

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
N° :



DOMAINE : TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

**Etude comparative de méthodes d'activation
(Addition et Substitution) du ciment avec ajout :
Propriétés mécaniques des mortiers préparés à base
de ciments activés et non activés par la chaux fine**

Dirigé par :

- Pr. Naceri Abdelghani
- Dr. Zitouni Salim

Présenté par :

- Abdessamed Noureddine

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

REMERCIEMENTS

D'abord je remercie Allah de m'avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser ce travail.

Il ne m'aurait été possible, à moi seul, d'achever le présent travail sans l'assistance, l'appui et le suivi minutieux de mes enseignants et encadreurs Messieurs Nacéri Abdelghani et Zitouni Salim, à tous les deux j'exprime mon respect.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et jurer ce travail.

J'adresse mes remerciements à tous les responsables du laboratoire YAMNA MALIKA WAHIBA qui ont toujours été disponibles pour me faciliter la recherche et m'encourager.

Abdessamed Soureddine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A ma très chère mère pour ses sacrifices et ses encouragements
pour ma voir réussir et heureux .

A mon très chère père pour ses sacrifices et ses efforts déployés

A mon encadreur Pr.Nacéri Abdelghani et tous les enseignants de département

A tout mes amis mes collègues de classe génie civil master II

A tous ce qui m'ont aidé de pré ou de loin.

Abdessamed Houreddine

RESUME

Les différentes méthodes d'accélération de prise et de durcissement du mortier ainsi que les caractéristiques souhaitées ont une grande importance quant à la l'usage des mortiers et leurs emploi dans les différentes applications en génie civil .

L'objectif principal de ce travail est de comparer les résultats obtenus par les étudiants (REZIG Mourad , BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005) [33] entre deux méthodes d'activation (Addition et Substitution) du ciment avec ajout : Propriétés mécaniques des mortiers préparés à base de ciments activés et non activés par la chaux fine .

Donc ce mémoire contient comporte deux grandes parties

Une étude bibliographique s'intéressant aux liants hydrauliques avec et sans constituants secondaires (CPA-CEM I et CPJ-CEM II) et à la chaux : composition, propriétés , etc

Une analyse expérimentale basée sur des essais effectués au laboratoire sur les caractéristiques physiques des ciments préparés (chaux + ciment) à l'état anhydre et à l'état hydraté (compositions chimiques, finesses des ciments, masses volumiques absolues, consistances normales des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les caractéristiques mécaniques des mortiers testés (R_c et R_f) suivie d'interprétation des résultats expérimentaux obtenus .

Mots clés : Ciment , résistance, activation chimique, activation mécanique .

المخلص

تعتبر الطرق المختلفة لتسريع عملية تثبيت وتصلب الملاط بالإضافة إلى الخصائص المطلوبة ذات أهمية كبيرة في استخدام الملاط واستخدامها في مختلف التطبيقات في الهندسة المدنية .

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو مقارنة النتائج التي حصل عليها الطالبان : (رزيق مراد ، بوعشرين توفيق : أطروحة تخرج في شهر يونيو 2005) [33] بين طريقتين لتنشيط (إضافة واستبدال) الأسمنت مع الإضافة : الخواص الميكانيكية للمونة المحضرة على أساس الأسمنت النشط وغير نشط بالجير الناعم . حيث تحتوي هذه المذكرة على جزأين أساسيين

دراسة مكتبية تركز على دراسة الروابط المائية بواسطة أو بدون المكونات الثانوية للإسمنت (CPJ-CEM II و CPA-CEM I) و الجير: المكونات ، الخصائص ، إلخ

تحليل تجريبي يركز على مجموعة من التجارب المخبرية على الخصائص الفيزيائية للأسمنت المحضر (إسمنت + جير) في الحالة الجافة، و في الحالة المميهة (المكونات الكيميائية ، النعومة ، الكتلة الحجمية المطلقة ، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية، و كذلك زمن الشك) ، إضافة إلى الخصائص الميكانيكية للمونة المختبرة في حالة الانحناء و الضغط (R_f و R_c) مع تقديم تحليل للنتائج التجريبية المحصل عليها.

الكلمات المفتاحية : الاسمنت ، المقاومة ،التنشيط الكيميائي ، التنشيط الميكانيكي .

ABSTRACT

The different methods of accelerating setting and hardening of the mortar as well as the desired characteristics are of great importance with regard to the use of mortars and their use in the different applications in civil engineering .

The main objective of this work is to compare the results obtained by the students (REZIG Mourad, BOUACHRINE Toufik : Graduate thesis in the month of June 2005) [33] between two methods of activation (Addition and Substitution) of cement with addition: Mechanical properties of mortars prepared based on activated cements and not activated by fine lime.

So this thesis contains two main parts

A bibliographic study focusing on hydraulic binders with and without secondary constituents (CPA-CEM I and CPJ-CEM II) and lime: composition, properties,

An experimental analysis based on tests carried out in the laboratory on the physical characteristics of the cements prepared (lime + cement) in the anhydrous and hydrated state (chemical compositions, fineness of cements, absolute densities, normal consistencies of cements and setting times) as well as the mechanical characteristics of the mortars tested (R_c and R_f) followed by interpretation of the experimental results obtained .

Keywords : Cement, resistance, chemical activation, mechanical activation .

Nomenclature :

Acronyme des termes utilisés :

- CEM** : Ciment Portland.
- CSH** : Aluminates de calcium hydratés.
- CPA** : Ciment portland (dans la notation française).
- CPJ** : Ciment portland composé.
- CHF** : Ciment de haut fourneau.
- CPZ** : Ciment pouzzolanique.
- CLC** : Ciment au laitier et aux cendres.
- C₃S** : Le silicate tricalcique.
- C₂S** : Le silicate bicalcique.
- C₃A** : L'aluminate tricalcique.
- C₄AF** : L'alumino-ferrite tétracalcique.
- CaCO₃** : Carbonate de Calcium.
- CaO** : Chaux libre.
- CaSO₄.2H₂O** : Gypse.
- SiO₂** : Silice.
- MgO** : L'oxyde de Magnésium .
- Na₂O** : L'oxyde de Sodium.
- K₂O** : L'oxyde de Potassium.
- Fe₂O₃** : L'oxyde de fer.

Lettres grecques :

- ρ** : la densité du ciment.
- e** : la porosité.
- Ø** : Taille des boulets de broyeur.

Lettres latines :

- T** : Température de la salle d'expérience °C.
- R_c** : Résistance à la compression.
- R_f** : Résistance à la flexion.

Sommaire

Résumé

ملخص

Abstract

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

Introduction générale	1
CHAPITRE I: Etude bibliographique sur les liants hydrauliques (ciment et chaux)	
Introduction	5
I.1 Le ciment	5
I.1.1 Définition du ciment	5
I.1.1.1 Principales phases du ciment portland	6
I.1.1.2 Les différentes méthodes de fabrication de ciment	6
I.1.1.3 Principe de fabrication du ciment Portland	6
I.1.1.3.1 Matières premières	7
I.1.1.3.2 Les étape de la fabrication du ciment Portland.....	7
* Les phénomènes physico-chimiques au cour de la cuisson.....	9
I.1.1.3.3 Les Constituants principaux de ciment.....	12
I.1.1.4 Types de ciments.....	15
I.1.1.5 Hydratation du ciment Portland	16
I.1.1.5.1 Composition d'un ciment portland	17
I.1.1.5.1.1 Silicate tricalcique (C ₃ S)	17
I.1.1.5.1.2 Silicate bicalcique (C ₂ S)	18
I.1.1.5.1.3 Aluminate tricalcique (C ₃ A)	18
I.1.1.5.1.4 Alimino-ferrite tétracalcique (C ₄ AF)	18
I.1.1.5.2 Les composés mineurs.....	18
I.1.1.5.2.1 Hydratation du C ₃ S et du C ₂ S	18
I.1.1.5.2.2 Hydratation de C ₃ A	20
I.1.1.5.2.3 Hydratation de C ₄ AF (Célite 1)	21
I.1.1.5.2.4 Hydratation en présence des additions minérales	21
I.2 La chaux	21
I.2.1 Définition	21
I.2.2 La fabrication des chaux hydrauliques naturelles	21
I.2.2.1 La matière première	22
I.2.2.2 La cuisson	22
I.2.2.3 L'extinction.....	22
I.2.2.4 Le broyage	22
I.2.3 Différents types de chaux	22
I.2.4 Caractéristiques chimiques et physiques	23

I.2.4.1 composition chimique	23
I.2.4.2 Caractéristiques physiques	24
Conclusion	25
CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés	
II.1 Liant hydraulique ciment (CEM II-CPJ)	27
II.1.1 Type de ciment	27
II.1.2 préparation des échantillons.....	27
II.1.3 Analyse chimique des ciments préparés	27
II.1.3.1 Analyse chimique du clinker	28
II.1.3.2 Analyse chimique des ciments préparés	28
II.1.4 Surface spécifique du liant hydraulique (ciment) (EN 196-6).....	29
II.1.4.1 L'objectif de l'essai	29
II.1.4.2 Equipement nécessaire.....	29
II.1.4.3 Conduit de l'essai	30
II.1.4.4 Résultats et analyses	30
II.1.5 Masse volumique absolue (surface spécifique) des ciments:	31
II.1.5.1 Equipement nécessaire.....	31
II.1.5.2 Résultats et analyses	32
II.1.6 Masse volumique apparente ou masse volumique.....	32
II.1.7 Essai de consistance.....	33
II.1.7.1 Objectif de l'essai.....	33
II.1.7.2 Equipement nécessaire.....	33
II.1.7.3 Conduite de l'essai	33
II.1.8 Mesure des temps de début et de fin de prise (EN 196-3)	34
II.1.8.1 Objectif de l'essai.....	34
II.1.8.2 Principes de l'essai	34
II.1.8.3 Equipement nécessaire.....	34
II.1.8.4 Conduit de l'essai	34
II.1.8.5 Résultats et analyses	35
II.2 Caractéristique physique du sable teste:	36
II.2.1 Origine de sable	36
II.2.1.1 Exploitation de sable de dune	36
II.2.1.2 Composition chimique du sable utilisé.....	36
II.2.2 Masse volumique absolue (masse spécifique).....	37
II.2.2.1 Définition.....	37
II.2.2.2 Principe de la mesure.....	37
II.2.2.3 Résultats obtenus	37
II.2.3 Masse volumique apparente ou masse volumique.....	37

II.2.3.1 Etat lâche ou poreux	37
II.2.3.1.1 Définition.....	37
II.2.3.1.2 Principe de la mesure.....	37
II.2.3.1.3 Résultat à obtenir	38
II.2.3.2 Etat compacte ou dense	38
II.2.3.2.1 Définition.....	38
II.2.3.2.2 Principe de la mesure.....	38
II.2.3.2.3 Résultat obtenu	38
II.2.3.3 La porosité	38
II.2.4 Equivalent de sable (contrôle des boues argileuses)	39
II.2.4.1 Définition.....	39
II.2.4.2 Principe de l'essai.....	39
II.2.4.3 Résultat obtenu:	39
II.2.4.3.1 Equivalent de sable piston	39
II.2.4.3.2 Equivalent de sable visuel	39
II.2.5 La granulométrie du sable.....	40
II.3 L'activant minérale (la chaux).....	42
II.3.1 Définition.....	42
II.3.2 Propriétés physiques	42
II.3.3 Propriétés chimiques.....	42
II.3.4 Compositions chimique de la chaux utilisée.....	42
II.3.5 Caractéristique physique.....	43
II.4 Eau de gâchage	43
CHAPITRE III : Comparaison et interprétation des résultats	
III.1 Définition des essais sur les matériaux.....	45
III.2 Pourquoi effectuer des essais	45
III.3 La résistance d'un mortier	45
III.4 Préparation de mortier de fraction (C/S = 1/3).....	46
III.5 Mesure des résistances à la flexion et à la compression.....	47
III.5.1 Principe de l'essai	47
III.5.2 Equipement nécessaire	47
III.5.3 Conduit de l'essai.....	48
III.5.5 Résultats expérimentaux obtenus.....	49
III.6 Masse volumique du mortier.....	49
III.7 Discussion des résultats obtenus	50
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	56

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I: Etude bibliographique sur les liants hydrauliques (ciment et chaux)

Tableau I.1 Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie	5
Tableau I.2 Les principales phases du ciment Portland	6
Tableau I.3 Composition chimique du clinker	12
Tableau I.4 Composition en constituants des ciments par type.....	16

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés

Tableau II.1 Composition des ciments préparés par substitution	27
Tableau II.2 Composition des ciments préparés par addition	27
Tableau II.3 Composition chimique du clinker	28
Tableau II.4 Composition minéralogique du Clinker selon la formule de BOGUE.....	28
Tableau II.5 Compositions chimique des ciments préparés	28
Tableau II.6 Surface spécifique de Blaine des ciments préparés.....	30
Tableau II.7 Masse volumique absolue des ciments	32
Tableau II.8 Caractéristiques physiques des pâtes de ciments étudiés (consistance normale et délais de prise)	35
Tableau II.9 Composition chimique du sable utilisé	36
Tableau II.10 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable	40
Tableau II.11 granularité du sable de dune testé	41
Tableau II.12 classement de sable.....	41
Tableau II.13 Composition chimique de la chaux utilisé.....	42

CHAPITRE III : Comparaison et interprétation des résultats

Tableau III.1 Composition des mortiers testés.....	46
Tableau III.2 Les limites de temps des essais mécaniques à d'autres ages	48
Tableau III.3 Résultats des résistances mécaniques à la compression des mortiers étudiés	49
Tableau III.4 Résultats des résistances mécaniques à la flexion des mortiers étudiées	49
Tableau III.5 Masse volumique des mortiers étudier	50

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I: Etude bibliographique sur les liants hydrauliques (ciment et chaux)

Figure I.1 Le processus de fabrication du ciment Portland	6
Figure I.2 Etape de l'extraction des matières premières aux niveaux de la carrière.	8
Figure I.3 Etape de concassage.....	8
Figure I.4 Schéma d'un four rotatif dans les cimenteries.	9
Figure I.5 Nodules de clinker	10
Figure I.6 Modes de broyage d'un grain de poudre dans un broyeur à boulet	10
Figure I.7 Broyeur à boulets.....	11
Figure I.8 Ecoulements possibles dans un broyeur à boulets	11
Figure I.9 Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés	13
Figure I.10 Triangle des compositions principales des ciments	15
Figure I.11 Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage $G = \times 1010$	19
Figure I.12 Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage	20
Figure I.13 Schéma du principe de la fabrication de la chaux.....	22

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés

Figure II.1 Perméabilimètre de BLAINE	29
Figure II.2 Accroissement de la finesse des ciments étudiés.....	31
Figure II.3 Variation de la masse volumique absolue des ciments étudiés	32
Figure II.4 Appareil de VICAT	33
Figure II.5 Variation de la consistance normale(besoin en eau) des pâtes de ciments étudiés.....	35
Figure II.6 Variation des délais de prise des pâtes de ciments étudiés	36
Figure II.7 Courbe granulométrique de sable (0/5).	41

CHAPITRE III : Comparaison et interprétation des résultats

Figure III.1 Appareil de Compression.....	47
Figure III.2 Appareil de traction par flexion	47
Figure III.3 Accroissement de la résistance mécanique à la compression des mortiers étudiés (par substitution).....	51
Figure III.4 Accroissement de la résistance mécanique à la la compression des mortiers étudiés (par addition)	51
Figure III.5 Accroissement de la résistance mécanique à la flexion des mortiers étudiés (par substitution)....	52
Figure III.6 Accroissement de la résistance mécanique à la flexion des mortiers étudiés (par addition).....	52
Figure III.7 Variation de la masse volumique des Mortiers testés	53

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

1- Présentation de l'étude

Lorsque le ciment Portland est mélangé avec de l'eau, il se produit plusieurs réactions chimiques, ces réactions font intervenir les différents constituants du ciment hydrates. Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout.

La propriété latente (cinétique d'hydratation : prise et durcissement) du ciment portland composé, confirme la nécessité d'emploi d'un bon activant chimique, mécanique ou thermique.

La recherche d'une solution à ce problème nous a poussé à l'utilisation de la technique d'activation du ciment composé (CPJ-CEM II) par la chaux fine (activant d'origine minéral), objet de la présente étude.

2- But de l'étude

L'objectif principal de ce travail est de comparer les résultats obtenus par les étudiants (REZIG Mourad , BOUACHRINE Toufik : Mémoire de PFE soutenu le mois de juin 2005) [33] donc ce travail consiste à étudier l'effet de l'activation du CPJ par la chaux fine ($< 80 \mu\text{m}$: 0,08 mm) sur la réponse (comportement) mécanique du mortier 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 composé par la chaux fine (activant d'origine minérale) dont nous disposons les meilleurs performances mécaniques du mortier.

3- Structure de Mémoire :

Ce mémoire va commencer par une Introduction générale où on a exposé le problème et le but de cette étude comparative.

Le premier chapitre :

Cette partie présente une étude bibliographique sur les liants hydrauliques (avec ou sans constituants secondaires : CPA-CEM I et CPJ-CEM II) et la chaux : définition, composition et propriétés,... etc

Le deuxième chapitre :

Ce chapitre présente les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés.

Le troisième chapitre :

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et les discussions et interprétations et conclusions tirées lors de cette étude comparative .

Enfin, ce mémoire se terminera par une conclusion récapitulant les principaux résultats de cette étude comparative .

CHAPITRE I

Etude bibliographique sur les liants hydrauliques (ciment et chaux)

Introduction

Cette partie porte sur les constituants du ciment portland, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation, grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment portland est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction.[1]

On peut théoriquement fabriquer du ciment Portland à partir de matériaux renfermant de la chaux, de la silice, de l'alumine et du fer, quel que soit son lieu de fabrication, le ciment Portland possède toujours, à quelques exceptions près, la même composition.

Cependant, cette simplicité apparente cache une série de réactions chimiques très complexe que l'on ne sait pas toujours expliquer de façon précise, on peut donc dire que les produits à base de ciment Portland sont le fruit d'une technologie simple et d'une science complexe.

I.1 Le ciment

I.1.1 Définition du ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Elle est défini selon la norme NF P15-301, comme une fine mouture inorganique qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit, le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker, de gypse et d'ajouts minéraux, le ciment est majoritairement composé de quatre phases anhydres.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaSO ₄	H ₂ O	SO ₃
Composition	50-70%	5-10%	15-30%	5-10%	0-5%	0-2%	0-5%
Notation cimenterie	C	A	S	F	CS	H	S

Tableau I.1: Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie.[2]

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau car cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau, ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, l'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc. [3]

I.1.1.1 Principales phases du ciment portland

Les principales phases du ciment portland sont comme suivant:

Composé	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicate bicalcique	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminate tricalcique	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Aluminoferrite tétracalcique	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

Tableau I.2: Les principales phases du ciment Portland. [2]

I.1.1.2 Les différentes méthodes de fabrication de ciment

IL existe quatre méthodes de fabrication du ciment:

- 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).

I.1.1.3 Principe de fabrication du ciment Portland

Le ciment est produit à partir des roches facilement accessibles : calcaire, marbre et argile. De façon générale, un mélange renferme environ 80% de calcaire et 20% d'argile.

Le mélange finement broyé est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker, lors de la phase de broyage, du gypse (5% en poids) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise, a ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, le calcaire....etc.

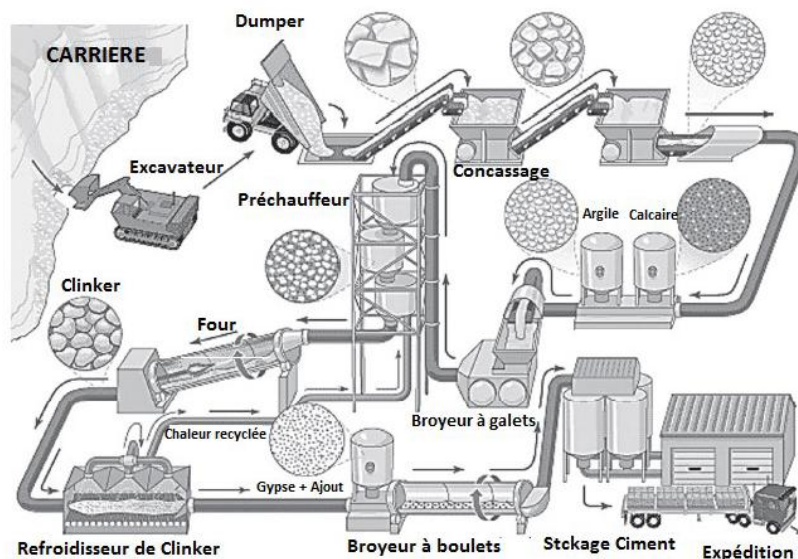


Figure I.1: Le processus de fabrication du ciment Portland.

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃), la chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles, les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier l'oxyde ferrique Fe₂O₃.

Le principe de fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four, Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé, au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée, à partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO₂) et en chaux (CaO) et du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion, le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions, on suppose que les composants du ciment sont formés de

la façon suivante : une partie de CaO est retenue par l'Al₂O₃ et le Fe₂O₃ en formant une masse liquide, le SiO₂ et le CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

Le clinker se retrouve sous forme de billes ayant un diamètre de 3 à 25 mm. Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment) pour contrôler la prise du ciment, le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland [4].

I.1.1.3.1 Matières premières

Les matières premières utilisées pour préparer le mélange à travers lequel la cuisson se transforme en clinker sont:

- Les matières premières de caractère carbonatent (calcaire et certains types de marnes avec une forte teneur en CaCO₃).
- Les matières premières d'un caractère acide (argiles, schistes, marnes argileuses, tuf, pouzzolane et autres), matières premières correctives, dont le rôle est fondamental pour améliorer la composition chimique du mélange sont les suivants:
- Les matières premières d'un caractère silicate (sable de quartz, tuf et autres matières minérales d'origine naturelle ou synthétique).
- Les matières premières avec une teneur élevée en oxydes de fer (pyrite brûlures) et similaires.

Les matières premières qui sont dans le processus d'obtention du produit final mélangé avec du clinker sont le gypse et des additifs tels que la pouzzolane naturelle et synthétique, laitier de haut fourneau, le calcaire et autres.

I.1.1.3.2 Les étapes de la fabrication du ciment Portland

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité, ce procédé comporte les étapes de fabrication suivantes :

Extraction et préparation des matières premières



Figure I.2: Etape de l'extraction des matières premières aux niveaux de la carrière.

Les matières premières sont extraites de carrières, dans la plupart des cas, l'usine est implantée près de la carrière essentielle de calcaire plus au moins marneux, vu l'importance de ce dernier dans la production du ciment.

Pour l'extraction de calcaire dur on utilise des explosifs, et pour le calcaire tendre on utilise des engins comme le bulldozer, scrapeur.....etc, et pour l'argile on utilise l'excavateur ou pelle mécanique.

Le concassage



Figure I.3: Etape de concassage.

Les matériaux sont réduits par le concasseur à une taille maximum de 80mm. La roche est ensuite échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine, silice) et arriver ainsi à la composition chimique idéale.

Le transport de ces matières à l'usine est assuré le plus souvent par des grands camions où à l'aide de convoyeurs à bandes, l'ensemble des matières premières après leurs concassages, sont stockées dans des réserves, le mélange est ensuite stocké dans un hall de pré homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

Le broyage et le séchage

Les matières premières sont ensuite séchées et broyées très finement, on obtient la farine. Celle-ci sera plus tard introduite dans le four sous forme pulvérulente ou préalablement transformée en Granules .

Le préchauffage

Avant introduction dans le four, la farine est chauffée à environ 800°C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones.

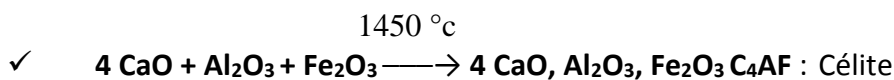
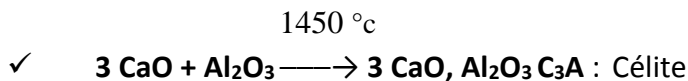
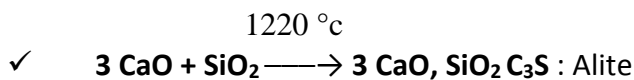
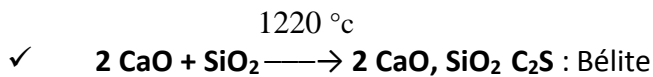
La cuisson

Quel que soit la technique élaborée pour la préparation du cru, les installations de cuisson sont similaires et il existe Cinque zones comme suivant :

- 1- La zone de préchauffage
- 2- La zone de cuisson
- 3- La décarbonatation
- 4- La zone de clinkerisation
- 5- La zone de refroidissement

* Les phénomènes physico-chimiques au cour de la cuisson

- A 100°C : évaporation de l'eau libre.
- Entre 450 et 550°C : Evaporation de l'eau de constitution.
- A partir de 650°C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.
- A partir de 700°C : Décomposition du calcaire.
- Vers 800°C : Formation du silicate bi calcique (2CaO, SiO₂) 'Bélite'.
- A partir de 1250°C : le silicate tricalcique appelé 'alite' commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite.
- Entre 1200 et 1260°C : apparition du premier liquide.
- Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.



La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie, la source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : gaz naturel, fuel, charbon, coke de pétrole.

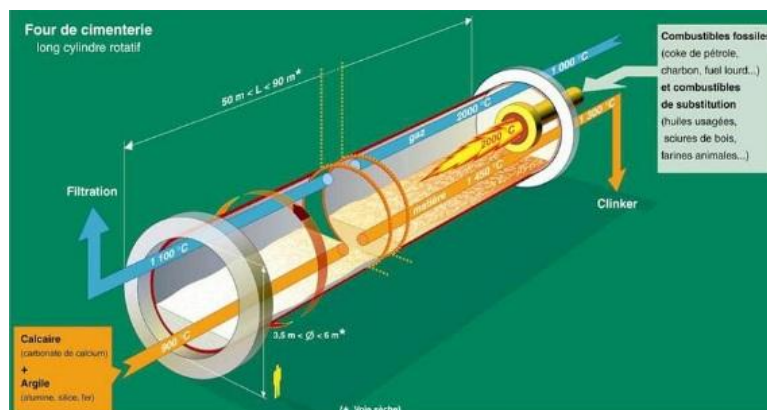


Figure I.4: Schéma d'un four rotatif dans les cimenteries.

Refroidissement du clinker

A la fin de la cuisson en aval du four, le clinker obtenu sort à une température comprise entre 1200 et 1450°C et tombe dans le refroidisseur, ce refroidissement à l'air du clinker fige les phases formées à hautes températures (silicates et aluminates de calcium).

Broyage de clinker

A la sortie du four et après la trempe, les grains de clinker se présentent sous forme de granules allant de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre (**Figure I.5**), à cette finesse, ces granules ne peuvent constituer un liant hydraulique efficace, le clinker est donc broyé de manière à obtenir des particules de taille plus fines inférieures à 50µm, cette étape est donc très importante dans la fabrication du ciment car elle permet d'activer les propriétés physico-chimiques du matériau.



Figure I.5: Nodules de clinker.[5]

Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, fragile et abrasif du clinker [5-6].

Le broyage par percussion est réalisé à partir de l'énergie cinétique dans le milieu de broyage. Le choc réalisé entre les grains de clinker et les parois ou les projectiles présents dans

Le broyeur (boulets) permet de fragmenter les grains, le broyage par frottement (ou attrition) s'effectue entre les grains de clinker présents dans le broyeur, les forces appliquées sont généralement tangentiels à la surface de la particule.

Ce type de broyage permet d'obtenir de fines particules suite à l'érosion progressive des grains.



Figure I.6: Modes de broyage d'un grain de poudre dans un broyeur à boulet.[5]

Le broyeur le plus répandu en cimenterie pour le clinker est le tube-broyeur à boulets (**Figure I.7**). Il permet d'utiliser une combinaison des différents modes de broyage, cet appareil est constitué d'un tube en acier divisé en deux parties, la première est chargée avec des granules de clinker (entre 10 et 20 mm) et des boulets en acier de tailles échelonnées ($\varnothing = 80\text{mm}$, $\varnothing = 60\text{mm}$ et $\varnothing = 50\text{mm}$), les particules les plus fines passent alors au travers d'un diaphragme

séparant les deux compartiments, dans la seconde, un broyage plus fin est réalisé grâce à des boulets de dimensions plus petites ($\varnothing < 25$ mm).



Figure I.7: Broyeur à boulets.[5]

Le fonctionnement du broyeur à boulet dépend de la vitesse de rotation des cylindres permettant la réalisation de plusieurs états de broyage, à une vitesse faible, la matière présente un état de glissement dans le milieu de broyage, la fragmentation des grains étant réalisée par frottement, pour une vitesse excessive, la force centrifuge plaque la matière contre les parois du broyeur annulant les effets de broyage, Il existe donc une vitesse critique pour laquelle le régime de cascade est atteint permettant de combiner les modes de broyage par percussion et par frottement dans les zones A et B présentées sur la (Figure I.8)

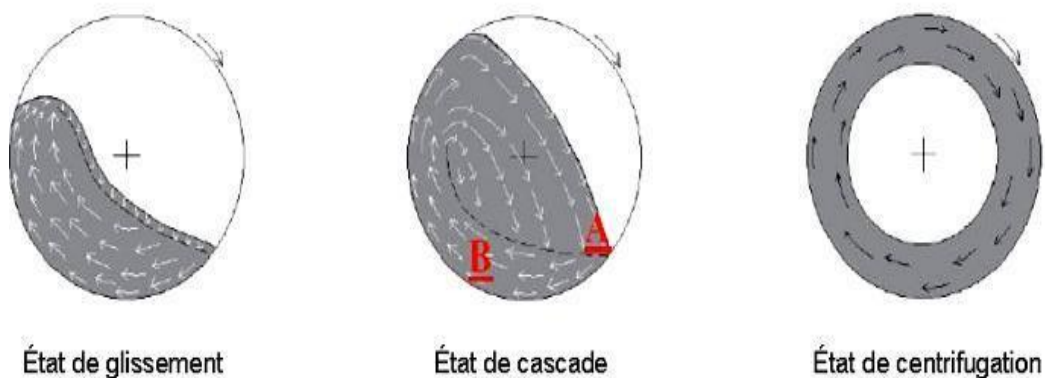


Figure I.8: Ecoulements possibles dans un broyeur à boulets.[6]

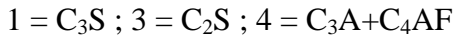
À la sortie du broyeur, le clinker passe au travers d'une grille de décharge empêchant les particules non broyées de sortir, de plus, la poudre obtenue présente 0% de refus au tamis de 90 μ m. Pour optimiser le rendement de l'opération de broyage, la solution mécanique la plus courante est l'adjonction d'un séparateur à air au circuit de broyage, celui-ci permet d'extraire les particules les plus fines évitant la ré agglomération et facilitant le broyage des particules de taille supérieure. L'énergie économisée peut atteindre 15%. [6-7]

Malgré les procédés mécaniques mis au point pour le broyage du clinker, cette opération présente des rendements très faibles. En effet, une grande quantité de l'énergie est dispersée sous

forme de chaleur. En moyenne 2,7% de l'énergie électrique est effectivement utilisée pour fragmenter les particules de clinker. [8]

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker à son tour broyé très finement, c'est également lors du broyage qu'une quantité de gypse (3 à 5% en poids) est ajouté au clinker ; le gypse est indispensable à la régulation de prise du ciment.

Le mélange passe dans des broyeurs, il est réduit en poudre fine $< 80\mu\text{m}$; On obtient alors le ciment "Portland", le produit final (ciment) est stocké dans des silos, en attente de livraison.



Le stockage et les expéditions

La large gamme de produits obtenus est stockée dans des silos avant d'être expédiée en vrac (par Route, fer par voie fluviale) pour 70% de la production ou en sacs pour les 30% restant

La salle de contrôle et le contrôle qualité

Les pilotes de la salle de contrôle conduisent l'usine depuis leurs écrans où s'affichent toutes les Informations.

A chacune des étapes de la transformation de la matière, des échantillons sont automatiquement prélevés et analysés de façon très rigoureuse .

I.1.1.3.3 Les Constituants principaux de ciment

Le clinker

Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant du CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , et des petites quantités d'autres matières, la farine crue, la pâte ou la suspension doivent être finement divisées, intimement mélangées et être homogènes.

Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) (5-15% du clinker) [9].

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 I.3: Composition chimique du clinker.

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux, la teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité à l'illite du ciment durci.

A l'aide du microscope on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants : [10-11]

- a) L'alite est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %), Il s'agit d'une forme impure (phase cristallisée) du silicate tricalcique de formule C_3S réagissant très rapidement avec l'eau, l'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux hydrates à l'origine des propriétés mécaniques du ciment.
- b) La bélite (phase vitreuse) et constitue 15 à 30% du clinker se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- c) Les aluminates tricalciques (Célite) phase vitreuse légèrement foncée et claire, constitue 5 à 10% du clinker de ciment CEM I se trouve dans le clinker sous forme impure, il accélère la prise. En quantité importante, il génère une forte chaleur d'hydratation et permet l'obtention de ciment à résistance mécanique initiale élevée, l'hydratation rapide du C_3A est ralentie par l'ajout de sulfates (gypse) qui jouent le rôle de régulateur de prise.
- d) Les alumino-ferrites calciques sont des solutions solides de C_2A et C_4F proches du C_4AF , mais sans composition chimique définie, Ils constituent environ 5 à 10% du clinker du ciment CEM I et jouent un rôle peu important dans ses réactions de durcissement, les oxydes de fer confèrent la couleur grise caractéristique de certains ciments.

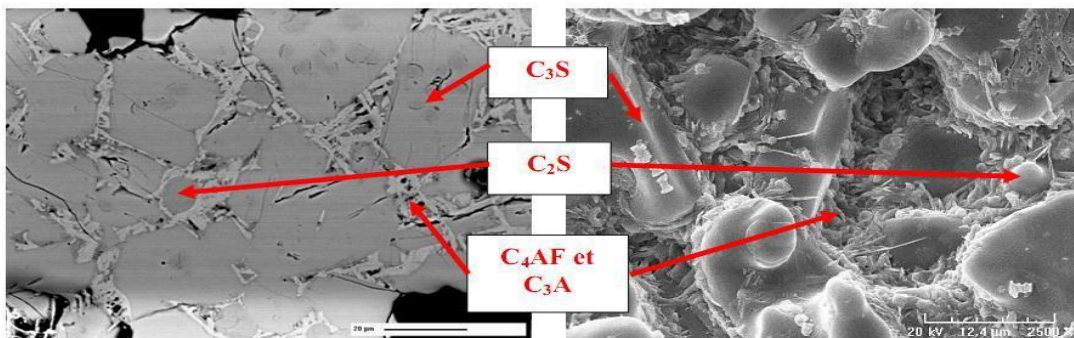


Figure I.9: Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés.[12]

Les différents types des ajouts

Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles, Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant.[13]

Le gypse ($CaSO_4$)

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable, ce fait est surtout dû à la célite (C_3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés, ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$), la quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A

dans le liant, lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

Ajout minéral actif

Ces ajouts qui jouent le rôle suivant : d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker.

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique.[14]

Parmi les ajouts les plus utilisés, on mentionne :

Les laitiers de haut-fourneau

On obtient du laitier granulé de haut fourneau par refroidissement rapide de la scorie fondue, c'est-à-dire des résidus provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de CaO, MgO et SiO₂, le reste contenant Al₂O₃ et de faibles quantités d'autres oxydes.

Les laitiers existent sous forme de poudre fine, sèche, Ils sont considérés comme un matériau hydraulique latent, qui présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable, en effet, l'ajout d'eau à un échantillon de laitier vitrifié n'entraîne aucun durcissement du mélange.

L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates (AC₂H₇) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite).[3]

Les cendres volantes

Si la proportion de cendres volantes dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les cendres volantes satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse (Cendres volantes siliceuses (V)) ou silico-calcaire (Cendres volantes calciques (W)) , les premières ont des propriétés pouzzolanique; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

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

Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à la norme Algérienne.[15]

Les fumées de silice

La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de Ferro silicium.

Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique, elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de particules sphériques de très petite taille dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1 µm et composées de silice amorphe (>85%).

Ces particules sont essentiellement vitreuses, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

Les Pouzzolanes

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées, elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolanique, les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple).[16]

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles-mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés.[3]

I.1.1.4 Types de ciments

Il existe différents types de ciments Portland selon qu'ils contiennent ou non des additions minérales, et si oui, de la nature de ces additions. La (Figure I.10) schématise le triangle des compositions principales des ciments. A partir de ce triangle, on s'aperçoit que le ciment CEM V contient une proportion de CaO plus faible que le CEM I, tandis que celle de SiO_2 et Al_2O_3 est plus élevée, une proportion de CaO plus faible conduit à une hydratation plus lente; la proportion de SiO_2 plus grande va augmenter la formation de C-S-H au détriment de la portlandite, la proportion d' Al_2O_3 plus élevée va favoriser les réactions de fixation de l'ion Cl^- .[17]

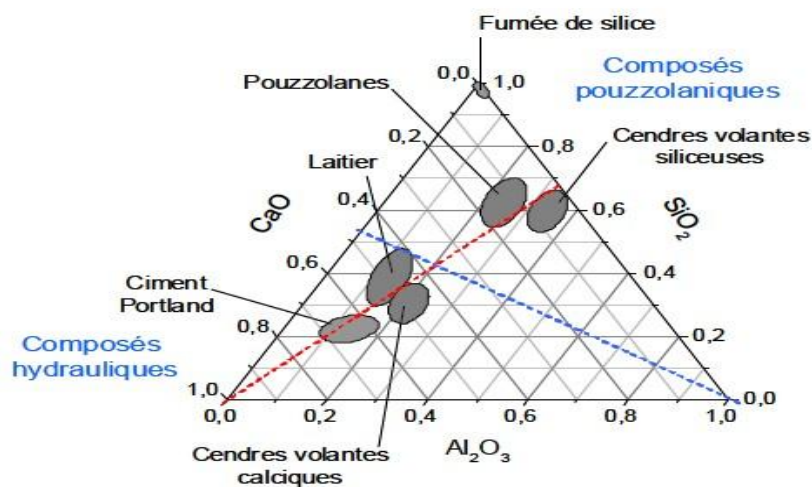


Figure I.10: Triangle des compositions principales des ciments.[17]

Les nuances cimentaires notées CEM, sont définies par la norme [18] et classées en cinq types de ciments courants, dont la composition doit être conforme au **Tableau I.4.** [19]

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

Tableau I.4: Composition en constituants des ciments par type.

I.1.1.5 Hydratation du ciment Portland

L'hydratation est l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre les constituants du ciment et l'eau et qui se poursuivent dans le temps, le processus est initié dès le contact de l'eau avec les phases anhydres, toutes les phases anhydres réagissent selon des vitesses différentes pour former plusieurs hydrates, les réactions chimiques ayant lieu lors de cette hydratation sont nombreuses.

On distingue trois étapes [20] :

- La dissolution des constituants du ciment.
- La formation de solutions sursaturées en différents hydrates.
- La précipitation et la recristallisation de ces hydrates dans les vides inter-granulaires.

D'une manière générale, lors de la mise en contact avec l'eau, la surface des grains de ciment se recouvre de molécules d'eau, les constituants du ciment se dissolvent alors, et se retrouvent sous forme d'ions (ions de calcium, hydroxydes, aluminates, silicates et sulfates), lorsque la concentration ionique dépasse le produit de solubilité, les ions se précipitent sous forme d'hydrates.

Ce phénomène se poursuit jusqu'à la dissolution complète des constituants du ciment anhydre.

La cinétique de cette hydratation diminue au fur et à mesure du temps, par l'effet d'une diminution de la diffusion de l'eau vers le ciment anhydre, ce dernier étant de plus en plus recouvert de couches d'hydrates, la période de maturation du matériau peut donc s'étendre sur plusieurs mois voire années.[21]

Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment Portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et aluminates calciques.

I.1.1.5.1 Composition d'un ciment portland

Avant de décrire les mécanismes de l'hydratation du ciment il semble nécessaire de faire un rappel sur la nature et la composition du ciment le plus couramment utilisé.

Le ciment Portland est un liant hydraulique obtenu de la cuisson d'un mélange principalement composé de calcaire et d'argile, ces matériaux doivent contenir respectivement des proportions appropriées de chaux (provenant de la pierre calcaire) et de fer, de silice et d'alumine (apportés par l'argile).[22] Les matières premières sélectionnées sont broyées, mouluées et dosées pour obtenir un mélange de composition chimique donnée, le procédé de fabrication employé est sec ou humide ; dans le procédé par voie sèche, le broyage, l'homogénéisation et le chargement du four se font avec des matériaux secs, alors que dans le procédé par voie humide, de l'eau est ajoutée et les mêmes opérations sont faites sur une pâte liquide, après homogénéisation, les matières premières broyées sont introduites dans la partie supérieure d'un four, dans la partie inférieure du four, la température est maintenue à environ 1450 °C pour transformer chimiquement la matière première en clinker de ciment, le clinker est ensuite refroidi et réduit en poudre, au cours de cette opération, on ajoute une faible quantité de gypse (moins de 5%) afin de régulariser le temps de prise du ciment. [23];[24]

Le produit pulvérisé ainsi obtenu constitue le ciment Portland, le diamètre des particules de ciment est compris entre 1 et 80 µm et elles ont une surface spécifique mesurée avec l'appareil Blaine, de près de 300 m²/kg [25], et une densité de l'ordre de 3,15.

Les ciments Portland sont normalement constitués à 95% de leur masse de quatre composants principaux qui sont :

I.1.1.5.1.1 Silicate tricalcique (C₃S)

Cette phase constitue le composé principal du ciment (50 à 70%), les cimentiers la désignent par le mot « alite » qui est une forme impure de C₃S. En effet, le C₃S contient soit en substitution des ions Ca ou Si, soit en insertion dans le réseau cristallin des traces de Mg, Al et Fe.

Ces impuretés améliorent généralement la réactivité du ciment, la teneur en impureté du C₃S dépend, entre autres, de la nature des matières premières, de la température de cuisson et de mode de refroidissement du clinker. Il est bon de souligner que l'alite confère essentiellement sa résistance au ciment, en particulier à court terme .

I.1.1.5.1.2 Silicate bicalcique (C_2S)

Le C_2S constitue entre 15 et 30% du ciment Portland, les cimentiers le désignent par « bélite » qui est une forme impure de C_2S , dans le C_2S , on retrouve, en plus du potassium, les mêmes ions étrangers que dans le C_3S , mais ils y sont en plus grande quantité, la bélite fournit au ciment sa résistance à long terme, Il existe au moins quatre variétés polymorphiques de C_2S (α , $\acute{\alpha}$, β , γ) et leur domaine de stabilité est différent selon le chauffage et le refroidissement, la forme β est celle que l'on rencontre le plus souvent dans les clinkers industriels, lors d'un refroidissement lent, la forme β peut se transformer en γ qui n'a aucune propriété hydraulique, contrairement au C_3S , les propriétés hydrauliques du C_2S varient considérablement selon la variété polymorphique.

I.1.1.5.1.3 Aluminate tricalcique (C_3A)

Le C_3A , qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante. Dans les clinkers, la présence d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C_3A , ainsi, selon la quantité totale d'alcalis dissous dans le réseau cristallin, le C_3A peut être cubique, orthorhombique ou monoclinique. Généralement dans le ciment, le C_3A est toutefois un mélange des formes cubique et orthorhombique, mais rarement monoclinique, le C_3A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C_3A cubique.

I.1.1.5.1.4 Alimino-ferrite tétracalcique (C_4AF)

Le C_4AF représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland, les formes C_6A_2F et C_4AF sont les plus couramment rencontrées dans le ciment, la réactivité de l'alumino-ferrite tétracalcique dans l'eau est modérée et elle augmente avec la teneur en alumine.

Les phases C_3A et C_4AF sont liquides à la température de formation du clinker, et elles constituent au cours du refroidissement, une phase interstitielle qui cristallise entre les cristaux de C_3S et C_2S .

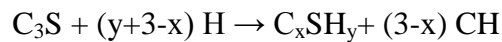
I.1.1.5.2 Les composés mineurs

Comme il a été dit précédemment, aucune des phases principales du clinker ne se trouve à l'état pur la présence d'impuretés dans le clinker (MgO , sulfates alcalins, CaO_2) joue un rôle important sur les propriétés hydrauliques du ciment, ces composés mineurs proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

I.1.1.5.2.1 Hydratation du C₃S et du C₂S

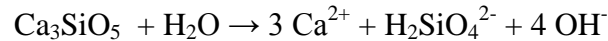
Elle produit des silicates de calcium hydratés notés C-S-H et de la portlandite.[26];[27]

La réaction complète est la suivante :

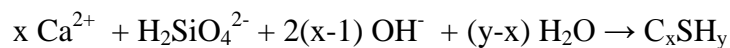


Elle peut être décomposée en trois étapes :

Dissolution congruente des grains de C₃S ayant subi une hydroxylation superficielle



Précipitation des ions silicates précipitent lorsqu'ils atteignent la sursaturation pour former des silicates de calcium hydratés de stœchiométrie variable, la dissolution du C₃S se poursuit simultanément



Précipitation des ions calcium sous forme de portlandite simultanément aux deux autres réactions.



L'hydratation du C₂S aboutit aux mêmes produits mais avec des cinétiques différentes, Il existe cinq polymorphes du silicate bicalcique (ou bélite à pression ordinaire), mais seul le β-C₂S possède des propriétés hydrauliques significatives.

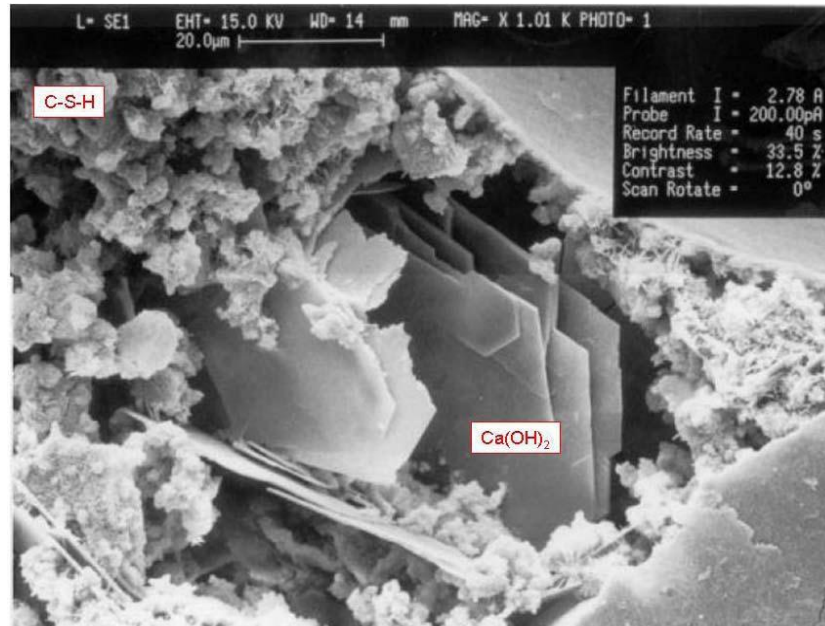
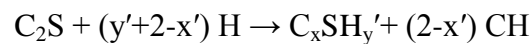
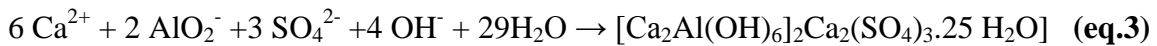
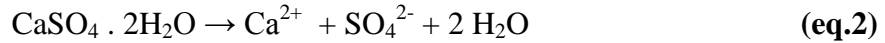


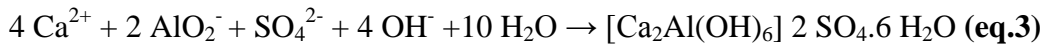
Figure I.11: Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage $G = \times 1010$. [28]

I.1.1.5.2.2 Hydratation de 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) [10];[11] , Les réactions se déroulent selon la séquence suivante : Période initiale de dissolution rapide du C₃A (eq.1) et du gypse (eq.2) ,Les ions se recombinaient instantanément pour former des cristaux d'ettringite ou trisulfoaluminate de calcium hydraté (TSA), de notation cimentière (C₃A.3CS.H₃₂), composé apparaissant sous forme d'aiguilles très fines (eq.3).



Au bout de 10 à 24 heures, l'épuisement du gypse, généralement en défaut par rapport au C₃A (la formation d'ettringite consomme 3 moles de sulfate de calcium pour une mole de C₃A), fait chuter la concentration en ions sulfate, la solution devient sous-saturée par rapport à l'ettringite, qui est dissoute partiellement et qui forme avec le C₃A excédentaire du monosulfoaluminate de calcium hydraté [29], de notation cimentière (C₃A.CS.H₁₂)



A long terme, la composition en aluminates de la pâte de ciment dépend des proportions relatives de gypse et C₃A, les ciments portland contiennent 8 à 12 % de C₃A et 5 % de gypse, soit un rapport molaire de 0,8 qui correspond théoriquement à un mélange de monosulfoaluminate de calcium hydraté et de C₃AH₆ issu de la réaction d'hydratation du C₃A seul, dont la réaction-bilan s'écrit : C₃A + 6 H → C₃AH₆. Cependant, l'analyse par diffraction des rayons X de pâtes de ciments courants hydratés, montrent généralement que la phase alumineuse majoritaire est l'ettringite.

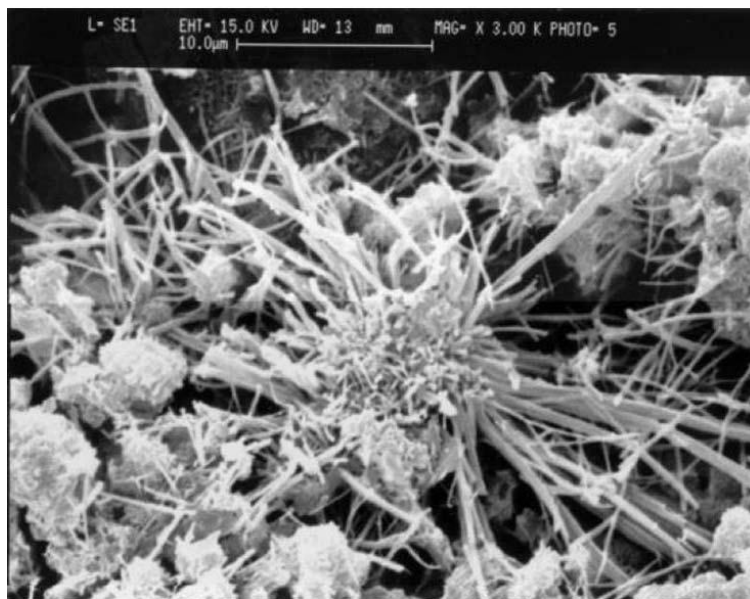
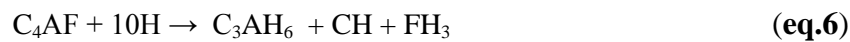
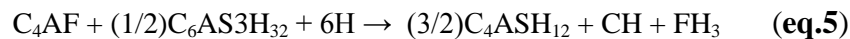
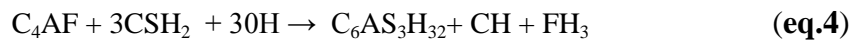


Figure I.12: Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage.[28]

I.1.1.5.2.3 Hydratation de C₄AF (Célite 1) [30]

Il est courant de comparer les réactions d'hydratation du C₄AF à celles du C₃A. Les compositions chimiques des produits formés sont en effet semblables, à l'exception des aluminoferrites substitués aux aluminates, les réactions sont cependant plus lentes dans le cas du C₄AF et libèrent moins de chaleur, la réactivité du C₄AF dépend de sa proportion en fer, une augmentation de celle-ci se traduisant par un ralentissement de l'hydratation du C₄AF. La fraction de fer qui n'a pas réagi au terme des deux réactions initiales (eq 4 et 5) se retrouve sous la forme d'hydroxyde de fer amorphe (FH₃), il y a alors également formation de Portlandite et d'ettringite (eq 6).



I.1.1.5.2.4 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). [31]

I.2 La chaux

I.2.1 Définition

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire, elle est utilisée depuis des siècles, Il existe plusieurs types de chaux utilisée dans des différents domaines notamment dans les traitements de sols argileux. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. [32]

I.2.2 La fabrication des chaux hydrauliques naturelles:[34]

I.2.2.1 La matière première

La roche calcaire est extraite de carrières à ciel ouvert ou souterraines. Après abattage, elle est concassée et criblée.

I.2.2.2 La cuisson

La cuisson s'effectue en général dans des fours verticaux à marche continue, dans lesquels sont introduits dans la partie supérieure, par couches successives, la pierre calcaire et le combustible.

La matière descend lentement, en traversant d'abord une zone de préchauffage, provoquant l'évaporation de l'eau libre et la déshydratation (vers 200°C).

Elle traverse ensuite une zone de calcination où elle est décarbonatée (à partir de 900 °C).

La zone de cuisson proprement dite, où se forment les silicates et aluminates de calcium, se situe à une température variant entre 1000 °C et 1200 °C selon la qualité de chaux recherchée.

I.2.2.3 L'extinction

La chaux recueillie à la sortie du four passe alors par une extinction contrôlée où, sous l'action de l'eau, la pierre se pulvérise et la chaux vive est éteinte complètement, tout en respectant les silicates et aluminates qui lui donnent naturellement son caractère hydraulique.

I.2.2.4 Le broyage

Le matériau obtenu est généralement broyé, avec ou sans addition d'autres constitués

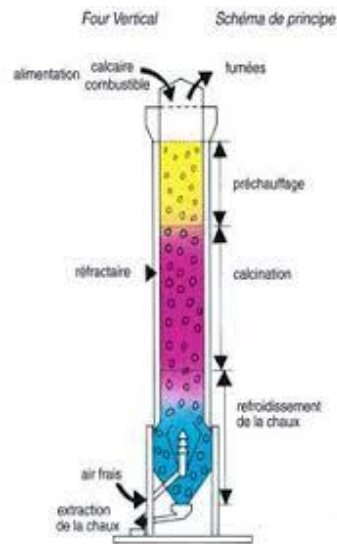


Figure I.13: Schéma du principe de la fabrication de la chaux.

I.2.3 Différents types de chaux

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux [22] :

- chaux aérienne provenant d'un calcaire pur.
- chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes elles se présentent sous deux formes:

I.2.3.1 Chaux vive

Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO, généralement à plus de 90%, la calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

Calcaire chaux vive + gaz carbonique $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Réaction endothermique nécessitant 425 kilocalories par kilogramme de calcaire.

Cette réaction s'effectue à une température voisine de 900°C et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45% correspondant à la perte en gaz carbonique.

I.2.3.2 Chaux éteinte

Contient essentiellement de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, elle est obtenue par extinction de la chaux vive selon la réaction d'hydratation suivante :

Chaux vive + eau chaux éteinte + 15.5 Kcal.

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 15.5 \text{ Kcal}$.

I.2.4 Caractéristiques chimiques et physiques

I.2.4.1 composition chimique

Teneur en CaO :

La teneur en CaO est évidemment la principale caractéristique d'une chaux mais ce CaO peut être libre, c'est-à-dire sous forme d'oxyde CaO ou d'hydroxyde $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou combiné sous forme:[35]

- De carbonate, soit parce que le calcaire d'origine n'a pas été complètement dissocié et qu'il reste des incuits; soit parce qu'il y a eu recarbonation de la chaux au contact de l'air .

Le CaO ainsi combiné peut être considéré comme inerte pour la plupart des emplois routiers , on apprécie son importance grâce à la teneur en CO_2 de la chaux.

- De silicates et d'aluminates, comme nous l'avons vu ci-dessus.
- Eventuellement, mais plus rarement, d'autres sels (Sulfates, Phosphates, par exemple).

Teneur en MgO :

La teneur en MgO est également importante à connaître puisque la Magnésie a en général une action analogue à la chaux, le MgO comme le CaO, peut être libre ou combiné.

Les principales indications données par l'analyse chimique d'une chaux seront donc les teneurs en :

- ✓ CaO total et CaO libre.
- ✓ MgO
- ✓ CO_2
- ✓ SiO_2 , Al_2O_3 et FeO_3 .

Il n'est pas nécessaire de connaître toutes ces valeurs, les teneurs en CaO et MgO sont souvent suffisantes.

Réactivité :

Cette propriété est essentiellement prise en compte dans les applications où la chaux est utilisée pour flocculer les argiles ou coaguler les impuretés (phénomène de floculation), la réactivité définit la rapidité d'action d'une chaux, dans une réaction donnée, elle dépend essentiellement de :

- de la porosité de la chaux (qui diminue lorsque la température de cuisson augmente) ;
- de sa finesse et du mode de cuisson.

Dans le cas de chaux vive, la réactivité dépend de la température de calcination et de la composition du calcaire en cause, pour la chaux éteinte, la réactivité est liée aux conditions d'extinction, elle peut se déterminer directement en mesurant dans des conditions bien définies la vitesse de réaction d'un échantillon en présence d'eau (hydratation) ou d'un acide (neutralisation). La surface spécifique, et même la finesse de mouture, peuvent dans certains cas en donner une idée.

I.2.4.2 Caractéristiques physiques**a-Finesse :**

C'est une caractéristique importante dans la mesure où elle intervient sur les conditions de transport, de stockage ou de mélange, elle peut également intervenir sur la vitesse de réaction de la chaux, mais il faut se rappeler, dans le cas de la chaux vive, que la présence d'eau peut modifier profondément la finesse initiale puisque l'extinction entraîne une pulvérisation très fine (à l'inverse du ciment qui se prend en grumeaux et perd de son efficacité s'il est humidifié prématurément).

b- Surface spécifique :

La surface spécifique donne une indication sur l'importance des surfaces de contact entre la chaux et le produit avec lequel elle est mise en réaction par conséquent sur la vitesse avec laquelle elle agit, la connaissance de la finesse ou surface spécifique est un élément fondamentale pour maîtriser la réactivité de la chaux, plus les grains sont fins, plus la surface de contact est étendue et plus les réactions de floculation sont rapides.

c- Masse volumique et densité :

Ces deux notions aident à déterminer la masse de liant contenue dans un volume donné.

- la masse volumique est exprimée généralement en kilogramme par mètre cube.
- la densité correspond au rapport entre la masse d'un volume de matière donnée et la masse d'un même volume d'eau.

La masse volumique varie beaucoup suivant la nature de la chaux, sa granulométrie, son degré de saturation.

d-Solubilité :

La solubilité de la chaux est très faible et diminue lorsque la température augmente. Elle est de l'ordre de 1.2 g / L à 20 °C et de 0.67 g / L à 80 °C.

Conclusion :

Ce premier chapitre donne un rappel sur les constituants du ciment portland, leurs caractéristiques chimiques ainsi que les principaux mécanismes et phénomènes physicochimiques liés à l'hydratation du ciment.

et nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégagent du CO₂ et de la poussière causant la pollution de l'environnement, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes.

- diminuer la quantité de clinker utilisé d'où un gain d'énergie.
- préserver l'environnement.
- améliorer les propriétés du ciment.

et nous montrent aussi que l'objectif principal de ces ajouts (la chaux) consiste à qualifier la résistance mécanique de mortiers.

CHAPITRE II

Caractéristiques des matériaux utilisés

II Caractéristiques des matériaux utilisé

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) [33]

II.1 Liant hydraulique ciment (CEM II-CPJ)

II.1.1 Type de ciment

Le liant hydraulique utilisé est un ciment portland composé fabriqué par la cimenterie, il est commercialisé comme étant un CPJ 42.5.

II.1.2 préparation des échantillons

Ce présent travail consiste à étudier l'influence de l'activation du ciment composé(CPJ-CEM II) par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier.

Deux techniques d'activation du ciment composé (CPJ-CEM II) ont été choisies dans cet étude expérimentale: Par substitution et par addition de l'ajout (activant) minéral actif utilisé (la chaux fine: < à 80 μm , c'est-à-dire < à 0,08 mm).

a- Par substitution : Remplacement partiel d'une partie de ciment par de la chaux fine (< à 80 μm : 0,08 mm).

Les différents pourcentages d'ajouts minéraux actifs (taux de chaux fine ajouté) choisis dans cet étude expérimentale sont : 0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10%..

Ciments préparés	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 II.1: Composition des ciments préparés par substitution.

b- par addition : Addition de la chaux fine au ciment utilisé.

Les différents pourcentages d'ajouts minéraux actifs (taux de chaux fine ajouté) choisis dans cette partie expérimentale sont : 0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10%..

Ciments préparés	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 II.2: Composition des ciments préparés par addition.

II.1.3 Analyse chimique des ciments préparés

Les analyses chimiques pour les ciments préparés ont été effectuées à la Cimenterie de «AIN-TOUTTA» Wilaya de Batna.

II.1.3.1 Analyse chimique du clinker

Les compositions chimique et minéralogique (**Tableaux III.3 et III.4**) du clinker de la cimenterie de «Ain-Toutta» ont été déterminées par la Méthode « Fluorescence aux rayons X ».

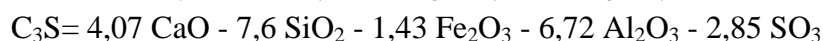
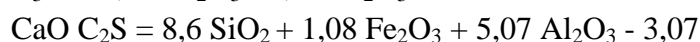
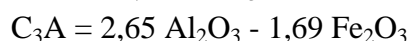
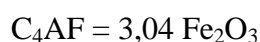
a - Composition chimique du clinker

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	K ₂ O%	Na ₂ O%	SO ₃ %	PAF%
21.49	5.28	3.56	66.4	1.94	0.63	0.1	0.59	0.62

Tableau II.3: Composition chimique du clinker.

b - Composition minéralogique du clinker

Équations de Bogue :



C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64.67	212.36	9.43	10.82

Tableau II.4: Composition minéralogique du Clinker selon la formule de BOGUE.

II.1.3.2 Analyse chimique des ciments préparés

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

Ciments 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 ₃	5.23	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	3.23	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	0.49	0.48	0.48
Na ₂ O	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 II.5: Compositions chimique des ciments préparés.

La méthode d'activation (par substitution ou par addition) du ciment composé influe sensiblement sur les compositions chimiques des différents ciments préparés.

II.1.4 Surface spécifique du liant hydraulique (ciment) (EN 196-6)

La surface spécifique de ciment est la surface totale en cm^2 développée par 1g de liant, elle est mesurée conventionnellement selon la norme EN 196-6 par le perméabilimètre de Blaine, et elle est exprimée en (cm^2/g) .

II.1.4.1 L'objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse de ciment peut être caractérisé par sa surface massique c'est la surface totales des grains contenues dans une face des grains de ciment par Kg de poudre; l'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

II.1.4.2 Equipement nécessaire

Un appareil appelé « Perméabilimètre de BLAINE » dont la description complète est donnée dans la norme EN 196-6, il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli jusqu'à son repère inférieur n°4, d'une huile légère, la cellule est équipé d'une grille sa partie inférieure, un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.



Figure II.1: Perméabilimètre de BLAINE

Pour la détermination de la SSB d'un liant, elle sera calculé en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée, et à une température connue, à travers une couche de liant tassée.

II.1.4.3 Conduit de l'essai

Il faut peser une masse m_c de ciment tel que la compacité c du ciment une fois tassé dans la cellule soit $c = 0,500$. La compacité est définie comme le rapport entre le volume absolu V_c de ciment compacté dans la cellule et le volume V de la cellule :

$$c = \frac{v_c}{V} + \frac{m_c}{V \cdot \rho_c} \quad (\text{II.1})$$

$$m_c = c \cdot V \cdot \rho_c \quad (\text{II.2})$$

La porosité p est définie comme le volume d'air occlus contenu dans le lit de ciment compacté apporté au volume total :

$$p = \frac{(V-v_c)}{V} = 1 - c \quad (\text{II.3})$$

Cette masse m_c de ciment est mise en place dans la cellule puis compactée par le piston, le lit de ciment ainsi compacté a un volume V , la cellule est alors placée dans le rodage conique au sommet du manomètre.

La partie supérieure de la cellule étant obturée par un bouchon adéquat et le robinet étant ouvert. amener par une aspiration modérée le liquide manométrique au niveau du repère supérieur n° 1

Fermé le robinet , enlever le bouchon, déclencher le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère n° 2 sur le tube , l'arrêter lorsque le liquide atteint le repère no 3 sur le tube. Relever le temps t ; à 0,2 s près et la température à 0,1 °C près.

L'essai est répété une deuxième fois sur le même lit de ciment. Puis un deuxième lit est préparé et essayé de la même manière. Soit t la moyenne des quatre temps t_i , ainsi obtenus.

Soit ρ_c la masse volumique absolue du ciment étudié. Sa surface massique S est :

$$S = K\sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \cdot \frac{1}{\sqrt{0.1\eta}} \quad (\text{II.4})$$

Dans cette expression

k =est la constante de l'appareil.

η =est la viscosité de l'air à la température de l'essai.

p =porosité de la couche tassé.

t = temps mesuré en secondes.

II.1.4.4 Résultats et analyses

Pour ce qui est de la différence entre les finesses des ciments préparés (Tableau II.6, figure II.2), ceci peut être du à la quantité d'ajout (% de la chaux fine) incorporé dans le ciment composé et aussi à la différence des finesses entre le C.P.J (2810 cm²/g) et la chaux (4800 cm² /g).

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 II.6: Surface spécifique de Blaine des ciments préparés.

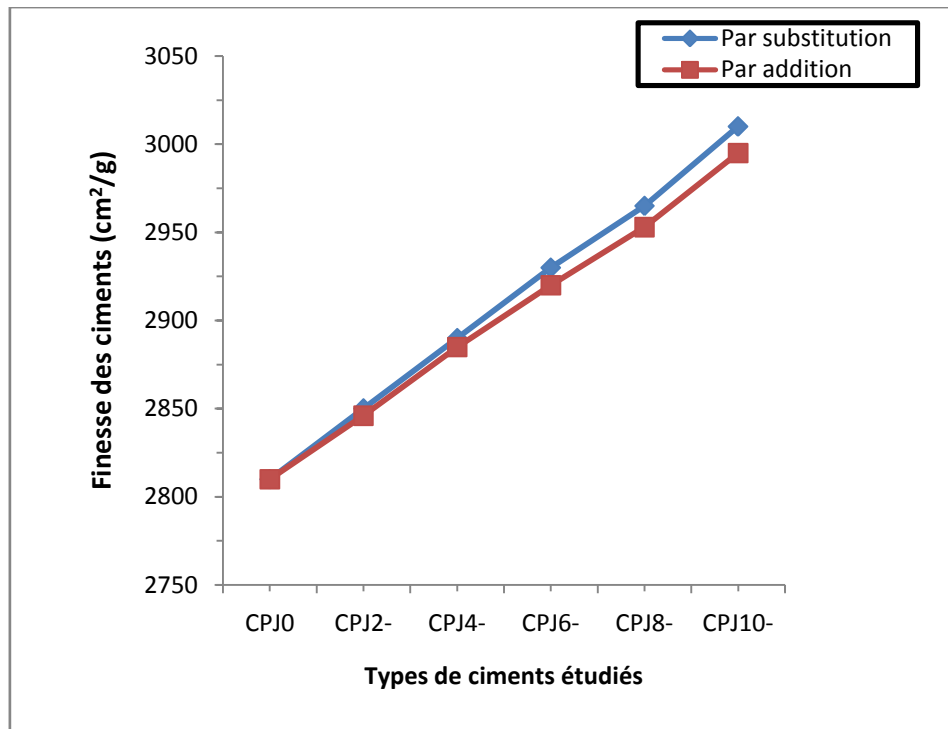


Figure II.2: Accroissement de la finesse des ciments étudiés.

II.1.5 Masse volumique absolue (surface spécifique) des ciments

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue (surface spécifique) de ciment anhydre qui varie en fonction de la composition de ciment, tout en restant comprise entre 2.8 à 3.0 g/cm³

On opère en comparant la masse m_c d'un volume connu de ciment V_c à la masse m d'un même volume de liquide (essence) dont la masse volumique ρ_c est connue la masse volumique de ciment ρ_c s'en déduit en écrivant :

$$\rho_c = \frac{\rho_e \cdot m_c}{m_e} \quad (\text{II.5})$$

II.1.5.1 Equipement nécessaire

Un pycnomètre d'une contenance de 100 cm³

Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment essence

Une balance de précision de balance devra adaptée a la masse de l'échantillon utilisé, $\Delta m < 2 \cdot 10^{-4} m_c$

un thermomètre précis a 0.1 °C permettant de connaître la température du laboratoire.

II.1.5.2 Résultats et analyses

La méthode d'activation (par substitution ou par addition) du ciment compose influe sensiblement sur la masse spécifique (masse volumique absolue) des différents ciments préparés, ceci est due principalement à la différence de densité entre le C.P.J ($\gamma=2.86 \text{ g/cm}^3$) et la chaux ($\gamma=2.58 \text{ g/cm}^3$)

Ciments Préparés	Finesses g/cm^2	Ciments Préparés	Finesses g/cm^2
CPJ ₀	2.86	CPJ ₀	2.86
CPJ ₂₊	2.84	CPJ ₂₋	2.82
CPJ ₄₊	2.78	CPJ ₄₋	2.76
CPJ ₆₊	2.76	CPJ ₆₋	2.74
CPJ ₈₊	2.74	CPJ ₈₋	2.71
CPJ ₁₀₊	2.68	CPJ ₁₀₋	2.65

Tableau II.7: Masse volumique absolue des ciments.

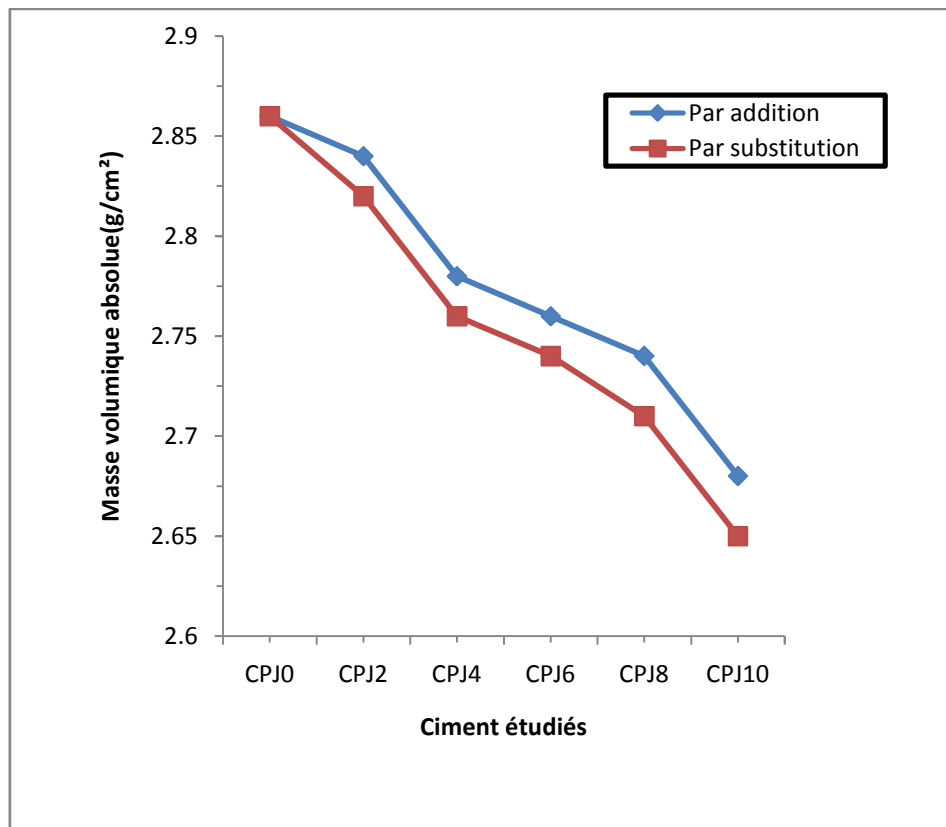


Figure II.3: Variation de la masse volumique absolue des ciments étudiés.

II.1.6 Masse volumique apparente ou masse volumique

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

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

II.1.7 Essai de consistance

La consistance de la pâte de caractériser sa plus ou moins fluidité deux essais normalisés d'apprécier cette consistance:

L'essai de consistance effectuée avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN196-3

L'essai d'écoulement au cône, conforme à la norme NF P18-358

II.1.7.1 Objectif de l'essai

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour tous les pâtes testées. L'objectif de cette essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée »

II.1.7.2 Equipement nécessaire

-Une salle maintenue à 20 ± 2 °c et à une humidité relative d'au moins 65% .

-Un malaxeur décrit dans la norme EN 196-1. Ce malaxeur est muni d'une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide): 140 et 285 tr/min,

-Un appareil de Vicat. L'appareil, est pour l'essentiel, composé d'un :
moule tronconique de 40mm de hauteur.
sonde d'un diamètre $\varnothing = 10$ mm. On aiguille.
une règle graduée.

la partie coulissante a une masse totale de 300g (y compris la sonde amovible) une balance permettant de peser à 1g près.

II.1.7.3 Conduite de l'essai

La quantité d'eau choisie est pesée de préférence directement dans la cuve du malaxeur. Puis on pèse 450g de ciment qui seront ajoutés à l'eau en un temps compris entre 5 et 10s. Si, par exemple, la quantité d'eau pesée est de 125g, alors E/C=0,25.

Si $d = 6\text{mm} \pm 1\text{ mm}$. La consistance est la consistance normalisée.

Si d n'atteint pas cette valeur, il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance. (Appareil de VICAT)



Figure II.4: Appareil de VICAT.

Les résultats d'essais sont regroupés dans le tableau (II.9).

II.1.8 Mesure des temps de début et de fin de prise (EN 196-3)

II.1.8.1 Objectif de l'essai

Le début de prise dépend de plusieurs paramètres il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et, le cas échéant, des dosages en adjuvant. Utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer par une plus ou moins grande rapidité de prise. L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, Un temps qui soit significatif de cette rapidité de prise.

II.1.8.2 Principes de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre Quand, sous l'effet d'une charge de 300g, l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.

On dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « temps de début de prise ».

Le temps de fin de prise « est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5mm.

II.1.8.3 Equipement nécessaire

Salle climatisée. L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de 20 °C et dont l'humidité relative soit supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à 20 ± 1 °C.

Malaxeur normalisé.

Appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1,13mm de diamètre.

II.1.8.4 Conduit de l'essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée. Le temps zéro est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au ciment dans la cuve du malaxeur. La pâte, une fois malaxée, est introduite dans le moule tronconique comme indiqué pour l'essai de consistance.

L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale.

Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base. Recommencer l'opération à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Cet instant mesuré à 5 min près est le temps de début de prise pour le ciment concerné.

Retourner le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule primitivement en contact avec la plaque de base.

Munir l'aiguille d'un accessoire annulaire pour faciliter l'observation précise des faibles pénétrations Enregistrer, à 15 min près, le temps au bout duquel l'aiguille ne pénètre plus pour la première fois qu'à 0,5mm dans l'éprouvette comme temps de fin de prise du ciment étudié. Ce temps est celui au bout duquel l'accessoire annulaire cesse de laisser une trace sur l'éprouvette.

II.1.8.5 Résultats et analyses

D'après les résultats obtenus (Tableau II.8, Figures II.5 et II.6), on remarque que l'augmentation de la quantité de chaux incorporé dans le ciment (par substitution ou par addition) a un double effet:

- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte de liant préparé.
- Raccourcissement (diminution) des délais (début et fin) de prise des ciments testés.

Ciments	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 II.8: Caractéristiques physiques des pâtes de ciments étudiés (consistance normale et délais de prise).

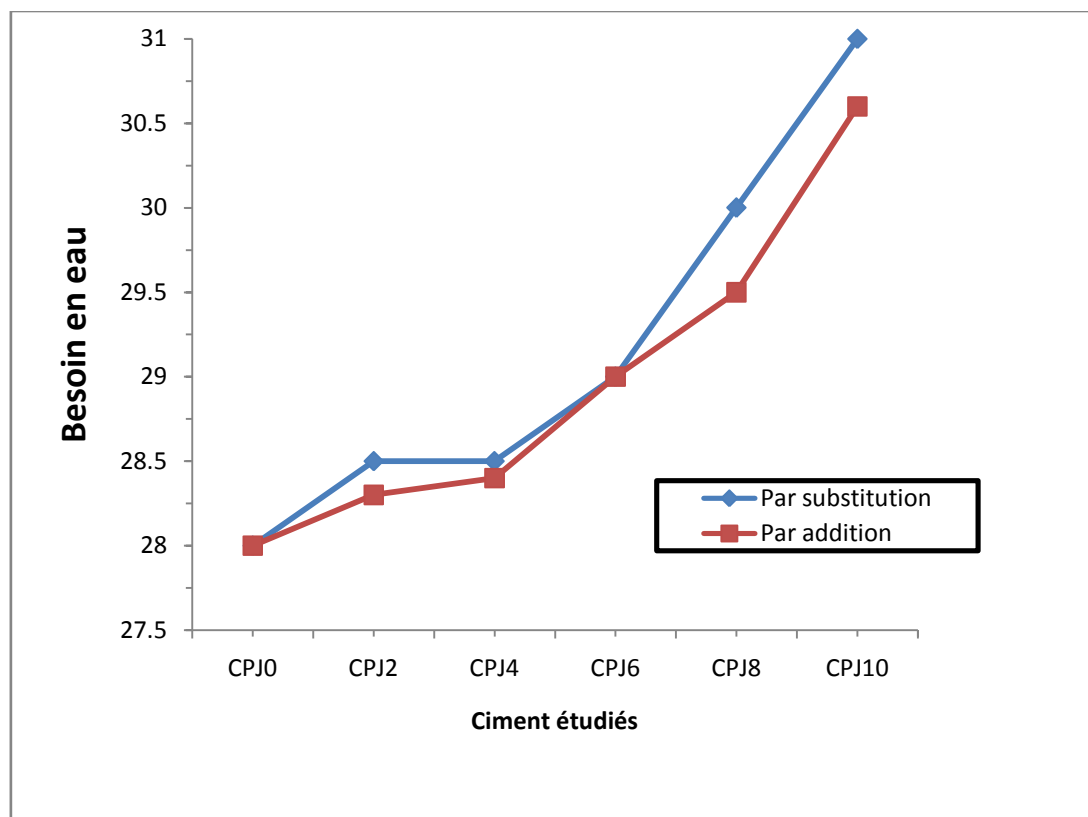


Figure II.5: Variation de la consistance normale(besoin en eau)de pâtes de ciments étudiés.

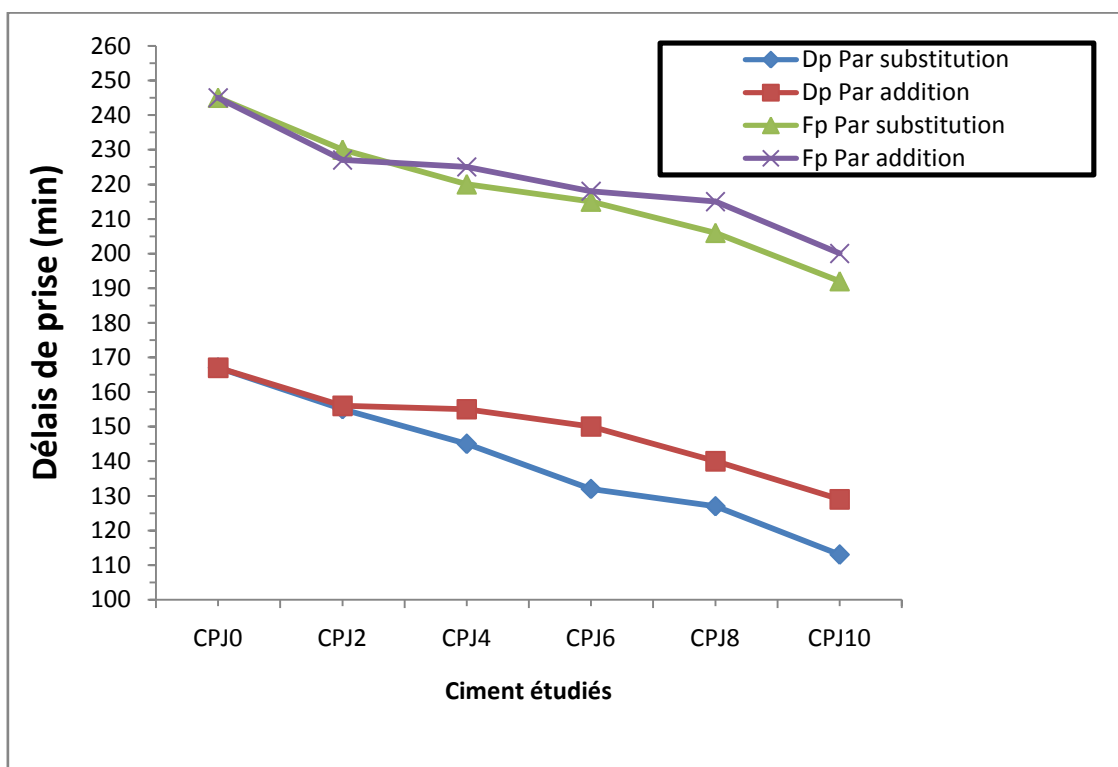


Figure II.6: Variation des délais de prise des pâtes de ciments étudiés.

II.2 Caractéristique physique du sable teste

L'étude et menée sur le sable dune de Boussaâda.

II.2.1 Origine de sable

Le sable utilisé dans cet étude provient des abords l'oued maiter cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, entre lesquelles souffle un vent prévenant du sud chargé de grain fin. 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.

II.2.1.1 Exploitation de sable de dune

L'exploitation des carrières le long de l'oued par plusieurs entreprises étatiques et privées s'effectue divers moyens surtout mécaniques (chargeur, pelle....), le sable mélange de grains fins galets est 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, Sétif.....

II.2.1.2 Composition chimique du sable utilisé

Les résultats obtenus par la méthode d'essai "Fluorescence aux rayons X"

Eléments	Teneur (%)
Silice SiO_2	89.67
Alumine Al_2O_3	0.90
Oxyde de Ferrique Fe_2O_3	0.91
Oxyde de magnésium MgO	0.20
Oxyde de calcium CaO	5.56
Perte au feu (P.A.F)	6.34

Tableau II.9: Composition chimique du sable utilisé.

II.2.2 Masse volumique absolue (masse spécifique)

II.2.2.1 Définition

la masse volumique absolue (réelle) est le rapport de la masse d'une matière sur son volume réelle (absolu), c'est la masse de l'unité de volume sur l'unité de volume absolu d'un corps (matériau), c'est-à-dire de la masse qui constitue le corps, sans 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.

II.2.2.2 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 utilisée est une éprouvette graduée (déplacement d'un liquide)

II.2.2.3 Résultats obtenus

$$\gamma_s = \frac{m}{V} + \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- ✓ M: masse du sable testé.
- ✓ V: volume absolu du sable.
- ✓ V_1 : volume d'eau (volume initial).
- ✓ V_2 : volume de sable + l'eau (volume finale).

Les valeurs moyennes de la masse spécifique des trois échantillons testés sont égales à

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

II.2.3 Masse volumique apparente ou masse volumique

II.2.3.1 Etat lâche ou poreux

II.2.3.1.1 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.

II.2.3.1.2 Principe de la mesure

L'essai consiste à remplir une masse de 1 dm^3 (1 litre), et déterminer la masse du contenu (opération de remplissage d'un récipient de volume connu et passage du matériau teste).

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

II.2.3.1.3 Résultat à obtenir

$$\rho_{sl} = \frac{m}{V} + \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

- ✓ m: masse ou poids du matériau (sable) contenu dans le récipient
- ✓ m_1 : masse de récipient métallique vide
- ✓ m_2 : 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 :

$$\rho_{sl} = 1.49 \text{ g/cm}^2$$

II.2.3.2 Etat compacte ou dense

II.2.3.2.1 Définition

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

II.2.3.2.2 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 secousse, complète le remplissage du récipient, puis on nivelle ce dernier et on le pèse, soit m_2 le poids l'ensemble (sable + récipient).

II.2.3.2.3 Résultat obtenu

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

$$\rho_{sl} = \frac{m}{V} + \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{II.8})$$

Les volumes moyenne des trois échantillons testés son

$$\rho_{sc} = 1.66 \text{ g/cm}^2$$

II.2.3.3 La porosité

La porosité d'un matériaux est le rapport du volume des vides au volume totale, elle reprisant donc le degré remplissage (la proportion) de sont volume occupé par les vides.

Cette porosité ou notion de porosité est importante car elle influe sur son volume occupe par les vides.

- Résistance mécanique (R ou R_m) : ρ élevée donc R faible.
- Capacité absorption d'eau (W) : ρ élevée donc W grand.
- Conductibilité thermique (λ): ρ élevée donc λ faible.
- Masse volumique occupe (ρ) ρ élevée donc ρ faible.

La porosité est déterminée par la relation suivant

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\gamma}\right) \cdot 100 \quad (\text{II.9})$$

Pour cet étude, deux cas sont à distinguer

$$\text{Etat lâche} \quad P_{Sl}(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{Sl}}{\gamma_s}\right) \cdot 100 = 47.36\% \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Etat compacte} \quad P_{Sc}(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{Sc}}{\gamma_s}\right) \cdot 100 = 41.34\% \quad (\text{II.11})$$

II.2.4 Equivalent de sable (contrôle des boues argileuses)

II.2.4.1 Définition

Cet essai à pour but de mesure la propriété d'un sable, c'est-d-dire la quantité de particule fins (élément fine) présente dont le sable.

II.2.4.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à laver un échantillon de sable, puis déterminer la quantités de particule fins (argile, limon, et impureté) contenue dons cet échantillon par apport à la quantité d'éliment sableux, C'est le rapport multiple par cent (100) de la hauteur de la partie sédimentée á la hauteur totale du floculat et de la partie sédimente, nous avons :

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

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

L'essai est réalise à 20 °C sure un fraction de sable passant par un tamis de 5mm.

II.2.4.3 Résultat obtenu

II.2.4.3.1 Equivalent de sable piston

$$E.S.P = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad (\text{II.12})$$

h_1 : hauteur totale (sable+floculat)

h_2 : hauteur du sable c'est-à-dire de la partir sédimentée.

II.2.4.3.2 Equivalent de sable visuel

$$E.S.V = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad (\text{II.13})$$

h_1 : hauteur totale (sable+floculat).

h_2 : hauteur du sable sans tassement.

Les résultats obtenus lors de l'essai réalisé sont

E.S.P= 74.57 %

E.S.V= 73.21 %

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

$$E.S = 73.89 \%$$

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
E.S.<65	E.S.<60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65≤E.S.<75	60≤E.S.<80	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour des bétons de qualité courants on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤E.S.<85	70≤E.S.<80	Sable propre : à faible pourcentage de fines argileuse covenant parfaitement pour les béton de haut qualité, (Valeur optimale: E.S.P=75, E.S.V=80)
E.S.≥85	E.S. ≥80	Sable très propre : l'absence presque totale de fine argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattrape par une augmentation du dosage en eau

Tableau II.10: Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.

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

II.2.5 La granulométrie du sable

La granulométrie du sable a pour objet de déterminer ou définir la grosseur des grains des granulats qui les constituent et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

La composition granulométrique des granulats est d'une grande importance pour la quantité des bétons, les agrégats destinés aux mélange des béton doivent être composés des grains de démontions différentes afin d'assurer un volume minimale des vides.

*Granulométrie: détermination des démontions grains.

*Granulométrie: distribution dimensionnelle des grains d'un granulat,

*Refus: matériau qui est retenu sure la tamis.

*Tamisât ou passant : matériau qui passe a travers les maile d'un tamis.

L'essais granulométrique consiste à fonction au moyen d'un série, colonne ou jeu de tamis un matériau pulvérulent en plusieurs classe granulaire, les dimension et les nombres de tamis sont choisis en fonction de la nature de matériau et de la précision exigé.

La tamisage à sec (méthode de séparation) consistera à faire passer ne quantité donné de granulat dons un colonne formée de tamis (le fond est constitué par un grillage définissant des ouvertures carrée ou maille) ou de passoires le font est constituée par un totale perforée à trous ronds).

La courbe granulométrique comprend:

*En abscisse: les dimensions des tamis en mm.

*En ordonné: le pourcentage du tamisât cumulés au refus cumulé.

Le module de finesse (M_f) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant :

$$M_f = \frac{\sum R_i}{100} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

R_i : refus cumulé en pour sent (%)

Les résultats d'essais obtenu sans regroupés dans le tableau (II.11) et la figure (II.7)

Maille de tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
0	0	0	0	100
2.5	1.42	1.42	0.14	99.85
1.25	2.54	3.96	0.39	99.60
0.63	5.53	9.49	0.94	99.05
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 II.11: granularité du sable de dune testé.

Les normes de l'ex URSS spécifique que :

Quantité de sable	Modèle de finesse
Gros	2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2.0
Très fin	1.0 à 1.5

Tableau II.12: classement de sable.

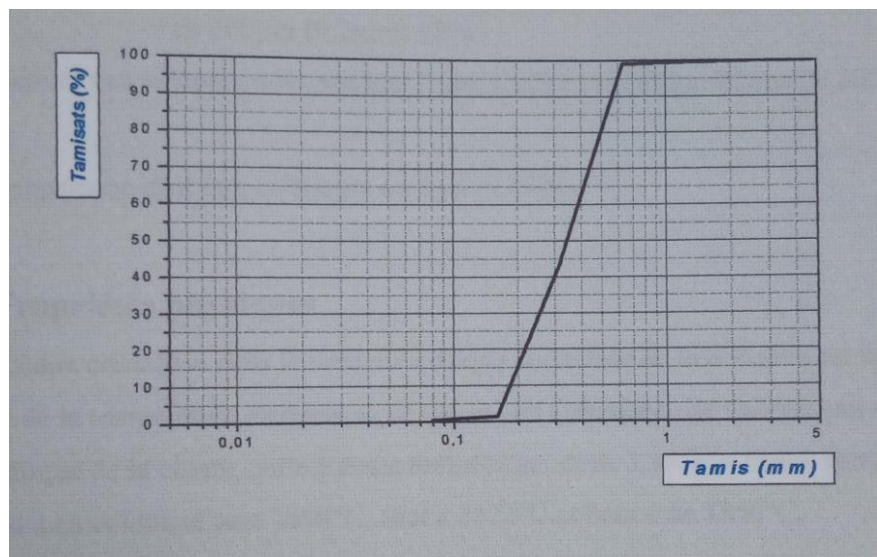


Figure II.7: Courbe granulométrique de sable (0/5).

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

$M_f = 1.57$ (valeur caractéristique d'un sable fin)

II.3 L'activant minérale (la chaux)

II.3.1 Définition

La chaux utilisé dans cette étude c'est la chaux de l'entreprise " la chaux du l'ouest de Saida " c'est un chaux hydraulique naturelle et obtenue par calcination, a 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 90 μ m (0.09mm) \leq 7%

de 200 μ m (0.2mm) \leq 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.3.2 Propriétés physiques

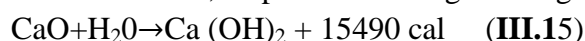
La chaux cristallise dans le système cubique la chaleur de dissolution est indépendante de la température de la température de cuisson, ce qui exclut l'existence de variétés polymorphique, la masse volumique de la chaux, cuite à passe température et de 3.18 de la chaux fondue, de 3.4 elle commencent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

II.3.3 Propriétés chimiques

Oxygène est dépassé à froide 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 faire elle réagit sur l'alumine au-dessus de 700°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.3.4 Compositions chimique de la chaux utilisée

Les résultats obtenus par la méthode « Fluorescence aux rayons X » sont :

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

Tableau II.13: Composition chimique de la chaux utilisé.

La 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 des ses caractéristiques physique et chimiques elle peut se déterminer en mesurant dans des condition 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.

II.3.5 Caractéristique physique

La masse volumique absolue $Y_{\text{chaux}} = 2.58\text{g/cm}^3$

La masse volumique apparente $\rho_{\text{chaux}} = 0.58\text{g/cm}^3$

La porosité est déterminée par la relation suivant :

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\gamma}\right) \cdot 100 = 77.51\% \quad (\text{II.16})$$

$$C(\%) = 100 - P(\%) = 22.49\% \quad (\text{II.17})$$

La finesse il s'agit d'une caractéristique très importante puisqu'elle intervient dans les conditions de stockage de transport et de mélange, la surface spécifique donne une indication sur cette finesse elle est déterminée à l'appareil de plaine, la finesse est $S=4800\text{g/cm}^2$
Solubilités dans l'eau elle est très faibles et diminuée quand la température augmente 1.2g/l à 20°C et 0.67g/l à 80°C.

II.4 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 est 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 III

Comparaison et interprétation des résultats

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

III. 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) [33]

III.1 Définition des essais sur les matériaux

L'essai mécanique d'un échantillon consiste à déterminer sa résistance, c'est-à-dire sa performance mécanique lorsqu'on lui applique une charge (solicitation).

III.2 Pourquoi effectuer des essais

Il y a principalement trois raisons :

En recherche

Pour analyser la conception et surtout le comportement, c'est-à-dire la performance des nouveaux matériaux.

En contrôle qualité

Pour suivre est aussi pour contrôler en permanence la qualité de la matière brute ou des sous-produits finis en environnement de production, par exemple dans le cadre des norme ISO 9000.

Confiance des produits

Pour le producteur comme pour le client, on effectue des essais avec un appareil ou une machine adaptée.

L'étude a été effectuée au laboratoire sur un mortier normal de composition pondérale (C/S=1/3) constitué de:

- 3 parties de sables
- 1 parties de ciment
- Le rapport « Eau/Ciment »(E/C = 0.5)

III.3 La résistance d'un mortier

La résistance mécanique d'un mortier après durcissement, dépend de l'activation du ciment, de rapport « Eau/Ciment » (E/C) et aussi de la qualité de sable.

La résistance mécanique d'un mortier est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression des demi-éprouvettes obtenu après la rupture à la flexion d'éprouvettes prismatiques (4*4*16) cm³.

Les deux types de résistance considérée pour le mortier sont :

- La résistance à la traction par flexion.
- La résistance à la compression

III.4 Préparation de mortier de fraction (C/S = 1/3)

Le mortier normal se compose en masse de

- Une partie de liant.
- Trois parties de sable.
- Une demi partie d'eau (E/L = 0,5).

Dans notre cas les éprouvettes préparés sont des échantillons de formes prismatiques (parallélépipédiques) de dimensions: (4*4*16) cm³.

Le mortier normal confectionné à la composition pondérale suivante

- Sable = 1350 ±5g
- liant préparé (ciment + chaux) = 450 ±2g.
- Affaissement au cône = 2.5 cm (E/L varie de 0.51 à 0.59)

Ciments	E ml	Rapport E/L = E/(C+Ch)	Ciment (g)	Chaux «Ch» (g)	Sable (g)
CPJ ₀	230	0.51	450	0	1350
CPJ ₂₋	235	0.52	441	9	1350
CPJ ₄₋	240	0.53	432	18	1350
CPJ ₆₋	245	0.54	423	27	1350
CPJ ₈₋	250	0.56	414	36	1350
CPJ ₁₀₋	255	0.57	405	45	1350
CPJ ₂₊	250	0.54	450	9	1350
CPJ ₄₊	260	0.55	450	18	1350
CPJ ₆₊	270	0.57	450	27	1350
CPJ ₈₊	280	0.58	450	36	1350
CPJ ₁₀₊	290	0.59	450	45	1350

Tableau III.1: Composition des mortiers testés.

L'analyse des compositions pondérales des différents ciments préparés (**Tableau III.1**), montre que l'incorporation de la chaux dans le ciment (par substitution ou par addition) influe sensiblement sur le besoin en eau (E/L ou E/ciment + chaux) des mortiers testés.

Lors du gâchage, plus les particules sont fines (finesse très élevée de la chaux utilisée), plus la surface du liant hydraulique préparé (ciment + chaux) en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

III.5 Mesure des résistances à la flexion et à la compression

III.5.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier les résistance a la flexion et a la compression d'éprouvettes de mortier normal dans un tel mortier la seule variable et la nature du liant hydraulique la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilise.

III.5.2 Equipement nécessaire

L'ensemble des décrits de manière détaillée par la norme EN 196 1. Il est énuméré ci-dessous

- Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité é relative supérieure ou égale à 50%.
- Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90%.
- Un malaxeur normalisé
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4*4\text{ cm}^2$ et de longueur 16 cm (ces éprouvettes sont appelées «éprouvettes $4*4*16$ ».
- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charge jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$, la machine ne doit pas être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui shimatisé dans la figure (III.1)
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400\text{ N/s} \pm 200\text{ N/s}$. cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure (III.2).



Figure III.1: Appareil de traction par flexion



Figure III.2: Appareil de Compression

III.5.3 Conduit de l'essai

La norme EN196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier préparé comme indique au paragraphe on remplit un moule 4*4*16 le serrage de mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs a chaque fois.

Après quoi le moule est arase recouvert d'une plaque de métal et entrepose dans la sale.

Entre 20h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvette sont démoulées et entreposées dans l'eau à 20°C ±1°C jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au Jour prévu les trois éprouvettes sont rompues en flexion et en compression ,la norme définit les classes de résistance des ciments d'après leur résistance a 2 (ou 7 jours) et a 28 jours tableau (I.4) ces age sont donne impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment,

Si des essais sont réalisés à d'autres ages, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau suivant :

Age	24h	48h	72h	7jours	≥ 28jours
Précision	±15min	±30min	±45min	±2h	±8h

Tableau III.2: Les limites de temps des essais mécaniques à d'autres ages.

La rupture de chaque éprouvette en flexion. Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion exprimée en Méga Pascal (MPa). Les demi -prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression Si F_c est la charge de rupture, la contraint de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{III.1})$$

Ou b c'est largeur de l'éprouvette = 40 mm.

Cette contraint est appelé résistance à la compression et, si F_c exprimée en Newton (N) , cette résistance exprimée en méga pascal (MPa).

Les résultats obtenus pour chacun des 3 demi prismes sont arrondis a 0,1 MPa près et on en fait la moyenne.

Si l'un des 3 résultats diffère de ±10% de cette moyenne, il est écarte et la moyenne est alors calculée à partir des 2 résultats restants, Auquel cas il convient de rechercher les raisons de cette disposition malaxage, mise en place, conservation?

Lorsque les résultats et satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment a l'âge considéré.

III.5.5 Résultats expérimentaux obtenus

Les résultats expérimentaux des essais mécaniques obtenus sont regroupés aux tableaux (III.3 et III.4), et aux figures (III.3, III.4, III.5, et III.6) donnant la moyenne de trois valeurs des essais réalisés.

Ciments	7j (Mpa)	14j (Mpa)	28j (Mpa)
CPJ ₀	13.1	27.2	35.6
CPJ ₂₋	14.5	33.6	38.5
CPJ ₄₋	15.8	34.3	39.7
CPJ ₆₋	13.5	27.9	35.0
CPJ ₈₋	13.1	26.8	34.2
CPJ ₁₀₋	12.5	25.0	32.5
CPJ ₂₊	14.8	32.5	37.8
CPJ ₄₊	15.4	33.2	38.2
CPJ ₆₊	13.7	26.0	36.5
CPJ ₈₊	13.2	25.2	34.8
CPJ ₁₀₊	12.4	24.5	32.8

Tableau III.3: Résultats des résistances mécaniques à la compression des mortiers étudiés.

Ciments	7j (Mpa)	14j (Mpa)	28j (Mpa)
CPJ ₀	3.83	4.33	4.98
CPJ ₂₋	4.52	4.98	5.26
CPJ ₄₋	4.78	5.18	5.67
CPJ ₆₋	4.23	4.83	5.12
CPJ ₈₋	3.67	4.02	4.92
CPJ ₁₀₋	3.55	3.84	4.78
CPJ ₂₊	4.62	4.95	5.13
CPJ ₄₊	4.75	5.2	5.36
CPJ ₆₊	4.23	4.65	5.02
CPJ ₈₊	3.78	4.22	4.67
CPJ ₁₀₊	3.32	3.8	4.56

Tableau III.4: Résultats des résistances mécaniques à la flexion des mortiers étudiés.

III.6 Masse volumique du mortier

L'on détermine la masse volumique après avoir retiré les éprouvettes des bacs et les avoir laissés à l'air libre pendant 20 minutes afin qu'elles aient une humidité normale. Juste avant d'essai mécanique au différent âge, on détermine la masse volumique en pesant l'éprouvette. la masse volumique est donné par la relation suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{III.2})$$

Avec

m: masse de l'éprouvette

V: volume de l'éprouvette

Les résultats obtenus sont regroupés au tableau (III .5) donnant la valeur moyenne de trois essais.

Ciments	Par Addition		Par substitution	
	masse (g)	masse volumique (g/cm ³)	masse (g)	masse volumique (g/cm ³)
CPJ ₀	565	2.200	565	2.200
CPJ ₂	562	2.190	556	2.171
CPJ ₄	560	2.187	552	2.155
CPJ ₆	557	2.175	549	2.142
CPJ ₈	552	2.155	548	2.140
CPJ ₁₀	559	2.145	544	2.125

Tableau III.5: Masse volumique des mortiers étudié.

L'augmentation du pourcentage d'incorporation de la chaux dans le Ciment (par substitution ou par addition) entraîne un abaissement (diminution) de la masse volumique des mortiers testés, ceci est due essentiellement à la différence de finesse entre le ciment et la chaux.

III.7 Discussion des résultats obtenus

Les résultats obtenus des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des différents mortiers testés à base de ciment active (ciment + chaux), nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation du taux de chaux incorporé (par addition ou par substitution) dans le ciment préparé influe sensiblement sur la résistance mécanique à la compression du mortier testé.
- L'activation du ciment par la chaux fine donne des résultats satisfaisants du point de vue économique et mécanique du mortier testé.
- Le mortier confectionné à base de ciment activé (4% de chaux) donne des résistances mécaniques meilleures (R_f et R_c) par rapport autres mortiers testés contenant (0%, 6%, 8% et 10%) à différents âges de durcissement (7j, 14j et 28j).

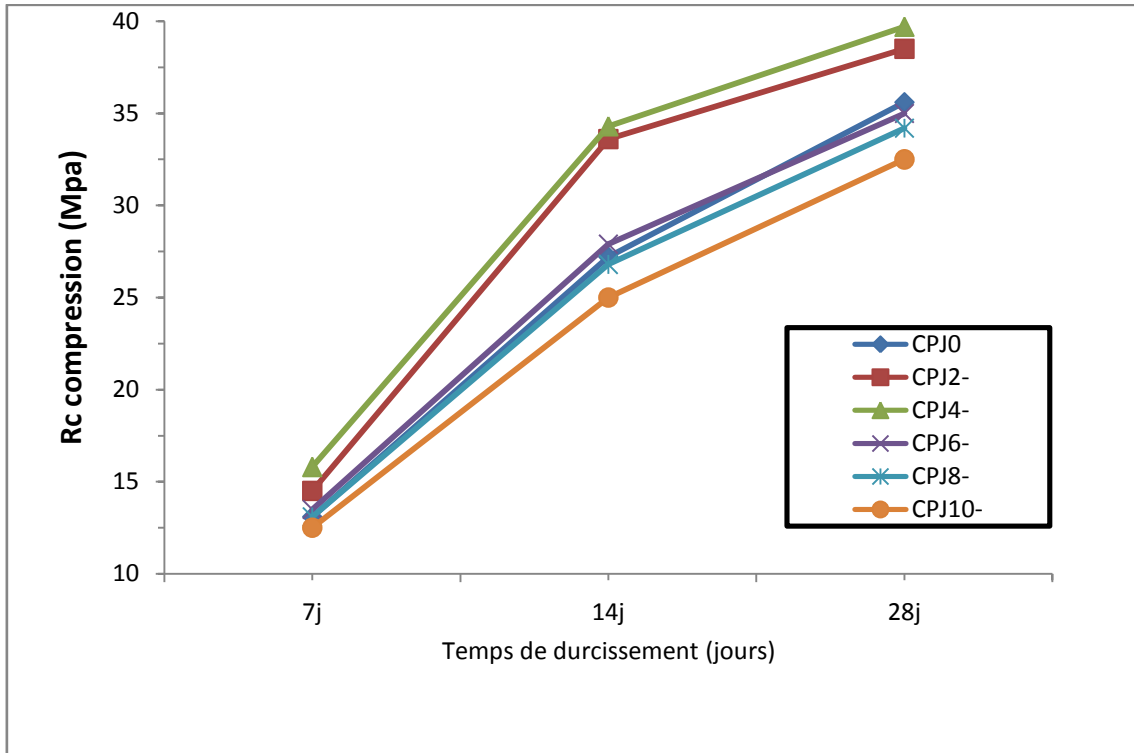


Figure III.3: Accroissement de la résistance mécanique à la compression des mortiers étudiés (par substitution).

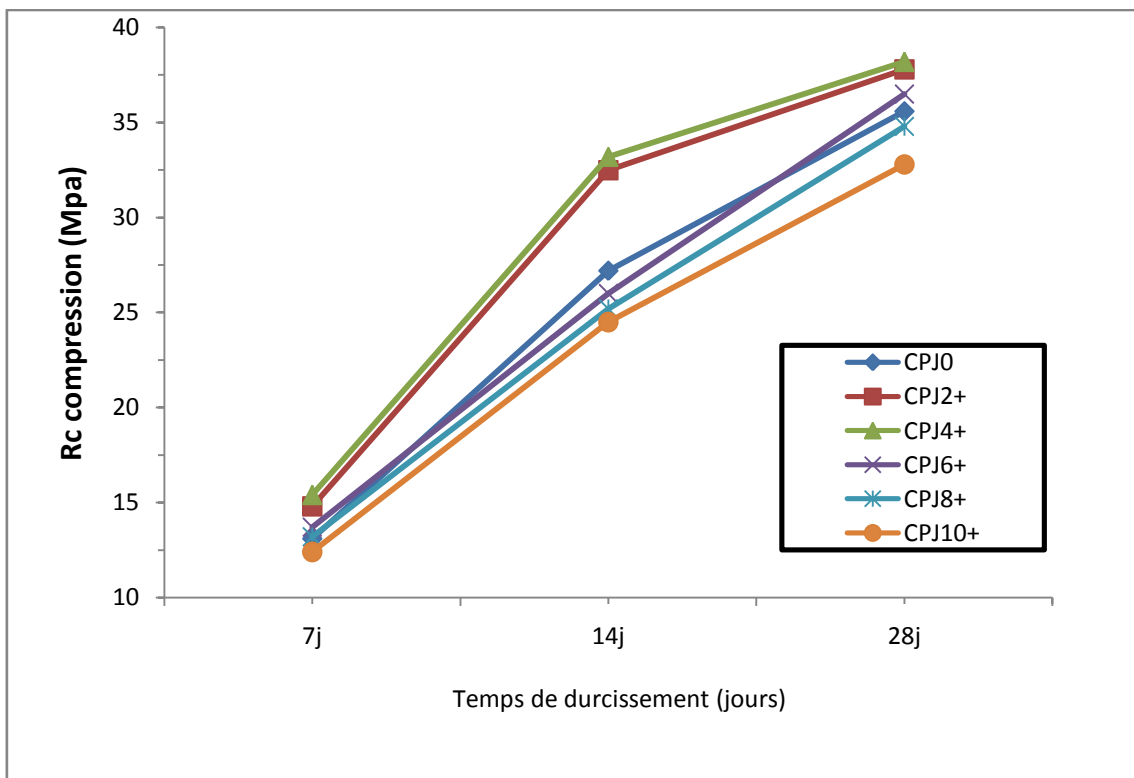


Figure III.4: Accroissement de la résistance mécanique à la compression des mortiers étudiés (par addition).

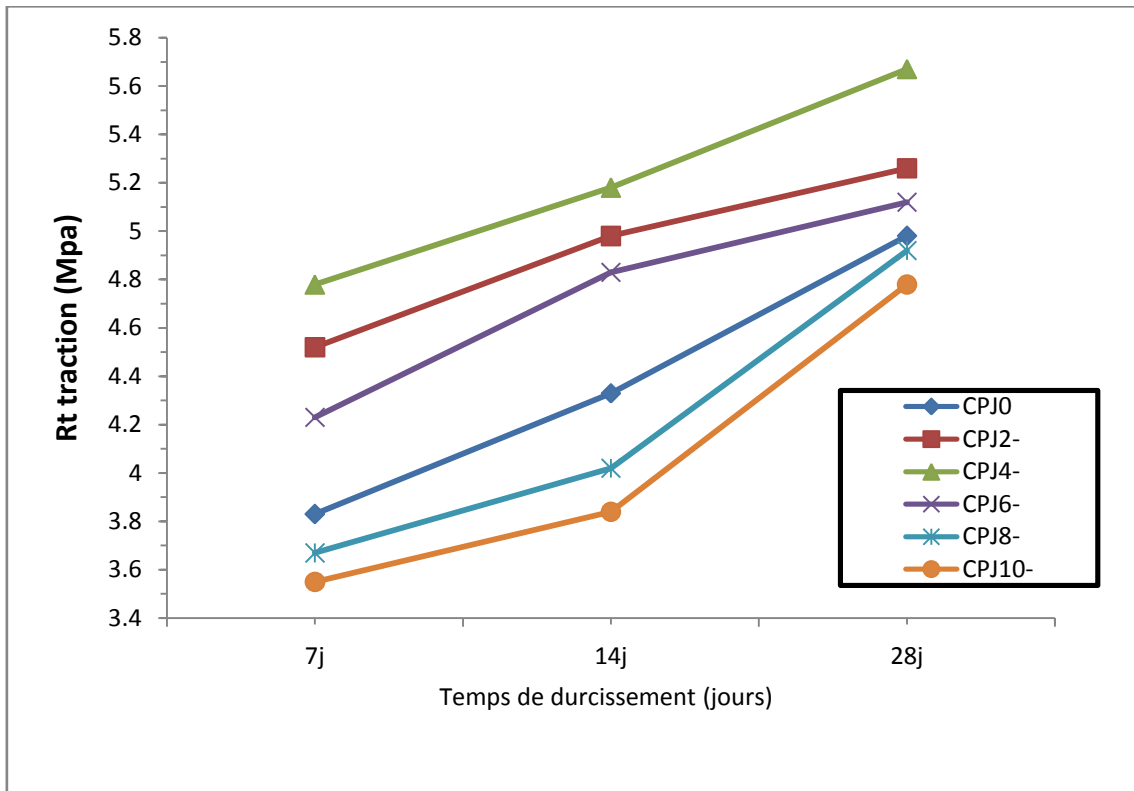


Figure III.5: Accroissement de la résistance mécanique à la flexion des mortiers étudiés (par substitution).

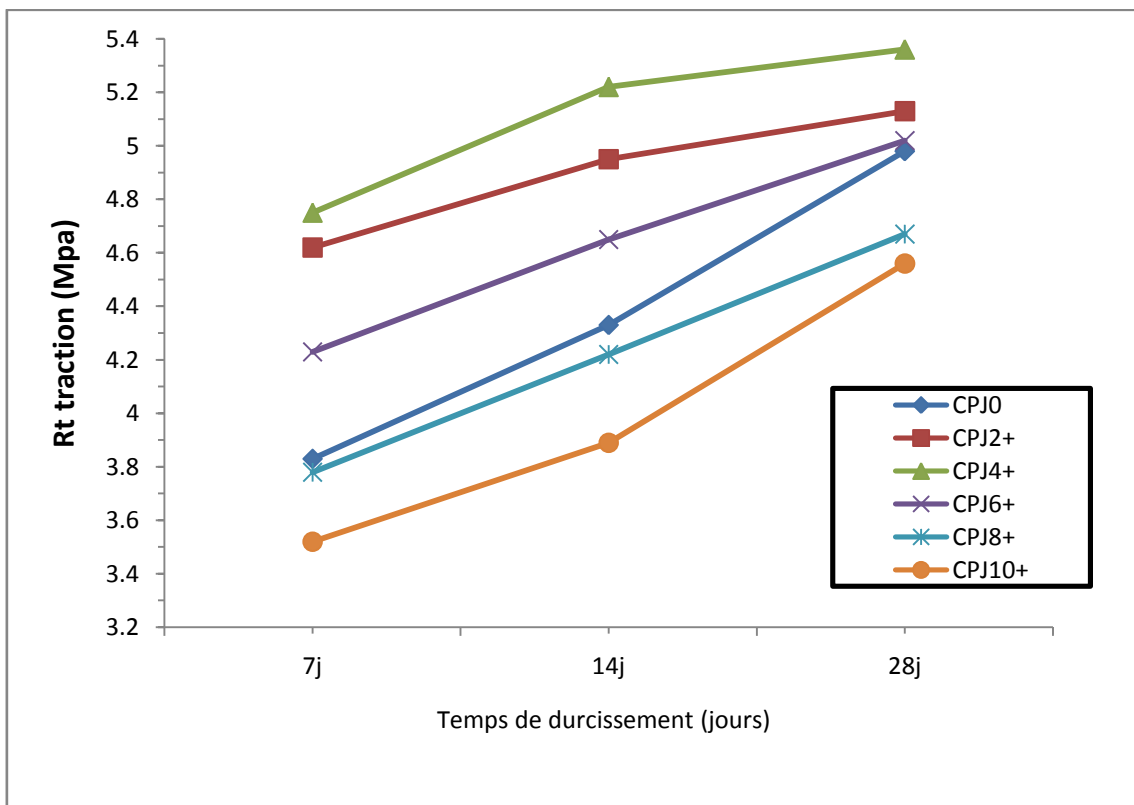


Figure III.6: Accroissement de la résistance mécanique à la flexion des mortiers étudiés (par addition).

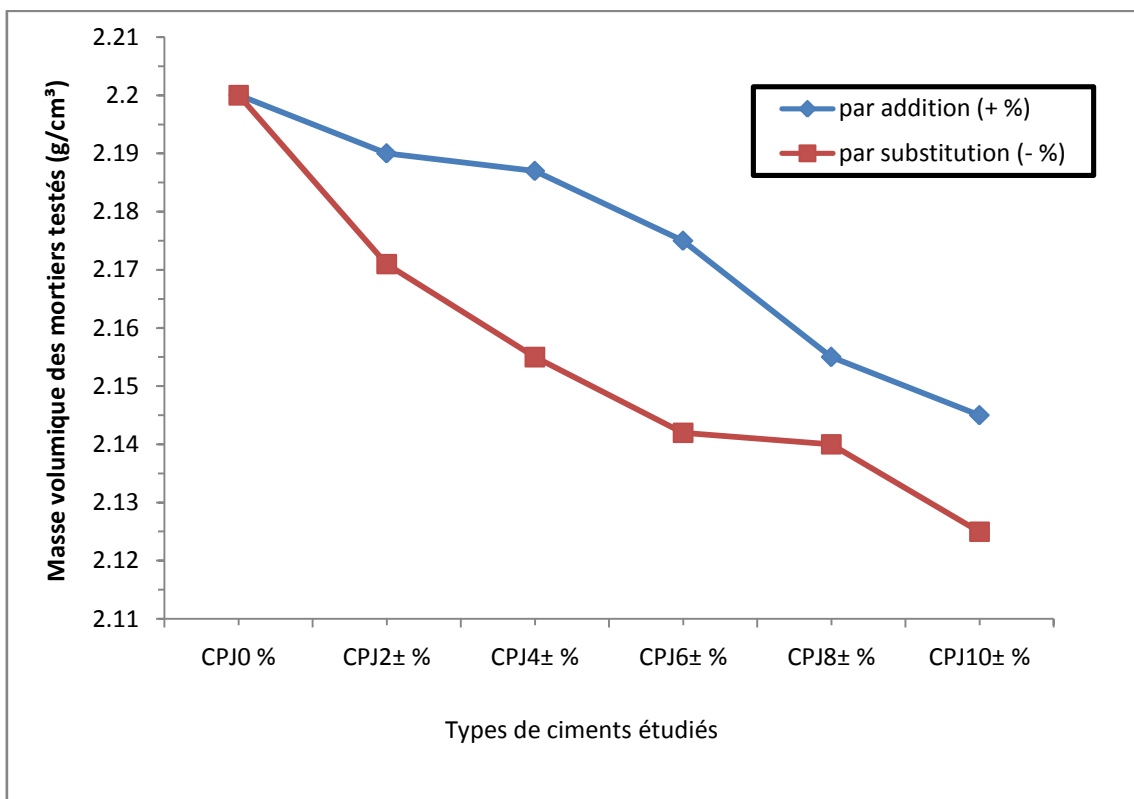


Figure III.7: Variation de la masse volumique des Mortiers testés.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

A l'issue de cette étude comparative les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✓ L'activation du ciment composé (CPJ) par la chaux fine comme accélérateur de prise et de durcissement améliore nettement le délai de prise et donne des résistances mécaniques supérieures par rapport au mortier témoin (0% de chaux), cela est due à la présence d'un taux élevé en C_3S (modules caractéristiques élevées) présent dans le ciment active (ciment+chaux).
- ✓ La substitution du ciment par la chaux fine (chaux + CPJ) influe sensiblement sur les caractéristiques physiques du liant mixte préparé (chaux + ciment) à l'état anhydre et à l'état hydraté (poids spécifique, consistance normale de la pâte de ciment et délais de prise) ainsi que sur les caractéristiques mécaniques du mortier (résistances mécaniques à la flexion et à la compression) .
- ✓ Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte de liant mixte (ciment + chaux), cela est du au fait que la surface de mouillage augmente au fur et à mesure que le ciment mixte est fortement activé par la chaux fine.
- ✓ Raccourcissement (diminution) des délais (temps) de prise de la pâte de liant préparé (chaux + ciment), cela s'explique par le fait que la réaction chimique est accélérée, ce qui veut dire que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus rapide en fonction de la quantité de chaux ajoutée (formation élevée des cristaux de C-H et C-S-H).
- ✓ Ces deux éléments (Portlandite : $Ca(OH)_2$ et le silicate de calcium hydraté C-S-H) sont les principaux responsables du phénomène d'hydratation et de durcissement de la pâte de liant préparé.
- ✓ La substitution d'une partie de CPJ par de la chaux fine (0% , 2% , 4% , 6% , 8% , 10%) améliore nettement les délais de prise (début et fin de prise) ainsi que les résistances mécaniques à la compression et à la flexion du mortier testé.
- ✓ Le mortier contenant jusqu'à 4% de chaux fine (activant minéral actif) donne des résistances mécaniques (R_f et R_c) meilleures que celle d'un mortier témoin (0% de chaux), cela confirme le rôle physique de la chaux fine ajoutée dans le liant hydraulique préparé (Ciment + chaux) qui consiste à remplir les vides laissés entre les grains de ciment.

Enfin, nous pouvons conclure que la méthode d'activation du CPJ par substitution est meilleure par rapport à celle par addition et entraîne une conservation et un maintien des performances mécaniques. La méthode d'activation par substitution présente un intérêt économique, elle réduit la quantité de ciment et occasionne un gain de résistance.

Références bibliographiques :

- [1] : Concrete the most widely used construction material, Adam Neville Symposium on Concrete Technology, 2nd CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, SP-154, Las Vegas, p. 257-266, 1995.
- [2] : Nicolas HYVERT : Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton (Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier-2009).
- [3] : BERRAIH MIMOUN : Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).
- [4] : Réunion d'ingénieur , matériaux de construction , Edition Eyrolles 1979
- [5] : H. Rumpf, Aufber. Techn., 1973. 2: p. 59-71.
- [6] : A. A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Trans. Roy. Soc, 1921. 163-198.
- [7] : H. Dombrowe, B. Hoffman, and W. Scheibe, Mode of action and possibilities for use of grinding aids. ZKG International, 1982. 35(11): p. 571-580.
- [8] : P. Blazy, J. Yvon, and E. A. Jdid, Fragmentation : Généralité, Théorie. Techniques de l'ingénieur, 1992. A5050.
- [9] : BELOUNIS radia, «Matériaux de construction», Cours en ligne ;Université Laarbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi; ww.univ-oeb.dz/fssa/wp-content/uploads/2020/03/chapitre-3-Les-Liants-Min
- [10] : H.F.W. Taylor, Cement chemistry. Thomas Telford publishing, 1998.
- [11] : Ciments Français, La fabrication des ciments. Eyrolles, 1993.
- [12] : C. Guerandel, E. Moudilou, and S. Tusseau-Nenez and M. N. De Noirfontaine, Modélisation thermodynamique du diagramme de phases du système CaO-SiO₂-Al₂O₃. rapport de fin d'étude ESIREM/CTG-Italcementi Group, 2006.
- [13] : CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [14] : Yassine SENHADJI : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2006).
- [15] : NORME ALGERIENNE : « Liants hydrauliques - ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité », NA 442 : 2000, Deuxième Edditions, IANOR
- [16] : J.M.GEOFFRAY, R.VALLADEAU : Morphologie et couleur des pouzzolanes. Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92-nov-déc, 1977- réf. 2116. pp91-94.
- [17]: Ayrinhac F., Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil Thèse de doctorat, INSA Toulouse, P.180, 2005.
- [18]: Norme AFNOR. NF EN 197-1, Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2011.

- [19] : Dreux G., Festa J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, Édition Eyrolles, 32-38, 2002.
- [20] : Delair S., Etude de l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen de produits pouzzolaniques, Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, P.318, 2008.
- [21] : Shi C., An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, Canadian journal of civil engineering, vol. 28(5), P. 778-786, 2001
- [22] : Kosmatkas., H., Panareswe. C., Alleng. .E., Cummmgs., (1991), Dosage et contrôle des mélanges de béton D, Association Canadienne du Ciment Portland. 2 13 p.*
- [23] : Baron. J, Olivier. JP et Weiss. JC : « Les ciments courants », « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles, 806p-1997.
- [24] : Verbeck. G.J, Helmut. 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.
- [25] : Malhotra, .M., (1987), « Propriétés du béton frais et du béton durci renfermant du laitier de haut fourneau granulé et broyé », Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton, Canmet, V.M. Malhotra, ed., p. 328-371
- [26] : 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.
- [27] : Barret P., Bertrandie D. «Fundamental hydration kinetic features of the major cement constituents: Ca_3SiO_5 and C_2S ». Journal de Chimie physique, vol. 83,n° 11/12, 1986, p. 765-775.
- [28] : E. Moudilou, Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présent en traces dans les matrices cimentaires. Thèse Université d'Orleans, 2000.Pozz
- [29] : Regourd, M., (1986), « Microstructure of cement blends including fly ash, silica fume, slag and fillers », Rapport CERLLH.
- [30] : Pierre MOUNANGA. «Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermo physiques ». Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [31] : 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.
- [32] : Réunion d'ingénieur , matériaux de constricton , Edition Eyrolles 1979.
- [33] : REZIG Mourad , BOUACHRINE Toufik « Effet de l'activation du ciment composé (CPI-CEM II) par la chaux fine sur les propriétés mécaniques du mortier » Mémoire de PFE. Université Mohamed Boudiaf-M'SILA 2005.

[34]: HEMOUMA Djamel eddine «Effet de Etude des caractéristiques élastiques d'une argile expansive stabilisée à forte teneur de mélange ciment-chaux» mémoire de master .Université Mohamed Boudiaf-M'SILA 2015.

[35] : Redha.B «Stabilisation des sols argileux par la chaux(cas su Kaolin du gisement de Djebel DEBAGH-GUELMA) ». Thèse de magister Université de Mohamed Boudiaf-M'SILA 2008.