES C_3S : | 38 |
| b) EFFET DES SULFATES SUR L'HYDRATATION DES ALUMINATES : | 39 |
| VII.3. ÉVOLUTION DE L'HYDRATATION : | 39 |
| a) LA PERIODE DE PRE-INDUCTION | 40 |
| b) LA SECONDE PERIODE, | 40 |
| VII.4. LES PHASES HYDRATEES DU CIMENT PORTLAND : | 40 |
| a) LA PORTLANDITE : | 42 |
| b) LES C-S-H : | 42 |
| c) LES ALUMINATES HYDRATES : | 43 |
| VIII. L'INDUSTRIE CIMENTIERE : QUELQUE IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIETAUX : | 44 |
| VIII.1. LE PAYSAGE DE LA CIMENTERIE SENEGALAISE : | 44 |
| a) SOCOCIM | 44 |
| b) CEMENTS DU SAHEL : | 44 |
| c) DANGOTE : | 45 |
| VIII.2. MAITRISE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DIRECTS : | 45 |
| CONCLUSION : | 46 |
| REFERENCES : (Classées par ordre alphabétique)..... | 47 |
| WEBOGRAPHIE : | 49 |

INTRODUCTION

Parmi les matériaux de construction, les matériaux hydrauliques présentent l'avantage d'être modelables. Vers 2600 ans avant J.C., les Egyptiens ont commencés à utiliser des mortiers pour les joints, parements et les fixations de céramiques : il s'agissait d'un mélange de chaux, d'argile, de sable et d'eau. Il y a plus de deux mille ans les Romains ont amélioré la prise et le durcissement de ce liant en ajoutant de la terre volcanique de Pouzzoles à de la chaux vive obtenue par cuisson du calcaire et ont ainsi inventé le béton [BUR NICOLAS, 2012].

L'invention du ciment portland est généralement attribuée à Joseph ASPDIN, un maçon anglais celui-ci obtient en 1824 un brevet pour son produit, qu'il nomma ciment portland parce qu'il produisait un béton qui avait la couleur de l'excellente pierre naturelle extraite de la presque île calcaire de **Portland** située sur la Manche, à l'ouest de l'île de Wight en Angleterre le nom a été conservé et est utilisé partout dans le monde [SALHI KAMEL, 2007, p5].

Sous l'impulsion de la révolution industrielle, l'humanité s'est découverte une multitude de savoirs, de savoir-faire, de possibilités et de perspectives de développement économique notamment par l'apparition de métiers, de secteurs d'activités tels que celui de l'industrie cimentière. L'industrie du ciment occupe une place prépondérante dans les économies de toutes les nations. Elle est un élément nécessaire pour la réalisation des projets de construction dans les domaines industriels, économiques, sociaux et culturels tout en essayant de répondre aux exigences futures de la conservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement. Ainsi, les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner.

L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental.

L'objectif de ce travail est d'étudier la conception et les applications du matériau inorganique, le ciment. Ainsi, nous avons structurés ce mémoire en trois grandes parties :

La première partie consiste, à faire une revue de la littérature portant principalement sur l'historique du ciment ; de la nomenclature cimentière ; de décrire les constituants du ciment et leurs propriétés hydrauliques, physiques, pouzzolaniques etc.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des processus et procédés de fabrications du ciment de la carrière à la livraison ; d'évaluer la qualité du ciment ; de présenter les propriétés physico-chimiques du ciment (résistances mécanique, durcissement,...).

Et enfin, la troisième partie montre les caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répondant aux usages très divers du ciment, la notion d'hydratation du ciment regroupant les réactions chimiques mises en jeu entre le ciment et l'eau et en évoquant les enjeux environnementaux liés aux industries cimentières.

I. DEFINITION ET HISTORIQUE DU CIMENT :

Le ciment est un liant hydraulique. C'est un matériau anhydre finement broyé qui, par simple mélange avec l'eau, développe des hydrates dont l'imbrication rigidifie le matériau granulaire non cohésif de départ en matériau cohésif présentant des propriétés mécaniques élevées.

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" $Ca(OH)_2$ et des cendres volcaniques (riche en silice), notamment celle de la région de Pouzzoles (Naples en Italie). L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation et les secrets de fabrication de ce matériau se sont ensuite perdus à la chute de l'Empire face au retour de la maçonnerie en pierre [Ahmed Abdo Al-Eyani, 2016 /2017, p3]



Figure1 : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre [W1]



Figure2 : Le Colisée à Rome. [W2]



Figure 3 : Le Pont du Gard [w3]

J. Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile. En 1817, **Vicat** donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. **J. Apsdin** donne le nom de **Portland** au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Mais la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, moulable avec une bonne résistance à la compression et qui rend inutile la taille de la pierre. [YAHIA Mohamed, 2015/2016, p4]

Tableau 1: Evolution de l 'industrie du ciment :

| Evolution de l'industrie du ciment | | |
|------------------------------------|---|-------------------|
| 1800-1900 | Etude des propriétés hydrauliques de la chaux | John Smeaton |
| | | James Parker |
| | | Louis Vicat |
| | Découvert du ciment Portland | Joseph Aspedin |
| | | Isaac Johnson |
| | Etude de la composition chimique et minéralogique | Le Chatelier |
| | | Tönebolm |
| | Proportion du standard pour le ciment | Wilhelm Michaelis |

| | | |
|-----------|---|-----------------------|
| | Invention du four rotatif | Atlas Portland cement |
| 1900-1950 | Préchauffage four | |
| | Précalcinateur du four | |
| 1950-2011 | Innovation dans les industries de mesure | |
| | Réduction du coût et de la quantité de l'énergie | |
| | Développement essentielle des ressources d'informations | |
| | Développement du système de control a base informatique | |
| | Avancement dans les régulations et les techniques pour contrôler la pollution | |

II. NOMENCLATURE CIMENTIERE :

Les constituants du ciment sont des oxydes. Pour les désigner, les cimentiers utilisent une notation abrégée, fondée sur la nature de l'élément oxydé, que nous utiliserons intensivement. En voici le code :[W4]

Tableau 2:Nomenclature cimentière.

| Nom | Formule chimique | Notation symbolique |
|-----------------------|------------------|---------------------|
| La silice | SiO_2 | S |
| La chaux | CaO | C |
| L'eau | H_2O | H |
| La ferrite | Fe_2O_3 | F |
| L'alumine | Al_2O_3 | A |
| La magnésie | MgO | M |
| Le trioxyde de soufre | SO_3 | \bar{S} |
| L'oxyde de sodium | Na_2O | N |
| L'oxyde de potassium | K_2O | K |
| Le dioxyde de calcium | CaO_2 | \bar{C} |

Cette notation permet d'écrire les réactions chimiques de transformation de ces éléments lors de l'hydratation, entre autre. L'expression en oxydes est une simplification d'écriture mais ne correspond pas à la réalité physique, ces éléments étant cristallisés pour la majorité d'entre eux.

Il existe deux grandes familles de Ciments :

1. **Les ciments Portland**, constitués majoritairement de silice et de chaux et qui sont utilisés principalement dans les bétons et les ouvrages de génie civil ;

2. **Les ciments alumineux** qui se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont été développés au début du 20^{ème} siècle par **Bied [Réf]**. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour la confection de sols industriels, d'ouvrage d'assainissements ou des mises en service rapides, et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière.

III. CONSTITUANTS DU CIMENT

III.1. DEFINITION DES CONSTITUANTS :

Les constituants du ciment sont :

- Soit des produits spécialement fabriqués à cet effet (Clinker, pouzzolanes artificielles) ;
- Soit des sous-produits d'autres industries qui subissent, en vue de leur incorporation dans les ciments, une sélection et une préparation plus ou moins élaborée (laitier, cendres volantes) ;
- Soit 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).

III.2. PROPRIETES DES CONSTITUANTS :

Les principales propriétés des constituants sont :

- **Des propriétés hydrauliques** (dans la zone verte), c'est-à-dire qu'ils forment, par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau, présentant une forte **adhérence** entre eux et aux granulats, et créant ainsi progressivement une cohésion **croissante** des pâtes, des mortiers et des bétons. Parfois, pour se déclencher, ces propriétés hydrauliques nécessitent l'intervention d'un catalyseur constitué par une base forte (notamment chaux ou chaux naissante libérée par la prise du clinker) ;
- **Des propriétés pouzzolaniques** (dans la zone violette), c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec de la chaux, des composés hydratés, stables, analogues à ceux formés par les constituants hydrauliques au cours de leur hydratation ;
- **Des propriétés physiques**, qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité...). Les principaux constituant entrant dans la composition du ciment sont situés sur le trait rouge, qui présente un rapport de Si/Al constant. [NORME CAMEROUNAISE NC 234, 2005,p5]

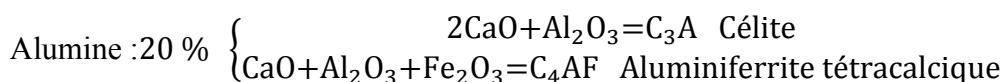
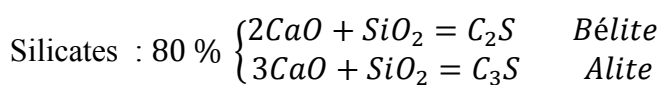


Figure 4 : composition des différents constituants du ciment dans un diagramme ternaire : silice-calcium-alumine. [HOLCIM Christophe charron,2008, p55]

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

III.2.1. CLINKER (K) :

Le constituant principal des ciments industriels actuels est le clinker, mot anglais signifiant «scorie». Produit constitué en majeure partie de **silicates** et d'aluminates de calcium **anhydres**, obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (**clinkérisation**) d'un mélange dosé et homogénéisé de matières crues ayant principalement comme composants de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), et en proportions moindres, de l'alumine, Al_2O_3 et de l'oxyde de fer Fe_2O_3 , le clinker est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins **deux tiers**, en masse, de silicates de calcium (Silicates tricalcique $(CaO)_3, SiO_2$ (Alite) et dicalcique $(CaO)_2, SiO_2$ (Bélite)), la partie restante contenant de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes. Le rapport en masse (CaO/SiO_2) ne doit pas être inférieur à 2. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5,0% en masse. Exemple de proportion des composants du clinker portland :



III.2.2. LAITIER POUR CIMENTERIE (S) :

Produit granulé obtenu par refroidissement brusque (généralement trempé à l'eau) de la scorie en fusion provenant principalement du traitement des minerais de fer en haut-fourneau : le laitier doit avoir des propriétés hydrauliques pour convenir à l'emploi en cimenterie.

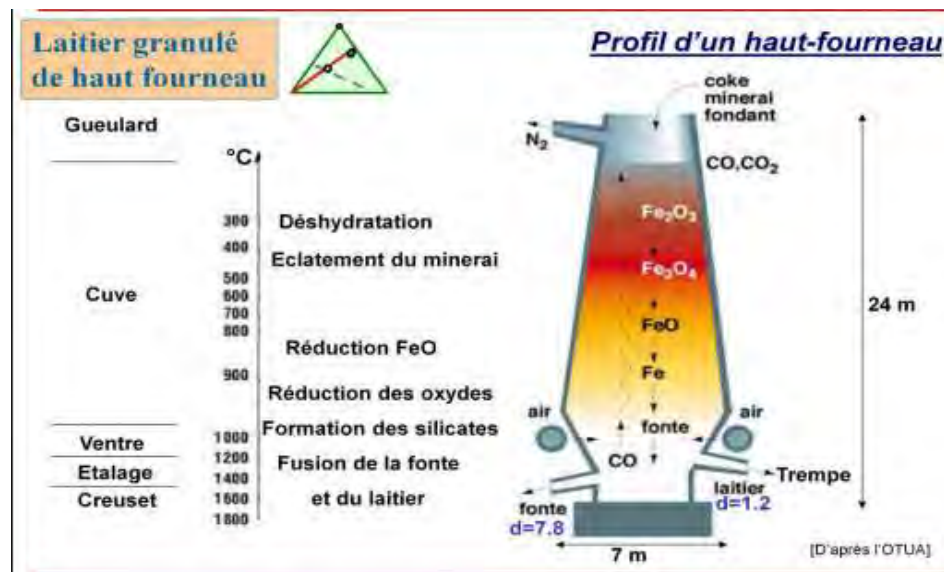


Figure 5 : le profil d'un haut-fourneau [HOLCIM Christophe charron,2008, p67]

Broyer avec le clinker, il donne des propriétés spécifiques. Il est utilisé pour la fabrication des ciments entrant dans la construction de bétons devant résister à des environnements agressifs.

Le laitier granulé de haut fourneau doit contenir au moins deux tiers, en masse, de laitier vitreux. Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme CaO , MgO et SiO_2 . Le restant contient Al_2O_3 , avec, en outre, de faibles quantités d'autres oxydes.

III.2.3. POUZZOLANE (P) :

Les pouzzolanes peuvent être naturelles ou issues de la calcination d'argile (artificielle).

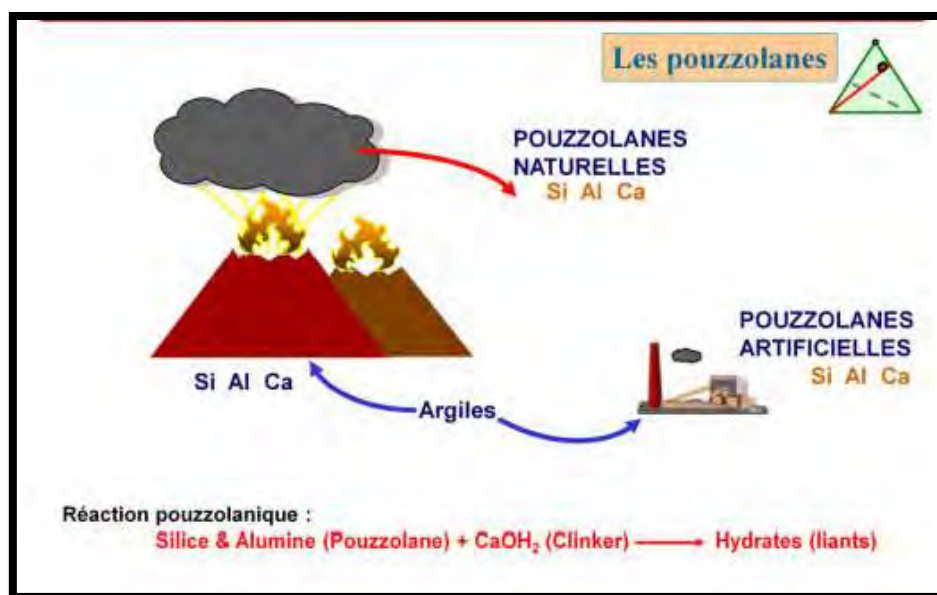


Figure 6 : la pouzzolane [HOLCIM Christophe charron,2008, p70]

➤ POUZZOLANE NATURELLE :

Produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes naturelles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température ambiante habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] dissous, pour former des composés de **silicate de calcium** et **d'aluminate de calcium** développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matières hydrauliques.

➤ POUZZOLANE ARTIFICIELLE :

Toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

III.2.4. CENDRES VOLANTES (V OU W) :

Les cendres volantes sont de nature silico-alumineuse ou silico-calcaire. Les premières ont des propriétés pouzzolaniques ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques. La perte au feu des cendres volantes sèches doit, dans tous les cas, être inférieure ou égale à 7% en masse. De plus, dans cette limite, pour une usine donnée, une livraison de cendres ne doit pas présenter une perte au feu s'écartant de plus de 2 %, en absolu, de la perte au feu moyenne calculée sur l'ensemble des livraisons annuelles.

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

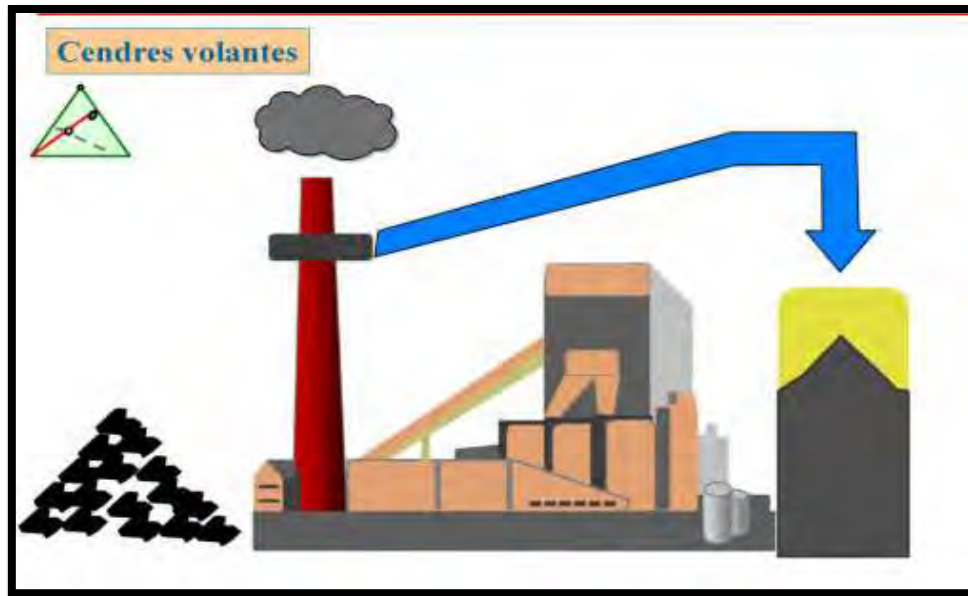


Figure 7 : les cendres volantes [HOLCIM Christophe charron,2008, p65]

III.2.5. CENDRE VOLANTE DE HOUILLE (V) :

Produit pulvérulent, résidu de la combustion en centrale thermique de houille pulvérisée, généralement entraîné par les fumées.

La cendre volante de houille contient, en majeure partie, sous forme vitreuse, de la silice, de l'alumine et une faible quantité de chaux. Il est important de souligner que seule la cendre volante de houille présentant des propriétés pouzzolaniques est utilisée en cimenterie.

III.2.6. CENDRE VOLANTE DE LIGNITE (W) :

Produit pulvérulent, résidu de la combustion en centrale thermique de certains lignites pulvérisés, généralement entraîné par les fumées. Cette cendre volante a une teneur élevée en chaux qui peut nécessiter une extinction préalable ; elle doit avoir des propriétés hydrauliques pour convenir à l'emploi en cimenterie.

III.2.7. SCHISTES CALCINES (T) :

Les schistes calcinés, et en particulier les schistes bitumineux calcinés, sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800°C. Du fait de la composition de la matière naturelle ainsi que du procédé de production, les schistes calcinés contiennent des phases du

clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique, de même que de petites quantités de chaux libre CaO et de **sulfate de calcium**, ainsi que des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolaniques, particulièrement le SiO_2 .

De ce fait, les schistes calcinés finement broyés montrent de fortes propriétés hydrauliques, comme le ciment Portland, et, en plus, des propriétés pouzzolaniques.

Si la proportion de schistes calcinés dans le ciment excède 5% en masse (constituant principal) seuls les schistes calcinés satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisés : les schistes calcinés finement broyés, doivent avoir une résistance à la compression d'au moins $25,0 \text{ N/mm}^2$ à 28 jours. L'expansion des schistes calcinés doit être inférieure à 10 mm en utilisant un mélange de 30% en masse de schistes calcinés broyés et de 70% en masse de ciment de référence (ciment pur, sans ajout autre que le gypse). Si le contenu en SO_3 des schistes calcinés excède la valeur limite du SO_3 du ciment, ceci doit être pris en compte pour la fabrication du ciment en réduisant de façon appropriée les constituants contenant des sulfates

Le mortier est préparé avec des schistes calcinés seuls à la place du ciment. Les échantillons de mortier doivent être démoulés 48 h après leur préparation, puis conservés en atmosphère humide d'au moins 90% d'humidité relative, jusqu'à l'essai.

III.2.8. CALCAIRES (L) :

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excédant 5% en masse (constituant principal), les calcaires doivent satisfaire aux spécifications suivantes :

- Teneur en calcaire $CaCO_3 \geq 75\%$ en masse ;
- Teneur en argile (adsorption de bleu de méthylène) $\leq 1,20\text{g}/100\text{g}$;
- Teneur en matières organiques (TOC) $\leq 0,50\%$ en masse.



Figure 8 : le calcaire issu de la carrière et broyé [HOLCIM Christophe charron,2008, p69]

La procédure de détermination de l'adsorption de bleu de méthylène et de la teneur en matières organiques (TOC) des calcaires sont décrites en détail dans la norme homologuée. Pour cet essai, le calcaire doit être broyé à une finesse d'environ 5000 cm²/g (aire massique).

III.2.9. FUMÉES DE SILICE (D) :

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice amorphe. Si la proportion de fumées de silice dans le ciment excède 3% en masse, seules les fumées de silice satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

- Silice amorphe $SiO_2 \geq 85\%$ en masse ;
- Perte au feu $\leq 4\%$ en masse ;
- Aire massique BET (non traitée) $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$.

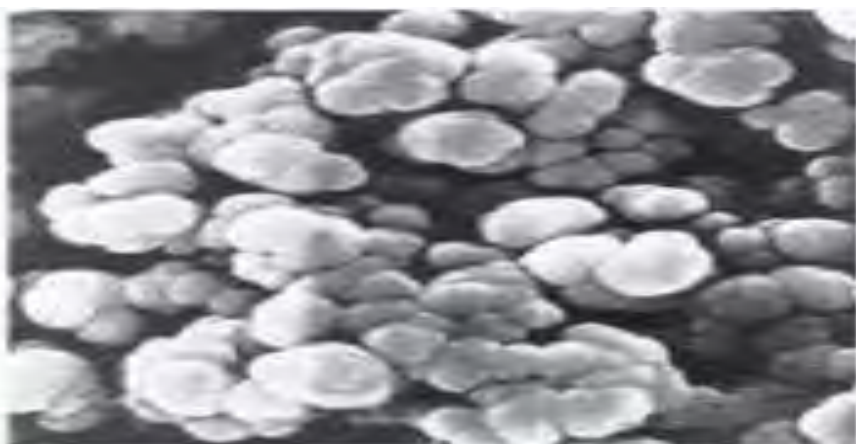


Figure 9 : Fumée de silice vue au Microscope électronique à balayage [W5]

En outre, le producteur de ciment doit être en mesure de communiquer, sur demande, la teneur en silicium libre des fumées de silices utilisées.

Pour le Co-broyage avec du clinker et du gypse, la fumée de silice peut être dans son état original, densifiée, ou granulée (avec de l'eau).

La procédure de détermination de l'aire massique suivant la méthode BET est décrite en détail dans la norme homologuée.

III.2.10. FILLERS OU CONSTITUANTS SECONDAIRES :

Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite, cendres volantes) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granulométrie appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité, diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction de la fissurabilité...), les fillers sont des matières minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées après une préparation appropriée.

Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques. Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau.

III.3. ADDITIFS :

Il peut être, en outre, ajouté en petites quantités aux constituants, au cours de la fabrication de tout ciment. Et sauf limitations fixées aux articles suivants, un ou plusieurs des produits ci-après présentés.

III.3.1. SULFATE DE CALCIUM :

Produit incorporé aux ciments ($\leq 4,5\%$ de SO_3 en poids) généralement en petites quantités, sous forme de gypse ou d'anhydrite, pour réguler la prise.

Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium hydraté $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$), de l'hémihydrate $(CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O)$, de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre $CaSO_4$), ou tout mélange de ceux-ci. Le gypse et l'anhydrite se trouvent à l'état naturel. Le sulfate de calcium est aussi obtenu comme sous-produit de certains procédés industriels.

III.3.2. SELS SOLUBLES :

L'addition de sels solubles est interdite dans les ciments Portland CEM I définis à l'article 4.1.

Des sels solubles peuvent être incorporés aux autres ciments, en faibles proportions (moins de 1%) en vue d'améliorer certaines de leurs caractéristiques. En cas d'addition, notamment de chlorures, mention du pourcentage et de la nature du sel ajouté doit figurer sur les sacs ou toutes autres pièces accompagnant le ciment.

III.3.3. AGENTS DE MOUTURE

Produits employés en usine, en très faibles proportions, pour séparer les grains de ciment et faciliter ainsi le broyage. Ces composés ne doivent avoir aucune action nocive sensible, même à un dosage quintuple de leur dosage normal, ni sur les propriétés du ciment, ni sur les armatures.

IV. FABRICATION DU CIMENT :

IV.1. PROCEDE DE FABRICATION :

Les matières premières nécessaires à la production de ciment sont le carbonate de calcium, la silice, l'alumine et le minerai de fer. Elles sont, pour l'essentiel, tirées de la roche calcaire, de la craie, de la marne, du schiste argileux et de l'argile. Ces matières premières sont concassées, puis broyées et mélangées dans des proportions adéquates. Le mélange est ensuite introduit dans un four rotatif et chauffé à une température d'environ 1500 °C pour obtenir du clinker.

Broyé avec du gypse, celui-ci permet d'obtenir le ciment. Il est également possible de substituer à certaines matières premières – ou d'ajouter en fin du processus de fabrication - d'autres composants : calcaire, laitier broyé (sous-produit de la fabrication de l'acier), cendres volantes (provenant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques) ou pouzzolane (scories volcaniques). Cette technique permet notamment de réduire la facture énergétique et les émissions de CO_2 et d'élargir la gamme de produits. [W6]

IV.2. PROCESSUS DE FABRICATION :

Matériau indispensable de la construction, le ciment fait partie de la vie quotidienne. Difficile d'imaginer le développement des territoires sans ciment... De la carrière de calcaire à la livraison, suivez pas à pas les trois étapes de fabrication du ciment

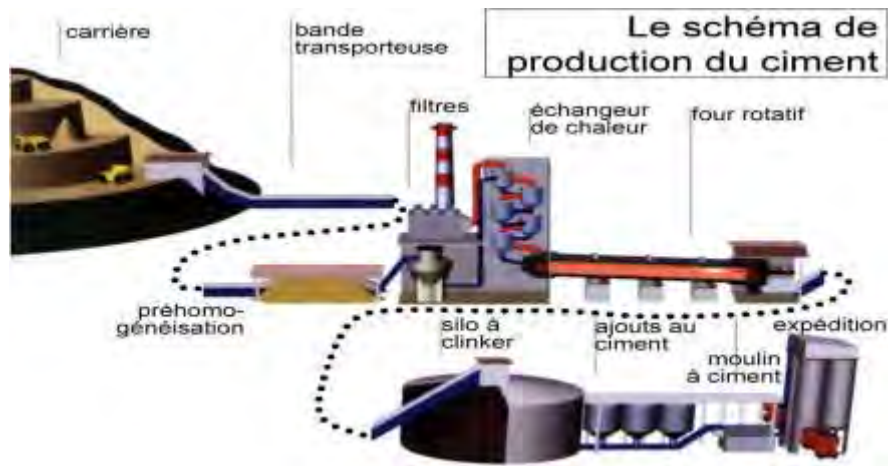
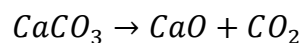


Figure 1: Etape de fabrication du ciment

On note quatre procédés de fabrication par voie humide, par voie semi humide, par voie sèche ou par voie semi sèche, dans le procédé par voie sèche, le broyage et l'homogénéisation se font sur des matériaux secs. Par contre, dans le procédé par voie humide, le broyage se fait sur une forme de pâte (slurry) qui contient à peu près 30 à 40% d'eau. Le procédé par voie sèche est plus économique parce qu'il n'y a pas d'eau à évaporer.

La « farine », résultant du concassage, broyage et homogénéisation de la matière première, est introduite à l'extrémité supérieure d'un four en acier de forme cylindrique qui est incliné selon un angle de 3 à 4 degrés et qui tourne à une vitesse de rotation de 1 tr/min, le four peut être long (d'environ 75 m de longueur) ou court (d'environ 40 à 50 m de longueur) avec une précalcination, un gros brûleur est placé à l'extrémité inférieure du four.

Le mélange homogénéisé traverse lentement le four vers la partie inférieure où il y a plusieurs réactions chimiques conduisant à la formation du clinker de ciment portland : à 100 C° : évaporation de l'ordre de 1% (eau) ; à 450 C° : départ de l'eau combinée à l'argile ; Entre 700 et 900 C° : calcination de CaCO_3 Selon la réaction suivante :



La chaux (CaO) obtenue réagit avec la silice, activée par la déshydratation de l'argile ou du schiste, et avec l'alumine ;

Jusqu'à 1200 C° : formation de C_2S par combinaison de SiO_2 et CaO ; à partir de 1250 C° : formation de C_3S résultant de la combinaison de C_2S et de la chaux résiduelle, au-dessus de 1300 C°, cette réaction est activée par l'apparition de la phase liquide qui contient les aluminates et les ferro-aluminates qui, par refroidissement, vont se cristalliser en composés bien définis le

C_3A et le C_4AF . La matière sort du four sous forme de billes de 5 à 25 mm de diamètre appelée clinker ; à 1450 C°, la clinkérisation est complète.

Pour contrôler la prise du ciment, le clinker est broyé avec un faible dosage en gypse ($CaSO_4, 2H_2O$) généralement inférieur 5%, parfois l'anhydrite ($CaSO_4$) est ajoutée au clinker au lieu du gypse, à la sortie du broyeur, on obtient une fine poudre de ciment Portland qui est acheminée vers des silos pour l'entreposage [SALHI KAMEL, 2007, p6,7].

IV.2.1. ÉTAPE 1 : FABRICATION D'UN CRU :

Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment (carbonate de calcium, silice, alumine et minerai de fer) sont généralement extraites de roche calcaire, de craie, de schiste ou d'argile. Ces matières premières sont prélevées des **carrières** par **extraction** ou **dynamitage**. Ces minéraux naturels sont transportés de la carrière à l'usine par des Dumpers, et sont ensuite broyés mécaniquement. Ce broyage se fait à l'aide d'un concasseur à une taille maximum de 80 mm, puis ces minéraux sont acheminés par un convoyeur à bande vers les rôles de préhomogénéisation. La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches dans des halls de préhomogénéisation. À ce stade, d'autres minéraux sont ajoutés pour corriger la composition chimique du ciment. Ces minéraux sont des déchets ou des sous-produits d'autres industries, comme des cendres de papier. A la sortie du hall, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs pour éliminer l'humidité résiduelle et obtenir une poudre appelé (cru) avec la finesse requise. Le cru est à nouveau homogénéisé et stockés dans des silos avant l'introduction au four. [W6]

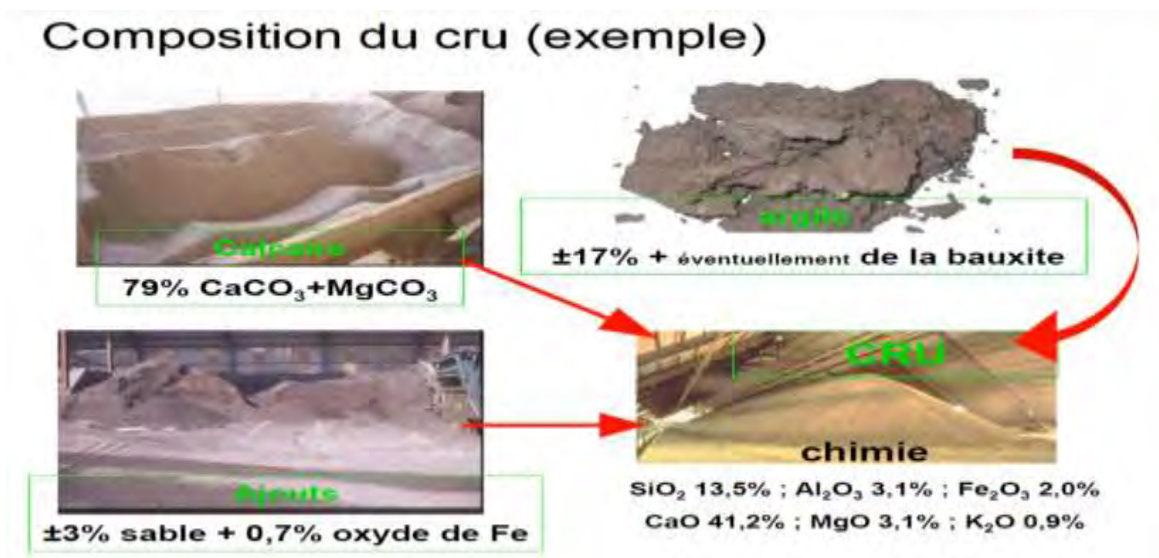


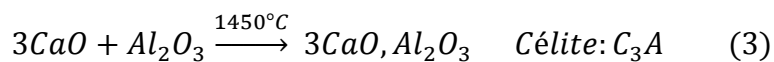
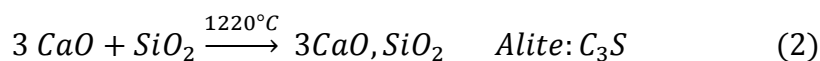
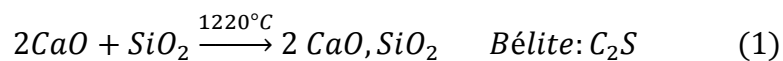
Figure 2: exemple de composition du cru

IV.2.2. ÉTAPE 2 : LIGNE DE CUISSON :

Quelle que soit la technique utilisée pour la préparation du cru, la phase de cuisson comporte deux parties :

Un échangeur de chaleur comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure jusqu'à l'entrée du four, elle se réchauffe progressivement en contact avec les gaz sortant du four et se décarbonate en partie. La poudre est ainsi portée d'environ 50°C à 900°C en un temps très court. [W7, p14]

Une fois dans le four, le cru de ciment est chauffé à environ 1 500 °C. Ce qui correspond à peu près à la température de la lave en fusion. Il s'agit d'un four horizontal cylindrique en tôle d'acier avec revêtement réfractaire de 60 à 150m de longueur et de 4 à 5 m de diamètre. Il tourne à une vitesse de 1 tour/minute. À cette température, des réactions chimiques (réactions acido-basiques de Lux-Flood) se produisent et entraînent la formation du clinker, substance qui contient des silicates de calcium hydrauliques. [W7, p16]



Pour chauffer des matières à une température aussi élevée, il faut produire une flamme de 2000 °C à l'aide de carburants fossiles et de déchets. Le four est incliné de trois degrés par rapport à l'horizontale, ce qui permet à la matière de le traverser en 20 à 30 minutes.

A la sortie du four, le clinker tombe sur des refroidisseurs à grille qui ramène sa température à 70°C. Ce choc thermique donne naissance à des granulats de diamètres variant entre 1 et 10 mm

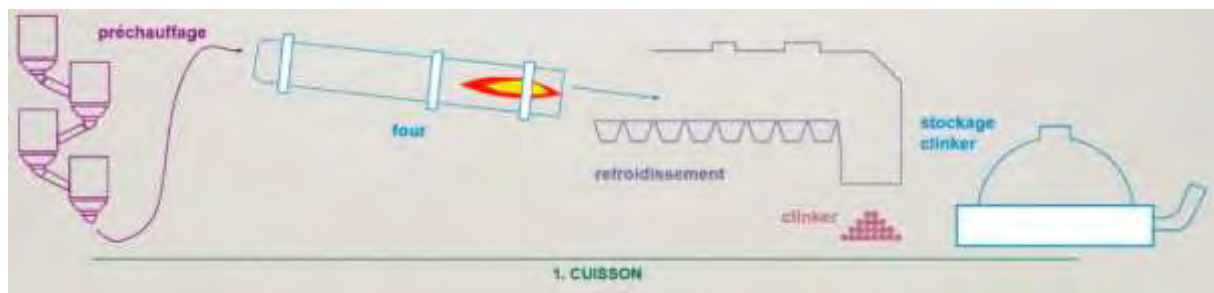


Figure 3:étape de la cuisson [W8]

IV.2.3. ÉTAPE 3 : PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT :

Une petite quantité de plâtre (gypse, de 3 à 5 pour cent (%)) est ajoutée au clinker pour réguler le durcissement du ciment. Ce mélange est ensuite moulu très finement pour obtenir du «ciment pur». Pendant cette phase, d'autres minéraux, appelés «adjuvants», pourraient être ajoutés en plus du plâtre. Ces adjuvants d'origine naturelle ou industrielle sont dosés pour conférer au ciment des propriétés précises : perméabilité réduite, résistance accrue aux sulfates et aux environnements agressifs, maniabilité améliorée, meilleure qualité des finis, etc.[W6]

Enfin, le ciment est entreposé dans des silos avant d'être expédié en vrac ou en sacs aux chantiers où il sera utilisé.

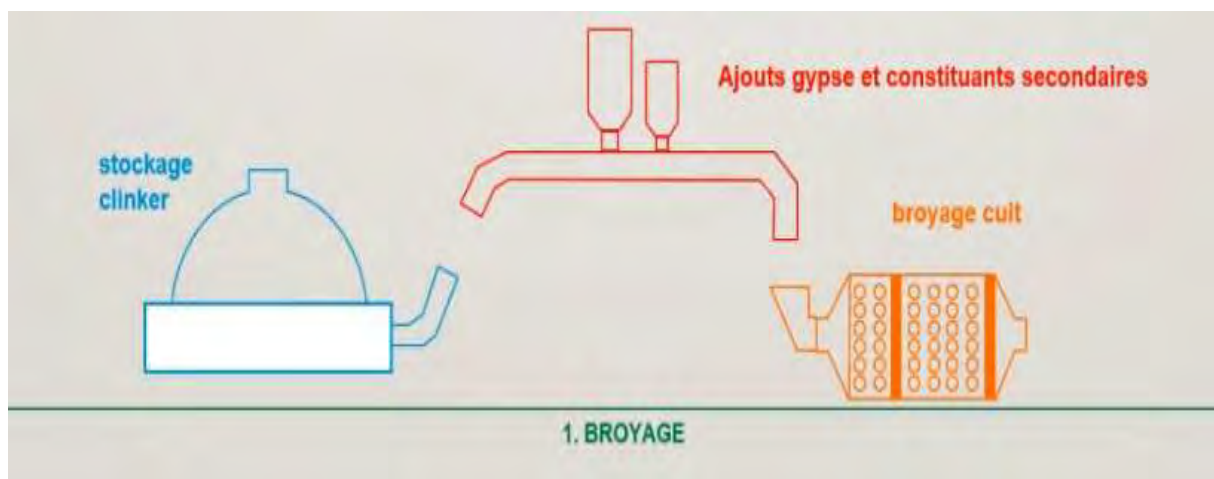


Figure 4:Etape de broyage [W8]



Figure 5:stockage, conditionnement, expédition [W8]

IV.2.4. CONTROLE DE FABRICATION ET DE QUALITE :

Lors de son stockage, le ciment est prélevé, analysé chimiquement et physiquement et des essais de résistance sur mortiers normalisés sont réalisés, afin de garantir son niveau de qualité.

Les analyseurs du laboratoire de la cimenterie sont à la pointe des technologies d'analyse comme la Fluorescence X et la Diffraction des rayons X. Les prélèvements d'échantillons, ainsi que leur préparation, se font maintenant de plus en plus au moyen de robots de très grande précision. La qualité d'un ciment se reconnaît par la régularité de sa composition et de ses performances. [W9]

V. PROPRIETES DES CIMENTS

V.1. PROPRIETES MECANQUES

Les ciments, utilisés essentiellement pour la confection de bétons, confèrent au matériau des propriétés de résistance mécanique élevée, en compression. La résistance mécanique à la traction est par contre de douze à quatorze fois plus faible que celle en compression. Ainsi un béton ordinaire possède une résistance à la compression, mesurée à vingt-huit jours, de l'ordre de 40 à 50 MPa, cette résistance peut atteindre des valeurs de 100 à 150 MPa dans le cas de bétons à haute et très hautes performances. L'utilisation de béton armé permet de donner au béton la résistance mécanique à la traction de l'acier. Dans le cas du béton précontraint, le béton subit, en général, à l'aide de câbles d'acier, une compression préalable qui permet, lors de la mise en service de l'ouvrage, de maintenir toutes les parties comprimées [J.-L. VIGNES, p64,65,66].

V.2. PROPRIETES CHIMIQUES :

La durabilité d'un ciment ou d'un béton est liée, dans un environnement donné, à ses propriétés chimiques qui sont essentiellement celles de l'hydroxyde de calcium.

La libération d'hydroxyde de calcium lors de la prise, donne au ciment un pH fortement 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 autrefois 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 ce qui 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 (09), 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 et cela se traduit par l'éclatement du ciment et une corrosion accélérée du fer.

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.

VI. TYPES DE CEMENTS, COMPOSITION ET DESIGNATION NORMALISEE

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. [W10]

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.

Les ciments peuvent fournir des valeurs de résistance des bétons très différentes. 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. L'objet de ce chapitre est de présenter la normalisation, marquage CE et marque NF des ciments courants, les exigences physiques et chimiques, 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.

VI.1. NORMALISATION, MARQUAGE CE ET MARQUE NF DES CEMENTS COURANTS :

La norme NF EN 197-1 présente les caractéristiques et les spécifications des ciments courants et de leurs constituants. La première partie est descriptive, elle définit les constituants des ciments et les 27 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.

En France, tous les ciments courants bénéficient d'un marquage CE et d'une marque NF.

Les ciments courants doivent être marqués CE depuis le 1er avril 2002 (sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac). Ce marquage obligatoire atteste leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et le respect des exigences essentielles de la Directive des Produits de Construction en matière de santé, sécurité et respect de l'environnement. [W11]

La marque de qualité NF, volontaire et complémentaire du marquage CE (certification de niveau 1+), 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 pratiquées en France. La marque NF atteste que les ciments bénéficient de garanties complémentaires sur leur composition, leurs performances et leurs contrôles, en particulier :

- des critères de régularité de composition plus stricts ;
- des temps de début de prise plus longs pour les ciments des classes 32,5N/ 32,5R/ 42,5R/ 52,5N/ 52,5R ;
- des résistances à court terme plus élevées pour les ciments (de type CEM I et CEM II) des classes 32,5N/ 32,5R/ 42,5N.

Le règlement de la marque NF-LH (Liants Hydrauliques) définit les conditions d'attribution de la marque par l'AFNOR. Il s'agit d'une certification par tierce partie, s'appuyant sur :

- l'acceptation et le contrôle du système qualité du fabricant ;

- l'autocontrôle du fabricant,
- le contrôle extérieur et la vérification de l'autocontrôle.

L'AFNOR, a confié au Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris (LEMVP) les missions de secrétariat technique, de laboratoire de contrôle, et d'organisme d'inspection pour la marque NF-LH. La certification est réalisée sur la base de la norme EN 197-2 Ciment partie 2 "Evaluation de la conformité". Le droit d'usage de la marque est donné après certification de la conformité à la norme, sur la base d'un référentiel plus contraignant (que le marquage CE) en termes d'exigences et de contrôles.

VI.1.1. CLASSES DE RESISTANCE :

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance 32,5 - 42,5 - 52,5 définies par la valeur de la résistance du ciment. Cette résistance correspond à la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours sur éprouvettes de mortier conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa.

Tableau 3: classes de résistance des ciments courants

| Classes de résistance | Résistance à la compression en MPa | | | |
|-----------------------|------------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | Résistance à court terme | | Résistance courante | |
| | 2 jours | 7 jours | 28 jours | |
| 32.5 N | - | $\geq 16,0$ | $\geq 32,5$ | $\leq 52,5$ |
| 32.5 R | $\geq 10,0$ | - | | |
| 42.5 N | $\geq 10,0$ | - | $\geq 42,5$ | $\leq 62,5$ |
| 42.5 R | $\geq 20,0$ | - | | |
| 52.5 N | $\geq 20,0$ | - | $\geq 52,5$ | - |
| 52.5 R | $\geq 30,0$ | - | | |

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). Pour les ciments de classe de résistance 32,5 et 42,5 une valeur maximale de la résistance à 28 jours est fixée.

VI.1.2. EXIGENCES PHYSIQUES :

Les ciments doivent satisfaire à diverses exigences physiques telles que :

- le temps de début de prise

- la stabilité ou expansion dont les valeurs à respecter sont fonction des classes de résistance. Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45, 60 ou 75 minutes.

L'expansion se mesure suivant un essai normalisé (norme NF EN 196-3) avec les 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.

Tableau 4: temps de début de prise et stabilité des ciments

| Classe de résistance | Temps de début de prise (min) | Stabilité (expansion) (mm) |
|----------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 32.5 N | ≥ 75 | ≤ 10 |
| 32.5 R | | |
| 42.5 N | ≥ 60 | |
| 42.5 R | | |
| 52.5 N | ≥ 45 | |
| 52.5 R | | |

VI.1.3. Exigences chimiques

Les exigences chimiques sur les ciments sont définies en termes de valeurs caractéristiques. Elles concernent en particulier :

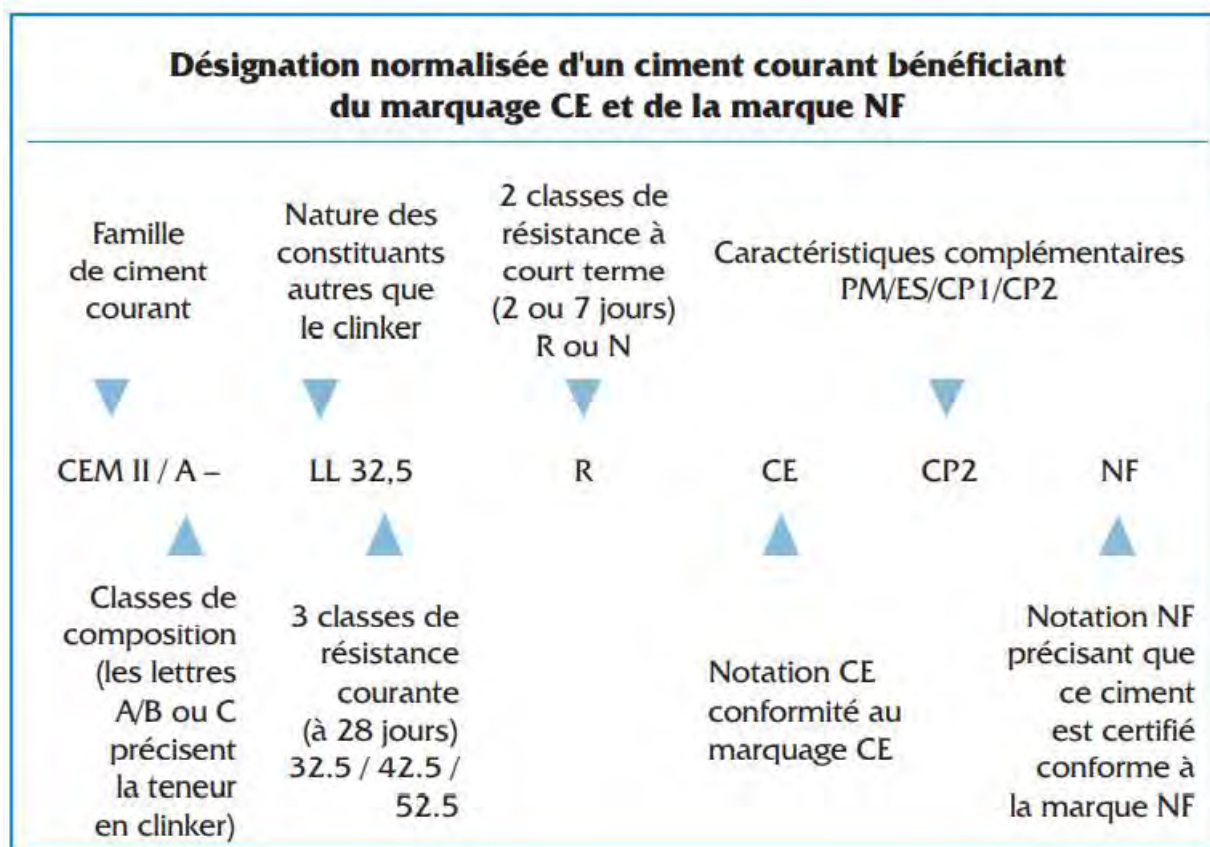
- la perte au feu : $< 5 \%$
- le résidu soluble : $< 5 \%$
- la teneur en ions sulfate : $\leq 3.5 \%$ ou 4% selon la classe de résistance
- la teneur en ions chlorure : $\leq 0,10 \%$.

VI.1.4. EXEMPLE DE DESIGNATION D'UN CIMENT COURANT :

Les ciments courants doivent être identifiés par les lettres CEM suivies du type (I, II, III, IV, V) et par un nombre indiquant la classe de résistance (32,5 ; 42,5). Les lettres N ou R qualifient la résistance à court terme. Les caractéristiques complémentaires éventuelles sont rappelées par les notations PM/ES/CP1/ CP2.

La désignation normalisée des ciments figure sur les sacs ou sur les bons de livraison (dans le cas de ciment livré en vrac).

Tableau 5: Désignation normalisée d'un ciment courant bénéficiant du marquage CE et de la marque NF



VI.2. LES CIMENTS PORTLAND CEM I - NORME NF EN 197 – 1 :

a) 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 %.

b) 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. Ces résistances sont mesurées sur « mortier normal » selon la norme NF EN 196 -1.

Les propriétés chimiques, qui sont des facteurs importants de la résistance des bétons à des ambiances agressives, concernent la teneur en anhydride sulfurique (SO₃) inférieure à 4 % (3, 5 % pour les classes 32, 5 N, 32, 5 R et 42, 5 N) et en ions chlorure inférieure à 0,10 %.

Tableau 6: Valeurs limites de résistance à la compression

| Valeurs limites de résistance à la compression | | | |
|---|--|----------------|-----------------|
| Classe de résistance | Résistances minimales absolues en MPa | | |
| | 2 jours | 7 jours | 28 jours |
| 32,5 L | — | 10 | 30 |
| 32,5 N | — | 14 | 30 |
| 32,5 R | 8 | — | 30 |
| 42,5 L | - | 14 | 40 |
| 42,5 N | 8 | — | 40 |
| 42,5 R | 18 | — | 40 |
| 52,5 L | 8 | — | 50 |
| 52,5 N | 18 | — | 50 |
| 52,5 R | 28 | — | 50 |

c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI :

Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint, 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.

d) PRECAUTIONS PARTICULIERES :

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.

VI.3. LES CEMENTS PORTLAND COMPOSES - CEM II NORME NF EN 197 – 1 :

a) 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 %.

b) 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 limites sont également fixées pour la teneur en SO₃ inférieure ou égale à 3, 5 %, 4 %, 4, 5 % ou 5, 0 % (suivant le type de ciment et / ou la classe de résistance) et la teneur en ions chlorure inférieure à 0, 10 % (voir le tableau de la page 25).

c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI :

Les CEM II 32, 5 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie. Les CEM II 32, 5 N et 42, 5 N conviennent pour les travaux de toute nature en béton armé. Les CEM II 52, 5 sont adaptés 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 exigeant 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).

d) PRECAUTIONS PARTICULIERES :

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.

VI.4. LES CEMENTS BLANCS :

a) COMPOSITION et CARACTERISTIQUES :

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

b) 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.

VI.5. LES CIMENTS COMPORTANT DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU
NORME NF EN 197 - 1

a) 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 compos CEM VI / S-P ou V, ou S-L.

Tableau 7: Ciments comportant du laitier de haut fourneau

| Ciments comportant du laitier de haut fourneau | | | | | |
|--|-----------------------------|-------------|------------------------------|--|----------------------|
| Type de ciment | Notation | % Clinker K | % laitier de haut Fourneau S | % pouzzolanes naturelles ou naturelles calcinées ou cendres volantes siliceuses P ou V | % Calcaire (L ou LL) |
| Ciment Portland au laitier | CEM II/A-S | 80-94 | 6-20 | - | - |
| | CEM II/B-S | 65-79 | 21-35 | - | - |
| Ciment Portland composé | CEM II/C-M (S-PouV ou L) | 50-64 | 16-44 | 6-20 ↔ | 6-20 |
| | CEM II/C-M (P ou V-L ou LL) | 50-64 | - | 16-44 | 6-20 |
| Ciment de haut fourneau | CEM III/A | 35-64 | 36-65 | - | - |
| | CEM III/B | 20-34 | 66-80 | - | - |
| | CEM III/C | 5-19 | 81-95 | - | - |
| Ciment pouzzolanique au laitier | CEM V/A | 40-64 | 18-30 | 18-30 | - |
| | CEM V/B | 20-38 | 31-49 | 31-49 | - |
| Ciment Composé | CEM VI (S-Pou V) | 35-49 | 31-59 | 6-20 | - |
| | CEM VI (S-L) | 35-49 | 31-59 | - | 6-20 |

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

b) VALEURS LIMITES :

Les valeurs limites pour la résistance sont analogues à celles des CEM I. La teneur en SO₃ doit être inférieure ou égale 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) et inférieure ou égale à 3, 5 % ou 4 % pour les CEM VI.

c) PRINCIPAUX DOMAINES D'EMPLOI :

Ces ciments sont bien adaptés aux travaux suivants :

- travaux hydrauliques, souterrains, fondations, injections;

- travaux en eaux agressives : eaux de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles et eaux pures;
- ouvrages massifs : fondations et barrages;
- travaux en milieu agricole : stockage, ensilage et fosse à lisier.

d) PRECAUTIONS PARTICULIERES :

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 rûche 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.

VI.6. LES CIMENTS MACONNIER MC – NORME NF EN 413 - 1

a) COMPOSITION

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

b) CLASSES DE RESISTANCE :

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 ci-dessous précise la désignation en fonction de la présence ou non d'un entraîneur d'air.

Tableau 8:Désignation du ciment à maçonner

| Désignation des ciments à maçonner | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Type | Classe de résistance en MPa | avec entraîneur d'air | sans entraîneur d'air |
| Ciment à maçonner | 5 12,5 22,5 | MC 5 MC 12,5 MC 22,5 | - MC 12,5 X* MC 22,5 X* |

** La lettre X signale les liants ne contenant pas d'entraîneur d'air.*

c) VALEURS LIMITES :

Chaque classe de ciment implique le respect de valeurs limites de résistance à la compression.

Tableau 9: résistance à la compression :

| Résistance à la compression | | | |
|-----------------------------|--|---|-------------|
| 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 | $\geq 22,5$ | $\leq 42,5$ |

d) 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.

VI.7. LE CIMENT PROMPT NATUREL CNP - NORME NF P 15 - 314

a) COMPOSITION

Le ciment prompt naturel est obtenu par cuisson, à température modérée (1 000 / 1 200° C), d'un calcaire argileux d'une grande régularité. Le temps de début de prise ne doit pas être inférieur à 45 minutes. La teneur en SO₃ est limitée à 3, 0 % pour les classes 12, 5 et 22, 5 et à 2, 5 % pour la classe 5.

b) CARACTERISTIQUES :

Le ciment prompt naturel est un produit, à prise rapide, et à résistances élevées à très court terme. 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.

Tableau 10: Evolution de la résistance dans le temps

| Évolution de la résistance dans le temps | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|
| 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 |

Le début de prise commence à environ 2 minutes, s'achève pratiquement à 4 minutes. Le début de prise du ciment prompt naturel 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.

c) 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 les nombreux emplois, on peut citer :

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

d) PRECAUTIONS 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.

VI.8. LE CIMENT D'ALUMINATE DE CALCIUM CA NORME NF EN 14647

a) 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.

b) CARACTERISTIQUES :

Le temps de début de prise, déterminée conformément à l'EN 196 - 3, ne doit pas être inférieur à 90 min.

Tableau 11: Exigences mécaniques et physiques données comme valeurs caractéristiques

| Exigences mécaniques et physiques données comme valeurs caractéristiques | |
|---|--------------|
| Résistance à la compression en MPa | |
| à 6h | à 24h |
| ≥18,0 | ≥40,0 |

Le ciment d'aluminates de calcium 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 pour travaux 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).

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;
- scellements (en mélange avec du ciment Portland pour la préparation de mortiers à prise réglable).

d) PRECAUTIONS 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. [W10]

VII. HYDRATATION DU CIMENT :

La notion d'hydratation regroupe la totalité des réactions chimiques mises en jeu entre le ciment et l'eau. Le processus est initié dès qu'il y a contact entre les deux phases.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été élucidés dès la fin du 19^{ème} siècle par Henri LE CHATELIER (1887). Il a notamment décrit trois étapes relatives à la prise du ciment : [Alexandre Govin, 2004, p19]

- La dissolution des constituants du ciment
- La formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates
- La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides inter granulaires.

VII.1. HYDRATATION DES PHASES PURS :

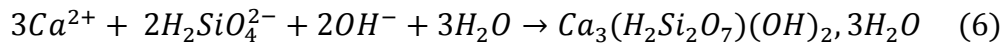
a) HYDRATATION DES PHASES SILICATES :

Plusieurs travaux ont porté sur l'hydratation du silicate tricalcique C_3S [ODLER 79], [CHEN 92],[GARRAULT-GAUFFINET 98]. Cette phase joue un rôle important sur la prise et le durcissement de la pâte de ciment. L'hydratation du C_3S est, en général, décrite en trois étapes :

La période initiale : dès le gâchage, le C_3S se dissout superficiellement en libérant des ions calcium Ca^{2+} , hydroxydes OH^- et silicates $H_2SiO_4^{2-}$:



La solution devient rapidement sursaturée par rapport au silicate de calcium hydraté noté **CSH** qui précipite selon la réaction :



Les **CSH** sont en réalité des composés non stœchiométriques, dont le rapport C/S est compris entre 1,5 et 1,8. Leur morphologie varie aussi en fonction des conditions de concentration et de **pH** de la solution. Durant cette étape, la teneur en ions silicates atteint un maximum très rapidement. C'est le moment où la vitesse de précipitation devient plus grande que la vitesse de dissolution du C_3S . La vitesse de dissolution décroît aux premiers instants du fait de l'élévation du pH causée par la libération d'ions hydroxydes en présence de calcium. Au cours de cette période, la dissolution du C_3S et la précipitation des **CSH** ont lieu simultanément. Quelles que soient les vitesses de ces deux réactions, les concentrations en hydroxyde de calcium et en silicates, suivent une courbe nommée par BARRET « chemin cinétique » [BARRET 86] [BARRET 88].

Le chemin cinétique se situe entre les courbes de solubilité des **CSH** et celle de la phase anhydre C_3S (figure 15). Le fait que le système tende toujours vers ce chemin cinétique résulte d'une autorégulation de la vitesse d'hydratation. Cette régulation est due aux effets opposés de la composition chimique de la solution sur les vitesses de dissolution du C_3S et de précipitation des **CSH**.

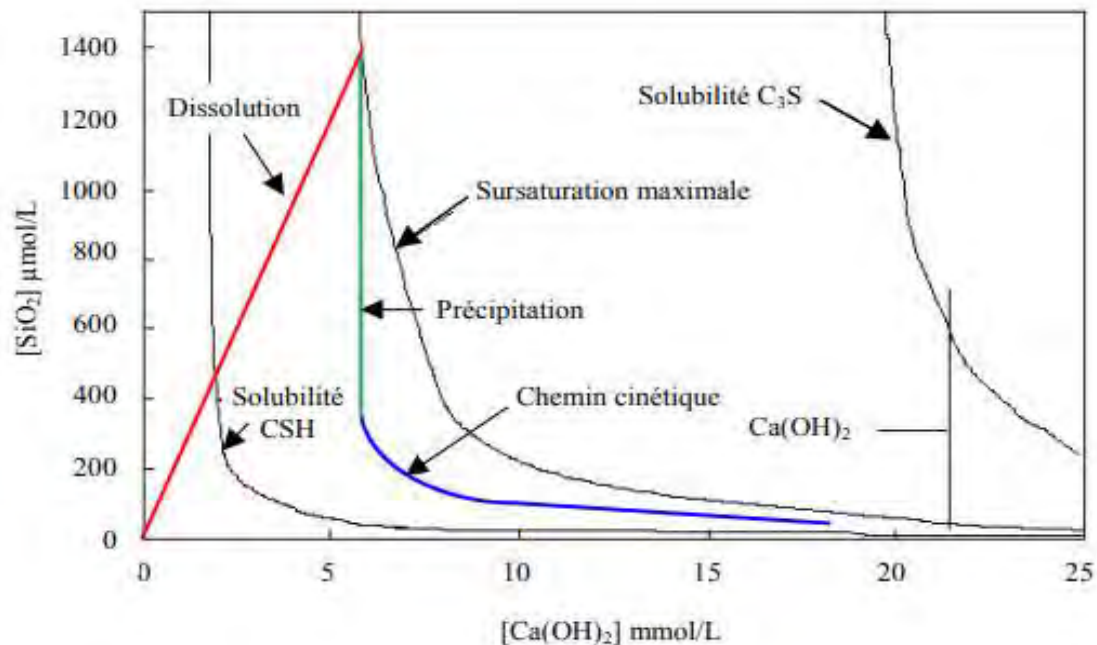


Figure 6: Diagramme chaux-silice montrant l'évolution de la solution lors de l'hydratation

Au cours de cette phase, il y a compétition entre la germination des **CSH** et de la portlandite. Tant que la teneur en ions silicates de la solution reste élevée, la germination des **CSH** l'emporte.

La période dite d'induction : Au cours de cette étape, les réactions précédentes se poursuivent à des vitesses plus lentes du fait du pH élevé et de la forte concentration en ions calcium. La période d'induction est encore mal connue, cependant plusieurs hypothèses tentent d'en expliquer la cause et la fin.

- Les hydrates formés au cours de la phase initiale (en particulier les **CSH**) vont former une couche de très faible épaisseur à la surface des grains anhydres de C_3S . Cette membrane, pas forcément continue, va constituer une barrière de faible perméabilité. Les réactions d'hydratation sont alors limitées par la diffusion de l'eau vers les grains anhydres et des ions vers la solution interstitielle. La fin de cette période est atteinte lorsque cette couche est détruite ou rendue plus perméable par vieillissement ou transformation de phase [JENNINGS 86].
- Les germes de portlandite ne peuvent pas croître du fait de l'adsorption de silicates sur la surface. Cette période se termine lorsque le taux de sursaturation par rapport à la portlandite est suffisant pour contrer ces phénomènes [TADROS 76].

- Les vitesses de réaction durant la période d'induction sont contrôlées par la germination et la croissance des **CSH** formés. Cette période s'achève lorsque la croissance commence, [FIERENS 76].

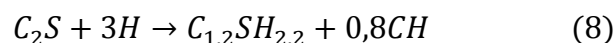
Durant cette période, la consommation d'eau reste faible donc la pâte reste fluide et maniable. La concentration en portlandite (notée **CH**) augmente, la solution devient sursaturée par rapport à cet hydrate et le pH atteint des valeurs de l'ordre de 12,8. La portlandite précipite alors en cristaux plats hexagonaux entre les grains de C_3S partiellement hydratés selon la réaction suivante :



Cette précipitation joue un rôle de « pompe à calcium » à la surface des grains en cours d'hydratation, ce qui provoque une accélération de leur dissolution. Ce moment constitue la fin de la période d'induction et se caractérise par une diminution de la concentration en ions calcium et hydroxydes.

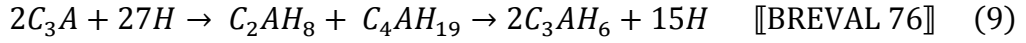
La phase de prise : Les réactions, précédemment ralenties, reprennent de la vitesse en générant une quantité importante d'hydrates et en consommant de l'eau. Le gel de silicate hydraté et les cristaux de portlandite formés s'enchevêtrent et remplissent les pores intergranulaires. La pâte acquiert de la consistance, le matériau se densifie et devient solide. La couche d'hydrate qui enrobe les grains de silicate anhydre atteint une épaisseur suffisante pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau. Les réactions d'hydratation du C_3S se poursuivent à des vitesses de plus en plus réduites jusqu'à épuisement de l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcie.

L'hydratation de la phase C_2S a été peu étudiée malgré son impact sur la résistance mécanique finale du ciment [TONG 91]. Les mécanismes et les produits d'hydratation du silicate dicalcique sont similaires à ceux détaillés précédemment pour le C_3S . En revanche, son hydratation est généralement plus lente et la teneur en portlandite plus faible. L'hydratation du silicate dicalcique peut être représentée par l'équation suivante :



b) HYDRATATION DES PHASES ALUMINATES :

L'aluminate tricalcique est une phase extrêmement réactive en présence d'eau. Le C_3A est responsable du phénomène de « prise éclair » qui conduit à la formation d'aluminates hydratés. L'hydratation du C_3A est représentée par les équations bilans suivantes [11] :



Où

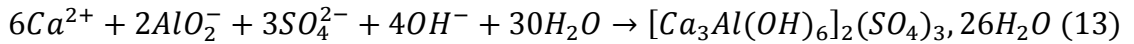


Les phases C_2AH_8 , C_4AH_{19} et C_4AH_{13} sont des hydrates hexagonaux thermodynamiquement instables qui évoluent en hydrates cubiques (C_3AH_6).

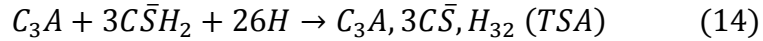
Afin d'éviter ce phénomène de prise rapide, dans un ciment Portland, l'hydratation du C_3A est contrôlée par l'addition d'environ 5% de sulfate de calcium $CaSO_4 \cdot xH_2O$ ($0 < x \leq 2$). Le C_3A va réagir avec le gypse pour former différents intermédiaires relativement stables : le TriSulfoAluminate de calcium (TSA) ou ettringite et le MonoSulfoAluminate de calcium (MSA). Le C_3A et le gypse sont rapidement dissous pendant la gâchée.



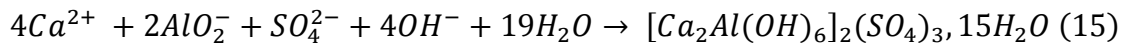
La solution est rapidement saturée par rapport aux hydrates, les ions se combinent en formant l'ettringite selon la réaction suivante :



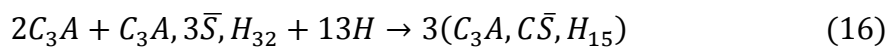
Soit la réaction globale :



La formation d'ettringite consomme 3 moles de sulfate de calcium par mole de C_3A . La teneur en C_3A est en général supérieure à cette proportion stœchiométrique. Il en résulte, après plusieurs heures, un épuisement du gypse. La solution s'appauvrit en ions sulfates et devient sous saturée par rapport à l'ettringite. Cette dernière va alors se dissoudre et libérer des ions sulfates pour former avec le C_3A excédentaire le monosulfoaluminate de calcium selon l'équation bilan :



Soit



La consommation de 2 moles de C_3A par mole d'ettringite entraîne une dissolution rapide de l'aluminate anhydre et alimente la solution en ions aluminates. Au cours de cette période de

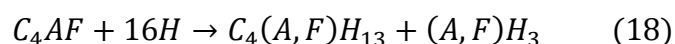
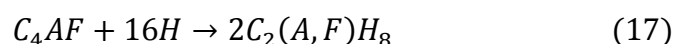
l'hydratation de C_3A , il y a une compétition de germination-croissance entre l'ettringite et le monosulfoaluminate en fonction des gradients de concentrations en aluminates et sulfates au voisinage des grains de C_3A .

Suite à ces réactions, le C_3A excédentaire va réagir avec les aluminates sulfatés pour former des hydrates de moins en moins riches en sulfate.

c) HYDRATATION DU FERROALUMINATE TRICALCIQUE : $C_2(A_x, F_{1-x})$

La phase ferrique (C_4AF) constitue environ 8 à 13% d'un ciment Portland. Cette phase est en réalité une solution solide dont la composition répond à la formule $C_2(A_x, F_{1-x})$ pour x compris entre 0 et 0,7 [RAMACHANDRAN 95].

La phase C_4AF adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase C_3A . Les réactions sont cependant plus lentes. En présence d'eau, le C_4AF réagit de la manière suivante (avec $(A,F) = (A_x, F_{1-x})$):



D'une manière analogue au C_3A , il y a formation d'hydrates hexagonaux $C_2(A,F)H_8$ et $C_4(A,F)H_{13}$ puis d'une phase thermodynamiquement stable $C_3(A,F)H_6$. En présence de gypse, l'hydratation du C_4AF est plus efficacement retardée que celle du C_3A . Il y a formation d'intermédiaires analogues à l'ettringite (Aft) et au monosulfoaluminate (Afm) [FUKUHARA 81].

VII.2. EFFET DES SULFATES SUR L'HYDRATATION DU CIMENT :

En général les sulfates jouent un rôle important comme régulateur de prise et d'hydratation du ciment leur présence a un effet sur la cinétique et la thermodynamique de l'hydratation du ciment

Les sulfates réagissent avec les aluminates pour donner de l'ettringite si la quantité d'ions SO_4^{2-} en solution n'est pas suffisante, le C_3A va alors s'hydrater et donner lieu à une prise rapide, tandis que si la concentration en ions sulfates est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise [Cours université Sherbrooke, chapitre 6, P58- 59- 62.]

a) EFFET DES SULFATES SUR L'HYDRATATION DES C_3S :

Des études sur l'hydratation des alites en présence de gypse ont montré que le sulfate de calcium accélère l'hydratation du C_3S [W. Lerch, 1946]. Copeland et Kantro [1968, VII p.387] reportent que l'hydratation à 1 jour est indépendante du degré de "gypsage", mais, à long terme 1 à 1,5% de SO_3 donne le degré d'hydratation maximum, Bennir [A. Bentur, 59(5), p210] lui aussi a reporté que la résistance à la compression et le degré d'hydratation des C_3S jusqu'à 48 heures sont indépendants du pourcentage de gypse introduit.

Jawad et Skalny [V 10 p. 697-701, 1980.] ont fait des études sur l'hydratation initiale des C_3S en présence de gypse, ils ont fini par conclure que la présence de SO_3 favorise la dissolution des C_3S durant la première étape hydratation, le C-S-H peut inclure des ions sulfates

b) EFFET DES SULFATES SUR L'HYDRATATION DES ALUMINATES :

Skalny et Young [1980] ont montré qu'une faible teneur en sulfate retarde l'hydratation des aluminates sans précipiter l'ettringite. Bien que la formation d'ettringite soit la première étape de l'hydratation du C_3A , ils suggèrent que l'adsorption des sulfates sur la surface du C_3A est un facteur important.

Jawad et coll.[1976] ont reporté que l'hydratation du C_3A et du C_4AF dans une solution saturée en gypse est retardée. Le ferroaluminate est très fortement affecté, l'émangite se forme initialement sur la surface du C_4AF , une chute de concentration des sulfates dans la solution engendre la formation de monosulfoaluminate et l'hydratation accélérée du ferret.

VII.3. ÉVOLUTION DE L'HYDRATATION :

L'évolution de la réaction d'hydratation dans le temps se divise en quatre principales périodes la figure 16 illustre ces différentes périodes de la cinétique d'hydratation

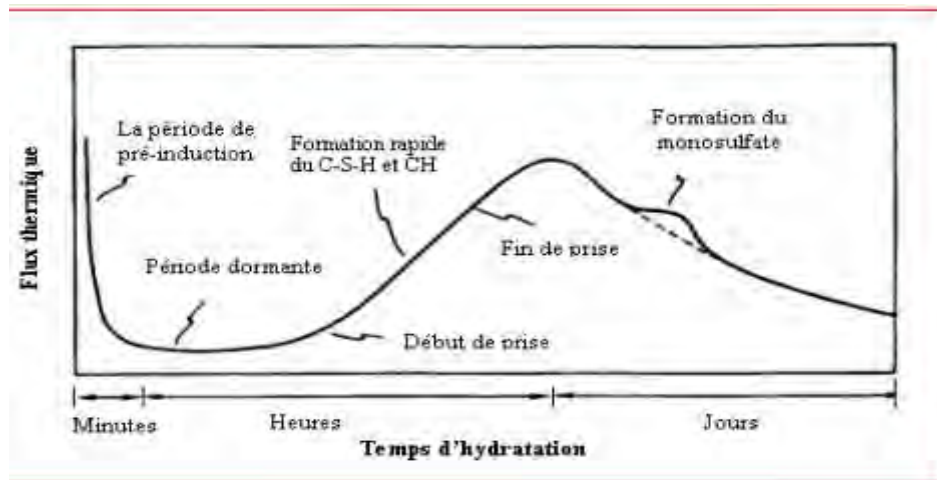


Figure 7:représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment d'après Bensted [VERNET, 1992]

a) LA PERIODE DE PRE-INDUCTION

Correspond à la première période, lorsque le ciment est en contact avec l'eau, il y a un grand dégagement de chaleur à cause de la dissolution rapide des sulfates et des aluminates, cette période est aussi caractérisée par la formation d'une couche d'ettringite à la surface du C_3A qui permet d'en contrôler l'hydratation.

b) LA SECONDE PERIODE,

La période dormante, est caractérisée par un faible taux de dégagement de chaleur durant laquelle la concentration d'ions calcium en solution augmente et celle des aluminates diminue. Cette période prend fin lorsque les CH commencent à précipiter et elle est suivie par la prise du ciment.

La prise qui est accompagnée d'un fort dégagement de chaleur, correspond à la période pendant laquelle le matériau change d'état, c'est-à-dire lorsqu'il passe de l'état de suspension à l'état solide. La prise est causée par la formation rapide de C-S-H et de CH.

Finalement la période de durcissement ou la période d'après prise correspond à la période d'évolution des propriétés mécaniques du matériau. Cette évolution est rapide dans les heures qui suivent la prise et elle se poursuit plus lentement pendant encore plusieurs mois en présence d'eau.

VII.4. LES PHASES HYDRATEES DU CIMENT PORTLAND :

Dans la réaction d'hydratation, le volume molaire des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes molaires du ciment anhydre et de l'eau participant à la réaction, ce phénomène est

appelé « contraction Le Chatelier ». Pour une hydratation complète, cette contraction est de l'ordre de 10 % du volume initial de la pâte si le matériau est isolé de toute source d'eau extérieure, la contraction le Chatelier provoque une auto-dessiccation de la pâte, c'est-à-dire une dessiccation interne progressive.

Après la prise, le squelette formé par les hydrates du ciment s'oppose, par sa rigidité, à la contraction le Chatelier. Il se forme ainsi progressivement des vides gazeux et des ménisques dans les capillaires de la pâte de ciment (figure 17). L'auto dessiccation d'une pâte de ciment augmente lorsque l'on diminue le rapport E/C.

La pâte de ciment durcie constitue donc un système hétérogène comprenant un solide poreux, une phase liquide et généralement une phase gazeuse (vapeur d'eau) présents dans les pores, le solide est formé de minéraux hydratés et éventuellement de ciment anhydre résiduel si la quantité d'eau initiale est insuffisante pour une hydratation complète, les principaux hydrates sont indiqués dans le tableau 12 :

Tableau 12: principaux hydratés

| Nom | Notation cimentière | Formules chimiques |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Silicate de calcium hydraté | C-S-H | $1,7CaO.SiO_2,4H_2O$ |
| Portlandite | CH | $Ca(OH)_2$ |
| Ettringite | $C_3A.3CSH_{32}$ (Aft) | $3CaO.Al_2O_3.3(CaO - SO_3).32H_2O$ |
| Monosulfo-aluminate | $C_3A.3CSH_{12}$ (Afm) | $3CaO.Al_2O_3.CaO.SO_3.12H_2O$ |
| Katoïte | C_3AH_6 | $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ |

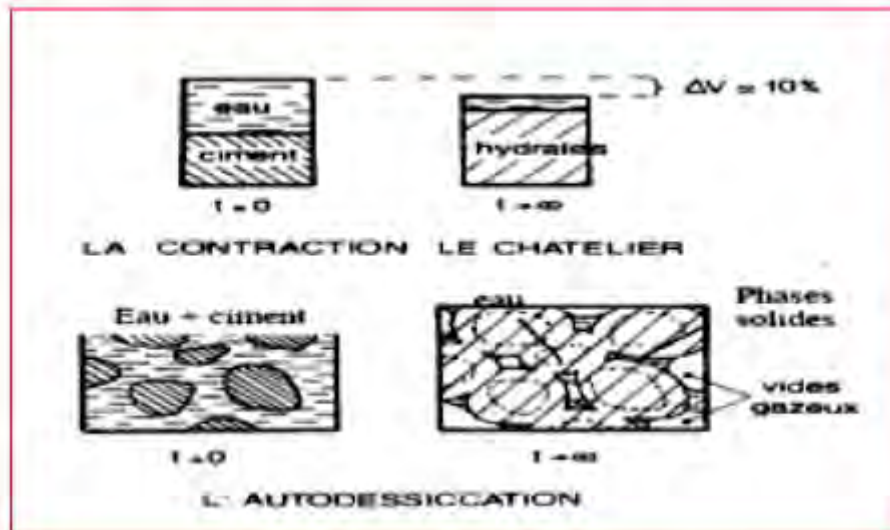


Figure 8: illustration de la contraction le Chatelier dans une pâte de ciment et de l'auto dessiccation qui en résulte [C. Richet, 2004]

Au bout d'un temps suffisamment long, l'hydratation est équivalente au système simplifié (en excluant les phases ferrifères) suivant :

- les silicates sont dissous et forment des C-S-H et de la portlandite,
- les aluminates sont dissous et forment de l'ettringite (AFt), du Monosulfoaluminate (AFm) et des aluminates hydratés (C_3AH_6),
- une partie des anhydres restes non hydratée en fonction du temps du e/c, de la durée de la cure, de la nature de l'anhydre

a) **LA PORTLANDITE :**

Elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique, dans la pâte du ciment, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5 elle participe peu au développement de la résistance du béton, elle peut même être responsable du problème de la durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par l'eau.

b) **LES C-S-H :**

Le CSH occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. C'est un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide, il a une structure en feuillet, formée de cristaux très petits et mal cristallisés, la cohésion des CSH est due aux forces de Van Der Walls entre les particules colloïdales des CSH.

Le PH de la solution interstitielle contenant le CSH est très alcalin (voisin de 13), a des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca^{2+} . Les CSH subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques. Le

gel de CSH est poreux, les pores de gel sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillettes, ils sont très petits (20 \AA à 30 \AA), la porosité du gel de CSH représente environ 28% du volume total du gel.

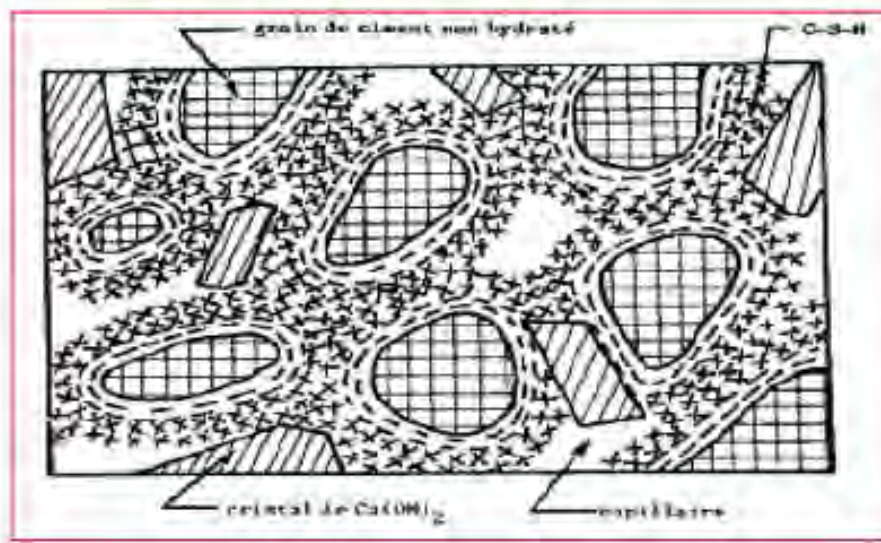


Figure 9: Représentation schématique de la pâte de ciment [Pigeon, 1981]

Le $C_3A.3CS.H_{32}$ (l'ettringite) et le $C_3F.3CS.H_{32}$ (les phases AFt) : L'ettringite du ciment Portland a théoriquement la formule suivante $C_3A.3CS.H_{32}$. L'aluminium peut partiellement être remplacé par du fer et du silicium, le sulfate (SO_4^{2-}) par du carbonate (CO_3^{2-}) ou des hydroxyles (OH^-) et le calcium (Ca^{2+}) par du magnésium (Mg^{2+}), le rapport Fe/Al dans l'ettringite serait de 1/30, le rapport Si/Al de 1/60, le rapport Mg/Ca de 1/160 et le rapport S/Ca de 1/3 au lieu de 1/2, rapport stœchiométrie de la phase pure idéale.

Le $C_3A.CS.H_{12}$ (monosulfoaluminate) et le $C_3F.CS.H_{12}$ (les phases AFm) : Les phases solides $C_3S.CS.H_{12}$ et $C_3AF.CS.H_{12}$ correspondent également à une solution solide le calcium peut être substitué par du magnésium, l'aluminium par du fer et le soufre par des hydroxyles et de la silice, une partie de la phase AFm faiblement cristallisée serait intimement mélangée aux C-S-H.

c) LES ALUMINATES HYDRATES :

Les aluminates de calcium hydratés sont fortement liés aux aluminosilicates de calcium, il existe deux types d'aluminosilicates de calcium stable : la gehlenite hydratée (C_2ASH_8) et une solution solide d'hydrogrenat variant entre l'aluminate de calcium hydraté et l'aluminosilicate de calcium ces deux pôles sont C_3AH_6 et C_3AS_3 en présence de portlandite, la gehlenite hydratée est instable, elle réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former de l'hydrogrenat.

VIII. L'INDUSTRIE CIMENTIERE : QUELQUE IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIETAUX :

L'industrie cimentière est certes génératrice de beaucoup d'emploi. En revanche, aujourd'hui, elle est à l'origine de 5% de la pollution mondiale[W12]. Et dans des pays en voie de développement, les répercussions peuvent également toucher les aspects sociaux et sociétaux. Les cimenteries comptent parmi les installations polluantes (fumées, vapeurs, envols de poussières, notamment des années 1950 aux années 1970, avant l'amélioration significative des électrofiltres et autres systèmes de traitement des envols de poussière ou des fumées). Aujourd'hui, les principaux rejets dans l'atmosphère restent les poussières, les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre. Les cimenteries sont souvent autorisées à brûler des déchets (dont notamment certains déchets de pneus, farines de vache folle, déchets de tanneries, déchets de la pétrochimie ou de l'industrie chimique, etc.).

Dans une étude au Bénin, l'eau de puits d'une localité proche d'une cimenterie est comparée à celle d'un village éloigné. Dans la localité proche, on trouve dans l'eau une quantité plus importante de silice, d'oxyde de calcium et de magnésium. Ce sont là des éléments faisant partie de la composition chimique normale du ciment. Ceci pose le problème de la pollution de l'eau de boisson des populations environnantes par la poussière de ciment. [ZOHOUN Th., FAYOMI E.B, 1993, p204]

VIII.1. LE PAYSAGE DE LA CIMENTERIE SENEGALAISE :

a) SOCOCIM

L'industrie SOCOCIM est la première cimenterie du Sénégal, créée au lendemain de la deuxième guerre mondiale, en 1948, à Rufisque par M. André LINDENMEYER. Une capacité de production de 40.000 tonnes par an. Plus vieille société de cimenterie au Sénégal, la pollution provoquée par les activités industrielles de la SOCOCIM fait l'unanimité. Depuis plus de 70 ans, les habitants de Bargny composent avec les reflux toxiques de la plus grosse cimenterie de l'Afrique de l'Ouest. La zone d'implantation de l'usine est aujourd'hui habituée aux nuages épais de poussière qui envahissent désormais le décor de la ville de Rufisque. [W13]

b) CEMENTS DU SAHEL :

Avec une capacité de production de 600000 Tonnes, « les ciments du sahel » est une entreprise en plein essor. Elle a été créée en 2002 par la famille LAYOUSSE et se trouve au cœur de la commune de Diass, dans le village de Bandia situé dans la région de Thiès. Par ailleurs, à quelques kilomètres, à Bandia, les populations se demandent si la cimenterie, ne va pas finir par détruire la réserve naturelle de Bandia qui représente un joyau écologique par la

réintroduction de grands mammifères d'Afrique. Ce risque de destruction de la réserve de Bandia entraînerait concrètement la disparition de plus de 100 espèces animales. L'exploitation des carrières de Bandia par les ciments du Sahel modifie également le paysage et l'écosystème de la région. [W13]

c) **DANGOTE :**

De son vrai nom, DANGOTE Cement Sénégal, DANGOTE est la dernière cimenterie arrivée dans le paysage sénégalais des producteurs de ciment. Elle a été lancée en 2015, et pendant ces 5 années d'existence au Sénégal, la cimenterie en est à un peu plus de 3 millions de tonnes de production, si l'on en croit aux dires du Directeur des ventes. La fabrique de ciment est basée dans la Région de Thiès, notamment à Pout. Pour le cas de DANGOTE, en Avril 2019, le Conseiller Municipal de Keur Moussa, Monsieur Malick Guèye déplorait les impacts négatifs que subit un village dont dépend sa municipalité. "Le village de Ngomène souffre des impacts environnementaux jugés néfastes de l'exploitation des carrières et de la cimenterie de DANGOTE sur son agriculture, son élevage et la santé de ses populations." En sus, les 10.000 habitants de ce village qui vivent principalement de l'agriculture et de l'élevage voient leurs cultures détruites par les poussières de ciment qui les recouvrent en saison sèche. Ceci, sans noter les problèmes qui sont liés à la santé des populations. [W13]

VIII.2. MAITRISE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DIRECTS :

Tous les produits et services peuvent avoir des impacts sur l'environnement, qu'ils soient positifs ou négatifs. Tout produit demande, par exemple, des matières premières et de l'énergie pour être fabriqué, emballé, transporté, utilisé et peut finir en déchet. Pour pouvoir réduire ou éviter les impacts négatifs, il faut d'abord être capable de les évaluer. Cette évaluation volontaire des impacts environnementaux des différentes étapes (production, transport, mise en œuvre, récupération, traitement du produit) passe par une méthode dite Analyse de Cycle de Vie (ACV). Au cours de cette évaluation il est nécessaire de réaliser des Inventaires de Cycle de Vie (ICV) pour décrire en flux élémentaires tous les intrants et sortants d'un produit. Ces méthodes et travaux d'ACV sont développés depuis les années 1970, et avec l'intérêt grandissant pour les problématiques environnementales, ces méthodes ont été normalisées, encadrées au niveau international (normes ISO), français (normes NF) puis européen (normes EN). Grâce à cette évaluation, l'ACV devient un outil d'aide à la décision, permettant d'établir un plan d'actions à mener pour réduire les impacts environnementaux du produit étudié et

fournissant également des mesures communes pour pouvoir comparer des produits à service rendu équivalent. [W14]

La SOCOCIM, seule entreprise qui, aujourd'hui, à une vitrine digitale, affiche sur son site web un engagement dans des actions de RSE notamment avec la création d'une fondation dans les années 2010. De même, nous y trouvons des informations liées aux nouvelles technologies utilisées qui témoigneraient d'une éventuelle réduction de la pollution à 15%. D'ailleurs, la certification ISO 14001 lui permet d'accéder à une certaine reconnaissance en tant qu'acteur de la RSE. Pour ce qui concerne les ciments du SAHEL et DANGOTE, en tant qu'entreprises contribuant aussi grandement à la pollution de leurs zones d'implantation, elles essaient tant bien que mal de compenser les impacts négatifs de leurs activités par un soutien aux populations environnantes. [W13]

CONCLUSION :

Le travail de ce mémoire nous a permis d'avoir les informations de base sur le ciment : de l'extraction à l'application. Ainsi, nous avons pu comprendre les différentes méthodes, techniques et matériaux utilisés pour la fabrication du ciment.

A travers cette étude on note les différents types de ciment notamment le ciment portland appliqué dans les bétons armés, ciment composé utilisé dans les travaux en milieu agressifs, ciment au laitier en haut fourneau qui convient aux travaux hydrauliques, ciment blanc valorisant les teintes des granulats etc, avec des valeurs limites de résistances de compression fixées à 28 jours.

Par la même occasion on a pu montrer les différents procédés d'hydratation du ciment : de la prise au durcissement, ainsi que le rôle régulateur de l'ajout des sulfates.

Enfin, on a pu relayer les impacts environnementaux et sociétaux liés aux industries cimentières dus à la pollution atmosphérique incluant les différents gaz à effet de serre (CO_2 , NO_x , etc.), et les poussières (silice, alumine, chaux, etc).

Dans la continuité de notre travail nous souhaiterions faire une étude de terrain détaillée sur l'impact de la pollution générée par les industries cimentières aux populations environnantes afin d'apporter des résultats fiables et de proposer des solutions qui nous permettraient d'améliorer les conditions de vie de ces habitants et la préservation de l'écosystème.

REFERENCES : (Classées par ordre alphabétique)

- Ahmed Abdo Al-Eyani, *Valorisation du déchet de marbre et de verre comme additif dans la production du mortier*, FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL, 2016 /2017, p3.
- A. Bentur, " *Effect of gypsum on the hydration and strength of C3S pastes*", J. Am. Ceram. Soc, 1976, 59(5), p210
- BREVAL E., "C3A hydration.", Cement and Concrete Research, 6, 129-138, (1976)
- BUR NICOLAS, Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement, Thèse de Doctorat de l'Université de Strasbourg, 2012, p13
- BARRET P., BERTRANDIE D., "Fundamental hydration kinetic features of the major cement constituents : Ca_3SiO_5 and βCa_2SiO_4 .", Journal de Chimie Physique, (1986), V 83, 765-775,
- BARRET P., BERTRANDIE D., "Comment on « Aqueous solubility relationships for two type of calcium silicate hydrate. ».", Journal of American Ceramic Society, (1988), V71, 113-115,
- CHEN Y., ODLER I., "On the origin of Portland cement setting.", Cement and Concrete Research, (1992), V 22, 1130-1140.
- Cours université Sherbrooke « *hydratation du ciment portlande* » chapitre 6, P58- 59- 62. 2006
- C. Richet, C. Galle, P. Le Bescop, H. Peycelon, S. Bejaoui, I. Toven, I. Pointeau, V. L'hostis, P. Lovera, « *synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des bétons applications aux colis cimentés* » CEA Saclay Direction de l'Énergie Nucléaire France pp. 16-18, Mars 2004
- FIERENS P., VERHAEGEN J.P., "Hydration of tricalcium silicate in paste – Kinetics of calcium ions dissolution in the aqueous phase.", Cement and Concrete Research, (1976), 6, 337-342.
- FUKUHARA M., GOTO S., ASAGA K., DAIMON M., KONDO R., "Mechanisms and kinetics of C4AF hydration with gypsum.", Cement and Concrete Research, (1981), 11, 407-414.

- GOVIN Alexandre. *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois - ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois*. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Français, 2004.
- GARRAULT-GAUFFINET S., "*Etude expérimentale et par simulation numérique de la cinétique de croissance et de la structure des hydrosilicates de calcium, produits d'hydratation des silicates tricalciques et dicalciques.*", Thèse Université de Bourgogne, UFR des Sciences et Techniques, (1998).
- HOLCIM Christophe charron, *l'industrie du ciment données générales*, 2008, p55
- Jawed et J. Skalny, "Effect of gypsum on C3S hydration", *Cem. Conc. Resc*, 1980, V 10 p. 697-701,
- JENNINGS H.M., "*Aqueous solubility relationships for two types of calcium silicate hydrate.*", *Journal of American Ceramic Society*, (1986), 69 (8), p 614-618.
- J. Skalny et J. F. Young, "*Mechanism of Portland Cement Hydration*" 7th. Int. Congr. Chem., cement., Paris, 1980
- J.-L. VIGNES Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Économie - Industrie - EXC-1, ENS de Cachan. M. MORANVILLE et J.-P. BOURNAZEL Département Génie Civil - ENS de Cachan - 94235 Cachan Cedex, *Une vie de ciment Expériences de chimie sur la mise en œuvre et les propriétés d'un matériau*, BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS, 1996, p64,65,66.
- Jawed, S. Goto et R. Kondo, "*Hydration of C4AF in presence of Lime and sulfates*", *Cem. Concr. res.*, 1976), 6(4), p441.
- *LIANTS HYDRAULIQUES CIMENT : LES SPECIFICATIONS*, NORME CAMEROUNAISE NC 234, DIVISION DE LA NORMALISATION ET DE LA QUALITE, 2005, p5.
- L. E. Copeland et Kantro D. L., "*Hydration of portland cement*" 5th. Int. Symp. Chem. Ceme., Tokyo. 1968, VII p.387
- ODLER I., DÖRR H., "*Early hydration of tricalcium silicate. II. The induction period.*", *Cement and Concrete Research*, (1979), 9, p277-284
- Pigeon, *Composition et hydratation du ciment Portland, séminaire progrès dans le domaine du béton*, Québec, septembre 1981, p.36-72.
- RAMACHANDRAN V.S., "*Concrete science.*", "*Concrete Admixtures Handbook*, Second Edition.", Noyes Publications, (1995), p12-13.

- RAMACHANDRAN V.S., "Water reducers/retarders.", "Concrete Admixtures Handbook, Second Edition.", Noyes Publications, 286-409, (1995).
- SALHI KAMEL, *Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton*, UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA, 2007, p5
- TADROS M.E., SKALNY J., KALYONCU R.S., "Early hydration of tricalcium silicate.", Journal of American Ceramic Society, (1976), 59, 344-347.
- TONG Y., DU H., FEI L., "Comparison between the hydration processes of tricalcium silicate and beta-dicalcium silicate.", Cement and Concrete Research, 21, 509-514, (1991).
- VERNET, C. *introduction à la physico-chimie du ciment portland ; Deuxième partie : Chimie de l'hydratation*, Techno des S.A. Groupe ciments Français. Département de recherche / Produits nouveaux. 1992
- W. Lerch, "The influence of gypsum on the hydration and properties of Portland cement pastes", Roc ASTM, 1946, 46, p1252
- YAHIA Mohamed, *Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment*, Université Mohamed Boudiaf - M'sila Faculté de Technologie Département de GENIE CIVIL, 2015/2016, p4.
- ZOHOUN Th., FAYOMI E.B., TCHOKKI F. *POUSSIÈRE DE CIMENT ET POLLUTION D'EAU DE PUIITS*, Médecine d'Afrique Noire : 1993, 40 (3), p204.)

WEBOGRAPHIE :

[W1] : <https://www.walksinsiderome.com/tour-attractions/pantheon/>

[W2]: https://www.google.com/maps/uv?pb=!1s0x132f61b6532013ad%3A0x28f1c82e908503c4!3m1!7e115!4shhttps%3A%2F%2Fh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipPbAtJLnjtr34KpBzJoCeofwkJZWtDRWMIJz7WZ%3Dw240-h160-k-no!5sLe%20Colis%20C3%A9e%20%20C3%A0%20Rome%20-%20Recherche%20Google!15sCgIgAQ&imagekey=!1e10!2sAF1QipMeM5-R9v6XCwDQK_wjftStPN4FEmDAXNyMACqn&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwi2vdyp2fjvAhXIX4UKHT45DioQoiowJHoECDkQAw

[W3] : <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/voyage-ete-construit-pont-gard-5245>

[W4] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment#:~:text=Pour%20d%20C3%A9signer%20les%20phases%20ciment%20C3%A8res,MgO%20\(oxyde%20de%20magn%C3%A9sium%20ou](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment#:~:text=Pour%20d%20C3%A9signer%20les%20phases%20ciment%20C3%A8res,MgO%20(oxyde%20de%20magn%C3%A9sium%20ou)

[W5] : https://www.researchgate.net/figure/Fumee-de-silice-vue-au-Microscope-electronique-a-balayage-a-Aitcin-Mindess-2013_fig30_312026876

[W6] : <https://www.lafargeholcim.ma/fr/ciment>

[W7] https://courses.ex-machina.ma/downloads/gc-2/s7/Materiaux_de_constructions/Generalite_sur_les_materiaux.pdf

[W8] : <https://www.youtube.com/watch?v=9TmuUWD3cEY&t=1540s>

[W9] <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/le-controle-qualite>

[W10] : <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>

[W11] : <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G56.pdf>

[12] : <https://dunya-ethic.com/industrie-du-ciment-au-senegal-impacts-et-preconisations/#:~:text=Cette%20derni%C3%A8re%2C%20est%20certes%20g%C3%A9n%C3%A9ratrice,les%20aspects%20sociaux%20et%20soci%C3%A9taux.>

[W13] : <https://dunya-ethic.com/industrie-du-ciment-au-senegal-impacts-et-preconisations/>

[W14] : <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>

RESUME

L'objectif de notre travail est d'étudier les différentes voies et processus de fabrications du ciment et leurs applications dans les différents ouvrages afin d'identifier les différents axes de recherches liés à l'industrie cimentière. Car, l'industrie du ciment occupe une place prépondérante dans les économies de toutes les nations, nécessaire pour la réalisation des projets de construction dans les domaines industriels, économiques, sociaux et culturels tout en essayant de répondre aux exigences futures de la conservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement. Par ailleurs, ces dernières décennies se sont souvent accompagnés par la valorisation des produits secondaires ou des déchets qui ont une incidence directe et néfaste sur notre environnement mettant en place une variété de ciments qui ont des résistances, de vitesses de prise et de durcissement qui est à l'attente des utilisateurs et adaptées au domaines d'employabilité.

Mots clés : Ciment, construction, ressources naturelles, résistances, prise, durcissement

ABSTRACT

The objective of our work is to study the different ways and processes of cement manufacturing and their applications in different structures in order to identify the different lines of research in the cement industry. Because, the cement industry occupies a preponderant place in the economies of all nations, necessary for the realization of construction projects in the industrial, economic, social and cultural fields while trying to meet the future requirements of the conservation of resources natural and environmental protection. In addition, these last decades have often been accompanied by the valuation of secondary products or waste which have a direct and harmful impact on our environment, setting up a variety of cements which have strengths, setting speeds and hardening which is to the expectations of users and adapted to the areas of employability.

Keywords: Cement, construction, natural resources, resistance, setting, hard

