

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

**Faculté de Technologie
Département de GENIE CIVIL**

FILIERE : Génie Civil SPECIALITE : Matériaux

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
Master Académique**

L'Intitulé du mémoire :

Etude comparative de méthodes d'activation (Addition et substitution) du ciment avec ajout : Propriétés physico-chimiques des ciments activés et non activés par la chaux fine

Dirigé par :

**Pr. NACERI Abdelghani
Dr. MAZA Mekki**

Présenté par :

**Saadaoui Soheyb
Aouina Moutassem Billah Adnan**

Promotion: 2019/2020

Remerciements

Nous remercions d'abord Dieu Tout-Puissant, le Clément et Miséricordieux

Nous remercions nos professeurs (Pr.NACERI Abdelghani, Dr.MAZA Mekki) pour leur encadrement, encouragements, correction et leur aide à toutes les étapes de la réalisation de ce modeste travail.

Nous remercions également tous nos camarades et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

Nous remercions également tout le corps de la faculté de Technologie en général et du Département de Génie Civil en particulier, les enseignants, les administrateurs, et tous ceux qui ont contribué à notre formation et à notre parcours universitaire.

Saadaoui Soheyb

Aouina Mouatassef Billah Adnan

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents ;

A mes frères et sœurs ;

A mes tantes et oncles ;

A ma famille ;

A mes très chers amis ;

A tout qui se donne à fond à la recherche scientifique ;

Et à toute la promotion 2019/2020 Master Matériaux.

Saadaoui Soheyb

Dédicace

Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère

A celui qui m'a fait de moi un homme, mon père

A Mes chers Frères et Sœurs,

A tous mes amis de promotion de 2^{ème} année Master en Génie Civil,

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur,

A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom Aouina, je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

Aouina Mouatasseem Billah Adnan

Sommaire

-Résumé :

-Abstract :

-ملخص :

-Introduction :01

Chapitre I : Etude bibliographique :

I-1-Ciment :	02
I-1-1-Introduction :	02
I-1-2-Historique :	02
I-1-3-La fabrication du ciment :	03
I-1-3-1 : Fabrication par voie humide :	05
I-1-3-2 : Fabrication par Voie sèche :	06
I-1-3-3 : Processus de fabrication de ciment :	09
I-1-3-3-1: Extraction :	09
I-1-3-3-2:Concassage :	10
I-1-3-3-3:Préparation du cru :	11
I-1-3-3-4 : Broyage du cru :	12
I-1-3-3-5 : Zone de cuisson :	13
I-1-3-3-5-1 : Préchauffeur ou cyclones :	14
I-1-3-3-5-2: Four rotatif :	14
I-1-3-3-5-3 : Refroidisseur :	15
I-1-3-3-6 : Broyage clinker :	15
I-1-3-3-7 : Stockage, ensachage et expédition :	15
I-1-3-3-8 : Les transporteurs :	15
I-1-4 : les constituants et les additions :	15
I-1-4-1 : Notations chimiques cimentières :	15
I-1-4-2 : Clinker :	16
I-1-4-2-1 : Composition chimique du clinker :	16
I-1-4-3 : Le gypse (Le Sulfate de Calcium - CaSO_4) :	17
I-1-4-4 : Le Calcaire :	17
I-1-4-5 : La chaux libre (CaO) :	17
I-1-5 : Composition minéralogique :	18
I-1-5-1 : L'alite (silicate tricalcique C3S) :	18

I-1-5-2: la bélite (silicate bi calcique C2S) :.....	19
I-1-5-3: la céliste (l'aluminate tricalcique C3A) :.....	19
I-1-5-4: L'alumino -ferrite tétracalcique(C4AF) :.....	19
I-1-6 :Les types des ciments :.....	20
I-1-7 : Hydratation de ciments :.....	20
I-1-7-1 : Hydratation du l'alite (silicate tricalcique C3S) :.....	21
I-1-7-2 : Hydratation du la bélite (silicate bi calcique C2S) :.....	22
I-1-7-3 : Hydratation du la céliste (l'aluminate tricalcique C3A) :.....	22
I-1-7-4 : Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C4AF :.....	24
I-1-7-5: Hydratation en présence des additions minérales :	24
I-1-8 : Les ajouts minéraux :.....	25
I-1-8-1 : Définition :.....	25
I-1-8-2 : Classification des ajouts minéraux :.....	25
I-1-8-2-1 : Ajouts minéraux inertes :.....	25
I-1-8-2-2 : Ajouts minéraux actifs :.....	26
I-1-8-3 : La pouzzolane :.....	26
I-1-8-4 : Les fillers calcaires :.....	27
I-1-8-5 : La poussière :.....	28
I-1-8-6 : Les cendres volantes :.....	28
I-1-8-7 : Les fumées de silice :.....	29
I-1-8-8 : Les laitiers de haut fourneau :	30
I-1-8-9 : L'importance des ajouts minéraux :.....	31
I-1-8-10 : L'utilisation des ajouts dans l'industrie cimentaire en Algérie :.....	33
I-2 : La Chaux :.....	33
I-2-1 : Introduction :.....	33
I-2-2 : Définition :.....	35
I-2-3 : Le cycle de la chaux:.....	35
I-2-4 : De la pierre a la chaux:.....	37
I-2-4-1 : La cuisson :.....	37
I-2-4-2 : Les chaux aériennes :.....	38
I-2-4-3 : Les chaux hydrauliques :.....	38
I-2-5 : La norme:.....	38
I-2-5-1 : Les chaux aériennes calciques "CL" ou dolomitiques "DL" :.....	38
I-2-5-2 : Les chaux hydrauliques "NHL" :.....	38

I-2-5-3 : Les chaux bâtardées "NHL-Z" = NHL + ciment :.....	39
I-2-6 : Les prises des chaux naturelles :.....	39
I-2-7 : Les chaux artificielles :.....	39
I-2-8 : La conservation des chaux :.....	40
I-2-9 : La production de la chaux :.....	40
I-2-10 : La chaux dans le ciment :.....	41
I-2-10-1 : Technique d'incorporation de la chaux dans le ciment :.....	41
I-2-10-2 : Les caractéristiques des chaux aériennes sont :.....	41
I-2-10-3 : La prise hydraulique se fait en trois étapes :.....	42
I-2-10-4 : Les résistances dépendent de nombreux facteurs dont :.....	42

Chapitre II : l'activation de ciment :

II-1 : Introduction :.....	43
II-2 : Méthodes d'activation du ciment avec ajouts minéraux :.....	43
II-3 : les méthodes (type) d'activation :.....	44
II-3-1 : Activation mécanique :.....	44
II-3-2 : Activation thermique :.....	44
II-3-3 : Activation chimique :.....	45
II-4 : Comparaison entre les types d'activation :.....	45
II-5 : L'activant minérale utilisé (la chaux) :.....	46
II-5-1 : Définition :.....	46
II-5-2 : Propriétés physique :.....	46
II-5-3 : Propriétés chimiques :	46
II-5-4 : Composions chimique de la chaux utilisé :.....	47

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés :

III-1 : Ciment :.....	48
III-1-1 : Ciment CEM II-CPJ :.....	48
III-1-2 : Préparation des échantillons :.....	48
III-1-3 : Analyse chimique de ciment :.....	49
III-1-3-1 : Analyse chimique du clinker:.....	49
III-1-3-2 : Analyse chimique des échantillons des ciments préparés :.....	50
III-1-4 : Surface spécifique (finesse de ciment) EN-196-6 :.....	51
III-1-5: Masses volumiques:.....	52
III-1-5-1: Masse volumique apparente :.....	52

III-1-5-2: Masse volumique absolue :.....	53
III-1-6: Consistance :	55
III-1-7: La prise selon la norme (NF EN 196-3) :.....	57
III-2: Sable :.....	61
III-2-1: Origine de sable :.....	61
III-2-2: L'exploitation de sable :.....	61
III-2-3: Composition chimique:.....	61
III-2-4: Masses volumiques:.....	61
III-2-4-1: Masse volumique apparente :.....	61
III-2-4-1-1: Etat lâche ou (poreux) :.....	61
III-2-4-1-2: Etat compacte ou (dense) :.....	62
III-2-4-2: Masse volumique absolue :.....	63
III-2-5 : La porosité :.....	64
III-2-6 : Equivalent de sable :.....	64
III-2-7 : La granulométrie:.....	66
III-2-7-1 : Classes granulaires :	66
III-2-7-2: Analyse granulométrique :.....	66
III-3: L'eau de gâchage :.....	68

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats :

IV-1 : La composition chimique des ciments préparés :.....	69
IV-2 : Surface spécifique (Finesse de ciment):.....	69
IV-3 : La masse volumique absolue :.....	71
IV-4 : Début et fin de prise :.....	72
IV-5 : L'indice d'hydraulicité :.....	74
IV-6: Les courbes des résultats :.....	75
IV-6-1: La finesse en fonction de l'indice d'hydraulicité :.....	75
IV-6-2: La finesse en fonction de début de prise :.....	76
IV-6-3: La finesse en fonction de fin de prise :.....	77
IV-6-4: La finesse en fonction de masse volumique absolue:.....	78
IV-6-5: Début de prise en fonction de l'indice d'hydraulicité:.....	79
IV-6-6: Fin de prise en fonction de l'indice d'hydraulicité:.....	80
<u>-Conclusion générale</u>	81
<u>-Références bibliographiques :</u>	82

Liste des tableaux

Chapitre I :

-Tableau 1.1- Principales phases du clinker de ciment Portland.....	02
-Tableau 1-2 : Notations chimiques cimentières.....	15
-Tableau 1-3 : Composition chimique du clinker.....	16
-Tableau 1-4 : Principales catégories de ciment.....	20
-Tableau 1-5 : Composition chimique de laitiers.....	31
-Tableau 1-6 : l'utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.....	33
-Tableau 1-7 : les différents états de la chaux.....	37

Chapitre II :

-Tableau 2-1 : Composition chimique de la chaux utilisée.....	47
---	----

Chapitre III :

-Tableau 3-1 : Composition des ciments préparés par substitution.....	48
-Tableau 3-2 : Composition des ciments préparés par addition.....	49
-Tableau 3-3 : Composition chimique du clinker.....	49
-Tableau 3-4 : Composition minéralogique du Clinker selon la formule de BOGUE.....	50
-Tableau 3-5 : Les compositions chimiques et minéralogiques ainsi que les modules caractéristiques des différents ciments (ciment + chaux) ont été déterminées au moyen de la méthode d'essai (fluorescence aux rayons X).	50
-Tableau 3-6 : surface spécifique de Blaine des ciments préparés.....	51
-Tableau 3-7 : Masse volumique absolue des ciments.....	54
-Tableau 3-8 : Procédure de l'essai.....	57
-Tableau 3-9 : Caractéristique physiques des pâtes des ciments étudiés consistant en la consistance normale et les délais de prise	60
-Tableau 3-10 : Composition chimique de sable utilisé.....	61
-Tableau 3-11 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	65
-Tableau 3-12 : Granularité du sable de dune testé.....	67
-Tableau 3-13 : Classement de sable.....	67

Chapitre IV :

-Tableau 4-1 : Les compositions chimiques et minéralogiques des différents ciments (ciment + chaux) ont été déterminées au moyen de la méthode d'essai (fluorescence aux rayons X).	69
-Tableau 4-2 : surface spécifique de Blaine des ciments préparés.....	69
-Tableau 4-3 : Masse volumique absolue des ciments.....	71

-Tableau 4-4 : Caractéristique physiques des pates des ciments étudiés consistence normal et délais de prise	72
-Tableau 4-5 : l'indice d'hydraulicité des ciments préparés.....	74
-Tableau 4-6 : la finesse et l'indice d'hydraulicité des ciments préparés.....	75
-Tableau 4-7 : la finesse et le début de prise des ciments préparés.....	76
-Tableau 4-8 : la finesse et la fin de prise des ciments préparés.....	77
-Tableau 4-9 : la masse volumique et la finesse des ciments préparés.....	78
-Tableau 4-10 : l'indice d'hydraulicité et le début de prise des ciments préparés.....	79
-Tableau 4-11 : l'indice d'hydraulicité et la fin de prise des ciments préparés.....	80

Liste des figures

Chapitre I :

-Figure 1-1 : Schéma représentatif des étapes de fabrication du ciment.....	04
-Figure 1-2 : Le schéma de la fabrication du ciment.....	04
-Figure 1-3 : Le schéma de la fabrication du ciment par voie humide.....	06
-Figure 1-4 : Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche.....	08
-Figure 1-5 : Carrière d'extraction d'argile et de calcaire.....	10
-Figure 1-6: concasseur situé au niveau de la carrière.....	11
-Figure 1-7 : Hall de préhomogénéisation.....	12
-Figure 1-8 : Broyeur.....	13
-Figure 1-9 : Le four rotatif.....	14
-Figure 1.10 : Microphotographie d'un clinker.....	18
-Figure 1-11 : Image de clinker en microscope optique (section polie).....	19
-Figure 1-12 : C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O)	21
-Figure 1-13 : Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage $G = \times 1010$	22
-Figure 1-14 Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton...	23
-Figure 1-15 : Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage.....	23
-Figure 1-16 : cycle de la chaux.....	36
-Figure 1-17 : réaction chimique du cycle de la chaux.....	36
-Figure 1-18 : procédé de la fabrication de la chaux.....	40

Chapitre II :

-Figure 2-1: Les différentes méthodes d'activation	43
--	----

Chapitre III :

-Figure 3-1 : Matériels de l'essai de la masse volumique apparente.....	52
-Figure 3-2 : Densitomètre Le Chatelier.....	53
-Figure 3-3 : pycnomètre.....	54
-Figure 3-4 : Appareil de Vicat.....	56
-Figure 3-5 : Détermination du temps de début de prise.....	58
-Figure 3-6 : Détermination du temps de fin de prise.....	58
-Figure 3-7: Evolution du temps de prise en fonction de la température.....	59
-Figure 3-8: Influence de la température sur la prise des ciments.....	59

-Figure 3-9 : Influence de l'E/C sur le temps de prise.....	60
-Figure 3-10 : Matériels de l'analyse granulométrique.....	66
-Figure 3-11: Courbe granulométrique de sable.....	68

Chapitre IV :

Figure 4-1 : Accroissement de la finesse des ciments étudiés.....	70
Figure 4-2 : Variation de la masse volumique absolue des ciments étudiés.....	71
Figure 4-3 : Variation de la consistance normale (besoin en eau) des pâtes de ciments étudiés	73
Figure 4-4 : Variation de délais de prise des pâtes de ciments étudiés	73
Figure 4-5 : la finesse et l'indice d'hydraulicité.....	75
Figure 4-6 : la finesse et le début de prise.....	76
Figure 4-7 : la finesse et la fin de prise.....	77
Figure 4-8 : la masse volumique et la finesse.....	78
Figure 4-9 : l'indice d'hydraulicité et le début de prise.....	79
Figure 4-10 : l'indice d'hydraulicité et la fin de prise.....	80

RESUME :

L'objectif principal de ce travail consiste à comparer les résultats obtenus par les étudiants (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005) entre deux méthodes d'activation (Addition et substitution) du ciment avec ajout : Propriétés physico-chimiques des ciments activés et non activés par la chaux fine ($< 80 \mu\text{m}$: 0,08 mm).

Notre étude comparative consiste à rechercher en utilisant deux méthodes différentes d'activation : par substitution (remplacement partiel d'une partie de ciment par la chaux fine) et par addition (ajout d'une quantité de chaux au ciment) du ciment avec ajout activé et non activé par la chaux fine (activant d'origine minérale) les meilleurs propriétés physico-chimiques : cinétique d'hydratation (prise et durcissement).

ABSTRACT:

The main objective of this work consists in comparing the results obtained by the students (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik: end of study thesis (PFE) discussed the month of June 2005) between two methods of activation (Addition and substitution) of cement with addition: Properties physico-chemical cements activated and not activated by fine lime ($<80 \mu\text{m}$: 0.08 mm).

Our comparative study consists in researching using two different methods of activation: by substitution (partial replacement of a part of cement by fine lime) and by addition (addition of a quantity of lime to the cement) of cement with activated addition and not activated by fine lime (activator of mineral origin) the best physico-chemical properties: kinetics of hydration (setting and hardening).

ملخص :

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو مقارنة النتائج التي حصل عليها الطالبان (رزيق مراد, بوعشرين توفيق: أطروحة نوقشت في شهر جوان 2005) بين طريقتين لتفعيل (إضافة واستبدال) الأسمنت مع إضافة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للأسمنت المنشط و الغير منشط بالجير الناعم (>80 ميكرومتر: 0.08 مم)

تتكون دراستنا المقارنة من البحث باستخدام طريقتين مختلفتين للتنشيط: عن طريق الاستبدال (الاستبدال الجزئي لجزء من الأسمنت بالجير الناعم) وإضافة (إضافة كمية من الجير إلى الأسمنت) للأسمنت مع الإضافة المنشط والغير منشط بواسطة الجير الناعم (منشط من أصل معدني) أفضل الخواص الفيزيائية والكيميائية: حركية الترطيب (التثبيت والتصلب)

Introduction

Introduction :

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout (C.P.A-C.E.M I). Ce type de ciment (CPJ-CEM II) présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

L'objectif principal de ce travail consiste à comparer les résultats obtenus par les étudiants (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005) entre deux méthodes d'activation (Addition et substitution) du ciment avec ajout : Propriétés physico-chimiques des ciments activés et non activés par la chaux fine ($< 80 \mu\text{m}$: 0,08 mm).

Notre étude comparative consiste à rechercher en utilisant deux méthodes différentes d'activation : par substitution (remplacement partiel d'une partie de ciment par la chaux fine) et par addition (ajout d'une quantité de chaux au ciment) du ciment avec ajout activé et non activé par la chaux fine (activant d'origine minérale) les meilleurs propriétés physico-chimiques : cinétique d'hydratation (prise et durcissement).

Chapitre I :

Etude bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique :

I-1-Ciment :

I-1-1-Introduction :

Le ciment Portland est fabriqué à partir de matières calcaires comme le calcaire ou la craie et à partir de silice et d'alumine présentes dans le schiste et dans l'argile.

La fabrication du ciment Portland commence avec le broyage des matières premières mélangées dans certaines proportions. Le cru ainsi obtenu est cuit dans un grand four rotatif à une température d'environ 1450°C. Une telle température provoque la fusion partielle des matériaux et transforme les matières premières en clinker de ciment. Le clinker est refroidi et broyé en poudre fine. Lors du broyage une faible quantité de sulfate de calcium est ajoutée pour contrôler la prise du ciment.

Les principaux oxydes qui constituent le ciment Portland sont: la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). On trouve aussi dans l'analyse chimique d'autres oxydes en plus faible quantité tels que l'oxyde de sodium (Na₂O), l'oxyde de potassium (K₂O), l'anhydride sulfurique (SO₃) et la magnésie (MgO).

Ces oxydes réagissent les uns avec les autres dans le four pour former quatre phases minérales qui représentent plus de 90 % de masse du ciment Portland. Le tableau 1.1 montre les formules chimiques et les abréviations de ces phases minérales [3].

Phase minérale	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C3S
Silicate bicalcique	2 CaO.SiO ₂	C2S
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C3A
Aluminoferrite tetracalcique	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF

Tableau 1.1- Principales phases du clinker de ciment Portland

I-1-2-Historique :

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, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice. L'association des caractéristiques de ce matériau 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.

Chapitre I : Etude bibliographique

L'utilisation de ce matériau et les secrets de sa fabrication se sont ensuite perdus à la chute de l'empire face au retour de la maçonnerie en pierre. John Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile.

En 1817, Louis Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. Joseph Aspdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon, mais ce brevet comportait encore des points obscurs.

C'est uniquement en 1845 que l'Anglais Johnson indique de façon précise les règles de fabrication du ciment. La dénomination Portland, due à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie [1]

Cependant la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, mouillable avec une bonne résistance à la compression. En 1890, on comprend l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et, après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente: par exemple le ciment alumineux fut découvert par Jules Bied, en 1908.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 Mpa, et même 140 Mpa dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 Mpa [2]

I-1-3-La fabrication du ciment :

La fabrication de ciment peut être décomposée en trois opérations élémentaires :

- préparation du cru.
- cuisson.
- broyage et conditionnement.

Comme présenté dans la figure 1.1 :

Chapitre I : Etude bibliographique

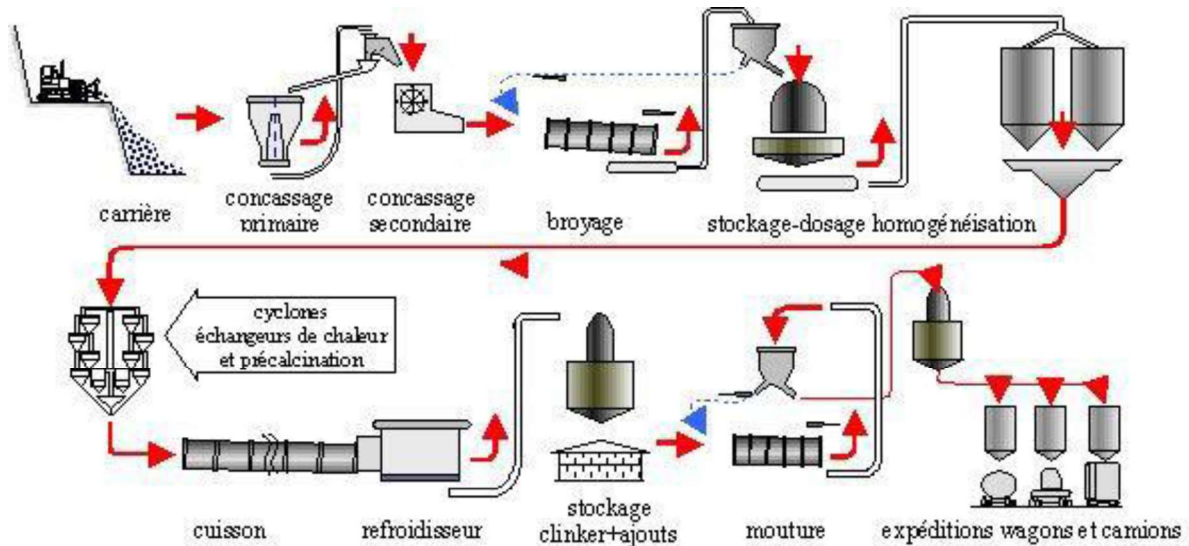


Figure 1-1 : Schéma représentatif des étapes de fabrication du ciment [4]

Les 4 voies de fabrication et les principales étapes de préparation du cru jusqu'à la cuisson.

Il existe 4 types de process différents :

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

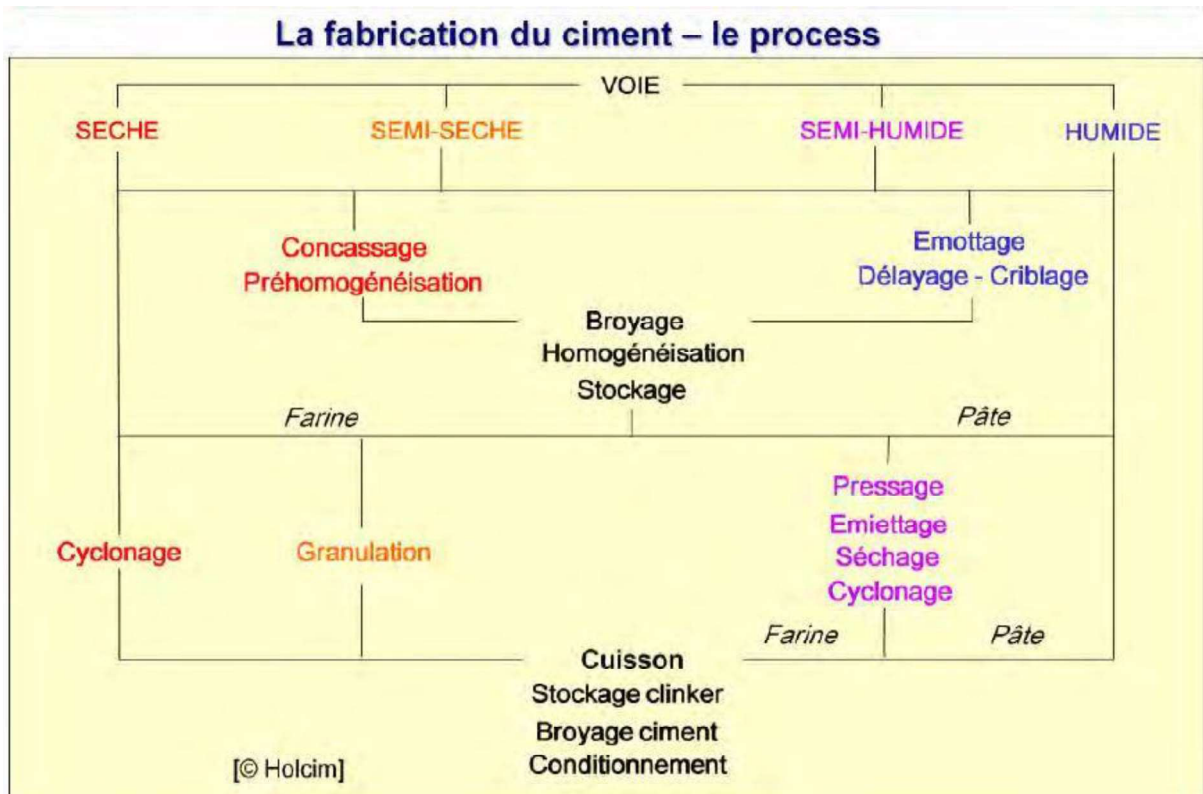


Figure 1-2 Le schéma de la fabrication du ciment.

I-1-3-1 : Fabrication par voie humide :

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru.

Les analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieur du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont :

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20 t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage.

Chapitre I : Etude bibliographique

Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C.

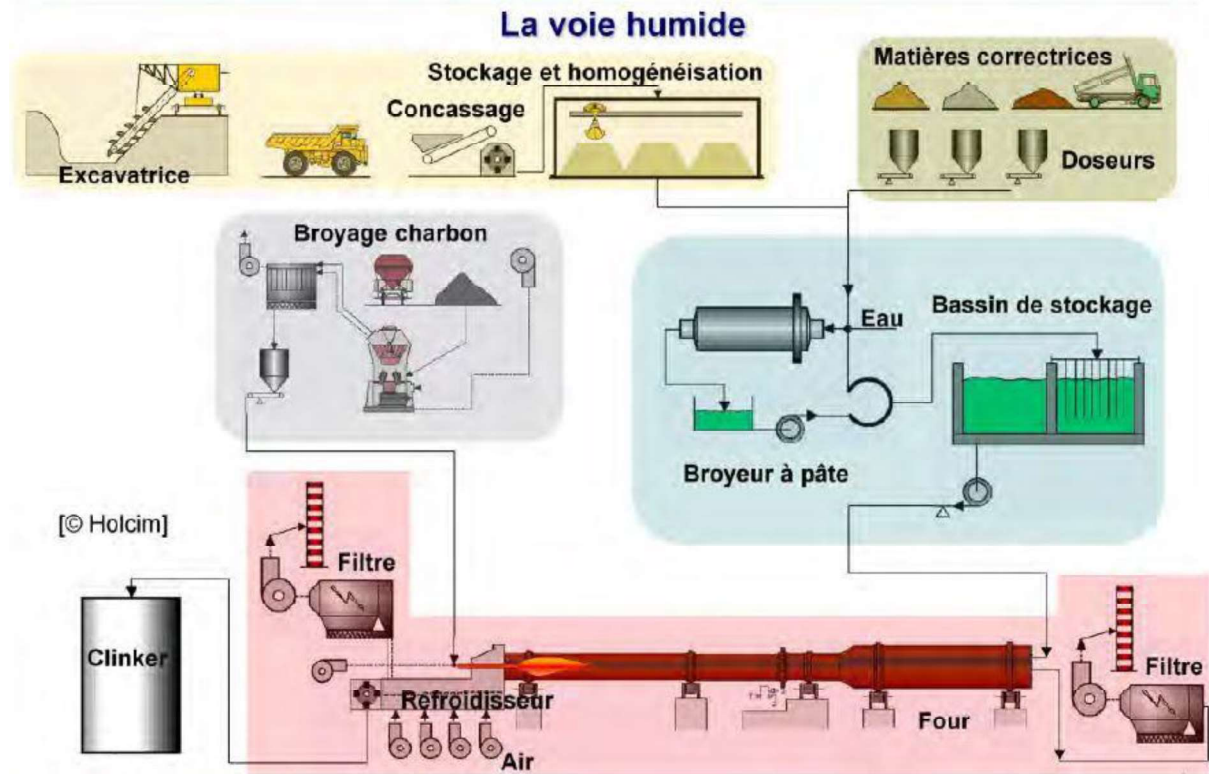


Figure 1-3 Le schéma de la fabrication du ciment par voie humide

I-1-3-2 : Fabrication par Voie sèche :

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO_2) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

Chapitre I : Etude bibliographique

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques:

1-La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.

2-Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes.

Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie.

Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.

3- Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'un pré homogénéisation puis d'une homogénéisation.

Chapitre I : Etude bibliographique

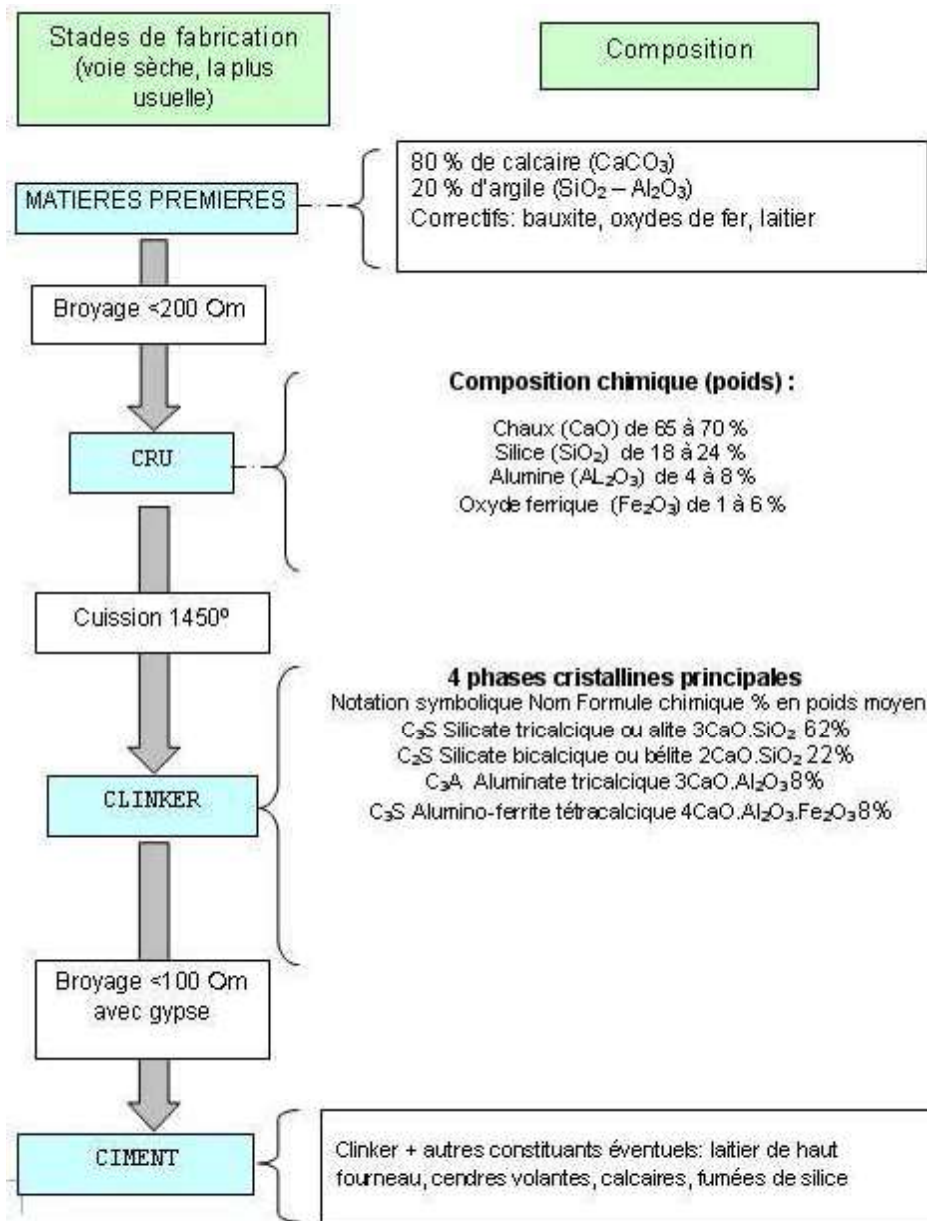


Figure 1-4 Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche

Il existe des phases communes à tous les process :

- l'extraction de la matière première, constituée de calcaire et d'argile
- la prehomogénéisation, qui consiste à homogénéiser les différents minéraux provenant de la carrière avec des ajouts minéraux secondaires. On obtient ainsi le "cru" qui a la composition idéale pour obtenir une matière finale avec la composition recherchée
- la cuisson, réalisée dans un four rotatif horizontal, qui porte à haute température le cru et le transforme en un produit fini appelé clinker. [5]

Chapitre I : Etude bibliographique

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer, peut être réalisée suivant quatre procédés différents : la voie sèche, semi - sèche, semi - humide et humide.

Dans la voie sèche, les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four.

Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granulats qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.

Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granulats et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

Dans la voie humide, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four où peut passer auparavant dans un sécheur [6].

I-1-3-3 : Processus de fabrication de ciment :

I-1-3-3-1: Extraction :

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges comme le calcaire (75 à 80%) et l'argile (20 à 25%) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert (figure :1-5). Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des tombereaux (dumpers) ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) [7,8].



Figure 1-5 : Carrière d'extraction d'argile et de calcaire [9].

I-1-3-3-2: Concassage :

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur. Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté.

Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile.

Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- ✓ Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasif mais non collants. Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.
- ✓ Le concasseur giratoire.
- ✓ Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).
- ✓ Le concasseur à marteaux pour les matériaux friable à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de 10 à 20) [9].

Chapitre I : Etude bibliographique

✓ Le concassage dans la cimenterie de est réalisé par un concasseur a battoirs qui est placé justes près de la carrière (figure-1-6), ce concasseur est constitué deux rotors primaire et secondaire.

Ce concasseur comporte aussi une chaudière pour chauffer les écrans de chocs et les parois du concasseur afin d'éviter le colmatage [10].



Figure 1-6: concasseur situé au niveau de la carrière [11]

I-1-3-3-3:Préparation du cru :

On utilise trois constituants en générale pour la préparation du cru qui sont le calcaire, l'argile brune, l'argile rouge pour la fabrication du CPA325, CPA400, CPJ450.

Après le concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm et on fait une prise d'échantillon pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition, les constituants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couvert puis ce mélange est stocké dans un hall de préhomogénéisation (figure : 1-7).

Le stackeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise. Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru, cette correction se fait pour ajouter le calcaire et le minerai de fer, après correction du cru, le mélange est acheminé à l'aide de transporteurs à bandes vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 0 à 7 mm [10].



Figure 1-7 : Hall de préhomogénéisation [11]

I-1-3-3-4 : Broyage du cru :

Les matières premières préhomogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four. Les réactions chimiques et les échanges thermiques sont en effet d'autant plus intenses que les surfaces des particules sont plus grandes. Les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture plus fine. Dans les installations récentes, on sèche le cru presque uniquement dans le groupe broyeur, en même temps que s'effectue le broyage. Ces installations fonctionnent avec séparateurs à air et broyeurs - sécheurs.

Le broyage - séchage est très avantageux au point de vue calorifique, car les gaz chauds enveloppent complètement les particules fines, et leur transmettent rapidement leur chaleur. Le degré d'humidité de la matière et la température du gaz ; déterminent la quantité de gaz chaud qu'il faut apporter à l'installation pour éliminer l'eau du cru.

La vapeur d'eau produite est évacuée du groupe – broyeur par élimination d'une quantité voulue du mélange air- vapeur d'eau produit. Cette quantité doit être suffisamment abondante pour éviter toute condensation.

Les broyeurs a cru assurent le séchage des matériaux et leur broyage jusqu'à l'obtention d'une farine cru ayant un refus au tamis de 160 μm de l'ordre de (1 – 1.5%) (Figure : 1-8) [6].



Figure 1-8 : Broyeur [11]

Séparation :

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à envoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les particules fines contenues dans les gaz [6].

Homogénéisation :

C'est au cours de cette phase, que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, qu'on peut obtenir un produit, parfaitement homogène de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit [6].

I-1-3-3-5 : Zone de cuisson :

- ❖ La ligne de cuisson est constituée par :
- ❖ Un préchauffeur
- ❖ Un four rotatif
- ❖ Un refroidisseur (figure. : 1-9)

Chapitre I : Etude bibliographique

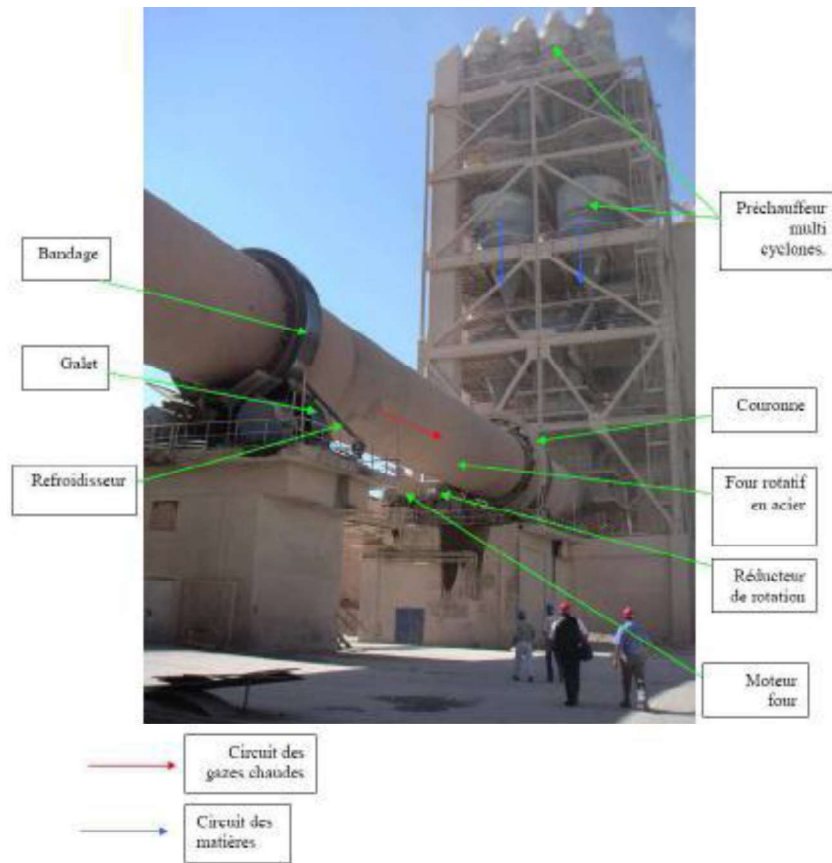


Figure 1-9 : Le four rotatif [10].

I-1-3-3-5-1 : Préchauffeur ou cyclones :

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau.

C'est un échangeur à contre-courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur des gaz sortant du four environ égale à 100°C, par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gaz de combustions et le mélange carrière, faisant une tornade qui garantit que tous les grains du crue subit la chaleur des gazes [10].

I-1-3-3-5-2: Four rotatif :

Le four constitué par une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par de la brique réfractaire, incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure [10].

Chapitre I : Etude bibliographique

I-1-3-3-5-3 : Refroidisseur :

Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C jusqu'à 80-100°C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement [10].

I-1-3-3-6 : Broyage clinker :

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés [6].

I-1-3-3-7 : Stockage, ensachage et expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches [6].

I-1-3-3-8 : Les transporteurs :

Le déplacement de la matière d'une installation à l'autre s'effectue à l'aide des transporteurs spécifique, chacun a son propre rôle. On peut distinguer :

Les transporteurs mécaniques, les transporteurs à bandes, les transporteurs à vis sans fin, les élévateurs à godés, et les transporteurs pneumatiques [6]

I-1-4 : Les constituants et les additions :

I-1-4-1 : Notations chimiques cimentières :

Les notations chimiques cimentières communément utilisées dans la chimie du ciment sont regroupées dans le tableau 1-2 [12] :

Composé	Formule chimique	Nomenclature
La silice	SiO ₂	S
L'alumine	Al ₂ O ₃	A
La ferrite	Fe ₂ O ₃	F
L'eau	H ₂ O	H
Le trioxyde de soufre	SO ₃	Š
La magnésie	MgO	M
Potassium	K ₂ O	K
Sodium	Na ₂ O	N
D'oxyde de carbone	CO ₂	Č
La chaux	CaO	C

Tableau 1-2 : Notations chimiques cimentières.[12]

Chapitre I : Etude bibliographique

I-1-4-2 : Clinker :

Le clinker est le produit sortant du four à ciment avant broyage. Les clinkers obtenus peuvent être très différents les uns des autres suivant les matières premières utilisées, le procédé de fabrication et la vitesse de refroidissement.

I-1-4-2-1 : Composition chimique du clinker :

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.

Le clinker portland comprend les oxydes suivant : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
Fourchette(%)	62 à 68	18 à 24	4 à 8	2 à 5	0 à 5	0 à 5	0 à 2	0 à 2	0 à 2
Moyenne (%)	66,6	21,9	6,3	2,5	1	0,8	0,2	0,2	0,2

Tableau 1-3 Composition chimique du clinker.[13]

-CaO : Il est lié avec SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, à l'état libre il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation (expansion). $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$.

La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63% à 67% dans le clinker.

-SiO₂ : Il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium ; un pourcentage élevé donne beaucoup de C₂S parce qu'il réagit avec tout le CaO, dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme. L'augmentation de C₂S donne une grande durabilité au ciment et surtout au milieu agressif, sa teneur est de 21% à 24%.

-Al₂O₃ : Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al₂O₃ donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7%.

-Fe₂O₃ : Il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5% à 4%.

-MgO : Une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de péri clase, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation, sa teneur est inférieure à 5%.

-TiO₂ : Sa teneur est inférieure à 0,5%, il provient des argiles.

-MnO₂ : Il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matières premières, sa teneur est 1,5%.

P₂O₅ : Se trouve sous forme d'impureté dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2%, il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2 à 0,3%.

Chapitre I : Etude bibliographique

-**Na₂O et K₂O**: Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0,5 à 1%.

Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des principaux minéraux. La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique. Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment. Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux [6].

I-1-4-3 : Le gypse (Le Sulfate de Calcium - CaSO₄) :

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2.3 .

Le sulfate de calcium (gypse CaSO₄.2H₂O) est un régulateur de prise ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication de 3 à 5% de la masse du ciment .

I-1-4-4 : Le Calcaire :

Les calcaires sont des roches sédimentaires, troisièmes par ordre d'abondance après les schistes et les grès, facilement solubles dans l'eau (voir karst), composées majoritairement de carbonate de calcium CaCO₃ (plus de 75%) mais aussi de carbonate de magnésium MgCO₃.mélangé à d'autres matériaux,(argile, silice, et des oxydes métalliques).

Les roches calcaires fournissent la plus grande partie de fabrication des matériaux de construction, des fois se forme des pierres ou après des transformations et des traitements chimiques (ex :la production de la chaux et du ciment).

- Le filler calcaire en général conduit à une augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment et par conséquence :

-À une diminution du début de prise.

-À une augmentation des résistances initiales.

- La finesse du filler contrôle ce mécanisme.

- Le filler calcaire va réagir avec les produits d'hydratation du ciment, en se formant des carboaluminates de calcium au lieu de monosulfoaluminate, ce qui permet d'avoir d'ettringite à long terme.

I-1-4-5 : La chaux libre (CaO) :

Elle est cristallisée dans le système cubique, sa densité est de 3.18 sa présence dans le ciment est proscrite (≤ 2%) notant cependant les problèmes posés par son hydratation.



Chapitre I : Etude bibliographique

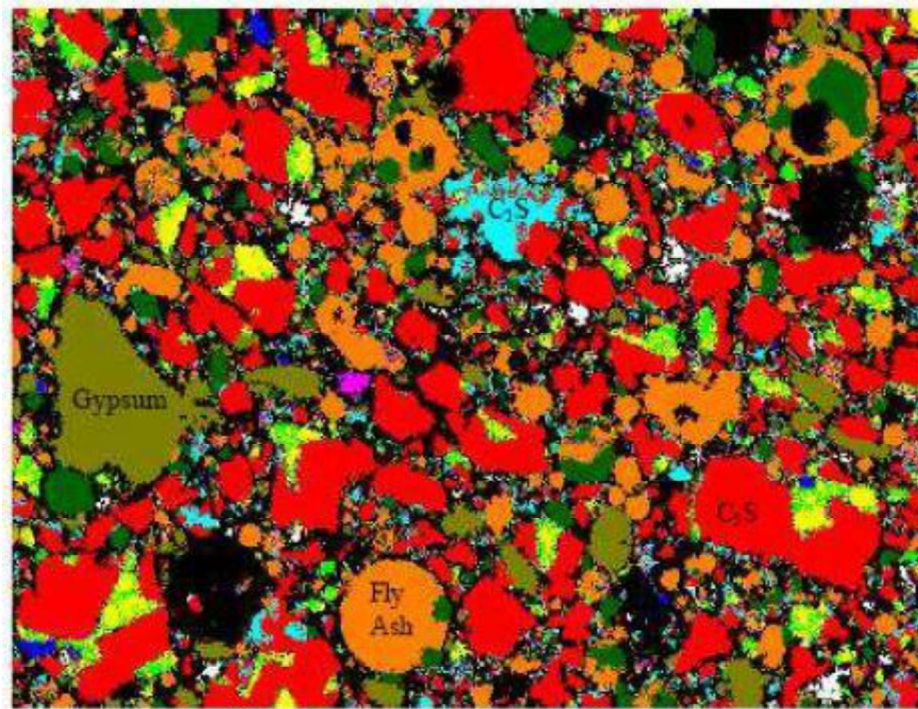


Figure 1.10 : Microphotographie d'un clinker
noir = porosité , rouge = C3S , bleu clair = C2S , vert = C3A , vert = sulfates de calcium , jaune = K2SO4, et blanc = CaO [24]

I-1-5 : Composition minéralogique :

Les compositions minéralogiques des ciments Portlands est fonction du mélange (clinker + 5% de gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [13]. Il contient quatre principaux composants:

- l'alite ; Le silicate tricalcique (alite) : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$: C3S (35-65% de masse)
- la bélite ; Le silicate bicalcique (bélite) : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$: C2S (10-40%)
- la célite ; L'aluminate tricalcique (célite) : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$: C3A (0-15%)
- L'alumino-ferrite tétracalcique (célite) : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$: C4AF(5-15%)

Des oxydes mineurs comme MgO, TiO₂, MnO, K₂O, Na₂O et P₂O₅, conditionnent en partie les propriétés physicochimiques et mécaniques du ciment. Ils jouent un rôle notable dans le processus de cuisson du clinker, les ions métalliques de ces oxydes s'insèrent dans le réseau des silicates, aluminates et alumino-ferrites, soit en remplacement des quatre oxydes principaux, soit en sites interstitiels, soit dans les lacunes du réseau.

I-1-5-1 : L'alite (silicate tricalcique C3S) :

L'alite, ou hatrurite pour son équivalent naturel, est le principal constituant du clinker avec une proportion dépassant généralement les 60 – 65%. Ce silicate tricalcique (Ca_3SiO_5) est un nésosilicate, il est composé de tétraèdres de silice (SiO_4)⁴⁻ isolés et liés aux ions Ca^{2+} coordonnés octaédriquement. Seuls trois octaèdres sont liés aux ions Si^{4+} .

Chapitre I : Etude bibliographique

En fonction de la température et des ions de substitutions du Ca^{2+} , il existe plusieurs polymorphes de structures cristallines différentes : une rhomboédrique de haute température (supérieure à $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$), trois monocliniques de moyenne température (de $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$) que l'on retrouve dans le clinker et trois tricliniques de basse température (inférieure à $980\text{ }^{\circ}\text{C}$)[14]

I-1-5-2: la bélite (silicate bi calcique C_2S) :

Ce silicate dicalcique (Ca_2SiO_4) est la deuxième phase en importance dans les clinkers. Comme l'alite, il possède un polymorphisme très compliqué et encore mal connu. La bélite, ou larnite pour son homologue naturel, est aussi un nésosilicate de système cristallin monoclinique.

La concentration en ions se substituant au Ca^{2+} est plus importante que dans le silicate tricalcique. Les plus communs sont : K^+ , Na^+ , Fe^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} et Mg^{2+} .

I-1-5-3: la célite (l'aluminate tricalcique C_3A) :

- Le C_3A à une densité proche de 3,04.
- Il existe plusieurs aluminates parmi lesquels, on peut citer 3 composés présentant des propriétés hydrauliques.
- CA et C_{12}A_7 que l'on trouve dans les ciments alumineux.
- L'hydratation des C_3A est très rapide et exothermique (l'ajout du gypse au clinker à pour effet de contrôler sa cinétique d'hydratation)
- Le C_3A contribue à la prise du ciment par contre, il contribue assez peu à la résistance finale. Le C_3A contient des impuretés (Na_2O) et se présente sous plusieurs formes allotropiques dont la réactivité vis-à-vis de l'eau est variable.

I-1-5-4: L'alumuno -ferrite tétracalcique(C_4AF) :

Il forme un solide de C_2A et C_2F (C_4AF , $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$), leurs réactions d'hydratation sont voisines de celles du C_3A .

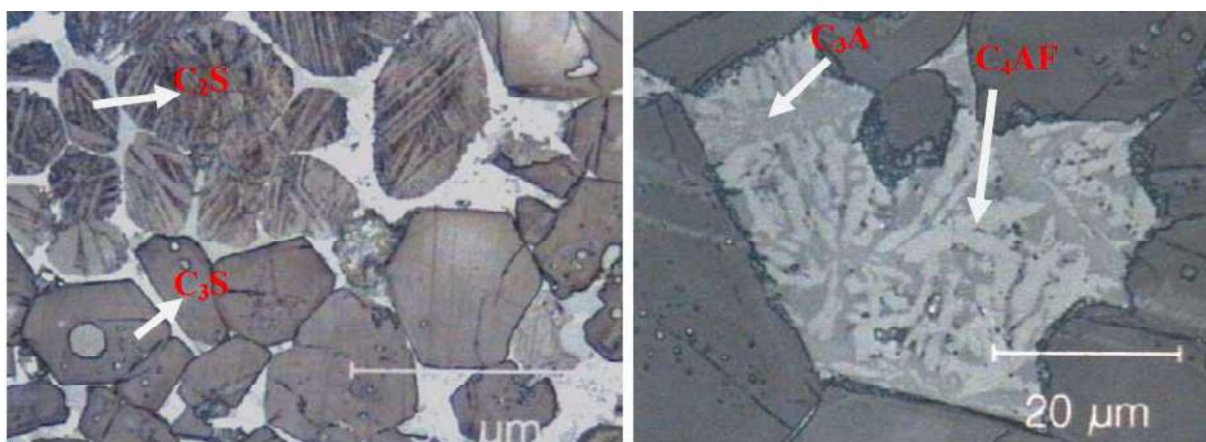


Figure 1-11 Image de clinker en microscope optique (section polie) [15]

Chapitre I : Etude bibliographique

I-1-6 : Les types des ciments :

D'après la norme ENV 197-1 définit 5 types de ciment :

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaire
Ciment portland	CPA-CEM I	95-100	----	0-5
Ciment portland composé	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	80-94 65-79	6-20 21-35	--- ---
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	0-5 0-5 0-5
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A CEM-CPZ IV/B	65-90 45-64	10-35 36-55	0-5 0-5
Ciment composé	CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	40-64 20-39	18-30 31-50	0-5 0-5

Tableau 1-4 Principales catégories de ciment

Avec les notations abrégées correspondantes qui sont comme suit : CEM pour indiquer que le produit est un ciment. Un chiffre romain 1, 2, 3, 4 ou 5 pour indiquer le type de ciment. Pour le ciment 2 ; 3 ; 4 et 5 une lettre A, B, C pour indiquer la proportion des constituants. Le nombre indiquant la classe de résistance 32.5, 42.5, 52.5 suivi le cas échéant de la lettre R pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours).

I-1-7 : Hydratation de ciments :

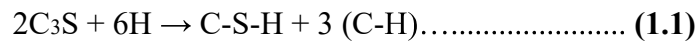
Le ciment est un liant hydraulique, il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [17]:

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

I-1-7-1 : Hydratation du l'alite (silicate tricalcique C3S) :

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C₃S avec de l'eau est la suivante:



Où C-S-H représente le 3CaO.2SiO₂. 3H₂O (Silicate de calcium hydraté) et (C-H) représente le Ca(OH)₂ (Portlandite). [19][20]

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S (figure 1.7) sont :

- les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés.
- La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g).
- La cohésion des feuillets de C-S-H est due aux forces de Van Der Walls entre leurs parties colloïdales.

L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium C-H (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.

La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [16].

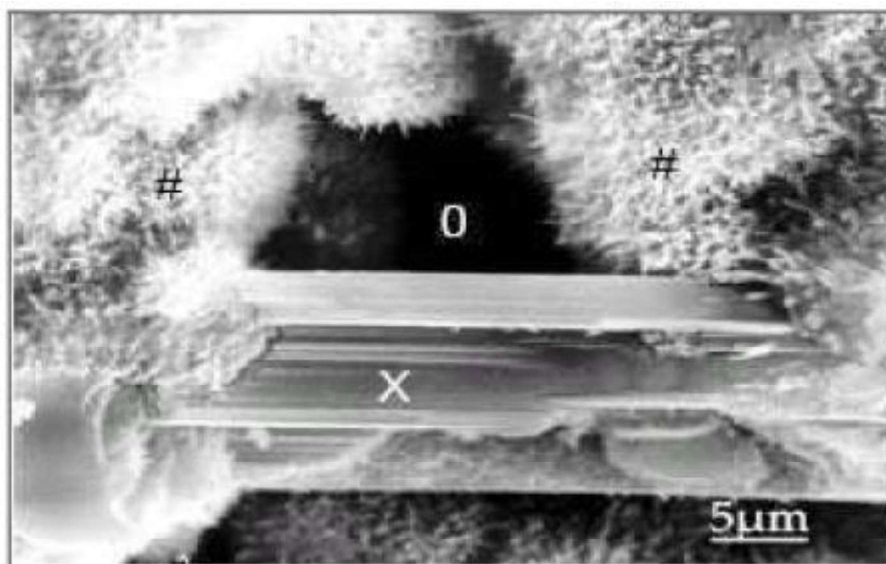


Figure 1-12 C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O) [18]

I-1-7-2 : Hydratation du la bélite (silicate bi calcique C2S) :

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des C-S-H. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stoechiométrie, l'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de C-S-H et 39% de CH alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de C-S-H et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C₃S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

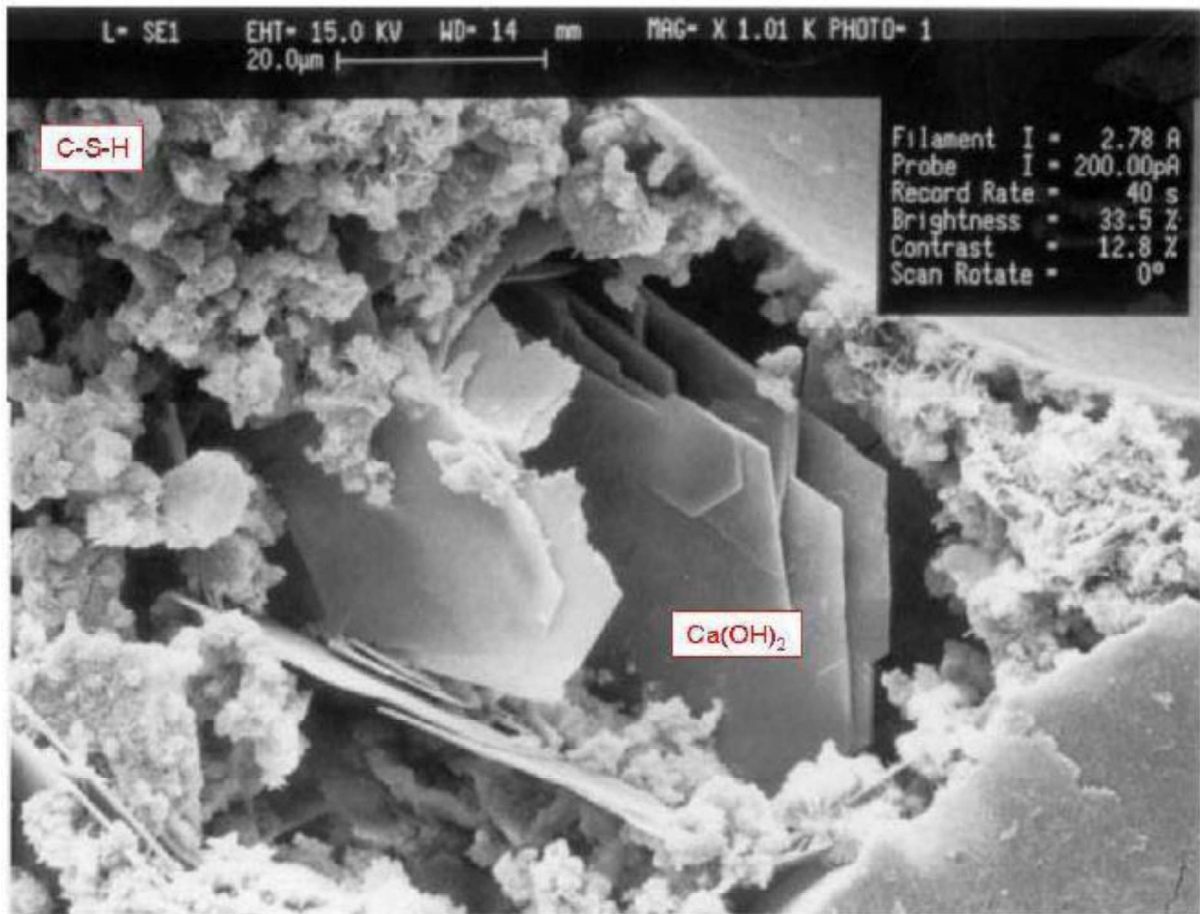
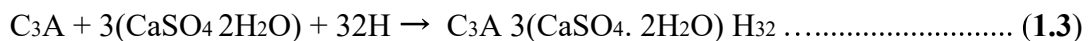


Figure 1-13 : Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage G = x 1010 [21]

I-1-7-3 : Hydratation du la célite (l'aluminate tricalcique C3A) :

L'hydratation du C₃A, naturellement très réactif, dans le ciment, est contrôlée par l'ajout de sulfate de calcium sous forme de gypse (CaSO₄.2 H₂O), d'hémihydrate (CaSO₄.½ H₂O) ou d'anhydrite (CaSO₄) [22][23]



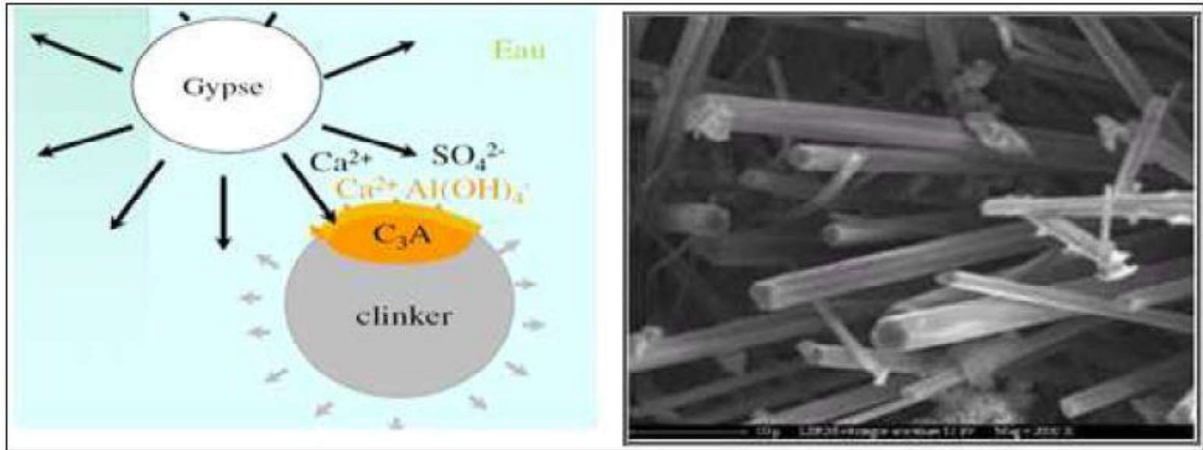
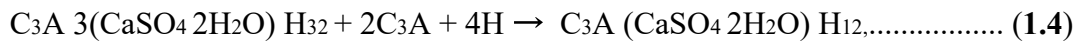


Figure 1-14 Microscopie Electronique à Balayage, étrangite aciculaire (aiguille) dans un béton [24]

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en étringite.

Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [27][25]. La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [26].

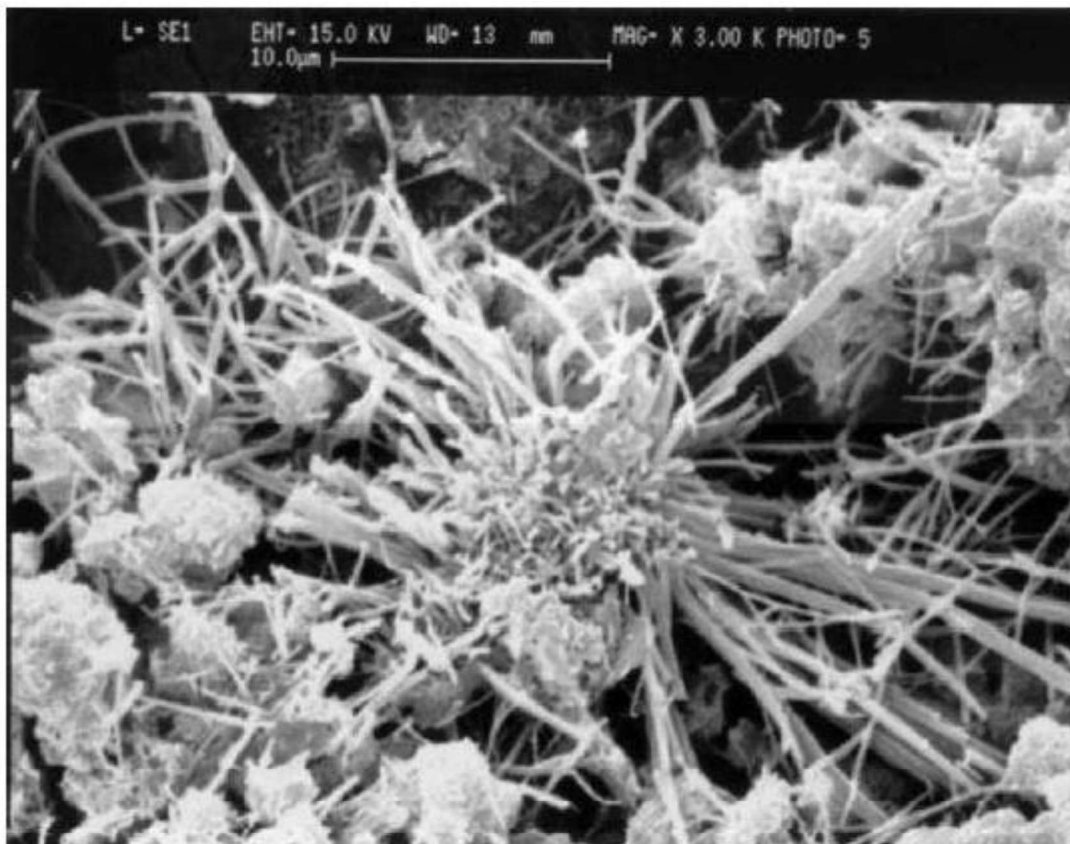


Figure 1-15 Image des cristaux d'étringite obtenue en microscopie à balayage [21]

I-1-7-4 : Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF :

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente, et les hydrates formés contiennent du Fe₂O₃ [21]

Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate.

Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [16].

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I-1-7-5: Hydratation en présence des additions minérales :

Les additions minérales d'un ciment sont dites « pouzzolaniques » quand elles consomment l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment et la silice pour créer des CSH dits « secondaires », par opposition aux CSH obtenus par hydratation directe du C₃S et C₂S.

Le mécanisme d'hydratation de base reste le même pour un ciment ordinaire de type Portland et un ciment contenant des additions minérales, pourtant des différences sont observables. D'un point de vue cinétique, les réactions d'hydratation sont plus lentes en présence d'additions minérales. De plus, la nature des hydrates formes n'est pas la même. La variation de composition de la solution porale en présence d'additions modifie le pH en fonction de la nature de celles-ci et influence la réactivité des espèces anhydres en orientant la formation des produits ou hydrates : l'hydroxyde de calcium n'est présent qu'en traces et la nature des CSH apparaît profondément changée (diminution du rapport C/S, variation morphologique) [28]

I-1-8 : Les ajouts minéraux :

I-1-8-1 : Définition :

Les ajouts minéraux sont des matières premières naturelles ou artificielles (sous-produits des autres industries, déchets industriels ou des résidus industriels) d'origine minérale utilisées dans les industries cimentaire soit dans la phase de production avec les matières premières ou avec le clinker et aussi on peut utiliser avec les ciments par addition ou par substitution pour modifier certaines de ses propriétés.

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du linker est très bénéfique, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du con. Les ajouts peuvent améliorer les propriétés du béton, en augmentant changeant sa micro sa compacité et en structure.

L'utilisation des ajouts dans les industries du ciment présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés au remplacement du ciment portland à travers le monde. Le laitier du haut fourneau, les gendres volantes, la fumée de silice la...etc. sont les matériaux les plus fiables pour leur qualité ou réaction pouzzolanique améliore la résistance des bétons aussi que leurs durabilité.[43]

I-1-8-2 : Classification des ajouts minéraux :

Les ajouts minéraux dans le ciment sont classés norme en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux : [44]

- Les fumées de silice.
- Les cendres volantes.
- Les laitiers de haut fourneau.
- Les fillers calcaires.

I-1-8-2-1 : Ajouts minéraux inertes :

Ce sont des ajouts qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation ou de durcissement de ciment portland (des ajouts spectateurs), n'influe ni positivement ni négativement sur les réactions, mais peut modifier les propriétés des produits finales, généralement utilisés au niveau de broyage de clinker.

Les dimensions supérieure à 60 μm ne particules de clinker de subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes [45].

Ce type est utilisé essentiellement pour deux raison :

1-Economique : par baisser le prix de production des produits cimentaires par le remplacement de clinker qui est très couteux de produire.

Chapitre I : Etude bibliographique

2-Technique et fonctionnelle : pour modifier ou améliorer certaines caractéristiques :

Par exemples :

- la porosité (ils jouent le rôle de micro agrégats et remplissent les pores de la pâte de ciment).
- l'ouvrabilité, préservation d'eau Etc.

Et pour profiter le maximum des avantages, ces ajouts doivent satisfaire les conditions suivantes :

- la disponibilité avec des quantités suffisantes avec le plus bas prix.
- la facilité de traitement et de préparation.
- la facilité d'intervention dans les mélanges.
- ne pas affecter la qualité de béton.
- être pure pour ne pas influencer les différents processus (fabrication, hydratation, durcissement...).
- ne pas nuire aux équipements.

I-1-8-2-2 : Ajouts minéraux actifs :

Ces ajouts sont constitués de minéraux et composés chimiques qui interviennent dans les réactions chimiques et processus de fabrication d'hydratation ou de durcissement du ciment portland.

Le but de leur addition est lié au rôle qu'ils peuvent jouer dans l'amélioration de la productivité (le rendement) et la production du ciment portland.

Ce type d'ajout est utilisé pendant ou après le broyage du clinker, leur addition a pour but d'améliorer et modifier les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques du ciment portland.

Comme le laitier de haut fourneau et la pouzzolane, ces ajouts sont employés dans la fabrication de ciment dans le but d'améliorer sa résistance mécanique après durcissement.

Cette classe est caractérisée par des propriétés chimiques et minéralogiques proches de celle du ciment portland.

Ces minéraux font accroître la résistance en formant des liaisons très fortes dans le réseau cristallin durci.

I-1-8-3 : La pouzzolane :

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Chapitre I : Etude bibliographique

Le nom pouzzolane généralement donnait à toutes les substances (naturelles ou artificielles) capables de réagir dans la présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux ou un ciment pour donner des composés nouveaux, stables avec des propriétés liantes. [61]

La propriété pouzzolanique est l'aptitude d'un matériau à se combiner à température ambiante et en présence d'eau avec la chaux ou la portlandite pour donner des hydrates très peu solubles. [62]

Pouzzolane naturelle :

Essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, produit d'origine volcanique ayant naturellement des propriétés pouzzolanique.

Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer après des traitements thermique des différentes roches (argiles, schistes, latérite, bauxite et moeller). Le traitement thermique assurer les propriétés pouzzolanique nécessaires.

I-1-8-4 : Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des poudres fines de composition chimiques celle du carbonate de calcium (CaCO_3) et plus le magnésium sous forme de ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) commercialisés comme des fillers avec une granulométrie précise et contrôlée ($\leq 80 \mu\text{m}$) obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes.....).

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique [46].

Ils sont soit obtenus par broyage du matériau cru, soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques.

L'influence des fillers calcaires apparue dans les caractéristiques de béton dans :

1-Sur les mortiers et les bétons frais :

- L'ouvrabilité augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à $500 \text{ m}^2/\text{kg}$.
- Augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.
- Contribuer au contrôle du temps de prise par la formation de carboaluminate de calcium (structure similaire à celle du monosulfoaluminate).

2- Sur les mortiers et les bétons durcis ;

- Augmenter des résistances mécaniques au jeune âge Par l'effet un accélérateur (l'addition du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S).
- La réduction de la demande en eau et une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker.
- Diminue la porosité initiale.

Chapitre I : Etude bibliographique

- Augmente le retrait durant les 24 premières heures (retrait augmente aussi avec la finesse du filler).
- Augmenter la profondeur de carbonatation.
- Diminuer la résistance à l'eau de mer.

I-1-8-5 : La poussière :

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/ g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le nuage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

I-1-8-6 : Les cendres volantes :

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont des particules très fines produites et récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. (Pouzzolanes artificielles). [48]

Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté.

Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses. La granulométrie s'échelonne de 1 à 200 µm et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30 µm. Leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m²/kg (domaine analogue à celui des ciments). [47][49]

Selon la norme ASTM C-618-80 les cendres volantes regroupent en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

1- La classe F : riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$). Elle est qualifiée de silicoalumineuse avec un faible potentiel pouzzolanique.

2- La classe C : riche en chaux ($\text{CaO} > 10\%$), avec une teneur en oxyde supérieur à 50%. Elle est qualifiée de silicocalcaire avec un potentiel pouzzolanique élevé.

L'influence des cendres volantes apparue dans les caractéristiques de béton dans :

1-Sur les mortiers et les bétons frais :

- Améliorer l'ouvrabilité des mortiers et des bétons grâce à leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique.
- Diminuer la quantité d'eau.
- Augmenter l'homogénéité et la compacité du béton.
- Améliorer sa mise en place.
- Modifie de peu le temps de prise à la température ordinaire par un remplacement de 20 à 30% de cendre , le temps de prise peut être augmenté et la chaleur d'hydratation dégagée lors

Chapitre I : Etude bibliographique

de la prise diminue régulièrement avec le pourcentage de cendre ajouté. (intéressant dans le cas de bétonnage par temps chaud.). [50]

2- Sur les mortiers et les bétons durcis :

- Les cendres volantes de classe F provoquent une baisse des résistances des bétons au jeune âge (3 j), mais avec des résistances supérieures à long terme. [46]
- Une augmentation relative des résistances mécaniques du béton à partir de l'âge de 7 jours pour un remplacement de 25% en masse du ciment par une cendre volante de classe F.
- L'effet des cendres est plus significatif pour les bas rapports E/C.
- Réduit la perméabilité aux ions chlore.
- Les perméabilités à l'eau et à l'air augmentent surtout si le béton est mûri à l'air au jeune âge. [51]
- La résistance au gel est légèrement diminuée dans le cas d'une addition de cendres volantes. (Limitée pour 20% de cendre). [50]
- Une bonne résistance au gel/dégel et une bonne durabilité de béton composé de 40 à 60% de cendre volante de classe F. [52]
- le retrait hydraulique après prise n'est jamais augmenté par l'addition de cendres volantes. [50]

I-1-8-7 : Les fumées de silice :

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium ou de zircon. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique à partir de quartz et de charbon et de fer dans le cas de ferrosilicium. [12]

Lors de cette production il se forme des vapeurs de SiO qui sont ensuite aspirées par la cheminée surmontant le four à arc. Les vapeurs de SiO s'oxydent en se refroidissant et se condensent sous forme de particules de silice amorphe (SiCh) sphériques et très fines qui sont ensuite collectées dans le système de dépoussiérage de l'usine.

Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1 μm . [3] La surface spécifique varie de 20 à 25 m^2/g . Les fumées de silice se caractérisent par une structure vitreuse (produit très réactif) avec une haute teneur en silice (de 75 à 95%). [53]

Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons :

1-L'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui plastifie le béton ayant un rapport E/C de 0,15 à 0,20.

2-L'effet filler et l'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de 0,1 mm de diamètre à partir de l'âge de 7 jours, ce qui rend le béton de fumée de silice tout à fait imperméable.

La pâte de ciment devient plus dense et la zone de transition pâte-granulat est considérablement diminuée à cause de leur faible diamètre (les particules de la fumée de silice remplissent des vides entre les particules de classes granulaires supérieures).[3][48][56]

3-L'effet et l'action pouzzolanique permet en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation de produire un CSH très dense qui permet des gains de résistances en compression dès l'âge de 7 jours [46].

Cette réaction, possible à la température ambiante et en présence d'eau, [54]

Chapitre I : Etude bibliographique

Le C-S-H produit par la fumée de silice possède un rapport C/S plus faible que le C-S-H produit par l'hydratation du ciment Portland seul. [55]
La réaction pouzzolanique entraîne à la longue une diminution graduelle de la portlandite.[3]

L'influence Les fumées de silice apparu dans les caractéristiques de béton dans :

1-Sur les mortiers et les bétons frais :

- une granulométrie améliorée.
- temps de prise prolongé
- une bonne consistance
- les fumées de silice réduit les phénomènes de ressuage et de ségrégation.

2- Sur les mortiers et les bétons durcis :

- Améliore la développement des résistances a la compression.[46]
- Réduire la perméabilité de béton a l'eau et au sels.
- Les fumées de silice améliorent aussi l'adhérence entre le béton et les armatures d'acier.[57]

I-1-8-8 : Les laitiers de haut fourneau :

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ils rassemblent toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke métallurgique. La densité du laitier fondu est beaucoup plus faible que celle de la fonte. [53][58]

Les laitiers de haut fourneau sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : Dans ce cas le laitier se retrouve sous forme vitreuse et peut développer des propriétés liantes s'il est suffisamment broyé et activé et permet son utilisation dans les ciments et les bétons. [53]
- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé principalement sous forme de melilite, un mélange d'akermanite et de gehlenite sans aucun pouvoir liant et aucune propriété hydraulique qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons. [53][58]

Les laitiers qui ont une température plus élevée au moment de leur trempe sont en général plus réactifs et possèdent une couleur plus claire.

Les laitiers qui ont une température plus faible lors de leur trempe sont moins réactifs et avec une couleur est plus foncée.

En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton.

Chapitre I : Etude bibliographique

La composition chimique du laitier :

Oxydes	Laitier français	Laitier Nord U .S .A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Tableau 1-5 : Composition chimique de laitiers [59]

La composition minéralogique du laitier :

Le laitier cristallise est le plus souvent composé de melilite, un mélange d'akermanite (C₂MS₂) et de gehlenite (C₂AS). Il peut aussi contenir de la merwinite (C₃MS₂), de la monticellite (CMS) et du diopside (CMS₂). [60]

L'influence Les laitiers apparaît dans les caractéristiques de béton dans :

1-Sur les mortiers et les bétons frais :

- Augmenter le taux et la quantité totale de ressuage.
- Temps de prise peu plus long.
- Améliorer l'ouvrabilité.

2- Sur les mortiers et les bétons durcis ;

- Résistance moins élevée que les bétons ordinaires durant les premiers jours. [50]
- Résistance élevée aux actions des eaux agressives.
- Perméabilité réduite.
- L'utilisation des laitiers n'affecte pas sur la résistance aux actions gel/dégel.

I-1-8-9 : L'importance des ajouts minéraux :

Avec le développement et les exigences (techniques, économiques, écologiques...) dans le domaine de génie civil, des travaux publics et du bâtiment, le ciment Portland artificiel sans ajout devient insuffisant tout seul.

De plus, dans une même cimenterie et pour répondre aux différentes demandes commerciales, on a la possibilité de fabriquer qu'un seul clinker et à le broyer plus ou moins finement avec des additions minérales de provenances diverses pour fabriquer des ciments composés (CEM II).

Chapitre I : Etude bibliographique

Les intérêts techniques :

- L'utilisation des ajouts donnent au ciment des performances aussi bonnes que celles d'un ciment Portland artificiel (CPA) de même classe de résistance.
- les ciments composés (CPA + ajouts) présentent une meilleure résistance aux agressions chimiques.
- Diminuer les fissurations d'origine thermique (les ciments composés dégagées moins de chaleur d'hydratation)
- Améliorer la durabilité et les propriétés mécaniques de béton.
- les bétons confectionnés par des ciments composés ayant les meilleures performances contre les dégradations sulfatiques.
- Les ciments composés sont recommandés pour les bétons exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).
- présentent une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau.

Les intérêts économiques :

- le cout des ajouts est très bas (la plupart des ajouts sont des sous-produits des différentes activités industrielles)
- L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts.
- L'introduction des ajouts réduit une partie très importante d'énergie nécessaire dans la transformation de la crue (argile + calcaire) dans la production de clinker. [63]
- La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisent déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles. [64]

Les intérêts écologiques:

- Réduire la pollution par l'élimination et la valorisation des sous-produits par l'introduction dans l'industrie cimentaire.
- Réduire l'émission de CO₂ par l'industrie cimentaire à cause de la réduction dans la production de clinker.
- préservation d'une partie de matières premières par l'utilisation des sous-produits comme des ajouts pour remplacer une partie de clinker.

Chapitre I : Etude bibliographique

I-1-8-10 : L'utilisation des ajouts dans l'industrie cimentaire en Algérie :

L'industrie cimentaire est très importante pour l'Algérie et parmi les moyens efficaces pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie. Comme le calcaire et pouzzolane naturelle de Beni-saf et le laitier d'El –Hadjar.

Cimenterie	Ajouts utilisés
Ain Touta	Laitier +calcaire
Ain El kebira	Laitier + pouzzolane
Hamma Bouziane	Laitier + calcaire
H'djar Essaoud	Laitier
Tebessa	Laitier
Meftah	Tuf / Calcaire
Rais Hamidou	Poussière
Sour EL Ghozlane	Calcaire / Tuf
Chlef	Calcaire
Béni Saf	Pouzzolane
Zahana	
Saida	

Tableau 1-6 : l'utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [65]

I-2 : La Chaux :

I-2-1 : Introduction :

La chaux, hier et aujourd'hui.

La maîtrise de la chaux s'appuie sur des millénaires de pratique dont témoignent quelques repères historiques.

Les Egyptiens fabriquaient couramment du plâtre et réalisaient 2600 ans avant JC des peintures murales sur des mortiers de plâtre et chaux.

Dans l'île de Santorin on retrouvera de la chaux mêlée à la poudre volcanique pour composer un mortier hydraulique à prise pouzzolanique, 200 ans avant JC.

Les Romains étaient passés maîtres dans la composition de ces mortiers à prise pouzzolanique et si la pouzzolane manquait, ils broyaient des briques d'argile cuite. 2000 ans plus tard les enduits et cuvelages de leurs bains défient nos connaissances techniques.

Pour mesurer à quel point nous maîtrisons peu les techniques à la chaux, il suffit de penser aux bains Romains. Dans ces lieux en permanence à 100% d'humidité la chaux était partout : dans les bassins, sur les murs et en décors peints. Aujourd'hui l'humidité nous incite à recourir à tous les produits, sauf la chaux.

Chapitre I : Etude bibliographique

Au moyen âge une grande partie de ce savoir-faire se perd, en particulier la maîtrise de la prise pouzzolanique. Les techniques les plus pointues réapparaissent avec la Renaissance Italienne, pour disparaître à nouveau à la fin du XIXème.

Tout au long du XIXe la maîtrise d'une autre prise hydraulique se précise. Le ciment, nouveau matériau, semble tout surpasser en résistance et en étanchéité. Le bâti ancien n'est pas perçu comme un patrimoine mais comme un parc immobilier dégradé. La reconstruction après-guerre n'a que faire de la chaux et des vieilles pierres. De toute façon les chaux-fourniers sont ruinés. Ne parvenant pas à fabriquer du ciment ils ont, au mieux, vendu leur carrière aux cimentiers. Leur savoir-faire et celui des maçons n'intéresse plus personne.

Peu à peu, peut-être depuis la loi Malraux sur les secteurs sauvegardés de 1962, le bâti "ancien" retrouve une place dans notre rapport au patrimoine.

On veut le restaurer mais le ciment, étanche et rigide, s'avère incompatible avec les matériaux faibles : pierres, joints ou murs en terre et bois qui font la masse des vieilles maisons. La chaux reprend sa place mais le savoir-faire manque cruellement. Le terrain perdu se regagne difficilement après près d'un siècle de table rase. Le savoir ne saute pas tout seul par-dessus les générations de maçons.

Aujourd'hui.

Après l'oubli, la chaux subit aujourd'hui l'assaut de la mode. Les peintures "effet chaux" sans chaux surfent sur la vague.

Ces effets secondaires auraient peu d'importance si sur le terrain la maîtrise des techniques à la chaux ne faisait défaut. Le savoir-faire dispersé cache ses incertitudes derrière un culte du secret aux effets désastreux.

Les connaissances ne sont pas confrontées. Les moyens scientifiques au service de fabricants ou de laboratoires s'appliquent à faire avancer lentement des approches partiales (la chaux aérienne contre la chaux hydraulique / les produits prêts à l'emploi contre la maîtrise des formulations sur chantier).

A ces partis pris s'ajoutent des difficultés de communication entre les cultures différentes des maîtres artisans et des ingénieurs soumis aux approches commerciales.

Aujourd'hui le savoir-faire croise la connaissance scientifique dans le cadre étroit de recherches partielles et privées. Aurons-nous un jour la volonté de synthétiser et de diffuser ces savoirs pour les appliquer massivement à l'entretien de notre patrimoine ?

En attendant, chaque jour, les chantiers dans l'ancien se traduisent 9 fois sur 10 par une altération du bâti, lourde ou légère mais souvent irréversible qui efface lentement le caractère du bâti ancien.

I-2-2 : Définition :

Le terme «chaux» fait référence à la chaux vive et est fabriqué en chauffant du calcaire (carbonate de calcium) à haute température dans un four. Le la chaux (oxyde de calcium) produite peut ensuite être réhydratée pour former de la chaux hydratée (une substance pulvérulente) ou «éteinte» et mûri pendant au moins 2-3 mois dans un excès d'eau pour créer du mastic à la chaux (qui a une texture similaire à celle du dentifrice).

Ces produits constituent la base des enduits à la chaux, des mortiers et des lavages.

I-2-3 : Le cycle de la chaux : [69] [70]

La chaux dans tous ses états :

Pour découvrir les chaux naturelles nous allons les suivre dans leur cycle. Nous verrons comment on passe de la pierre à la chaux vive puis à la chaux éteinte qui retournera dans le mortier à son état initial de pierre.

Vous pouvez cliquer sur les étapes du cycle qui composent les chapitres de cette fiche.

- LA PIERRE, calcaire pur ou argileux, détermine la prise, aérienne ou hydraulique, de la chaux.
- LA CUISSON transforme la pierre en chaux vive.
- LA CHAUX VIVE est broyée à la sortie du four. Elle s'utilise en l'état pour certains travaux ou sera éteinte.
- L'EXTINCTION sans excès d'eau transforme la chaux en poudre. Mise en sac elle sera vendue sous le nom de chaux aérienne ou de chaux hydraulique.
- Eteinte par immersion, seule la chaux aérienne peut se conserver en pâte.
- LES CHAUX ÉTEINTES répondent à des NORMES qui permettent de savoir si la chaux est calcique ou magnésienne, aérienne ou hydraulique, de résistance faible ou forte, pure ou bâtarde.
- LA CONSERVATION des chaux commercialisées dépend de leur état. Les chaux en poudre se conservent environ 1 an en sac. En pâte, la chaux aérienne se conserve sous l'eau sans limite de temps.
- LES TECHNIQUES A LA CHAUX ET LEUR APPLICATION feront l'objet d'autres fiches conseil. Nous donnerons ici seulement quelques conseils pour le choix d'une chaux aérienne ou hydraulique.
- LES TROIS PRISES des chaux : Aérienne, hydraulique ou pouzzolanique, elles conduisent le mortier à retrouver son état initial de calcaire. Le cycle de la chaux s'achève.

Chapitre I : Etude bibliographique

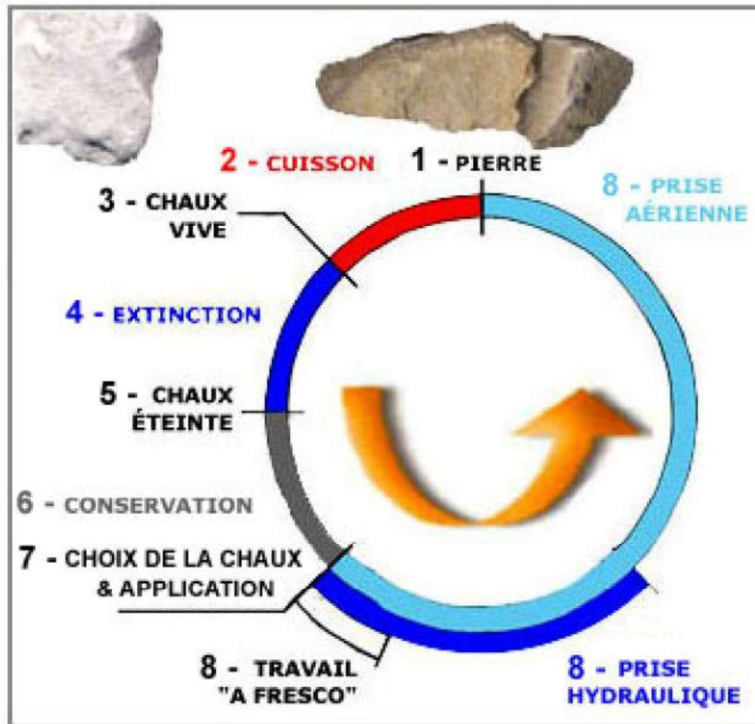


Figure 1-16 : cycle de la chaux

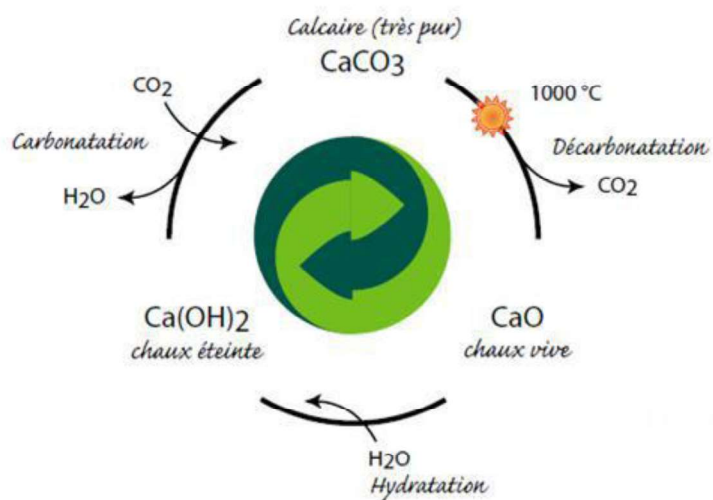


Figure 1-17 : réaction chimique de la cycle de la chaux

Chapitre I : Etude bibliographique

	Langage commun	Langage technique	Formules Chimiques
ETAT 1	PIERRE CALCAIRE	Carbonate de chaux	CaCO ₃
	+FEU	CUISSON	-CO ₂
ETAT 2	=CHAUX VIVE	Oxyde de calcium	=CaO
	+EAU	EXTINCTION	+H ₂ O
ETAT 3	=CHAUX ETEINTE	Hydroxyde de calcium	=Ca(OH) ₂
	+EAU du mortier +AIR (-Eau évaporée)	PRISE HYDRAULIQUE ET PRISE AERIENNE	+CO ₂
ETAT 4 = 1	CHAUX CARBONATEE	Carbonate de chaux	=CaCO ₃

Tableau 1-7 :les différents états de la chaux

I-2-4 : De la pierre a la chaux:

Le calcaire pur donne une chaux aérienne calcique qui fait prise à l'air. Egalement aériennes, les chaux magnésiennes proviennent d'un calcaire magnésien.

Le calcaire argileux rend la chaux hydraulique. Elle fera prise à l'eau.

Le calcaire pur : Il donne une chaux aérienne qui fera prise par réaction avec le gaz carbonique de l'air. Les coquillages, calcaire pur, donnent une très bonne chaux. Certaines chaux en pâte sont produites à partir de marbre.

Le calcaire argileux : Sa cuisson donne une chaux hydraulique qui fait prise par réaction à l'eau. La chaux sera plus hydraulique et plus résistante si le pourcentage d'argile est plus élevé.

I-2-4-1 : La cuisson :

La chaux c'est de la pierre cuite à 1000°. A la sortie du four la pierre a presque perdu la moitié de son poids, parti en fumée ou plus exactement en gaz carbonique. On comprend pourquoi la cuisson se nomme aussi décarbonatation.

Si on pousse la température on fabrique des chaux surcuites ou des ciments naturels tels le ciment prompt (connus pour leur emploi en rocaille et en fausse pierre entre la fin du XIXe s et le début du XXe s).

Autrefois, la chaux coûtait cher. Cuire de la pierre dans des fours mal maîtrisés consommait beaucoup de bois. On cuisait de la chaux partout comme en témoignent encore de nombreux noms de lieux sur les cartes. La cuisson lente (une journée entre 800° et 1100°) améliorait la finesse de la chaux et les cendres de bois participaient à la qualité de la chaux produite.

Chapitre I : Etude bibliographique

I-2-4-2 : Les chaux aériennes :

On distingue 3 types de chaux aériennes selon le % de calcaire ou d'oxyde de Magnésium.

CHAUX CALCIQUE : Chaux fabriquée à partir d'un calcaire Ca CO_3 pur ou contenant moins de 5% d'oxyde de magnésium MgO .

CHAUX MAGNÉSIENNE : Chaux fabriquée à partir d'un calcaire Ca CO_3 contenant de 5% à 34% d'oxyde de magnésium.

CHAUX DOLOMITIQUE : Chaux contenant de l'oxyde de calcium et de 34% à 41% d'oxyde de magnésium.

I-2-4-3 : Les chaux hydrauliques :

Si la pierre de la carrière contient de l'argile, la cuisson va combiner la chaux avec la silice et l'alumine de l'argile pour former des silicates et aluminates de chaux.

Les NHL (Liant Hydraulique Naturel) sont broyés pour réduire en poudre les grappiers qui contiennent les composants hydrauliques (la bélite "C2S")

Les chaux hydrauliques conservent une part variable de chaux aérienne. La prise aérienne d'une chaux hydraulique représente environ 30% de sa prise.

I-2-5 : La norme:

La norme des chaux de construction permet de savoir si une chaux est calcique ou dolomitiques, aérienne ou hydraulique, de résistance faible ou forte, pure ou bâtarde. Seules les chaux en pâte échappent encore à la pré-norme Européenne 15 311.

I-2-5-1 : Les chaux aériennes calciques "CL" ou dolomitiques "DL" :

Parmi les chaux aériennes, la norme distingue les chaux calciques provenant d'un calcaire pur et les chaux dolomitiques issues d'un calcaire magnésien.

Sur les sacs on retrouvera l'abrégié "CL" (Calcium Lime) pour les chaux calciques et "DL" (Dolomit Lime) pour les chaux dolomitiques.

Le chiffre qui suit les initiales CL ou DL donne le % de produit actif. "CL 90" désigne un "Liant Calcique à 90 % de chaux minimum". Il existe aussi des CL 80 et CL 70 à moindre teneur en chaux.

"DL 85" ou "DL 80" désigne un "Liant Dolomitique à 85% ou 80%".

I-2-5-2 : Les chaux hydrauliques "NHL" :

Elles se distinguent principalement par leur résistance à la compression mesurée après 1 mois de vieillissement.

Sur les sacs "NHL 2" correspond à une résistance comprise entre 2 et 5 MPa (20 et 50 Kg/cm²)

Chapitre I : Etude bibliographique

NHL 3,5 = une résistance comprise entre 3,5 et 10 MPa (35 et 100 Kg/cm²)

NHL 5 = une résistance comprise entre 5 et 15 MPa (50 et 150 Kg/cm²)

I-2-5-3 : Les chaux bâtardées "NHL-Z" = NHL + ciment :

On ne les utilisera pas sur les supports anciens.

I-2-6 : Les prises des chaux naturelles :

Rapidement, la prise hydraulique

L'eau du mortier déclenche la prise hydraulique des chaux NHL.

Plus rapide que la prise aérienne, la prise hydraulique permet à la sous-couche d'enduit de recevoir une couche de finition après une bonne semaine de séchage.

Plus lentes que les ciments, les chaux hydrauliques continuent à prendre de la résistance dans le temps.

Une part de la prise des chaux hydrauliques reste aérienne. Le mortier évolue lentement. A 6 mois, en fin de prise, la résistance sera de 2 à 3 fois la résistance mesurée à 1 mois.

Lentement, la prise aérienne.

Le mortier de chaux aérienne fait prise lentement au contact de l'air.

La carbonatation (absorption du dioxyde de carbone) se traduit par une reprise de poids. 1 Kg de chaux en poudre mise dans le mortier donnera 1,6 Kg de chaux carbonatée.

D'une certaine façon la matière croît lentement apportant au mortier des caractéristiques que ne permettent les prises hydrauliques rapides.

L'air nécessaire à la prise induit une utilisation des chaux aériennes en finition et hors périodes d'intempéries pour laisser au mortier le temps de se structurer.

En sous couche on recherchera un complément de prise hydraulique par une chaux hydraulique ou un agrégat pouzzolanique.

Exposé à l'air, le mortier de chaux aérienne continue à faire prise pendant 9 à 12 mois. Les mesures normalisées de la résistance à 1 mois, adaptées au ciment, ne conviennent pas aux mortiers de chaux.

A carbonatation complète, la résistance sera au moins 3 fois la résistance mesurée à 1 mois.

I-2-7 : Les chaux artificielles :

Elles n'existent plus. Ne contenant pas de chaux libre, elles ont retrouvé leur famille d'origine, les ciments, sous le nom de "ciments à maçonner". On évite ainsi la confusion entretenue volontairement par ces produits à base de ciments qui prétendaient être les équivalents "artificiels" des chaux "naturelles".

Chapitre I : Etude bibliographique

I-2-8 : La conservation des chaux :

Les chaux vives en poudre ou en roche se conservent sans limite de temps dans un sac plastique ou un seau fermé hermétiquement. Au contact de l'air la chaux vive passe à l'état de chaux éteinte puis de chaux carbonatée. Elle a alors perdu tout effet liant.

Les chaux en pâte se conservent également sans limite dans un seau hermétique. Comme les chaux vives elles se périment si on les expose à l'air.

Les chaux éteintes en poudre stockées en sac se conservent 1 an à l'abri de l'humidité et l'air (sac non ouvert).

I-2-9 : La production de la chaux :

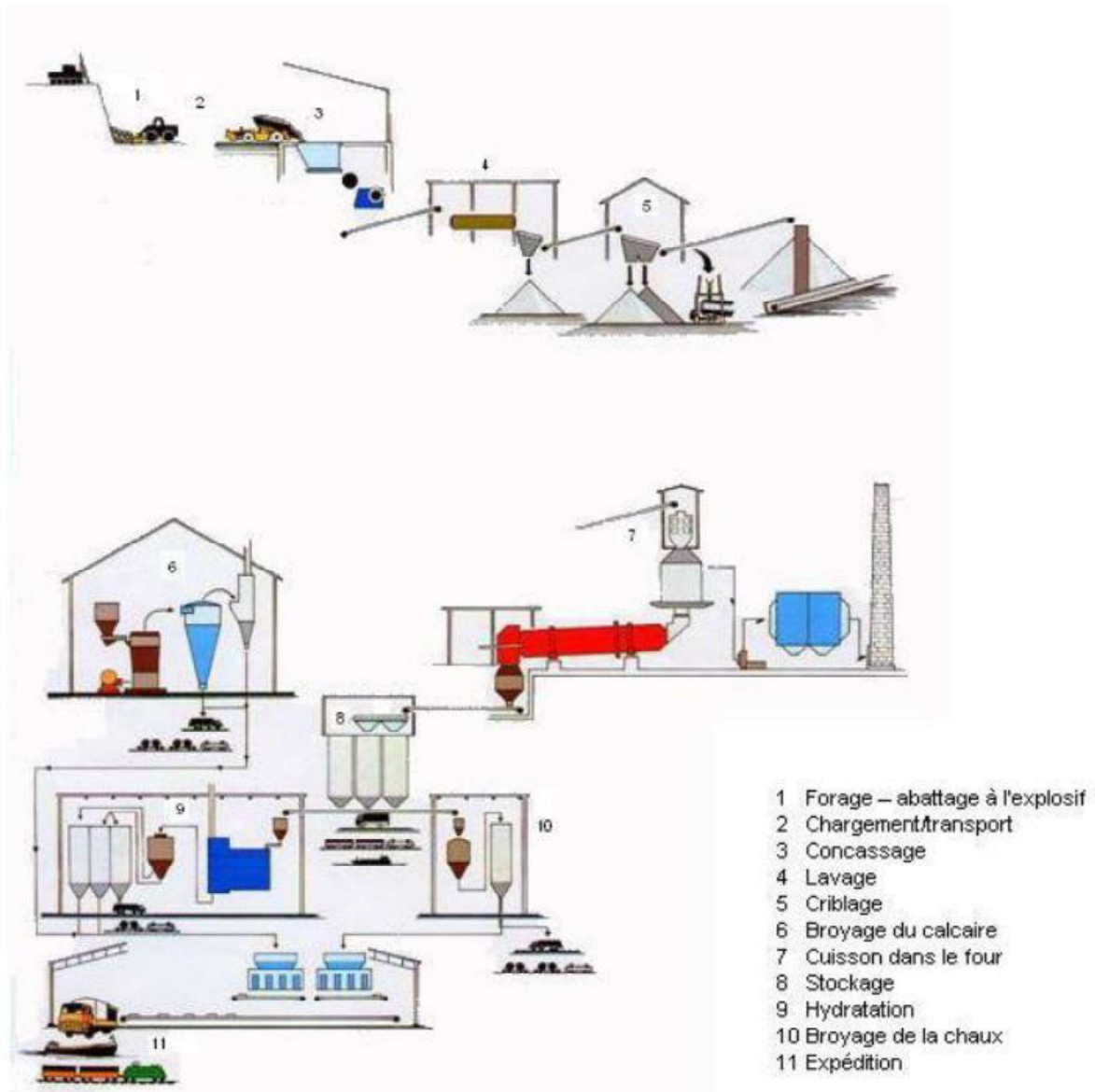


Figure 1-18 : procédé de la fabrication de la chaux

Chapitre I : Etude bibliographique

La fabrication de la chaux dépend en premier lieu de la qualité du calcaire qui est inhérente à la situation géologique du gisement. Le calcaire est broyé et chargé dans un four où il subit une réaction de décomposition thermique qui dégage de l'oxyde de calcium et du dioxyde de carbone. Ce « produit », généralement appelé chaux vive, est broyé à la finesse voulue avant stockage, transport ou traitement supplémentaire.

I-2-10 : La chaux dans le ciment :

I-2-10-1 : Technique d'incorporation de la chaux dans le ciment :

Concernant la chaux, elle est obtenue par décarbonatation du calcaire à 900°C environ :



Calcaire

chaux vive

La réaction est réversible, ce qui veut dire que la chaux vive produite peut, après réhydratation par l'humidité ambiante, se recarbonater d'où la qualification de « chaux aérienne (par opposition à la chaux hydraulique).

I-2-10-2 : Les caractéristiques des chaux aériennes sont :

- Sa forme (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux)
- Sa teneur en chaux libre (CaO)
- Sa granularité
- Sa réactivité, c'est-à-dire la vitesse d'hydraulique de la chaux vive

Quant aux liants hydrauliques, il existe deux sortes : ce sont soit des ciments « classiques normalisés soit des cendres hydrauliques comme les cendres volants, les laitiers de hauts-fourneaux ou les pouzzolanes naturelles, sont un mélange des deux.

En s'hydratant, les liants font prise et donnent au ciment une cohésion permanente dont l'importance dépend de la nature et de la proportion du liant.

L'incorporation de la chaux dans le ciment a des effets, comme :

-La modification des propriétés mécaniques du matériau cimentaire,

-l'accroissement des performances mécaniques par cimentation des grains entre eux :

C'est l'effet pouzzolanique.

Les dosages varient généralement entre 1 et 60%.

L'utilisation des ciments permet d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques du matériau.

I-2-10-3 : La prise hydraulique se fait en trois étapes :

- le début de la prise
- la prise à proprement parler
- le durcissement.

I-2-10-4 : Les résistances dépendent de nombreux facteurs dont :

- l'âge du mélange
- le dosage en liant
- la compacité atteinte à la mise en œuvre.

Chapitre II :

L'activation de ciment

Chapitre II : L'activation de ciment :

II-1 : Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter les différentes méthodes d'activation des ciments comme moyens d'accélérer le durcissement surtout à jeune âge. Cette aspect concerne le mode d'activation chimique par l'utilisation d'addition minérale (gypse et plâtre), de solution basique (NaOH, KOH), l'activation thermique et enfin le mode d'activation mécanique par le broyage très poussé du liant utilisé à un niveau de finesse élevé.

II-2 : Méthodes d'activation du ciment avec ajouts minéraux :

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout (C.P.A-C.E.M I). Ce type de ciment (CPJ-CEM II) présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température). En général, les différents types d'activation peuvent être classés en trois catégories. (**Figure 2-1**) [29]

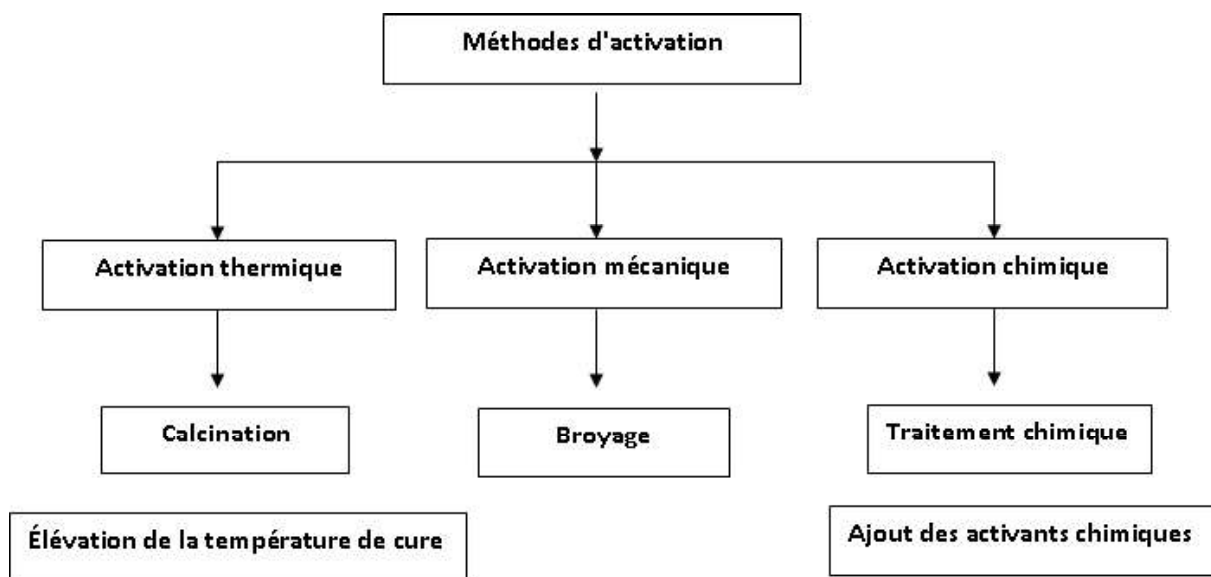


Figure 2-1: Les différentes méthodes d'activation [29]

Des efforts continus sont déployés pour développer des procédés qui permettent le développement de matériaux avec de meilleures caractéristiques mécaniques, un prix de production moindre et présentant un faible impact environnemental. La nécessité d'avoir un milieu basique pour initier l'hydratation de ces matériaux fait qu'ils réagissent moins rapidement avec l'eau. Plusieurs procédés d'amélioration de la réactivité des additions

Chapitre II : L'activation de ciment

minérales ont été mis en place [30]. Cette augmentation de la réactivité de la silice et/ou de l'alumine contenues dans le matériau pouzzolanique, améliore leur réaction avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment en formant plus de C-S-H responsables des propriétés mécaniques du matériau ciment. Les méthodes d'activations peuvent être divisées en quatre groupes.

* Activation mécanique par broyage de l'addition.

* activation thermique par calcination des pouzzolanes naturelles, par l'élévation de la température de cure du matériau incorporant l'addition;

- calcination : le metakaolin en comparaison du kaolin
- température de cure : cinétique liée à la température

* activation chimique avec traitement à l'acide des pouzzolanes naturelles, ou l'ajout d'un activant dans les matrices cimentaires incorporant l'addition.

*Ajout d'autres matériaux cimentaires.

II-3 : les méthodes (type) d'activation :

II-3-1 : Activation mécanique :

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse (surface spécifique) du ciment ou d'une addition pouzzolanique par broyage. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante) [31].

Augmenter la surface spécifique d'un liant (ciment ou ciment plus addition) conduit à accélérer le temps de prise et améliorer la résistance mécanique à la compression.
[32][33][34][35][36]

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède.

- plus de C3S,
- moins de C3A,
- le plus possible de petits cristaux.

Selon certains chercheurs, plus le rapport $[(C3S + C2S) / (C3A + C4AF)]$ est élevé, plus facile est le broyage.

II-3-2 : Activation thermique :

L'activation thermique est une accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température [37]. Elle consiste à conserver le matériau dans une étuve à différentes températures de cure jusqu'à l'échéance souhaitée. L'activation thermique peut être utilisée pour un béton avec ou sans l'incorporation d'une addition.

II-3-3 : Activation chimique :

L'activation chimique consiste à incorporer des produits spécifiques dans le mélange cimentaire à l'état frais afin de favoriser la dissolution de l'addition minérale, généralement le liant hydraulique (C.P.J. ciment portland composé) est activé par différentes solutions alcalines, telles que. L'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages en faisant varier la molarité de la solution basique.

La littérature fait état de travaux traitant de l'activation chimique des additions minérales (laitiers de haut fourneau, cendres volantes notamment). Elles indiquent que l'augmentation de la réactivité de ces matériaux passe par 3 étapes [38], [39] :

- 1- la dissolution des espèces solubles dans la phase alcaline,
- 2- une réorganisation et une diffusion des ions dissous avec la formation de petites structures coagulées,
- 3- la croissance et la condensation de ces structures pour former les produits hydrates.

Les activants chimiques (accélérateurs de prise et de durcissement) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Ce sont surtout.

- des alcalis (soude. NaOH, potasse. KOH) pour la prise.
- des chlorures de calcium (CaCl₂) pour le durcissement.

Les propriétés des activants qui contiennent du sodium et du potassium sont très similaires, mais contrairement aux produits à base de potassium, les activants NaOH, Na₂CO₃, Na₂O.nSiO₂ et Na₂SO₄,... sont les plus largement disponibles et commercialisés. [40]

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2% du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsqu'un durcissement rapide est souhaité.

La prise du ciment est généralement lente, l'ajout des activants chimiques et le broyage plus poussé du ciment présentent des solutions à ce phénomène.

II-4 : Comparaison entre les types d'activation :

Une comparaison entre les différentes méthodes d'activation indique que l'activation chimique a des avantages, un faible coût énergétique notamment. En effet, une série d'études montre que l'ajout d'un activant peut augmenter la réactivité. [42]

En tant que processus de production simple des matériaux cimentaires, par rapport aux activations mécanique et thermique qui ont besoin d'équipements supplémentaires, consomment beaucoup d'énergie et augmentent ainsi les coûts.

Chapitre II : L'activation de ciment

Les activateurs chimiques peuvent être ajoutés au cours du broyage, ou ajoutés pendant le malaxage dans l'eau de gâchage ou mélangés directement avec le liant [41]

Ainsi, l'activation chimique n'a pas besoin de changement significatif sur la ligne de production, et elle peut être facilement acceptée par l'industrie du ciment et du béton [29].

De plus, l'activation thermique n'est pas possible pour tous les types de bétons. Elle est utilisée en préfabrication, où les moyens d'étuvages existent déjà.

Pour les bétons prêts à l'emploi, l'activation mécanique est adaptée. Cependant, cette méthode a ses limites.

II-5 : L'actif minéral utilisé (la chaux) :

II-5-1 : Définition :

La chaux utilisée dans cette étude c'est la chaux de l'entreprise « la chaux du l'ouest de Saida » c'est une chaux hydraulique naturelle et obtenue par calcination, à une température de 900°C, de roche calcaire qui contiennent des éléments siliceux et alumineux.

La norme fixe des valeurs inférieure ou supérieure pour un certain nombre de caractéristique comme :

La finesse de mouture : refus aux tamis

*de 90µm (0.09mm) ≤7%

*de 200µm (0.2mm) ≤2%

A titre indicatives ces valeurs correspondant à une surface spécifique Blaine de 3000cm²/g à 10000cm²/g

Stabilité : l'expansion doit être inférieure ou égale à 2mm

II-5-2 : Propriétés physique :

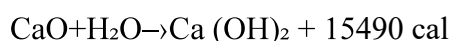
La chaux cristallise dans le système cubique la chaleur de dissolution est indépendante de la température de la température de cuisson, ce qui exclut l'existence de variétés polymorphique, la masse volumique de la chaux, cuite à passe température et de 3.18 de la chaux fondue, de 3.4 elles commencent à se volatiliser vers 1690°C, font à 1572°C et bout à de 1850°C.

II-5-3 : Propriétés chimiques :

Oxygène est dépassé à froid par le fluor, au-dessus de 300°C par le chlore, au rouge par le soufre, le phosphore, l'arsenic au-dessus de 1550°C par le carbone.

La chaux est réduite au rouge par le magnésium. Elle absorbe l'anhydrite sulfureuse au-dessus de 350°C, c'est une base énergique qui se combine avec la silice l'alumine, oxyde de fer. Elle réagit sur l'alumine au-dessus de 400°C, sur alumine au-dessus de 1000°C, donnant lieu à une réaction entre corps solide.

Elle absorbe, à la température ordinaire, en produisant un grand dégagement de la chaleur



II-5-4 : compositions chimique de la chaux utilisé :

Les résultats obtenus par ma méthode (fluorescence aux rayons X) sont :

Chaux	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	NaO ₂	P.A.F
(%)	2.56	0.18	0.43	44.49	30.04	0.09	0.03	31.33

Tableau 2-1 :Composition chimique de la chaux utilisée

Le teneur en CaO c'est la principale caractéristique d'une chaux elle peut être libre, ou combinée sous forme de carbonates ou plus rarement de silicates et d'aluminates.

La teneur en MgO : la magnésie en générale une action analogue a la chaux.

Réactivité : elle exprime la rapidité d'action d'une chaux et dépend de ses caractéristiques physique et chimiques elle peut se déterminer en mesurant dans des conditions bien définies la vitesse d'hydratation d'un échantillon de chaux : teste de réactivité a l'eau, température finale > 60°C obtenue en moins de 25 min.

Chapitre III :

**Caractéristiques des
matériaux utilisés**

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés :

Les résultats présentés dans ce mémoire concernant les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés sont tirés du mémoire réalisé par les étudiants (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005):

III-1 : Ciment :

III-1-1 : Ciment CEM II-CPJ :

-Le ciment utilisé dans l'étude est un ciment portland composé (CEM II-CPJ) fabriqué par la cimenterie de Ain-Touta « ERCE » - BATNA, commercialisé comme étant un CEM II-CPJ 42.5.

III-1-2 : Préparation des échantillons :

Le travail consiste à étudier l'influence de l'activation du ciment composé (CEM II-CPJ) par la chaux fine sur les différentes caractéristiques du ciment et de mortier.

On utilise deux types d'activation : par substitution et par addition de l'ajout (l'activant) minéral actif utilisé (la chaux) finement broyé à $\varnothing = 80 \mu\text{m}$ (0.08 mm).

Par substitution :

Par le remplacement d'une partie de ciment par de l'activant (la chaux fine) avec des différents pourcentages.

Les pourcentages utilisés dans notre étude sont : 0%,2%,4%,6%,8% et 10%.

Echantillons	Ciment (%)	Chaux (%)
CPJ ₀	100%	0%
CPJ ₂	98%	2%
CPJ ₄	96%	4%
CPJ ₆	94%	6%
CPJ ₈	92%	8%
CPJ ₁₀	90%	10%

Tableau 3-1 : Composition des ciments préparés par substitution

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

Par addition :

Par l'addition de la chaux fine au ciment utilisé avec des différents pourcentages.

Echantillons	Ciment (%)	Chaux (%)
CPJ ₀	100%	0%
CPJ ₂₊	100%	2%
CPJ ₄₊	100%	4%
CPJ ₆₊	100%	6%
CPJ ₈₊	100%	8%
CPJ ₁₀₊	100%	10%

Tableau 3-2 : Composition des ciments préparés par addition

III-1-3 : Analyse chimique de ciment :

- Tous les analyses chimiques sur le clinker et sur les échantillons des ciments préparés ont été effectuées par la méthode de la fluorescence des rayons x dans les laboratoires au niveau de la cimenterie de « AIN-TOUTTA » wilaya de Batna.

La fluorescence des rayons x :[66] [67]

- La fluorescence des rayons X (XRF) est une technique non destructrice qui sert à quantifier la composition élémentaire des échantillons solides et liquides. On utilise les rayons X pour exciter les atomes qui sont dans l'échantillon, ce qui leur fait émettre des rayons X à énergie caractéristique de chaque élément présent. L'intensité et l'énergie de ces rayons X sont ensuite mesurées.

- Cet technique est utilisé dans l'industrie dans des plusieurs demains et une de ces domaine est l'industrie cimentière pour faire les analyses nécessaires sur les matières premiers, le clinker, les ciments et aussi sur les déférents matériaux de construction utilisés dans le domaine de génie civil et des travaux publiques.

III-1-3-1 : Analyse chimique du clinker:

Les compositions chimique et minéralogique (Tableaux III.3. et III.4) du clinker de la cimenterie d'Ain-Touta ont été déterminées par la Méthode (Fluorescence aux rayons X) au niveau des laboratoires de la cimenterie.

a)Composition chimique du clinker :

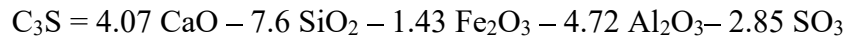
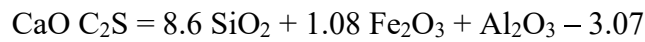
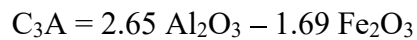
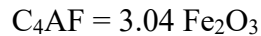
SiO₂%	Al₂O₃%	Fe₂O₃%	CaO%	MgO%	K₂O%	Na₂O	SO₃%	PAF%
21.49	5.28	3.56	66.4	1.94	0.63	0.1	0.59	0.62

Tableau 3-3 : Composition chimique du clinker

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

b) Composition minéralogique du clinker :

Equations de bogue:



C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
61.55	14.98	9.43	9.30

Tableau 3-4 : Composition minéralogique du Clinker selon la formule de BOGUE

III-1-3-2 : Analyse chimique des échantillons des ciments préparés :

Les compositions chimiques et minéralogiques ainsi que les modules caractéristiques des différents ciments (ciment + chaux) ont été déterminées au moyen de la méthode d'essai (fluorescence aux rayons X).

Ciment préparés	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
SiO ₂	22.35	21.92	21.54	21.16	20.78	20.37	21.96	21.58	21.27	20.81	20.55
Al ₂ O ₂	5.34	5.23	5.16	5.03	4.92	4.82	5.23	5.14	5.09	4.95	4.87
Fe ₂ O ₃	3.40	3.34	3.22	3.28	3.16	3.13	3.34	3.23	2.23	3.18	3.13
CaO	61.84	61.25	60.64	60.07	59.49	58.96	61.26	60.75	60.17	59.67	59.17
MgO	2.01	2.86	3.72	4.55	5.40	6.25	2.84	3.64	4.41	5.15	5.87
K ₂ O	0.52	0.51	0.58	0.49	0.48	0.47	0.51	0.5	4.49	0.48	0.48
NaO ₂	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.18	0.14	0.18	0.18	0.17
SO ₃	2.36	2.38	2.26	2.21	2.17	2.12	2.30	2.26	2.22	2.18	2.14

L _{SF}	86.98	88.07	89.19	90.35	91.57	92.82	88.04	89.1	90.15	91.2	92.25
M _S	2.55	2.55	2.56	2.56	2.57	2.57	2.55	2.56	2.56	2.56	2.57
M _A	1.57	1.56	1.56	1.56	1.56	1.55	1.57	1.56	1.56	1.55	1.55

C ₃ S	34.35	36.86	39.37	41.88	44.39	46.89	36.81	39.18	41.45	43.64	45.75
C ₂ S	33.1	30.18	27.25	24.32	21.4	18.47	30.23	27.48	24.82	22.27	19.8
C ₃ A	8.4	8.23	8.05	7.88	7.71	7.54	8.23	8.07	7.91	7.76	7.61
C ₄ AF	10.33	10.15	9.97	9.79	9.61	9.43	10.16	9.98	9.82	9.66	9.51

Tableau 3-5 : Les compositions chimiques et minéralogiques ainsi que les modules caractéristiques des différents ciments (ciment + chaux) ont été déterminées au moyen de la méthode d'essai (fluorescence aux rayons X).

III-1-4 : Surface spécifique (finesse de ciment) EN-196-6 :

La finesse de ciment :

La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface spécifique, L'étude de la finesse ou surface spécifique du ciment est d'autant plus nécessaire puisqu'elle a une influence directe sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mortier et béton. Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil de Blaine ou « Perméabilimètre de Blaine ».

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. Elle s'exprime en cm²/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000m²/g.

La surface spécifique S est calculée par la formule :

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e) \cdot \sqrt{\eta}}$$

- S : Surface spécifique
- k : Constante de l'appareil
- e : Porosité de la couche tassée
- t: Temps mesuré en secondes
- ρ : Masse volumique (g/cm³)
- η : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

Aussi elle peut être déterminée par la formule : $S = kt \cdot kd \cdot ka \cdot \sqrt{T}$

- ka : Constante de l'appareil (0.255)
- kt : Constante de la température
- Kd : Constante de densité
- T : Temps mesuré en secondes.

Ciments préparés	Finesses cm²/g	Ciments Préparés	Finesses cm²/g
CPJ 0	2810	CPJ 0	2810
CPJ 2-	2850	CPJ 2+	2846
CPJ 4-	2890	CPJ 4+	2885
CPJ 6-	2930	CPJ 6+	2920
CPJ 8-	2965	CPJ 8+	2953
CPJ 10-	3010	CPJ 10+	2995

Tableau 3-6 : surface spécifique de Blaine des ciments préparés

III-1-5: Masses volumiques:

III-1-5-1: Masse volumique apparente :

Définition

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

L'essai :

- Placer l'entonnoir au-dessus de la mesure de 1 litre.
- Fermer l'opercule.
- Verser environ 200g de liant sur la passoire et la faire descendre dans l'entonnoir à l'aide de la spatule.
- Ouvrir l'opercule, le liant tombe dans la mesure.
- Refermer l'opercule.
- Recommencer avec de nouvelles quantités du liant, jusqu'à ce que le bol déborde.
- Araser à la règle et peser le contenu.

$$\rho_{app} = M/V$$



Figure 3-1 : Matériels de l'essai de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente du ciment témoin non activé (CPJ₀) :

$$\rho_{app} = 1.125 \text{ g/cm}^3$$

III-1-5-2: Masse volumique absolue :

Densitomètre Le Châtelier (Voluménomètre) : NF EN 196-6 :

Matériel :

- Densitomètre Le Chatelier de 250 cm³ de volume.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment (chaux), du toluène par exemple.
- Une balance de précision

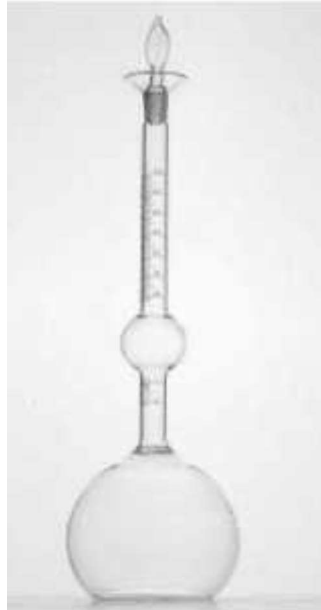


Figure 3-2 : Densitomètre Le Chatelier

ESSAI:

- Remplir l'appareil de Toluène jusqu'à un volume voisin du zéro soit V1.
- Peser le tout soit M1.
- Introduire environ 60 g de ciment jusqu'à ce que le liquide soit dans la partie utile de la graduation supérieure.
- Bien chasser les bulles d'air, noter V2.
- Peser soit M2.
- La masse spécifique est donnée par:

$$\rho_s = (M_2 - M_1) / (V_1 - V_2)$$

Pycnomètre à liquide:

Matériel utilisé :

- 1 Pycnomètre de 250 cm³.
- Une balance de précision
- Un liquide non réactif avec le ciment (chaux): Toluène.

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés



Figure 3-3 : pycnomètre

ESSAI:

- Peser le pycnomètre vide m_0
- Peser le pycnomètre rempli de Toluène jusqu'au trait repère soit m_1 .
- Peser 50 g de ciment (chaux) soit m_2 .
- Introduire le corps dans le toluène après avoir vider le pycnomètre à moitié.
- Éliminer l'air et remplir de Toluène au trait repère peser m_3 .
- Masse du Toluène déplacé correspond au volume du corps :

$$m_T = m_1 + m_2 - m_3$$

- Volume du Toluène déplacé : $V_T = M_T / \rho_T$ (ρ_T : masse spécifique du Toluène).
- Masse spécifique de l'échantillon : $P_c = m_2 / V_T$

Résultats :

Ciments préparés	Masse volumique g/cm^3	Ciments Préparés	Masse volumique g/cm^3
CPJ 0	2.86	CPJ 0	2.86
CPJ 2-	2.82	CPJ 2+	2.84
CPJ 4-	2.76	CPJ 4+	2.78
CPJ 6-	2.74	CPJ 6+	2.76
CPJ 8-	2.71	CPJ 8+	2.74
CPJ 10-	2.65	CPJ 10+	2.68

Tableau 3-7 : Masse volumique absolue des ciments

III-1-6: Consistance:

Le but de l'essai de consistance est précisément de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat ». (EN 196 – 3).

La pâte de ciment est composée de ciment (C) et d'eau (E). On définit souvent le rapport E / C ou C / E qui permet d'obtenir une pâte de consistance normalisée: ni trop, ni trop peu d'eau. On connaît les valeurs courantes de ces rapports, mais une variation minime de ces ratios ou des dispersions de température ou d'hygrométrie modifie rapidement la consistance de la pâte. Des adjuvants (plastifiants ou superplastifiants) permettent de modifier les rapports C/E ou E/C sans perturber l'ouvrabilité ou la maniabilité du béton.

- Pour déterminer ces rapports on effectue l'essai de consistance avec l'appareil de Vicat.

On mesure l'enfoncement d'une sonde amovible de diamètre 10 mm, fixée à la partie mobile de l'appareil de Vicat dont la masse totale est de 300 g, dans une pâte de ciment maintenue dans un moule tronconique.

L'enfoncement est fonction de la consistance de la pâte: on parle de consistance normalisée lorsque la sonde s'immobilise au plus tard 30 secondes après l'avoir lâchée à une distance $d = 6 \text{ mm} (+ \text{ ou } - 1 \text{ mm})$ du fond du moule.

Si d n'est pas atteint, il convient de modifier les rapports C/E ou E/C afin d'obtenir la consistance normale.

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

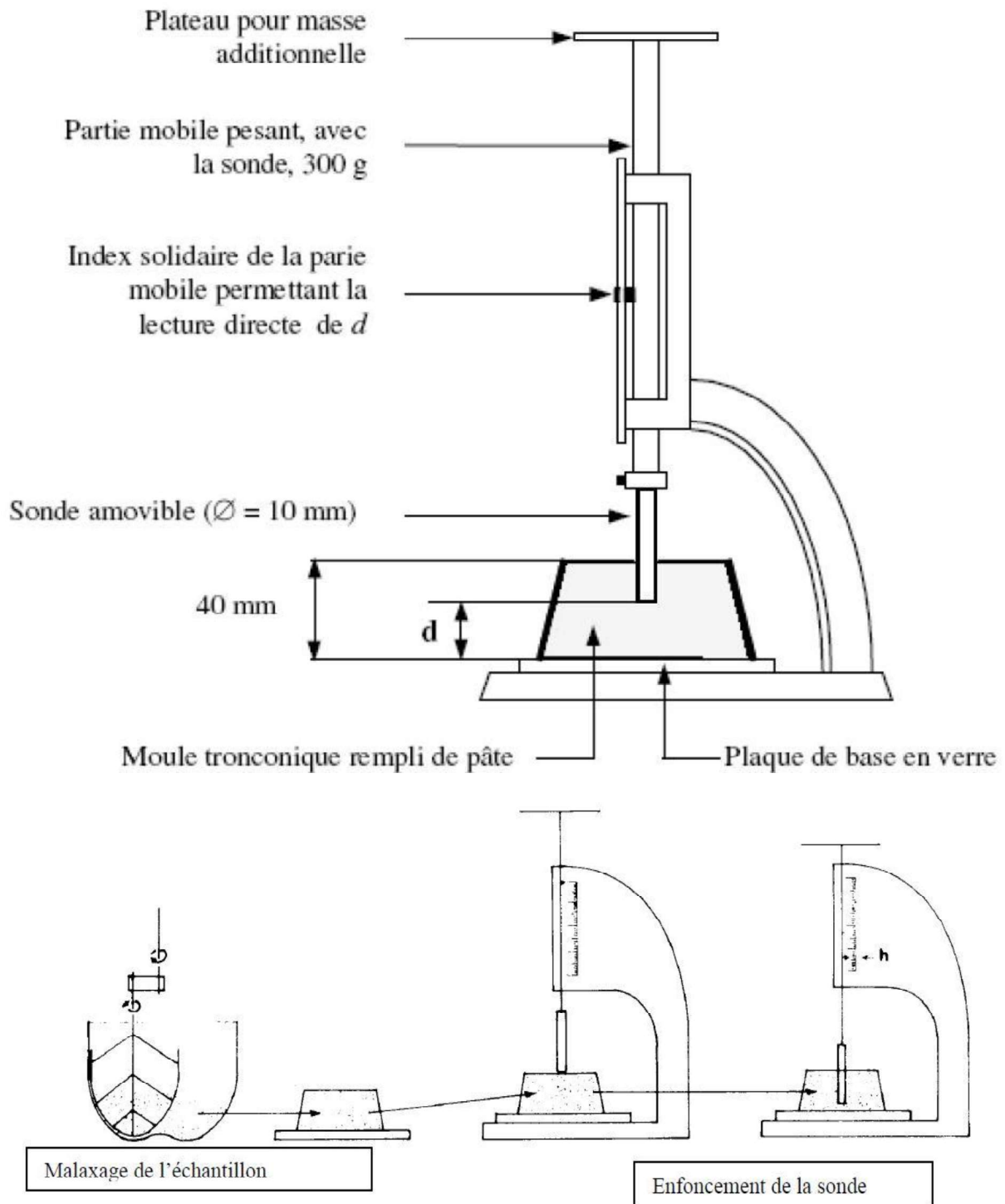


Figure 3-4 : Appareil de Vicat

Matériel nécessaire

- un malaxeur conforme à la Norme NF EN 196-1 ou NF P 15-471 avec récipient en acier inoxydable (cuve), batteur. Le malaxeur est pourvu de plusieurs vitesses : lente, moyenne, rapide
- un appareil de Vicat dont la masse totale des parties mobiles est de 300g
- un moule de Vicat de forme tronconique

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

- une plaque de base plane
- une sonde normalisée de diamètre 10 mm et de longueur 50mm
- des éprouvettes graduées en plastique
- une spatule
- un chronomètre
- une balance de portée 5 kg, précision 1g
- des bacs en plastique pour effectuer les essais

Mode opératoire

- Régler l'appareil de Vicat muni de la sonde par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle
- Relever la sonde en position d'attente.

Operations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

Tableau 3-8 : Procédure de l'essai

- introduire rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane
- placer le moule et la plaque de base plane dans l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat
- abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte
- 4 minutes après le temps zéro, lâcher la sonde sur la pâte
- 30 s après avoir lâché la sonde, noter la distance d entre l'extrémité de la sonde et la plaque de base plane
- vider la pâte de ciment dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure
- renouveler l'opération jusqu'à obtention de $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

III-1-7: La prise selon la norme (NF EN 196-3) :

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

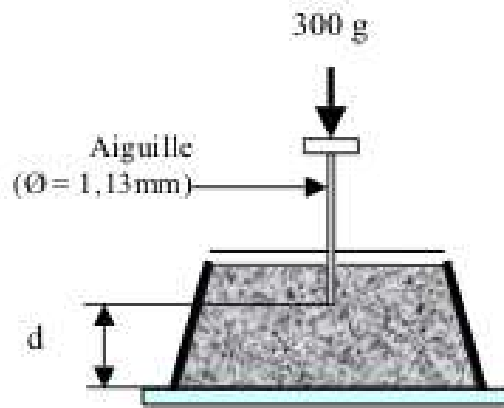


Figure 3-5 : Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (figure 1-16).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau (figure 1-17).

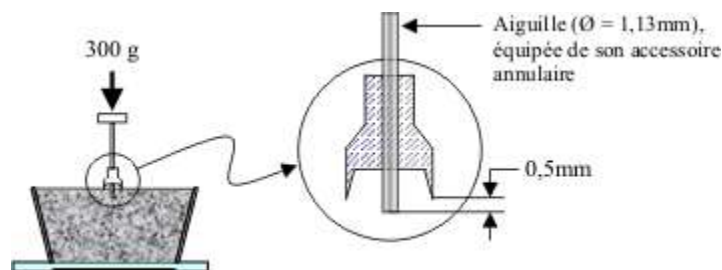


Figure 3-6 : Détermination du temps de fin de prise.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels : la nature du ciment, la finesse de mouture du ciment ; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court, la température ; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C (figure 1-18), la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise, L'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (figure 1-20).

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de :

- 1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.
- 1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

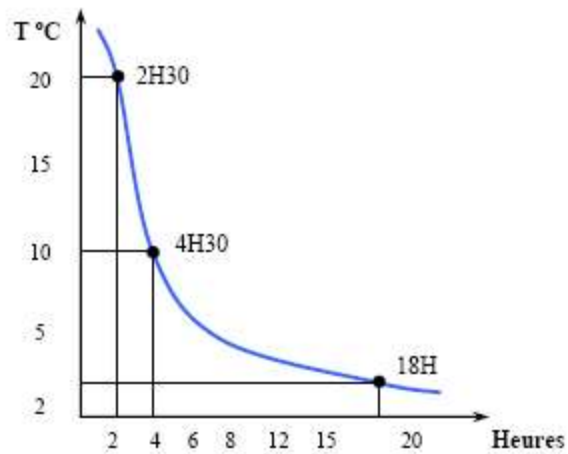


Figure 3-7: Evolution du temps de prise en fonction de la température.

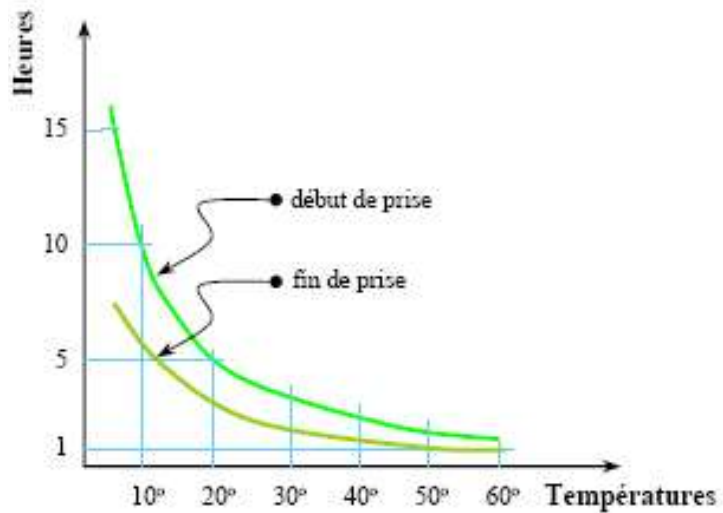


Figure 3-8: Influence de la température sur la prise des ciments.

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés



Figure 3-9 : Influence de l'E/C sur le temps de prise.

Ciment	CNP (%)	DP(h)	FP(h)
CPJ ₀	28.0	02 :47	04 :05
CPJ ₋₂	28.5	02 :35	03 :50
CPJ ₋₄	28.5	02 :25	03 :40
CPJ ₋₆	29.0	02 :12	03 :35
CPJ ₋₈	30.0	02 :07	03 :26
CPJ ₋₁₀	31.0	01 :53	03 :12
CPJ ₂	28.3	02 :36	03 :52
CPJ ₄	28.4	02 :35	03 :45
CPJ ₆	29.0	02 :30	03 :38
CPJ ₈	29.5	02 :20	03 :35
CPJ ₁₀	30.6	02 :09	03 :20

Tableau 3-9 : Caractéristique physiques des pates des ciments étudiés consistance normal et délais de pris

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

III-2: Sable :

Le sable utilisé dans l'étude : sable de dune de la région de Boussaâda.

III-2-1: Origine de sable :

Le sable utilisé dans notre étude provient des abords l'oued maïter ; cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, entre lesquelles souffle un vent prévenant du sud chargé de grains fins. Ce sable est d'origine éolienne, c'est un sable de dune, du moins ses grains fins le sable siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surface lisse est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximale qui n'excède pas 3.0mm.

III-2-2: L'exploitation de sable :

L'exploitation des carrières le long de l'oued par plusieurs entreprises étatique et privé s'effectue divers moyens surtout mécaniques (chargeur, poclain ..), le sable mélangé avec des grains fins galets passé à travers des tamis de dimension des mailles égales à 50mm, puis livré aux différents chantiers de toute la région et ses environs.(M'sila, Bordj Bou Arreridj, Sétif..)

III-2-3: Composition chimique :

Les analyses sont faites par la méthode de Fluorescence aux rayons X au niveau des laboratoires de la cimenterie de « Ain-Touta »

Elément		Teneur (%)
Silice	SiO ₂	89.67
Alumine	Al ₂ O ₃	0.90
Oxyde de Ferrique	Fe ₂ O ₃	0.91
Oxyde de magnésium	MgO	0.20
Oxyde de calcium	CaO	5.56
Perte en feu	(P.A.F)	6.34

Tableau 3-10 : Composition chimique de sable utilisé

III-2-4: Masses volumiques:

III-2-4-1: Masse volumique apparente :

III-2-4-1-1: Etat lâche ou (poreux) :

Définition :

La masse volumique apparente à l'état lâche (poreux) est la masse du matériau par unité de volume des vides existante entre les grains, elle représente donc la masse de l'unité volume apparente du corps, c'est-à-dire du volume des vides qu'elle contient.

Principe de la mesure

L'essai consiste à remplir une masse de 1dm³(1 litre), et déterminer la masse du contenu (opération de remplissage d'un récipient de volume connu et passage du matériau testé).

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

La mesure consiste à verser le sable dans un récipient de volume connu en le disposant sur une surface plane et à tasser par couche horizontale successive, d'araser la dernière couche par un mouvement de va et là et à l'aide d'une règle.

Résultat à obtenir

$$\rho_{sl} = \frac{m}{V} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Avec :

m : masse ou poids du matériau (sable) contenu dans le récipient.

m₁ : masse de récipient métallique vide.

m₂ : masse de récipient métallique avec le sable.

v : volume de récipient.

Les volumes moyens de la masse volumique apparente à l'état lâche du sable testé sont :

$$\rho_{sl} = 1.49 \text{ g/cm}^3$$

III-2-4-1-2: Etat compacte ou (dense) :

Définition

La masse volumique apparente à l'état compacte (dense) est la masse des matériaux par unité de volume après compactage γ compris les vides restant entre les grains, elle est souvent supérieure à la masse volumique apparente à l'état lâche (poreux).

Principe de la mesure

Le principe de mesure est même que celui présenté précédemment pour la détermination de la masse volumique apparente à l'état lâche.

Pour assurer un bon tassement du sable, on doit effectuer un compactage manuel de 30 secousses, compléter le remplissage du récipient, puis on nivelle ce dernier et on le pèse, soit m₂ le poids l'ensemble (sable +récipient).

Résultat obtenu

La masse volumique apparente à l'état compacte est donnée avec l'expression présentée précédemment.

$$\rho_{sc} = \frac{m}{V} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

Les volumes moyenne des trois échantillons testés son :

$$\rho_{sc}=1.49 \text{ g/cm}^3$$

III-2-4-2: Masse volumique absolue :

Définition

La masse volumique absolu (réale) est le rapport de la masse d'une matière sur son volume réelle (absolu), c'est la masse de l'unité de volume sure l'unité de volume absolu d'un corps (mâtereau), c'est-à-dire de la masse qui constitue le corps, son tenir compte du volume des vides.

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Principe de la mesure

Il suffit de déterminer le volume absolu occupé par une certaine masse du corps étudié, la détermination de la masse ne présente en générale aucune difficulté.

La matière d'essai utilisé est une éprouvette graduée (déplacement d'un liquide).

Résultats obtenus

$$\gamma^s = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

Avec :

- M** : masse du sable testé.
- V** : volume absolu du sable.
- V1** : volume d'eau (volume initial).
- V2** : volume de sable + l'eau (volume finale).

La valeur moyenne de la masse spécifique des trois échantillons testés sont égales à :

$$\gamma_s=2.83\text{g/cm}^3$$

III-2-5 : La porosité :

La porosité d'un matériau est définie par le rapport du volume des vides au volume totale.

La porosité avoir un influence très important dans les bétons et les mortiers généralement sur :

- la résistance mécanique.
- la masse volumique.
- la conductibilité thermique.
- la capacité d'absorption d'eau.

Calcul de la porosité

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\gamma_s}\right) \cdot 100$$

Dans notre étude, on a :

-à l'état lâche :

$$P_{sl}(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{sl}}{\gamma_s}\right) \cdot 100 = 47.36 \%$$

-à l'état compacte :

$$P_{sc}(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{sc}}{\gamma_s}\right) \cdot 100 = 41.34 \%$$

III-2-6 : Equivalent de sable :

L'équivalent de sable est un indicateur caractérisant la propreté du sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur.

Principe

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans une éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution flocculant afin de faire remonter les particules fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

Et nous avons :

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

E.S.V : l'équivalent de sable visuelle (mesure visuelle)

E.S.P : l'équivalent de sable piston (mesure au piston)

L'essai est réalisé à 20°C sur une fraction de sable passant par un tamis de 5 mm.

Les résultats :

E.S.V : l'équivalent de sable visuelle :

$$E.S.V = h_2/h_1 \cdot 100$$

h_1 : hauteur totale (sable +floculat).

h_2 : hauteur de sable sans tassement.

$$E.S.V=73.21\%$$

E.S.P : l'équivalent de sable piston :

$$E.S.P = h_2/h_1 \cdot 100$$

h_1 : hauteur totale (sable +floculat).

h_2 : hauteur de sable.

$$E.S.P=74.57\%$$

La valeur retenue de l'équivalent de sable est la moyenne entre les deux essais :

$$E.S=73.89\%$$

Es au piston (%)	ESV a vue (%)	Nature et qualité du sable
ES<60	ES<65	Sable argileux – Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
60≤ES<70	65≤ES<75	Sable légèrement argileux – de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait.
70≤ES<80	75≤ES<85	Sable propre – à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES>80	ES>85	Sable très propre – l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 3-11 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

Il s'agit d'un sable légèrement argileux (valeur optimale **E.S.V=73.21%****E.S.P=74.57%**)

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

III-2-7 : La granulométrie:

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles d'une collection d'éléments finis de matière naturelle ou fractionnée.

III-2-7-1 : Classes granulaires :

- Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D .
- Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D .
- Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné $0/D$.
- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

III-2-7-2: Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant la collection. La distribution granulométrique est la représentation sous forme de tables, de nombres ou de graphiques, des résultats expérimentaux de l'analyse granulométrique.

Les résultats généralement présentés dans un graphe appelé la courbe granulométriques. [68]

OBJECTIF:

-L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre **0,08** et **5mm**. On appelle :

-**REFUS** sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

-**TAMISAT** (ou **passant**) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

PRINCIPE DE L'ESSAI:

-L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.



Figure 3-10 : Matériels de l'analyse granulométrique

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

- Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

Module de finesse

- Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

- Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

$$M_f = (1/100) \sum R_i$$

R_i : refus cumulé (%).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
2.5	1.42	1.42	0.14	99.84
1.25	2.54	3.96	0.39	99.61
0.63	5.53	9.49	0.94	99.06
0.31	559.21	568.70	56.87	43.13
0.2	417	985.70	98.57	1.43
0.08	11	996.70	99.67	0.33
Fond	3.30	1000	100	0

Tableau 3-12 : Granularité du sable de dune testé

Quantité de sable	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1.0 à 1.5

Tableau 3-13 : Classement de sable

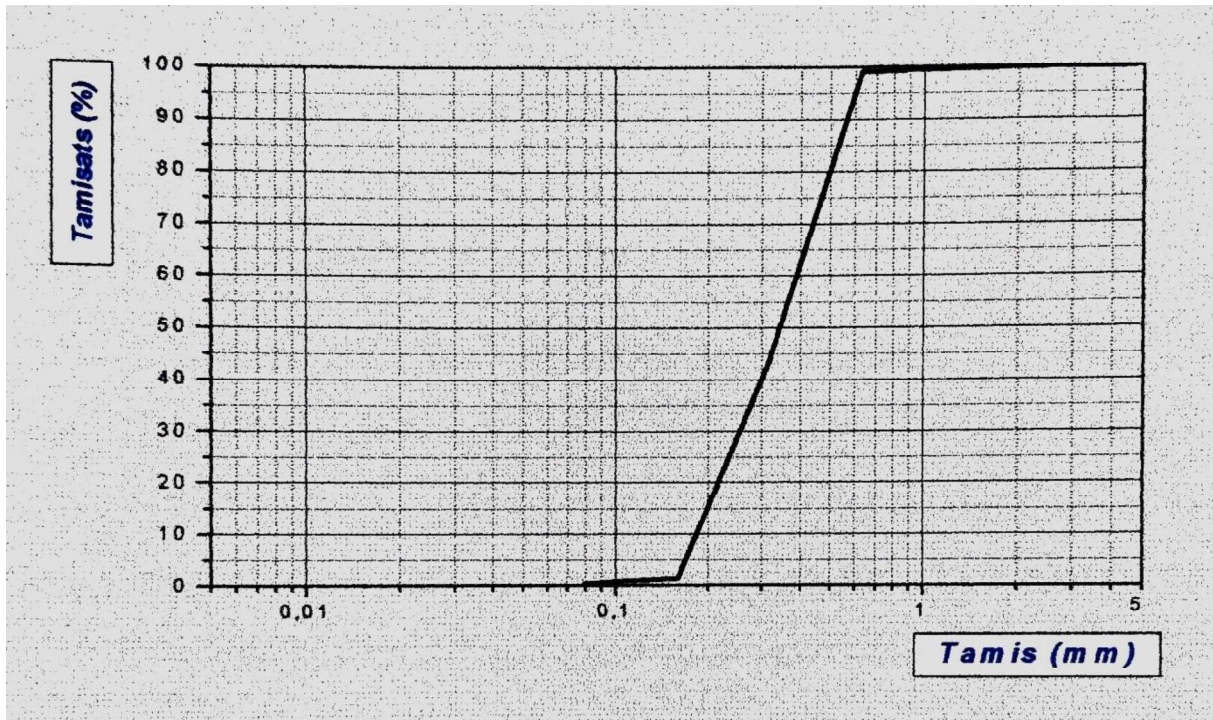


Figure 3-11 : Courbe granulométrique de sable

Le module de finesse (Mf) de sable testé est égale à :

Mf=1.57 (valeur caractéristique d'un sable fin)

III-3: L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage et la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec du mortier, elle est nécessaire pour l'hydratation des liants, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du mortier.

Cette eau de d'une grande importance, elle est soumise à certaines exigences et a même fait l'objet d'une norme (NPF 18-303).

On conçoit donc, en premier lieu que les impuretés nocives interdites pour les granulats ne doivent pas être apportées par l'eau de gâchage.

Remarque :

Pour l'eau de gâchage il ne faut utiliser ni des usées ni de l'eau de mer (sauf dans certaines prescriptions spécifiques), ni l'eau très douce (enlève la chaux).

Chapitre IV :

Comparaison et interprétation des résultats

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats :

Propriétés physico-chimiques des ciments activés et non activés par la chaux fine :

Les résultats présentés dans ce mémoire concernant la comparaison des caractéristiques physico-chimiques sont tirés du mémoire réalisé par les étudiants (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005) :

IV-1 : La composition chimique des ciments préparés :

Les compositions chimiques des différents ciments (ciment + chaux) ont été déterminées au moyen de la méthode d'essai (Fluorescence aux rayons X).

Ciment préparés	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
SiO ₂	22.35	21.92	21.54	21.16	20.78	20.37	21.96	21.58	21.27	20.81	20.55
Al ₂ O ₂	5.34	5.23	5.16	5.03	4.92	4.82	5.23	5.14	5.09	4.95	4.87
Fe ₂ O ₃	3.40	3.34	3.22	3.28	3.16	3.13	3.34	3.23	2.23	3.18	3.13
CaO	61.84	61.25	60.64	60.07	59.49	58.96	61.26	60.75	60.17	59.67	59.17
MgO	2.01	2.86	3.72	4.55	5.40	6.25	2.84	3.64	4.41	5.15	5.87
K ₂ O	0.52	0.51	0.58	0.49	0.48	0.47	0.51	0.5	4.49	0.48	0.48
NaO ₂	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.18	0.14	0.18	0.18	0.17
SO ₃	2.36	2.38	2.26	2.21	2.17	2.12	2.30	2.26	2.22	2.18	2.14

Tableau 4-1 : Les compositions chimiques des différents ciments (ciment + chaux) ont été déterminées au moyen de la méthode d'essai (Fluorescence aux rayons X).

IV-2 : Surface spécifique (Finesse de ciment):

Ciments préparés	Finesses cm ² /g	Ciments Préparés	Finesses cm ² /g
CPJ 0	2810	CPJ 0	2810
CPJ 2-	2850	CPJ 2+	2846
CPJ 4-	2890	CPJ 4+	2885
CPJ 6-	2930	CPJ 6+	2920
CPJ 8-	2965	CPJ 8+	2953
CPJ 10-	3010	CPJ 10+	2995

Tableau 4-2 : surface spécifique de Blaine des ciments préparés

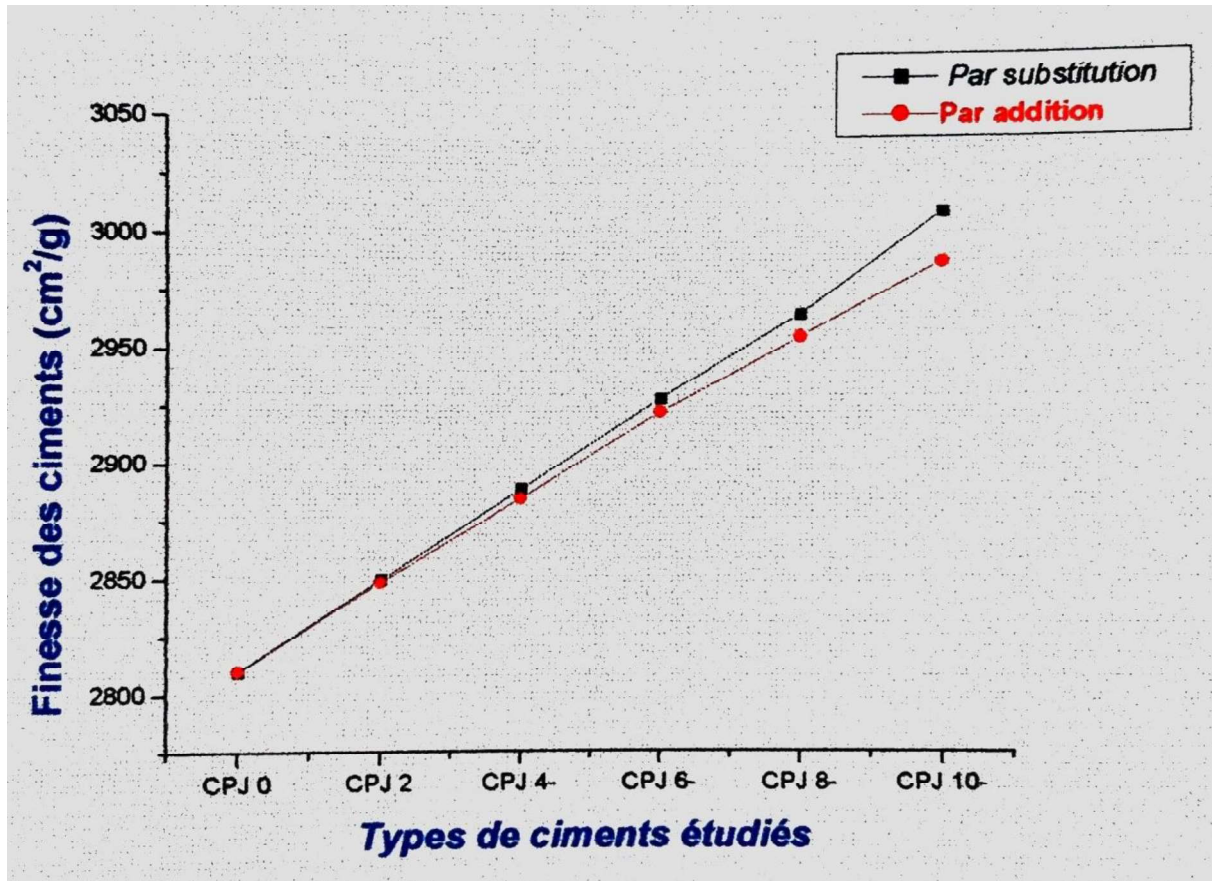


Figure 4-1 Accroissement de la finesse des ciments étudiés

- La finesse des ciments préparés s'améliorent avec la variation de l'ajout minéral utilisé (chaux fine).
- La méthode d'activation par substitution de la finesse (S.S.B) est meilleure par rapport a celle de l'activation par addition de la finesse des ciments.
- Cette variation de la finesse est dûe essentiellement à la différence qui existe entre les deux finesses (la finesse du ciment témoin par rapport à la finesse de la chaux utilisée comme activant).

IV-3 : La masse volumique absolue :

Ciments préparés	Masse volumique g/cm ³	Ciments Préparés	Masse volumique g/cm ³
CPJ 0	2.86	CPJ 0	2.86
CPJ 2-	2.82	CPJ 2+	2.84
CPJ 4-	2.76	CPJ 4+	2.78
CPJ 6-	2.74	CPJ 6+	2.76
CPJ 8-	2.71	CPJ 8+	2.74
CPJ 10-	2.65	CPJ 10+	2.68

Tableau 4-3 : Masse volumique absolue des ciments

- La masse volumique absolue des ciments préparés diminue avec la variation de l'ajout minéral utilisé (chaux fine).
- Cette diminution est plus importante pour l'activation par substitution par rapport à celle par activation par addition.
- Ce changement est dû à la différence entre la masse volumique de ciment utilisé et la masse volumique de la chaux fine utilisée comme activant.

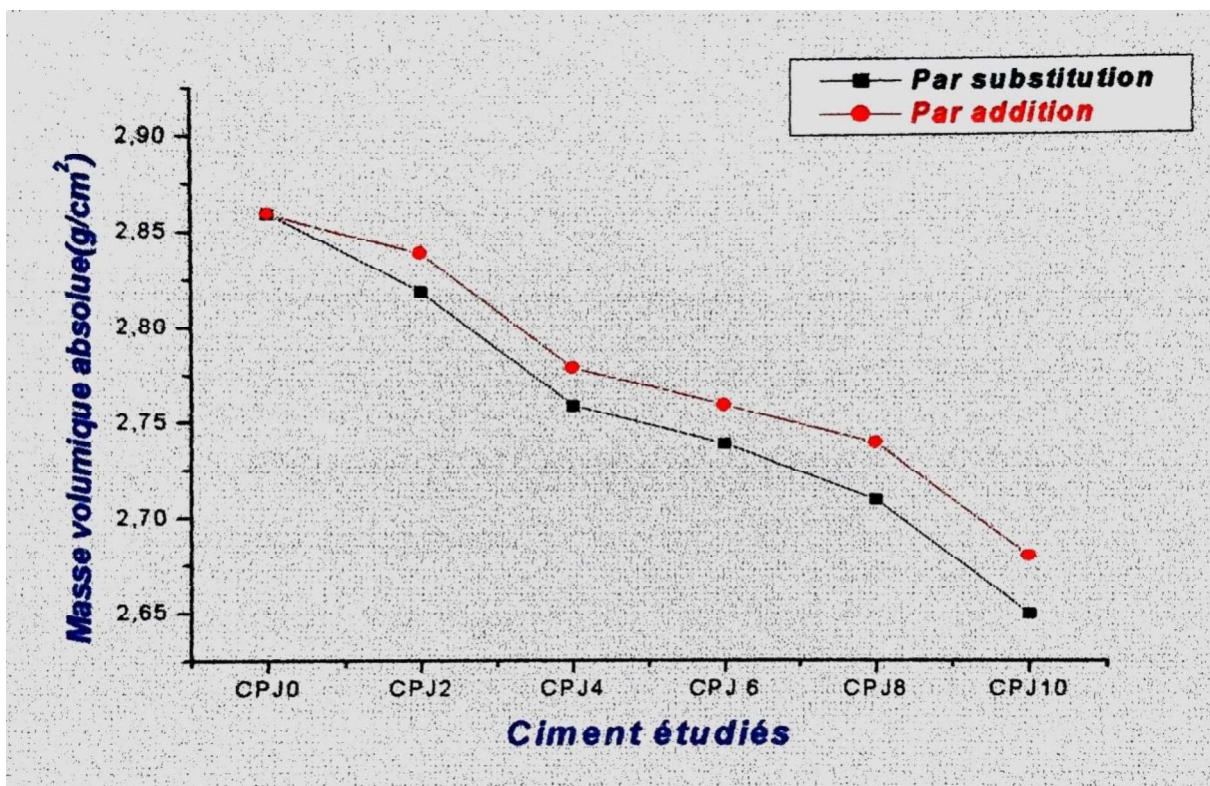


Figure 4-2 : Variation de la masse volumique absolue des ciments étudiés

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-4 : Début et fin de prise :

Ciment	CNP (%)	DP(h)	FP(h)
CPJ ₀	28.0	02 :47	04 :05
CPJ _{.2}	28.5	02 :35	03 :50
CPJ _{.4}	28.5	02 :25	03 :40
CPJ _{.6}	29.0	02 :12	03 :35
CPJ _{.8}	30.0	02 :07	03 :26
CPJ _{.10}	31.0	01 :53	03 :12
CPJ ₂	28.3	02 :36	03 :52
CPJ ₄	28.4	02 :35	03 :45
CPJ ₆	29.0	02 :30	03 :38
CPJ ₈	29.5	02 :20	03 :35
CPJ ₁₀	30.6	02 :09	03 :20

Tableau 4-4 : Caractéristiques physiques des pâtes des ciments étudiés : Consistance normal et délais de prise (début et fin de prise)

D'après les résultats obtenus concernant les propriétés physiques : Consistance normal et délais de prise (début et fin de prise) on remarque que l'augmentation de la quantité de la chaux fine incorporée dans le ciment présente un double effet :

- L'activation par addition provoque une forte absorption d'eau (Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte préparée) par rapport à celle par substitution.

- L'incorporation de l'activant minéral (chaux fine) dans le ciment améliore les délais de prise (début et fin de prise) pour les deux méthodes d'activation.

- L'activation par substitution présente une diminution (raccourcissement) très importante des délais de prise (début et fin de prise) par rapport à celle par addition.

- Cette variation des délais de prise (début et fin de prise) est dûe principalement à la différence des propriétés physiques (degré d'absorption d'eau et finesse) des deux matériaux utilisés (ciment et chaux fine).

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

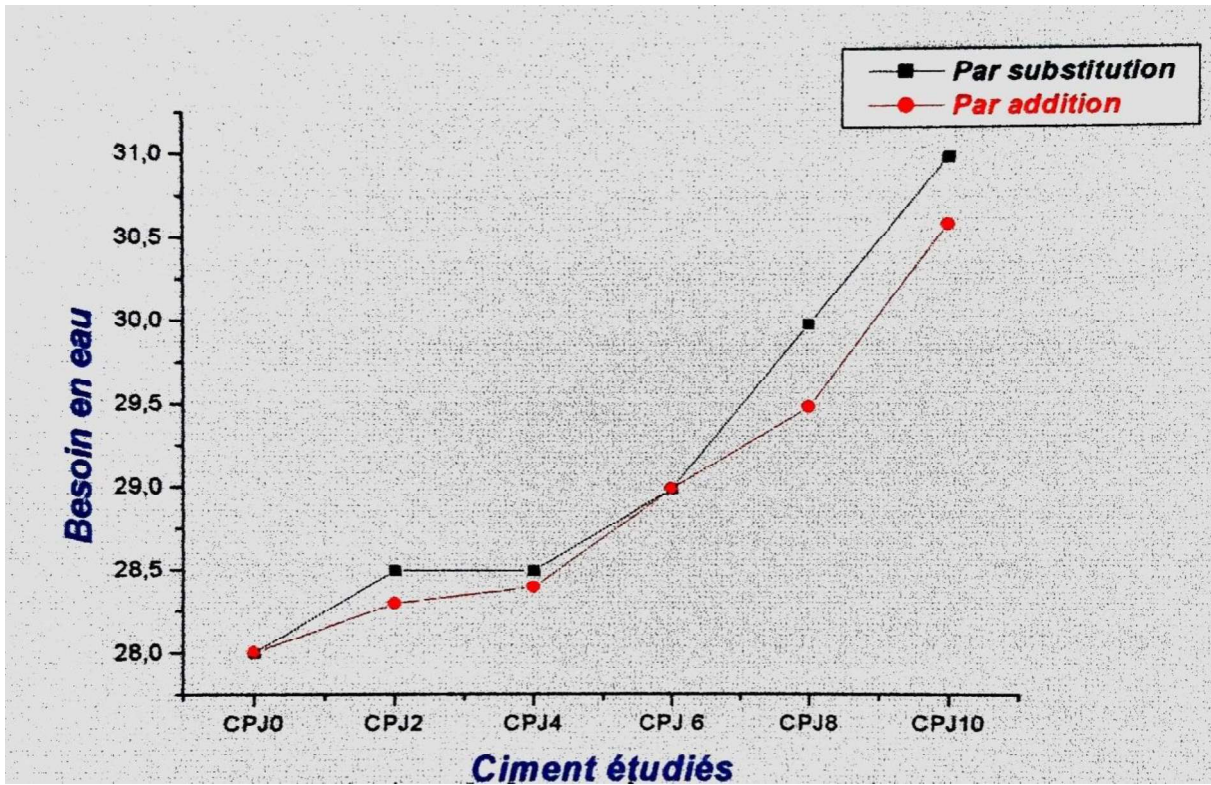


Figure 4-3 :Variation de la consistance normale (besoin en eau) des pâtes de ciments étudiés

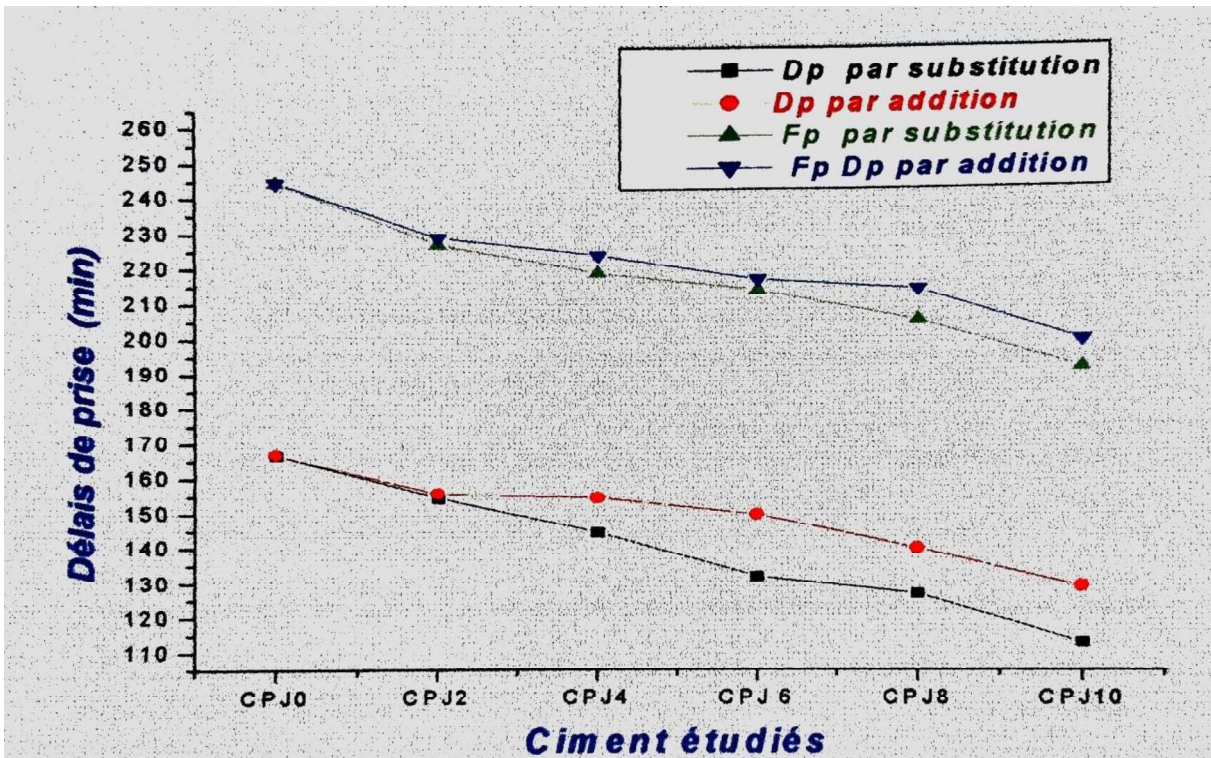


Figure 4-4 :Variation de délais de prise des pâtes de ciments étudiés

IV-5 : L'indice d'hydraulicité :

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

$$I_h = \frac{\text{Fraction acide}}{\text{Fraction basique}} = \frac{\text{SiO}_2(\%)}{\text{CaO}(\%)}$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice d'hydraulicité est plus élevé :

- quand $I_h > 0,5$, le ciment est dit basique (Portland) ;
- quand $I_h < 0,5$, le ciment est dit neutre (riche en laitier) ;
- quand $I_h \neq 1$, le ciment est dit acide (conventionnellement), ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non de la chaux mais de l'alumine (ciment alumineux).

Ciment préparés	CPJ₀	CPJ₂₋	CPJ₄₋	CPJ₆₋	CPJ₈₋	CPJ₁₀₋	CPJ₂₊	CPJ₄₊	CPJ₆₊	CPJ₈₊	CPJ₁₀₊
SiO ₂	22.35	21.92	21.54	21.16	20.78	20.37	21.96	21.58	21.27	20.81	20.55
CaO	61.84	61.25	60.64	60.07	59.49	58.96	61.26	60.75	60.17	59.67	59.17
I _h	0.361	0.358	0.355	0.352	0.349	0.345	0.358	0.355	0.353	0.349	0.347

Tableau 4-5 : l'indice d'hydraulicité des ciments préparés

- L'indice d'hydraulicité des ciments préparés s'améliorent avec la variation de l'ajout minéral utilisé (chaux fine).
- La méthode d'activation par addition de l'indice d'hydraulicité (I_h) est meilleure par rapport a celle de l'activation par substitution de l'indice d'hydraulicité (I_h) des ciments.
- Cette variation de l'indice d'hydraulicité (I_h) est dû essentiellement à la différence qui existe entre les deux oxydes (SiO₂ et CaO) du ciment témoin par rapport aux oxydes de la chaux utilisée comme activant).

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-6: Les courbes des résultats :

IV-6-1: La finesse en fonction de l'indice d'hydraulicité :

Par addition :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
I _h	0.361	0.358	0.355	0.353	0.349	0.347
Finesse	2810	2846	2885	2920	2953	2995

Par substitution :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋
I _h	0.361	0.358	0.355	0.352	0.349	0.345
Finesse	2810	2850	2890	2930	2965	3010

Tableau 4-6 : la finesse et l'indice d'hydraulicité des ciments préparés

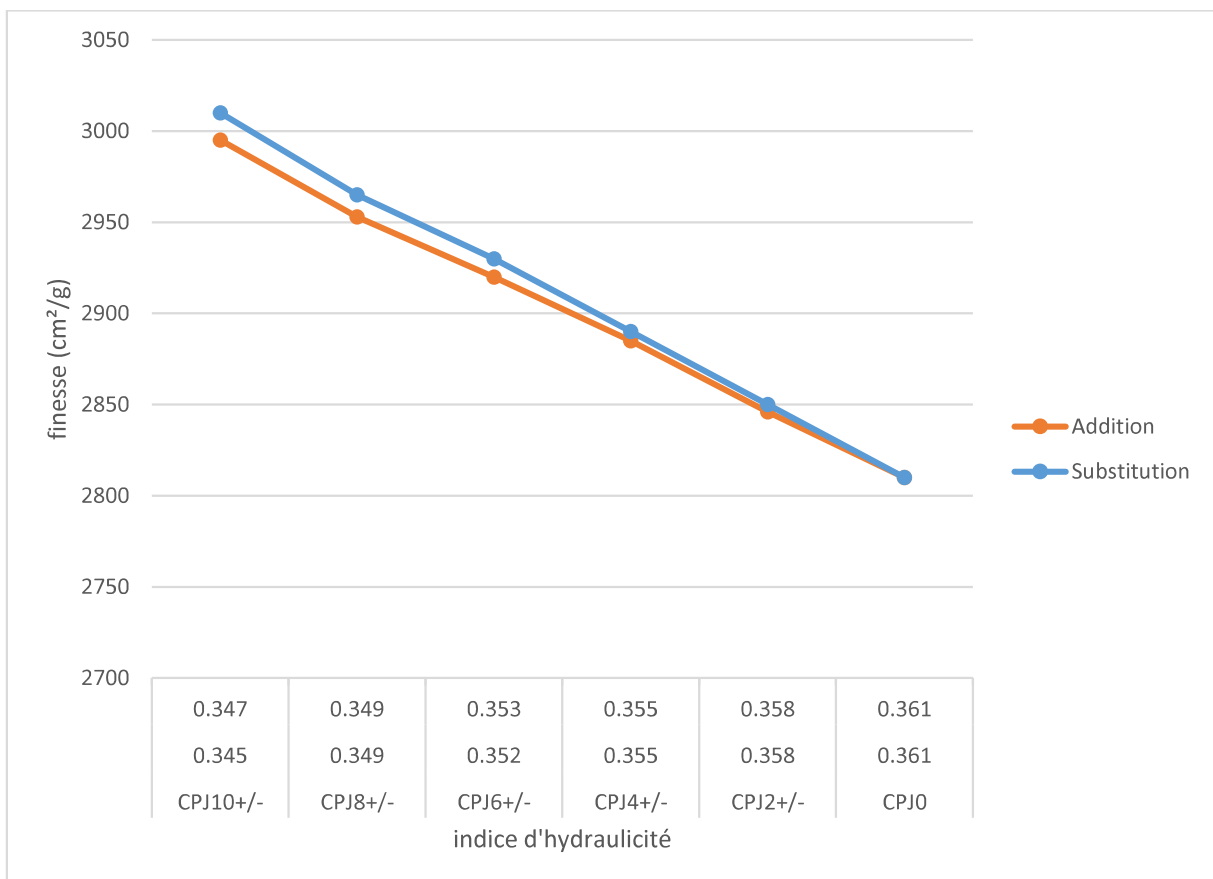


Figure 4-5 : la finesse et l'indice d'hydraulicité

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-6-2: La finesse en fonction de début de prise :

Par addition :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
DP	02 :47	02 :36	02 :35	02 :30	02 :20	02 :09
Finesse	2810	2846	2885	2920	2953	2995

Par substitution :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋
DP	02 :47	02 :35	02 :25	02 :12	02 :07	01 :53
Finesse	2810	2850	2890	2930	2965	3010

Tableau 4-7 :la finesse et le début de prise des ciments préparés

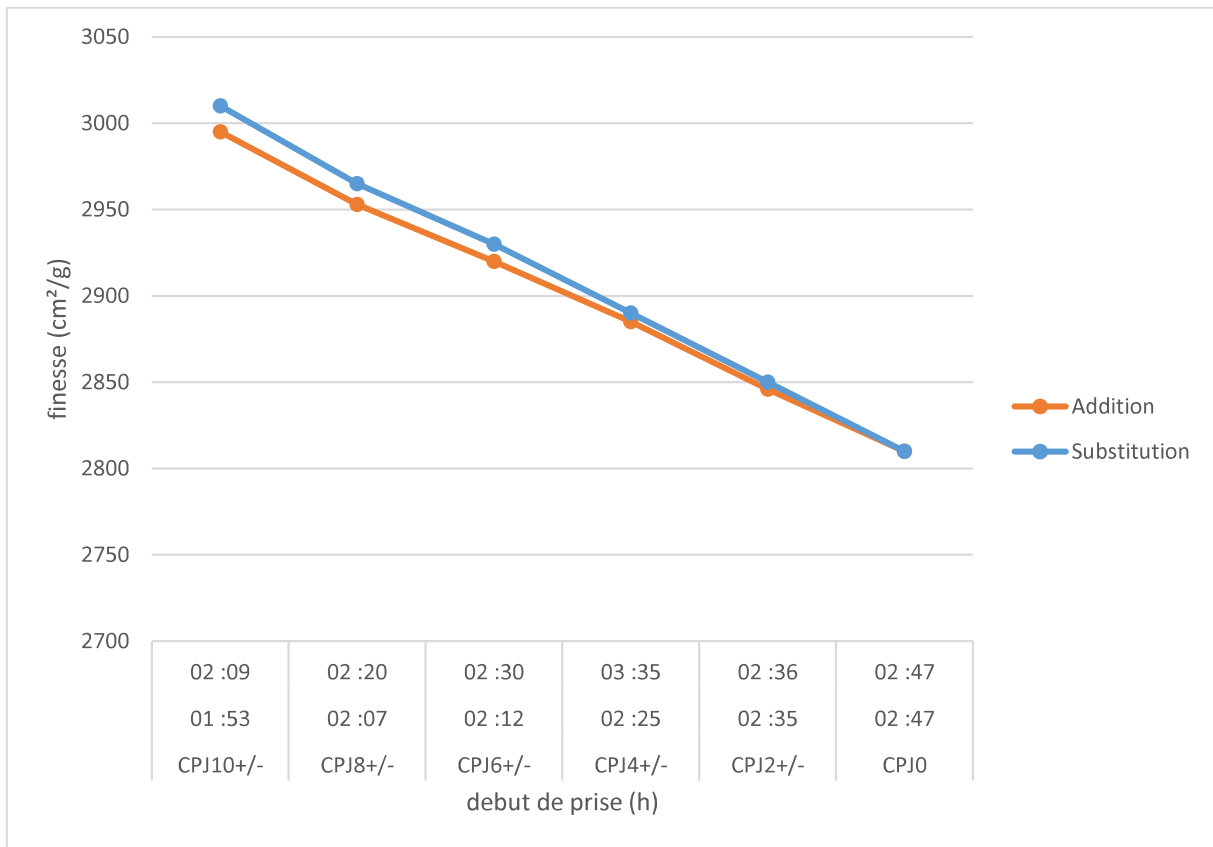


Figure 4-6 :la finesse et le début de prise

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-6-3: La finesse en fonction de fin de prise :

Par addition :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
FP	04 :05	03 :52	03 :45	03 :38	03 :35	03 :20
Finesse	2810	2846	2885	2920	2953	2995

Par substitution :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋
FP	04 :05	03 :50	03 :40	03 :35	03 :26	03 :12
Finesse	2810	2850	2890	2930	2965	3010

Tableau 4-8 :la finesse et la fin de prise des ciments préparés

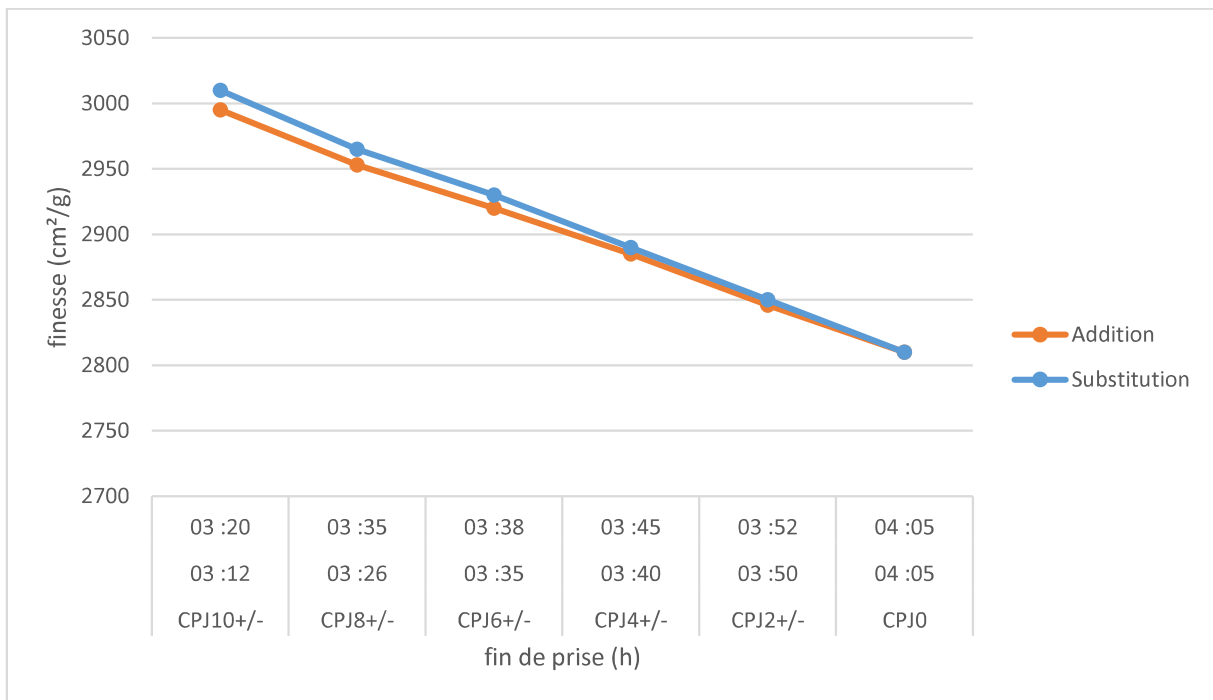


Figure 4-7 :la finesse et la fin de prise

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-6-4: La finesse en fonction de masse volumique absolue:

Par addition :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
MV	2.86	2.84	2.78	2.76	2.74	2.68
Finesse	2810	2846	2885	2920	2953	2995

Par substitution :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋
MV	2.86	2.82	2.76	2.74	2.71	2.65
Finesse	2810	2850	2890	2930	2965	3010

Tableau 4-9 :la masse volumique et la finesse des ciments préparés

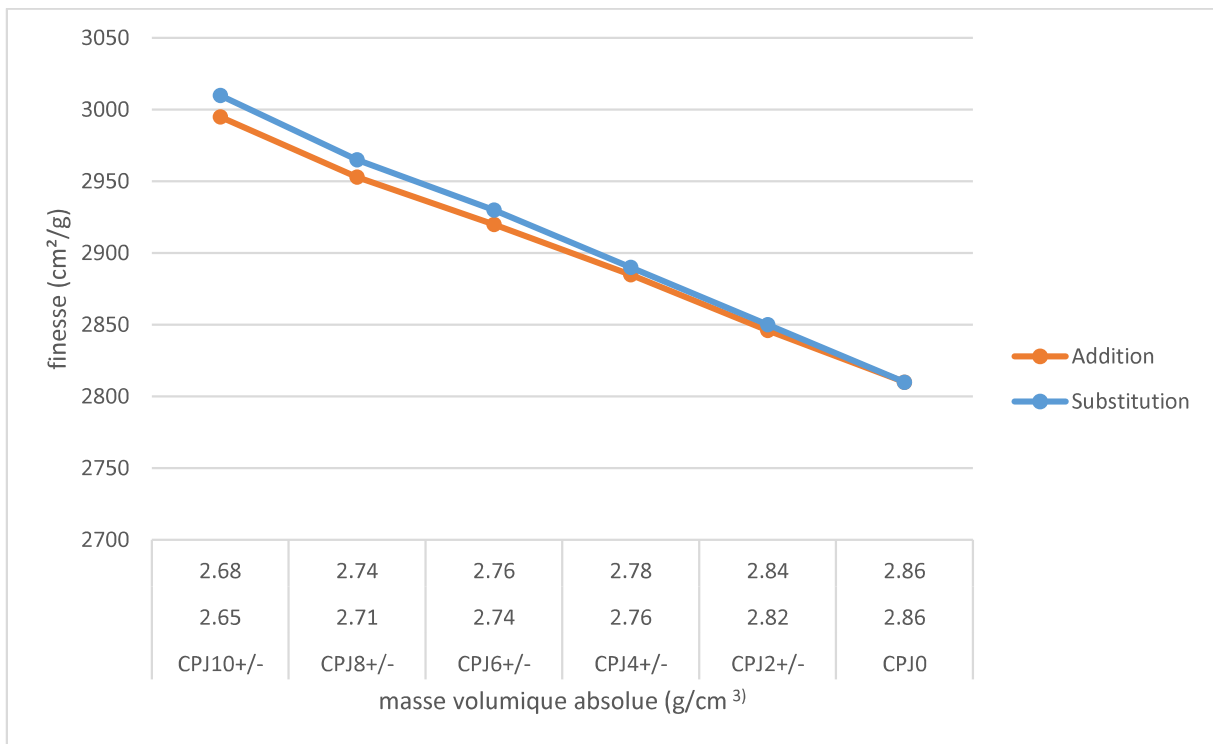


Figure 4-8 : la masse volumique et la finesse

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-6-5: Début de prise en fonction de l'indice d'hydraulicité:

Par addition :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
I _h	0.361	0.358	0.355	0.353	0.349	0.347
DP	02 :47	02 :36	02 :35	02 :30	02 :20	02 :09

Par substitution :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋
I _h	0.361	0.358	0.355	0.352	0.349	0.345
DP	02 :47	02 :35	02 :25	02 :12	02 :07	01 :53

Tableau 4-10 : l'indice d'hydraulicité et le début de prise des ciments préparés

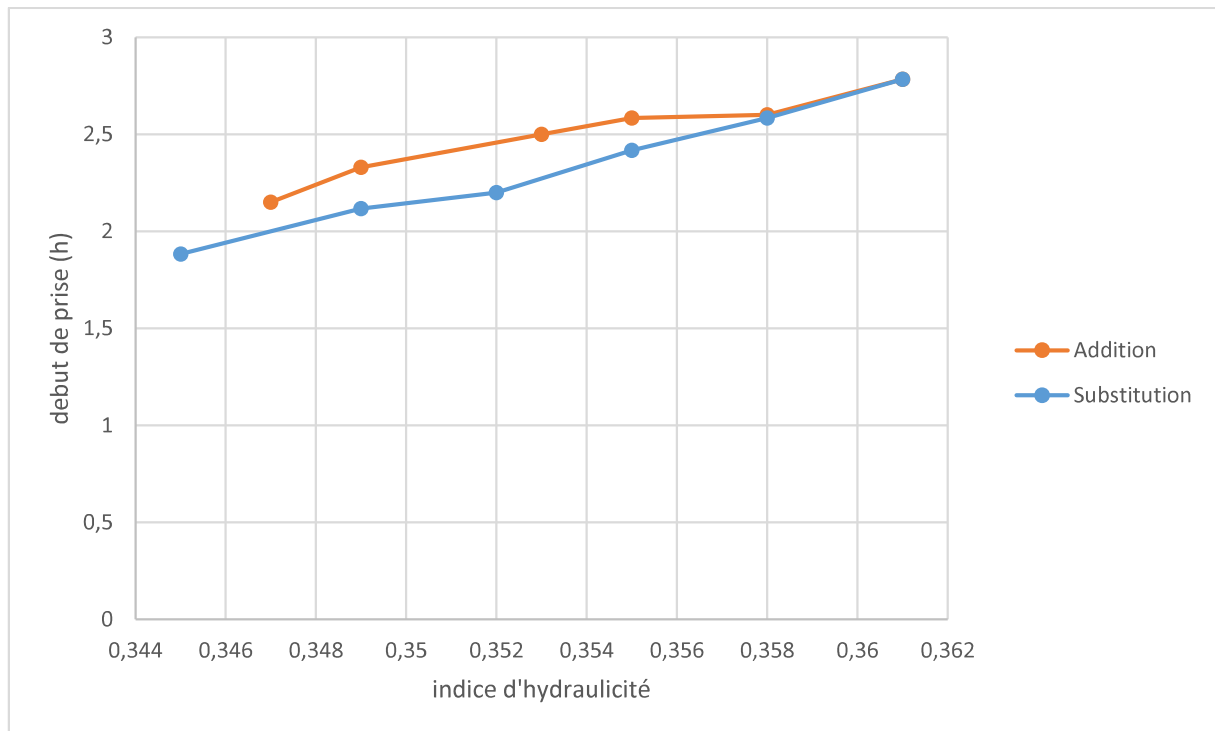


Figure 4-9 : l'indice d'hydraulicité et le début de prise

Chapitre IV : Comparaison et interprétation des résultats

IV-6-6: Fin de prise en fonction de l'indice d'hydraulicité:

Par addition :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₊	CPJ ₄₊	CPJ ₆₊	CPJ ₈₊	CPJ ₁₀₊
I _h	0.361	0.358	0.355	0.353	0.349	0.347
FP	04 :05	03 :52	03 :45	03 :38	03 :35	03 :20

Par substitution :

Ciment	CPJ ₀	CPJ ₂₋	CPJ ₄₋	CPJ ₆₋	CPJ ₈₋	CPJ ₁₀₋
I _h	0.361	0.358	0.355	0.352	0.349	0.345
FP	04 :05	03 :50	03 :40	03 :35	03 :26	03 :12

Tableau 4-11 : l'indice d'hydraulicité et la fin de prise des ciments préparés

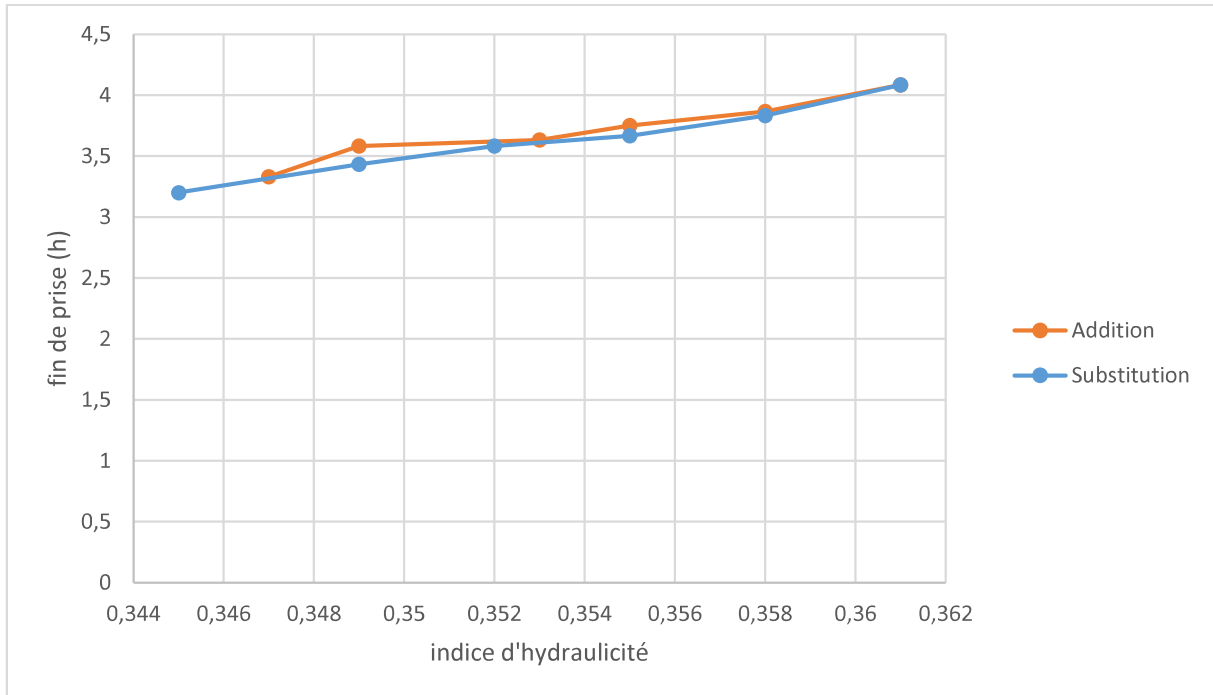


Figure 4-10 : l'indice d'hydraulicité et la fin de prise

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE :

Les principales conclusions tirées de cette étude comparative des résultats obtenus par les étudiants (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005) entre deux méthodes d'activation (Addition et substitution) du ciment avec ajout : Propriétés physico-chimiques des ciments activés et non activés par la chaux fine ($< 80 \mu\text{m}$: $0,08 \text{ mm}$) sont :

-La finesse des ciments préparés s'améliorent avec la variation de l'ajout minéral utilisé (chaux fine).

-La méthode d'activation par substitution de la finesse (S.S.B) est meilleure par rapport a celle de l'activation par addition de la finesse des ciments.

-La masse volumique absolue des ciments préparés diminue avec la variation de l'ajout minéral utilisé (chaux fine).

-Cette diminution est plus importante pour l'activation par substitution par rapport à celle par activation par addition.

- L'activation par addition provoque une forte absorption d'eau (Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte préparée) par rapport à celle par substitution.

- L'incorporation de l'activant minéral (chaux fine) dans le ciment améliore les délais de prise (début et fin de prise) pour les deux méthodes d'activation.

- L'activation par substitution présente une diminution (raccourcissement) très importante des délais de prise (début et fin de prise) par rapport à celle par addition.

-L'indice d'hydraulicité des ciments préparés s'améliorent avec la variation de l'ajout minéral utilisé (chaux fine).

-La méthode d'activation par addition de l'indice d'hydraulicité (I_h) est meilleure par rapport a celle de l'activation par substitution de l'indice d'hydraulicité (I_h) des ciments.

Enfin, nous pouvons conclure que la méthode d'activation du CPJ-CEM II par substitution est meilleure par rapport à celle par addition du point de vue économique et fonctionnel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] SITUATION ENVIRONNEMENTALE DES INDUSTRIES., «L'industrie cimentière», Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.
- [2] GABRYSIK F., Cours (chapitre 4). «Matériaux - Les bétons».
- [3] NEVILLE, A. M. (2000) Propriétés des bétons, Editions Eyrolles, Paris, 806 p.
- [4] V. PHOUMMAVONG; Matériaux de construction; Cours en ligne; Université Nationale du Laos; <http://www.la.refer.org/materiaux/default.html>,2009.
- [5] CHRISTOPHE CHARRON., L'industrie du ciment, «Données générales».
- [6] Documentation de la cimenterie de Hammam Bouziane; Le ciment portland.
- [7] W. H. Duda; Cement data book; 3rd édition; French & European Pubns ed. ISBN 0828802041 ; décembre 1985.
- [8] C. Avenier, B. Rosier, D. Sommain; Ciment naturel; Grenoble, Glénat éd. ISBN10 : 2723461580, 176 p ; 2007.
- [9] Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane; Le ciment portland.
- [10] B. Bounabe Ayache; Automatisation du stackeur et le moteur four; Rapport de stage à ERCE et SCHB; Cézanne Aix Marseille 3; <http://www.bhautomation.fr/Download/Automaticiens/Automatisation-stackeur-fourimenterie-DG.pdf>,2006-2007.
- [11] Dr. F. Ghomari; Science des matériaux de construction; Université Aboubaker Belkaid, 2009..
- [12] Documentation de la cimenterie de Hammam dalaa; Hydratation de ciment Portland.
- [13] BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [14] Rompaey, G. V. (2006), Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloré., 372 pp, ULB, Bruxelles.
- [15]-CAMILLE DEFOSSE, Chimie du ciment, valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruwelles, site "CHIM 315 Partie 32004".
- [16]- Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [17]- L. PLISKIN : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.
- [18]- M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage »Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [19] Barret P. – « Thermodynamique chimique : sur l'existence d'un stade d'hydroxylation superficielle dans le processus de dissolution du silicate tricalcique 3CaO , SiO_2 et son influence sur la solubilité de ce constituant du ciment ». C. R. Acad. Sc. 1979, vol. 288 (Série C), 1979, p. 461-464.
- [20] Barret P., Bertrandie D. – “Fundamental hydration kinetic features of the major cement constituents: Ca_3SiO_5 and bCa_2SiO_4 ”. Journal de Chimie physique, vol. 83, n° 11/12, 1986, p. 765-775.

- [21] E.moudilou,E, Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présent en traces dans les matrices cimentaires. Thèse Université d'Orleans, 2000.
- [22] Baron. J, Olivier. JP et Weiss. JC : « Les ciments courants », « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles, 806p-1997.
- [23] Verbeck. G.J, Helmuth. R.H, «Structures and physical properties of cement paste», Proc. 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 3, 3-1, pp.1-44, 1968.
- [24] E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », . thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [25] Y. Older , « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's -..... Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.
- [26] R. Gané « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [27] Regourd, M., (1986), « Microstructure of cement blends including fly ash, silica fume, slag and fillers », Rapport CERLLH.
- [28] Perlot C., (2005), «Influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert : application au stockage profond de déchets radioactifs» Thèse de doctorat Université Paul Sabatier de Toulouse U.F.R. P.C.A. et Faculté de Génie de l'université de Sherbrooke.
- [29] Shi C., (2001). "An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28(5), pp. 778-786.
- [30] Allahverdi A., Ghorbani J., (2006). "Chemical activation and set acceleration of lime-natural pozzolan cement". Ceramics – Silikaty, Vol. 50(4): 193-199.
- [31] Sekulic, Z., Petrov M., Zivanovic D., (2004). "Mechanical activation of various cements". International Journal of Mineral Processing 74(SUPPL.), pp355-363.
- [32]Bacanov, S.S., Bokarev, V.P. (1980). Neorg. Mater. Vol. 9, pp. 1650.
- [33] Boldrev B.B., (1991). Mehanohemieski Sitnez v Neorganiesko.
- [34] Bouglada salah, (2008). "Effet de l'activation du ciment avec ajout mineral par la chaux fine sur le comportement mecanique du mortier". Memoire de magister, Universite de m'sila, 148 p.
- [35] Deutche C.W., (1972). J. Chem. Phys, Vol.9, pp. 4002.
- [36] Senna M., (1985). Izv. Sib. Otd. Akad. Nauk SSSR, Ser. Him. Nauk 2, 3.
- [37] Taplin J.H. (1962). "The temperature dependence of the hydration rate of Portland cement paste". Australian Journal of Applied Science, Vol. 13(2), pp. 164-171.
- [38] Buchwald A., Kaps C., Hohmann M., (2003). "Alkali-activated binders and pozzolan cement binders-competete binder reaction or two sides of the same story".
- [39] Granizo M.L., Alonso S., Blanco-Varela M., Palomo A., (2002). "Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction". Journal of the American Ceramic Society, Vol. 85(1), pp. 225-231.
- [40] Shi C., Krivenko P.V., Roy D. M., (2006). "Alkali-Activated Cements and Concretes". Taylor & Francis, London, 376 p.
- [41] Sajedi F., Razak H. A.,(2011). "Comparison of different methods for activation of ordinary portland cement-slag mortars". Construction and Building Materials, Vol. 25(1), pp. 30-38.

- [42] Shi C., Day R. L., (1996). "Selectivity of alkaline activators for the activation of slags". Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18(1), pp. 8-14.
- [43] A. Naceri et I. Messaoudene. The chemical and physical effects of the granulated blast furnace slag on concrete compressive strength. « Les effets chimiques et physiques du laitier du haut fourneau sur la résistance à la compression du béton ». World Journal of Engineering 3(3), 2006, pp. 45-51.
- [44] ENV 2006 paragraphe 3.1.5
- [45] NF P 18- 305
- [46] Manai K., Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [47] la norme ASTM C-618-80
- [48] AITCIN, P.-C. (2001) (b) Les Hants hydrauliques, Notes de cours, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, 485 p.
- [49] DESROSIERS, H. (1999) Influence des cendres volantes sur le comportement au gel des matériaux cimentaires, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil, Québec, 299 p.
- [50] Venuat M., La pratique des ciments et des bétons, Edition du Moniteur, Paris, p. 75- 224, 1976.
- [51] Nagataki S., Fujiwara H., Self-compacting property of highly flowable concrete, Proceeding, ACI SP 154, Las Vegas, p. 301-314, 1995.
- [52] La norme ASTM C 666-A
- [53] AITCIN, P.-C. (2001) (a) Bétons haute performance, Editions Eyrolles, Paris, 683 p.
- [54] LEA, F.M. (1970) The Chemistry of Cement and Concrete , Chemical Publishing inc.
- [55] REGOURD, M. (1983) Pozzolanic Reactivity of Condensed Silica Fume, présentée dans Condensed Silica Fume par AITCIN, P.-C, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, p. 20-24.
- [56] KHAYAT, K., AITCIN, P.-C. (1992) Silica Fume in concrete : an Overview, Proceedings of ACI 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol II, Istanbul, Turquie, p. 835-871.
- [57] la norme ASTM C 234
- [58] MALHOTRA, V. M. (1987) Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton, Edité par V. M. Malhotra, CANMET, Ottawa, 471 p.
- [59] A. MEBROUKI « influence de la pouzzolane de Beni-Saf Sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de magister – Université Mostaganem- juin 2003.
- [60] SARIC-CORIC, M. (2001) Interactions superplastifiant-laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, 291 p.
- [61] M Venuat -La pratique des ciments , mortier et béton- Tom1 : « Caractéristiques des liants et des béton , mise en oeuvre des coulis et mortiers »-édition2- Collection Moniteur. -277p-1989.
- [62] Jean-Paul Kurtz, Dictionary of Civil Engineering, Springer Science & Business Media, 2004 , p. 951
- [63] B. C. BENI-REMOUR. , « Matériaux pouzzolanique : étude physico-chimique et mécanique des mortier et béton contenant de la pouzzolane) ,mémoire de fin d'étude ingénieur-IGCM ORAN-1993.

[64] L. Zeghichi, B. Mezghiche et A Merzougui. Etude de L'influence des solution basiques sur le ciment au laitier .11th international conference for building and construction. Cairo, Egypt ,Jun 17th-21th ,2004.pp.523-530.

[65] ALI AICHOUBRA.A., « effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire) thèse de Magister , IGCM ORAN 2005.

[66] J.-P. Eberhart, Méthodes physiques d'étude des minéraux et des matériaux solides, Paris, Doin, (1976).

[67] W. T. Elam, B. D. Ravel et J. R. Sieber, « A new atomic database for X-ray spectroscopic calculations », Radiation Physics and Chemistry, vol. 63, 2002, p. 121–128

[68] George DREUX , Jean FESTA . Nouveau guide du béton et de ses constituants , édition Eyrolles, Huitième Edition, 1998, p,115

[69] Ecole d'avignon, «Techniques et pratique de la chaux», Eyrolles, 2003

[70] Prof , NASRI abdelghani . chapitre 3 - Cours « Chaux-aérienne et hydraulique ».