



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de chimie industrielle

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie chimique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**AKACHA Imane**

Le : 07/09 /2020

## Impact des Alcalis sur les Performances de Ciment

---

### Jury :

Mr	A.Sakri	MCA	Université de Biskra	Président
Mme	H.Rehali	MCB	Université de Biskra	Examineur
Mme	C.Bouremel	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mr	S.Rahmani		SPA Biskria ciment	Co-encadreur

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au niveau du département contrôle qualité de la société SPA BISKRIA CIMENT.

Avant tout, je remercie Dieu le tout Puissant, qui m'a donnée la force, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

Il est difficile d'exprimer, en quelques lignes, mes remerciements à l'égard de mon encadreur de mémoire, **M<sup>me</sup> C. Bouremel**, maitre-conférence classe A à la faculté des sciences et de la technologie. En effet, j'ai le privilège d'être encadrée et orientée par elle, d'apprécier ses qualités et ses valeurs. Ce travail est donc pour moi, l'occasion de lui témoigner ma profonde gratitude pour ses précieux conseils, ses critiques constructives ses encouragements et sa rigueur scientifique qui m'ont été très utiles pour mener ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à **Mr A. Sakri** pour avoir accepté de présider le jury de soutenance et aussi **M<sup>me</sup> H. Rehali** pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie chaleureusement les travailleurs de la société SPA BISKRIA, qui m'a ouvert leurs portes et donné l'opportunité de réaliser ce projet et plus particulièrement **Mr A. Baiteche** le directeur de performance, **Mr S. Rahmani**, **Mr A. Gheddabi**, **Mr A. Kherchi** et **M<sup>lle</sup> A. Ghanem**, et toute l'équipe de performance et à tous ceux qui m'ont aidé durant mon stage pratique.

Enfin on remercie chaleureusement tous nos enseignants du Département de chimie industrielle, pour leurs soutiens et formation ainsi qu'à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

« IMANE »

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chères Parents

Qui m'a toujours donné un magnifique modèle de  
labeur et de persévérance,

A ma sœur et mon frère,

A tous ma famille,

A tous mes amis avec qui j'ai passé de meilleurs  
moments,

A toutes les personnes qui m'ont encouragé tout au  
long de mes études

« IMANE »

# Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xii
Introduction générale	1

## Chapitre I : Généralités sur le ciment

I.1.Définition de ciment	3
I.2.Historique de ciment	4
I.3.Constituants de base de ciment	6
I.3.1.Matières premières	7
I.3.1.1.Calcaire	7
I.3.1.1.1.Calcaire dur	7
I.3.1.1.2.Calcaire craie	7
I.3.1.2.Argile	7
I.3.2.Matériaux de correction	8
I.3.2.1.Minerais de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	8
I.3.2.2.Gypse ( $\text{CaSO}_4$ )	8
I.3.2.3.Bauxite( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	8
I.3.2.4.Sable ( $\text{SiO}_2$ )	9
I.3.3.Matières secondaires (Ajouts)	9
I.3.3.1.Pouzzolane	9
I.3.3.1.1.Pouzzolane naturelle	10
I.3.3.1.2.Pouzzolane artificielle	10
I.3.3.2.Laitiers de hauts fourneaux	10

---

I.3.3.3.Cendres volantes	10
I.3.3.4.Schistes calcinés (T)	11
I.3.3.5.Fumées de silice (D)	11
I.3.3.6.Fillers calcaires	11
I.3.4.Produit semi–fini (Le clinker)	11
I.3.4.1.Composition chimique du clinker	12
I.3.4.2.Composition minéralogique du clinker	13
I.3.4.2.1.Silicate tricalcique (Alite $C_3S$ )	13
I.3.4.2.2.Silicate bicalcique (Bélite $C_2S$ )	14
I.3.4.2.3.Aluminate tricalcique (Célite $C_3A$ )	14
I.3.4.2.4.Aluminoferrite tétracalcique ( $C_4AF$ )	14
I.3.5.Additifs	14
I.4.Types de ciment	14
I.5.Classes de résistance du ciment	16
I.5.1.Résistance courante	16
I.5.2.Résistance à court terme	16
I.6.Caractéristiques de ciment	17
I.6.1.Exigences chimiques	17
I.6.2.Caractéristiques physique et chimique de ciment	17
I.6.2.1.Indice d’hydraulicité	17
I.6.2.2.Temps de prise	18
I.6.2.3.Durcissement	18
I.6.2.4.Chaleur d’hydratation	18
I.6.2.5.Finesse de mouture	19
I.6.2.6.Retrait	19
I.6.2.7.Expansion	19
I.6.3.Caractéristiques mécaniques de ciment	20

I.6.3.1.Résistances mécaniques	20
I.7.Hydratation de ciment	20
I.7.1.Hydratation des silicates $C_3S$ et $C_2S$	21
I.7.2.Hydratation d'aluminate $C_3A$	21
I.7.3.Hydratation du $C_4AF$	22
I.8.Domaine d'utilisation des ciments	23

## **Chapitre II : Procédés de fabrication de ciment**

II.1.Définition	24
II.2.Types des procédés	25
II.2.1.Fabrication par voie humide	25
II.2.2.Fabrication par voie semi-humide	25
II.2.3.Fabrication par voie semi sèche	25
II.2.4.Fabrication par voie sèche	25
II.2.4.1.Extraction des matières première	25
II.2.4.2.Concassage	26
II.2.4.3.Pré-homogénéisation	26
II.2.4.4.Séchage et le broyage	27
II.2.4.5.Zone de cuisson	27
II.2.4.5.1.Préchauffage	28
II.2.4.5.2.Four rotatif	28
II.2.4.5.3.Refroidisseur	30
II.2.4.6.Stockage du clinker	31
II.2.4.7.Broyage de clinker	31
II.2.4.8.Transformation de clinker vers le ciment	32
II.2.4.9.Expéditions	33

**Chapitre III : Matériel et méthodes**

III.1.Introduction	34
III.2.Matériaux utilisés	34
III.2.1.ciment Portland (CEM I 42.5 R)	34
III.2.2.La poussière de By-pass	35
III.3.Préparation des échantillons	35
III.4.Méthodes chimiques	36
III.4.1.Détermination de chlorure	36
III.4.1.1.Définition	36
III.4.1.2.Principe	36
III.4.1.3.Mode opératoire	36
III.4.2.Détermination de la perte au feu (PAF)	37
III.4.2.1.Définition	37
III.4.2.2.Principe	37
III.4.2.3.Mode opératoire	38
III.4.3.Détermination d'humidité	38
III.4.3.1.Définition	38
III.4.3.2.Principe	39
III.4.3.3.Mode opératoire	39
III.4.4.Fluorescence X	40
III.4.4.1.Définition	40
III.4.4.2.Principe	40
III.4.4.3.Préparation des perles	41
III.5.Méthodes physiques et mécanique	41
III.5.1.Détermination du pourcentage de refus	41
III.5.1.1.Définition	41

---

III.5.1.2.Mode Opérateur	41
III.5.2.Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine	42
III.5.2.1.Définition	42
III.5.2.2.Principe	42
III.5.2.3.Mode opératoire	43
III.5.3.Consistance normale	44
III.5.3.1.Définition	44
III.5.3.2.Pâte normale	44
III.5.3.3.Mode opératoire	45
III.5.3.3.1.Malaxage de la pâte de ciment	45
III.5.3.3.2.Remplissage du moule	45
III.5.3.3.3.Essai de pénétration	45
III.5.4.Essais de prise	46
III.5.4.1.Définition	46
III.5.4.2.Principe	47
III.5.4.3.Mode opératoire	47
III.5.5.Essai d'expansion	47
III.5.5.1.Définition	47
III.5.5.2.Principe	48
III.5.5.3.Mode opératoire	48
III.5.6.Essais mécaniques (flexion–compression)	49
III.5.6.1.Définition	49
III.5.6.2.Objectif de l'essai	49
III.5.6.3.Principe de l'essai	49
III.5.6.4.Préparation du mortier	49
III.5.6.5.Préparation des éprouvettes	50
III.5.6.6.Essais des éprouvettes	52

III.5.6.6.1.Résistance à flexion	52
III.5.6.6.2.Résistance à la compression	52
III.6.Analyse du béton	53
III.6.1.Préparation de béton	53
III.6.2.Test d'affaissement	53
III.6.2.1.But du test	53
III.6.2.2.Mode opératoire	54
III.6.3.Détermination de la résistance	54
III.6.3.1.Préparation des éprouvettes	54
III.6.3.2.Test de résistance	55

#### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1.Introduction	56
IV.2.Analyses chimiques des échantillons	56
IV.3.Analyses physiques et mécaniques des échantillons élaboré	57
IV.3.1.Refus	57
IV.3.2.Surface spécifique par la méthode Blaine	58
IV.3.3.Consistance	58
VI.3.4.Temps de prise	59
IV.3.4.Expansion à l'eau chaude	60
IV.3.5.Résistance à flexion et résistance à la compression	61
IV.4.Analyse du béton	63
IV.4.1.Affaissement	63
IV.4.2.E/C dans le béton	64
IV.4.3.Résistance à la compression	65
Conclusion générale	67
Bibliographie	68

Résumés

Annexes

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> : Principaux constituants du ciment portland	3
<b>Tableau I-2</b> : Les 27 produits de la famille des ciments courants	15
<b>Tableau I-3</b> : Classes de résistants de ciment	16
<b>Tableau I-4</b> : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques	17
<b>Tableau I-5</b> : Produits d'hydratation du clinker	22
<b>Tableau I-6</b> : Domaine d'utilisation des ciments	23
<b>Tableau II-1</b> : Récapitulatif des réactions mises en jeu	30
<b>Tableau III-1</b> : Caractéristiques physique et mécaniques de CEM I 42.5 R	34
<b>Tableau III-2</b> : Caractéristiques chimiques de CEM I 42.5 R	34
<b>Tableau III-3</b> : Caractéristiques chimiques de poussière de By-Pass	35
<b>Tableau III-4</b> : Compositions du mortier	50
<b>Tableau III-5</b> : Compositions du béton	53
<b>Tableau IV-1</b> : Résultats du chlorure	56
<b>Tableau IV-2</b> : Résultats de la perte au feu	57
<b>Tableau IV-3</b> : Résultats d'humidité	57
<b>Tableau IV-4</b> : Résultats de la fluorescence X	57
<b>Tableau IV-5</b> : Résultats de la finesse 45 $\mu$	57
<b>Tableau IV-6</b> : Variation de SSB en fonction du pourcentage des alcalis	58
<b>Tableau IV-7</b> : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis	59
<b>Tableau IV-8</b> : Variation du temps de prise en fonction du pourcentage des alcalis	60
<b>Tableau IV-9</b> : Variation de l'expansion en fonction du pourcentage des alcalis	61
<b>Tableau IV-10</b> : Variation de la résistance à flexion en fonction du pourcentage des alcalis	62
<b>Tableau IV-11</b> : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des alcalis	63
<b>Tableau IV-12</b> : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des alcalis	64

<b>Tableau IV-13</b> : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis	65
<b>Tableau IV-14</b> : Variation de la résistance du béton en fonction du pourcentage des alcalis	66

---

## Liste des figures

<b>Figure I-1</b> : Poudre de ciment	4
<b>Figure I-2</b> : Constituants de base de ciment	6
<b>Figure I-3</b> : Grains de pouzzolane	9
<b>Figure I-4</b> : Nodules de clinker de taille environ 20 mm	12
<b>Figure I-5</b> : Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales	13
<b>Figure I-6</b> : Flux thermique dégagé par une pâte de ciment Portland en cours d'hydratation	20
<b>Figure II-1</b> : Différentes étapes de fabrication du Ciment	24
<b>Figure II-2</b> : Halls de Pré-homogénéisation	26
<b>Figure II-3</b> : Broyeur à meules verticaux(VRM)	27
<b>Figure II-4</b> : Représentation d'un système de pré calcination	28
<b>Figure II-5</b> : Four rotatif a ciment	29
<b>Figure II-6</b> : Refroidisseur à grille	31
<b>Figure II-7</b> : Silo de stockage de clinker	31
<b>Figure II-8</b> : Broyeur à boulet	32
<b>Figure II-9</b> : Transformation de clinker vers le ciment	32
<b>Figure II-10</b> : Expéditions de ciment	33
<b>Figure III-1</b> : Etapes de la détermination de chlorure	37
<b>Figure III-2</b> : Four de calcination	38
<b>Figure III-3</b> : Etuve de séchage	39
<b>Figure III-4</b> : Appareil de fluorescence X	40
<b>Figure III-5</b> : Perleuse et une perle préparée	41
<b>Figure III-6</b> : Appareil de tamisage alpin	42

---

<b>Figure III-7</b> : Tamis 45 $\mu$ m et 90 $\mu$ m	42
<b>Figure III-8</b> : Principe de fonctionnement de la technique de Blaine	43
<b>Figure III-9</b> : Appareil de SSB	44
<b>Figure III-10</b> : Malaxage de la pâte de ciment	45
<b>Figure III-11</b> : Appareil de Vicat manuel	46
<b>Figure III-12</b> : Appareil de vicat automatique	47
<b>Figure III-13</b> : Principe de l'essai d'expansion	48
<b>Figure III-14</b> : Moule le Chatelier	49
<b>Figure III-15</b> : Malaxage d'un mortier	50
<b>Figure III-16</b> : Moule des mortiers	50
<b>Figure III-17</b> : Appareil a choc	51
<b>Figure III-18</b> : Armoire humide	51
<b>Figure III-19</b> :Eprouvettes	52
<b>Figure III-20</b> : Appareil de résistance à la flexion	52
<b>Figure III-21</b> : Appareil de résistance à la compression	53
<b>Figure III-22</b> : Test d'affaissement	54
<b>Figure III-23</b> : Préparation des éprouvettes	55
<b>Figure III-24</b> : Appareil de résistance	55
<b>Figure IV-1</b> : Variation de SSB en fonction du pourcentage des alcalis	58
<b>Figure IV-2</b> : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis	59
<b>Figure IV-3</b> : Variation du temps de prise en fonction du pourcentage des alcalis	60
<b>Figure IV-4</b> : Variation de l'expansion à chaude en fonction du pourcentage des alcalis	61
<b>Figure IV-5</b> : Histogramme de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage des alcalis	62

<b>Figure IV-6 :</b> Histogramme de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des alcalis	63
<b>Figure IV-7 :</b> Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des alcalis	64
<b>Figure IV-8 :</b> Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis	65
<b>Figure IV-9 :</b> Histogramme de la résistance du béton en fonction du pourcentage des alcalis	66

*Introduction  
générale*

## Introduction générale

L'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles la mieux structurée et la mieux répartie [1].

Les matériaux cimentaire recouvrent une très grande partie de la planète et leur utilisation est toujours en forte croissance du fait de l'accroissement global de la population et de la nécessité de construire de grands ensembles urbains [2]. Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés [3] à cause de ses performances mécaniques, sa tenue au feu et son coût compétitif [4].

L'utilisation de liants remonte à l'antiquité, les égyptiens avaient découvert un liant calcique, obtenu par cuisson de roches calcaires, la chaux vive produite était préalablement éteinte par de l'eau, Son durcissement s'effectuait par carbonatation à l'air, plus tard les romains ont introduit des cendres volcaniques (la pouzzolane) à la chaux vive, ce matériau durcissait à température ambiante par ajout d'eau, il souffrit cependant de la concurrence de la chaux et de la brique et resta peu utilisé. C'est seulement au XIX<sup>ème</sup> siècle qu'apparut le ciment que nous connaissons il doit son essor aux travaux de recherche et à la mise au point du ciment artificiel par Louis Vicat actuellement, le ciment est présent dans la plus part des édifices il est devenu un matériau incontournable dans la construction [5].

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'un matériau minéral finement moulu. Il réagit avec l'eau en donnant une pâte qui durcit progressivement. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance mécanique et sa stabilité, même sous l'eau [6], le ciment d'aujourd'hui est un produit très élaboré aboutissement de technologies très avancées [7].

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits de béton sur chantier ou en usine.

Exigences climatiques, résistances à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus approprié. Pour faire ce choix, il importe de connaître les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments prévus par la normalisation [8].

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige aussi bien un savoir-faire, qu'une bonne maîtrise des différents outils et techniques qui entrent dans sa production et les contrôles rigoureux et continus de sa qualité [1].

L'objectif de notre travail est d'évaluer expérimentalement l'impact des alcalis sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment : sachant que sa résistance à la compression et la flexion, ainsi que le temps de prise, la consistance normalisée .... etc. et puis la recherche d'une valeur d'ajout optimum des alcalis au ciment afin d'obtenir un ciment avec une meilleure résistance conforme à la norme.

Les alcalis ou les alcalins proviennent des matières premières, en particulier de certains groupes argileux. Les alcalins solubles du ciment peuvent dépasser 1 % massique et la teneur en  $K_2O$  est en général plus élevée que celle en  $Na_2O$  [9]. Dans notre travail nous avons utilisé la poussière de By-pass car elle est une matière fortement alcaline, et les caractéristiques de ce matériau est proche des caractéristiques de produit semi-fini.

Ce mémoire s'articule sur quatre chapitres, répartie en deux chapitres pour la synthèse bibliographique et deux autres chapitres pour le travail expérimental.

**Le premier chapitre :** est consacré aux généralités sur le ciment.

**Le deuxième chapitre :** concerne les différents processus et étapes de fabrication du ciment, principalement par voie sèche sont détaillées.

**Le troisième chapitre :** présente la méthodologie d'étude utilisée. Les différents matériaux utilisés au cours de l'étude ainsi que les méthodes et essais utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques, les caractéristiques physiques et chimiques y sont explicités.

**Le quatrième chapitre :** décrit tous les résultats obtenus dans le cadre des différents essais réalisés et des interprétations de ces résultats.

Ce travail se termine par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus.

*Chapitre I :*  
*Généralités sur le ciment*

## I. Généralités sur le ciment

### I.1. Définition de ciment

Le ciment est un liant hydraulique durcissant dans l'eau, qui après hydratation présente un degré de solubilité très faible. Ce ciment, se présentant sous forme d'une très fine poudre, possède la propriété d'agglomérer des matériaux solides inertes après mélange à l'eau en leur assurant une cohésion et adhésion très fortes.

D'après la norme "AFNOR", le ciment est défini comme étant une matière finement broyée composée d'un pourcentage de clinker portland et d'ajouts (gypse, pouzzolane,...) [10].

D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être définie comme un mélange d'oxyde basique CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO<sub>2</sub> noté S, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> noté A, ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> noté F, en notation cimentaire [11].

Il existe trois grandes catégories de ciments hydrauliques :

- **Les ciments Portland** : constitués majoritairement de silice et de chaux [11], est une poudre de grains anhydres essentiellement composée de clinker et de sulfate de calcium dans un rapport massique d'environ 95-5%. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange d'argile et de calcaire dans une proportion de 20-80% [12].

**Tableau I-1** : Principaux constituants du ciment portland [13].

Dénomination	Notation cimentaire	Composition
Le silicate bicalcique (bélite)	C <sub>2</sub> S	2CaO.SiO <sub>2</sub>
Le silicate tricalcique (alite)	C <sub>3</sub> S	3CaO.SiO <sub>2</sub>
L'aluminate tricalcique	C <sub>3</sub> A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Le ferro-aluminate tétracalcique	C <sub>4</sub> AF	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

- **Les ciments fondus** : sont une alternative intermédiaire entre les ciments portland et les ciments réfractaires.
- **Les ciments alumineux** : forment le groupe des ciments réfractaire, le terme ciment alumineux fut utilisé quand ce type de ciment contenant 32-45% d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a été utilisé

après la guerre mondiale, pour le distinguer des ciments type portland qui contiennent moins d'alumine et plus de silice [14].



**Figure I-1** : Poudre de ciment [15].

## **I.2. Historique de ciment**

Dans la préhistoire et au début l'antiquité les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélagiques de Grèce ou les murs incas [8]. Le ciment employé par les premiers Egyptiens, et qu'on trouve encore aux joints des blocs des pyramides, était un gypse impur calciné. La chaux fut d'abord utilisée il y a 2000 ans par les romains qui s'aperçurent qu'en la mélangeant à de l'eau et des pouzzolanes (terres volcaniques faites de silice et d'alumine), on obtenait un mortier qui durcissait même sous l'eau. Ils avaient inventé le ciment qui doit sa résistance à la formation de cristaux d'hydrosilicate de calcium. Ainsi ont été construits le Panthéon de Rome, le Colisée et le Pont du Gard. Par la suite, le secret de durabilité de ces constructions fut perdu et, pendant tout le Moyen Age, la qualité et la longévité des mortiers de chaux furent médiocres. Si on en connaît aujourd'hui les raisons (mauvaise cuisson de la chaux, mauvais compactage et surtout absence de pouzzolanes), ce n'est qu'au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle que les savants se penchèrent sur le problème du ciment, intrigués par le fait que certaines chaux produisaient des mortiers qui durcissaient bien sous l'eau, alors que la plupart, préparées et gâchées de la même manière, s'y désintégraient [16].

Les événements ayant contribué aux ciments d'aujourd'hui peuvent être résumés comme ceci :

- Vers 800 – 700 avant J.C., utilisation par les Etrusques de la pouzzolane en mélange avec la chaux grasse. Le mot pouzzolane vient de Pozzuoli, localité au pied du Vésuve où furent exploitées les cendres volcaniques.

- Durant l'époque romaine, utilisation de mélanges de pouzzolanes et de chaux grasse comme liant. VITRUVÉ, architecte romain du 1er siècle avant J.C. conseillait de mélanger deux parts de pouzzolane pour une part de chaux grasse.

- De l'époque romaine à la seconde moitié du 18ème siècle : la recette du liant imaginée par les romains se perd : on ne fera plus de béton. Le liant pour maçonnerie sera à base de chaux grasse ou de chaux faiblement à moyennement hydraulique.

- Durant la seconde moitié du 18ème siècle et au début du 19e, plusieurs chercheurs remarquent que la propriété de certaines chaux de durcir sous eau provient de la présence de proportions importantes de matières argileuses dans les roches calcaires.

L'histoire des ciments modernes commença en 1756, SMEATON compare la dureté de ces chaux hydrauliques après durcissement à celle des meilleures pierres exploitées dans la région de Portland, nom qui deviendra célèbre par la suite.

- En 1796, PARKER commence à fabriquer sous le nom de 'ciment romain', un liant obtenu par la cuisson modérée de concrétions calcaires très argileuses.

- En 1818, VICAT, ingénieur français, explique l'hydraulicité des chaux par la réaction entre la silice et l'alumine des argiles et la chaux des calcaires lors de la cuisson. .

- C'est en 1824, en dépit de toutes les découvertes antérieures, que l'on peut affirmer que le ciment Portland est né [17]. En effet, ASPDIN prit un brevet pour la fabrication d'un ciment Portland, mais garda secrètes la composition et la température de cuisson. Ce brevet comportait encore beaucoup de points obscurs [8].

- En 1840, Louis Vicat découvre les principes d'hydraulicité des ciments : une cuisson à la température de fusion- soit 1450°C- qui permet d'obtenir le clinker et la régulation de prise par ajout de sulfate de calcium [18].

- A la fin du XIXe siècle, en France. Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'américain Bogue au XXe siècle.

• En 1890, on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : le ciment alumineux fut découvert par J-Bied, en 1908 [8].

### I.3. Constituants de base de ciment

Ces compositions diffèrent d'un ciment à l'autre selon la composition minéralogique voulue qui détermine les autres propriétés du produit fini (temps de prise, résistance mécanique, résistance aux sulfates, résistance à l'attaque de l'eau de mer...).

Toutes ces propriétés sont définies pendant et après l'hydratation et le durcissement du ciment portland.

La composition chimique d'un ciment est donnée en pourcentages des différents constituants de ses minéraux. Les constituants principaux sont  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et d'autres en très faibles pourcentages. Ces pourcentages dépendent essentiellement de la composition de la farine crue qui, à son tour, dépend des fractions dosées en matières premières (calcaire, argile,...) et de leurs compositions. Cependant,  $\text{CaO}$  provient de la décomposition du calcaire par contre,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont des constituants de l'argile. Les autres composés, en faibles teneurs, se trouvent comme impuretés dans la matière première [10].



Figure I-2 : Constituants de base de ciment [19].

### **I.3.1.Matières premières**

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont le calcaire et l'argile à des proportions variées. Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage.

#### **I.3.1.1.Calcaire**

Roche sédimentaire essentiellement composée de « Carbonate de calcium » de formule chimique «  $\text{CaCO}_3$  ». Le calcaire fait partie des roches carbonatées.

Un terrain ou une formation rocheuse est considéré comme calcaire lorsqu'il contient plus de 50% de  $\text{CaCO}_3$ .

Leur couleur peut varier du blanc au noir en passant par toute la gamme des gris, des beiges ou des roux. Ils peuvent être durs et compacts ou au contraire tendres et poreux. Ils peuvent présenter un grain très fin ou au contraire avoir une texture grossière (gros cristaux) [19].

Le calcaire est généralement extrait de la carrière. Il peut rentrer dans des proportions allant jusqu'à 75 % de la masse totale du mélange cru [20].

On classe les calcaires comme suit :

##### **I.3.1.1.1.Calcaire dur**

On attribue ce nom au calcaire contenant un minimum de 80 % de  $\text{CaCO}_3$  et un maximum de 5 % de  $\text{MgCO}_3$ . Les calcaires durs sont imperméables à l'eau [20].

##### **I.3.1.1.2.Calcaire craie**

Blanchâtre, tendre et friable plus de 90% de  $\text{CaCO}_3$ , c'est une roche meuble formée par l'accumulation d'algues microscopiques [19].

#### **I.3.1.2.Argile**

L'argile recouvre toutes les petites particules formées par les processus d'érosion ou d'altération des roches , c'est-à-dire aussi bien du sable ( $\text{SiO}_2$ ), des oxydes (comme l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui donne la couleur rouge à certains sols), des carbonates comme la calcite, que tout autre minérale [21].

Les argiles peuvent être classées de plusieurs manières du point de vue minéralogique on peut classer les argiles en différents groupes :

- Groupe de l'halloysite :  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Groupe de kaolin :  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Groupe de la montmorillonite :  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- Groupe des minéraux argileux micacés (séricite)
- Groupe des minéraux argileux magnésiens (sépiolite) [22].

### **I.3.2. Matériaux de correction**

Des correcteurs, minerai de fer qui apporte  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , bauxite pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , calcaire pour  $\text{CaO}$ , sable pour  $\text{SiO}_2$  sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) [20].

#### **I.3.2.1. Minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )**

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite.

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferri-fère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels. Les principaux minerais de fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes [23].

#### **I.3.2.2. Gypse ( $\text{CaSO}_4$ )**

Le gypse d'origine sédimentaire est une roche saline de la famille des évaporites. Il se forme également en milieu hydrothermal, ou comme produits d'oxydation de sulfures.

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [24]. notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement [25].

#### **I.3.2.3. Bauxite ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**

La bauxite est une roche découverte en 1821 par Pierre Berthier aux Baux-de-Provence, près d'Avignon, d'où son nom. Elle est caractérisée par sa forte teneur en alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (environ 50% en masse du minerai) et en oxydes de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (15% environ) qui donne sa couleur rouge au minerai et aussi de la silice  $\text{SiO}_2$  (en général moins de 5 %).

A partir de la bauxite, on produit l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dont l'électrolyse à l'état fondu permet d'obtenir l'aluminium [26].

#### **I.3.2.4.Sable ( $\text{SiO}_2$ )**

Le sable est avant tout un matériau naturel, issu du quartz ou du silex, largement utilisé dans le domaine de la construction. Le sable est constitué de grains plus ou moins fins, dont la dimension varie de 0,15 mm à 4,76 mm. En fonction de la taille des grains, on parle de sable fin, de gros sable ou de sable graveleux. Il existe ainsi différents types de sables, qui auront différentes utilisations en construction [27].

#### **I.3.3.Matières secondaires (Ajouts)**

##### **I.3.3.1.Pouzzolane**

Le terme couvre une série de matières naturelles de produit naturels caractérisés par une forte teneur en silice (50%), et l'aptitude à fixer la chaux en présence de l'eau à la température ambiante, pour formes des silicates et aluminates de calcium hydratés.

En association avec un ciment portland (ciment dégagement beaucoup de chaux hydratée lors de processus d'hydratation) la pouzzolane agit en fixant progressivement cette chaux.

Ce faisant, elle accroît à long terme la résistance mécanique et améliore le comportement aux agents agressifs par la réduction de teneur en chaux libre.

En outre, la poudre très fine que constitue la pouzzolane, améliore l'imperméabilité en colmatant les capillaires [21].



**Figure I-3 :** Grains de pouzzolane [28].

### **I.3.3.1.1. Pouzzolane naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présente des propriétés pouzzolanique .elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %) d'alumine et d'oxyde de fer [29].

### **I.3.3.1.2. Pouzzolane artificielle**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composees de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [30].

### **I.3.3.2. Laitiers de hauts fourneaux**

Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable .il est obtenue par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau [31]. Ils sont traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane(Le laitier vitrifié)
- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons (Le laitier cristallisé) [32].

### **I.3.3.3. Cendres volantes**

Les cendres volantes sont des fines particules recueillies lors du dépoussiérage des gaz résultant de la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques. Leur composition est en relation avec les différents types de matières incombustibles présentes dans le charbon. D'une façon générale, les éléments présents sont : le silicium, l'aluminium, le fer, le calcium et le magnésium [33].

Selon leurs compositions, on distingue deux grandes familles de cendres volantes :

- Les cendres volantes siliceuses (V) elles peuvent présenter des propriétés pouzzolaniques.
- Les cendres volantes calciques (W) elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques [34].

#### **I.3.3.4.Schistes calcinés (T)**

Il est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C.il contient des phases du clinker (silicate bicalcique et aluminat monocalcique) ainsi que des oxydes réagissant de façon pouzzolanique ( $\text{SiO}_2$ ).le schiste calciné finement broyé présente outre des propriétés pouzzolanique , des propriétés fortement hydrauliques [35].

#### **I.3.3.5.Fumées de silice (D)**

C'est un sous-produit des usines de fabrication d'alliages de silicium et de Ferro-silicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon [24]. Elles sont formées des particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$ ).pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principale elles doivent comporter au moins 85 % (en masse) de silice amorphe et avoir une surface spécifique supérieure à 15m<sup>2</sup>/g, les fumé de silice ont des propriétés pouzzolaniques avérées [36].

#### **I.3.3.6.Fillers calcaires**

Les fillers calcaires sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils se présentent sous forme de poudres non abrasives, principalement constituées de cristaux rhomboédriques de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), de dolomie ( $(\text{Ca},\text{Mg})_2\text{CO}_3$ ) et de quartz ( $\text{SiO}_2$ ) et Quelques carbonates , Leur surface spécifique est généralement proche de celle du ciment. Les fillers calcaires ne réagissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage [37].

#### **I.3.4.Produit semi-fini (Le clinker)**

Le ciment Portland est un mélange de clinker 95% et de sulfate de calcium 5%. Le clinker est obtenu par cuisson à 1420°C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire (80%) et d'argile (20%) [8].



**Figure I-4** : Nodules de clinker de taille environ 20 mm [38].

#### **I.3.4.1. Composition chimique du clinker**

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

Le clinker portland comprend les oxydes suivant :

- $\text{CaO}$  : Il est lié avec  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , à l'état libre, il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation (expansion).

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

- $\text{SiO}_2$  : Il réagit avec  $\text{CaO}$  en donnant les silicates de calcium, un pourcentage élevé donne beaucoup de  $\text{C}_2\text{S}$  parce qu'il réagit avec tout le  $\text{CaO}$ , dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme. L'augmentation de  $\text{C}_2\text{S}$  donne une grande durabilité au ciment et surtout au milieu agressif, sa teneur est de 21% à 24%.

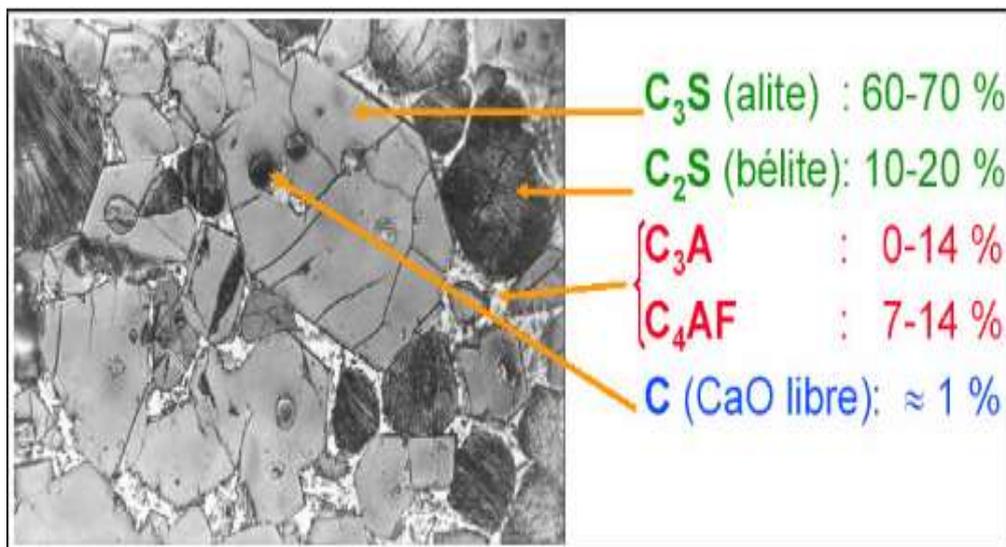
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  : Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7%.

- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  : Il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2.5% à 4%.

- $\text{MgO}$  : Une quantité élevée en  $\text{MgO}$  à l'état libre se trouve sous forme de périclase, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation, sa teneur est inférieure à 5%.

- $\text{TiO}_2$  : Sa teneur est inférieure à 0.5%, il provient des argiles.
- $\text{MnO}_2$  : Il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matière secondaire, sa teneur est 1.5%.
- $\text{P}_2\text{O}_5$  : Se trouve sous forme d'impureté dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2%, il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0.2 à 0.3%.
- $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  : Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0.5 à 1% [8].

#### I.3.4.2. Composition minéralogique du clinker



**Figure I-5** : Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales [38].

##### I.3.4.2.1. Silicate tricalcique (Alite $\text{C}_3\text{S}$ )

Le  $\text{C}_3\text{S}$  est le constituant majeur du clinker, sa proportion massique est de l'ordre de 60-65% [39]. L'alite contient des traces de Mg, Al ou Fe en substitution ou en insertion dans le réseau cristallin, ce qui améliore la réactivité du produit.

La formation de l'alite est essentiellement une réaction de dissolution partielle du silicate bi-calcique ( $\text{C}_2\text{S}$ ) et de la chaux, puis précipitation dans la phase liquide d'aluminates.

Cependant, l'alite peut aussi se former par diffusion de CaO dans la bélite par réaction solide-solide, selon l'équation suivante :



C'est essentiellement l'alite qui confère la résistance mécanique au ciment, en particulier à court terme [20].

#### **I.3.4.2.2.Silicate bicalcique (Bélite C<sub>2</sub>S)**

La proportion massique du C<sub>2</sub>S contenu dans le clinker est environ de 10 à 20%. L'hydratation du C<sub>2</sub>S est semblable à celle du C<sub>3</sub>S mais se distingue par une cinétique plus lente et aussi une teneur en portlandite plus faible. La réaction d'hydratation du C<sub>2</sub>S est moins exothermique que celle du C<sub>3</sub>S [39].

#### **I.3.4.2.3.Aluminate tricalcique (Célite C<sub>3</sub>A)**

La phase aluminate est formée par l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) est également connue sous le nom de Célite. Ce composé se forme à une température supérieure à 800°C à partir de l'aluminate monocalcique CA (CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) par un ajout continu de chaux. Lors du refroidissement du clinker, la phase fondue conduit à une forme cristalline stable à température ambiante [9].

#### **I.3.4.2.4.Aluminoferrite tétracalcique (C<sub>4</sub>AF)**

L'aluminoferrite tétracalcique est une partie de la solution solide C<sub>2</sub>A-C<sub>2</sub>F. si sa composition est désignée par C<sub>2</sub>A<sub>p</sub>F<sub>1-p</sub> alors p varier de 0 à 0,7. En général, dans les ciments portland, la valeur de p est de 0,5 cette valeur donne la formule C<sub>4</sub>AF.

Toute les solutions solides du C<sub>4</sub>AF ont la forme orthorhombique, la réactivité du C<sub>4</sub>AF dans l'eau est modérée, elle augmente avec la teneur en alumine [40].

### **I.3.5.Additifs**

Sont des constituants minéraux ou organiques ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés finales du ciment hydraté. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1% en masse de ciment. Pour les additifs organiques, la proportion de l'extrait sec doit être inférieure ou égale à 0.5% en masse de ciment [8].

## **I.4.Types de ciment**

Le tableau I-2 ci-dessous, donne les 27 produits de la famille des ciments courants traités dans ce présent règlement ainsi que leurs notations. Ils sont regroupés en cinq (5) types principaux :

**Tableau I-2 : Les 27 produits de la famille des ciments courants [41].**

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciments courants)		Compositions (pourcentage en masse)											
			Constituants principaux										Constituants secondaires	
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de Silice	Pouzzolane		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						Naturelle	naturelle calcinée	siliceuse	Calciq		L	LL		
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Ciment portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ciment portland au laitier	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment portland au schiste calciné	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Ciment portland Composé	CEM II/A-M	80-94	12-20								0-5		
		CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5		
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	-	12-20				-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	21-35				-	-	-	0-5	

## I.5. Classes de résistance du ciment

### I.5.1. Résistance courante

La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la norme NA 234, mesurée à 28 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau I-4 ci-dessous.

### I.5.2. Résistance à court terme

La résistance à court terme d'un ciment est la résistance à la compression, déterminée conformément à la norme NA 234, à 2 ou 7 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau I-3 ci-dessous.

A chaque classe de résistance courante, correspondent trois (3) classes de résistance à court terme :

- une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N.
- une classe de résistance à court terme Elevée, notée R.
- une classe de faible résistance à court terme, notée L.

**Tableau I-3** : Classes de résistance de ciment [41].

Classes de résistance	Résistance à la compression MPa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5 L	–	$\geq 12$	$\geq 32,2$	$\leq 52,5$
32,5 N	–	$\geq 16$		
32,5 R	$\geq 10$	–		
42,5 L	–	$\geq 16$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 N	$\geq 10$	–		
42,5 R	$\geq 20$	–		
52,5 L	$\geq 10$	–	$\geq 52,5$	–
52,5 N	$\geq 20$	–		
52,5 R	$\geq 30$	–		

## I.6.Caractéristiques de ciment

### I.6.1.Exigences chimiques

Déterminées conformément aux normes citées dans la colonne 2 du tableau I-4, les propriétés des types de ciments et classes de résistance figurant respectivement aux colonnes 3 et 4 de ce tableau doivent être conformes aux valeurs figurant à la colonne 5 du tableau I-4 ci-dessous.

**Tableau I-4 :** Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques [41].

1	2	3	4	5
Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences
Perte au feu	NA 5042	CEM I CEM III	Toutes classes	≤5%
Résidu insoluble	NA 5042	CEM I CEM III	Toutes classes	≤5%
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	NA 5042	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N 42,5 R	≤3,5%
			52,5 N 52,5 R	≤4%
		CEM III	Toutes classes	
Teneur en chlorure	NA 5042	Tout type	Toutes classes	≤0,1%
Pouzzolanicité	NA 1952	CEM IV	Toutes classes	Satisfait à l'essai

### I.6.2.Caractéristiques physique et chimique de ciment

#### I.6.2.1.Indice d'hydraulicité

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

$$I = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$$

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

- quand  $I > 0,5$ , le ciment est dit basique (Portland)
- quand  $I < 0,5$ , le ciment est dit neutre (riche en laitier)

• quand  $I \neq 1$ , le ciment est dit acide (conventionnellement), ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non de la chaux mais de l'alumine (ciment alumineux).

Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$1,40 < (\text{CaO} / \text{SiO}_2) < 1,45$$

$$0,45 < (\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2) < 0,50 [11].$$

### **I.6.2.2. Temps de Prise**

La prise de ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide [42]. Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance Normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée à l'aide de l'appareil de Vicat.

Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur [43].

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- 1 h 30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5 R.
- 1 h pour les ciments des classes 42,5 -42,5 R -52,5 -52,5

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h 30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20 °C [42].

### **I.6.2.3. Durcissement**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, C'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois au cours desquelles les résistances mécaniques continuent décroître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance [44].

### **I.6.2.4. Chaleur d'hydratation**

La dissolution des différents constituants est exothermique, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple

des ciments riches en  $C_3A$  que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 J/g par exemple pour certains CEM I/B et 300 J/g pour certains CEM I [11].

#### **I.6.2.5.Finesse de mouture**

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en  $cm^2/g$ , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment.

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du Ciment sont accrus [44].

#### **I.6.2.6.Retrait**

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent, C'est le retrait.

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment.
- La finesse de mouture.
- Le dosage en ciment, dans le béton.
- Le dosage en eau.
- La propreté et nature des granulats [42].

#### **I.6.2.7.Expansion**

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libres. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans de l'eau bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courants [11].

### I.6.3. Caractéristiques mécaniques de ciment

#### I.6.3.1. Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression.

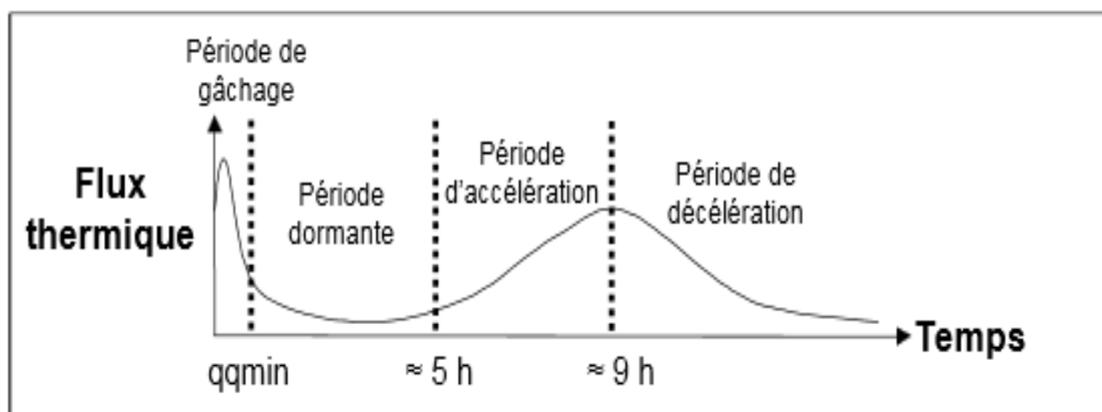
Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre [43].

### I.7. Hydratation de ciment

L'hydratation du ciment s'opère par dissolution des solides anhydres, suivie d'une précipitation des hydrates formant une structure mécaniquement résistante (théorie de Le Chatelier). Elle passe par une succession d'étapes clairement mises en évidence par calorimétrie.



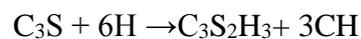
**Figure I-6** : Flux thermique dégagé par une pâte de ciment Portland en cours d'hydratation [16].

- 1) La phase de « pré-induction », durant quelques minutes, correspondant au mouillage des grains.
- 2) La phase d'induction, ou période dormante, dont la durée, le plus souvent de quelques heures, dépend du nombre de germes d'hydrosilicates (C-S-H) formés dès la mise en contact du ciment avec la solution de gâchage.
- 3) La phase d'accélération coïncidant approximativement avec le début de la prise et contrôlée par la croissance des hydrates sur les grains de ciment.
- 4) La phase de décélération due à la coalescence des îlots d'hydrates en croissance à la surface des grains, puis au recouvrement total des grains par les hydrates, les réactions étant alors limitées par la diffusion à travers ces couches d'hydrates.

Les réactions chimiques qui se produisent lors de la mise en contact du ciment avec l'eau peuvent être décrites de la façon suivante :

### **I.7.1.Hydratation des silicates C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S**

Elle produit des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (CH) selon les réactions bilans suivantes :



L'hydratation du C<sub>3</sub>S a une importance particulière parce qu'il est le composant prépondérant de plus, son produit d'hydratation (C-S-H) est responsable de la plus grande partie des propriétés mécaniques de la pâte durcie.

Le C<sub>3</sub>S confère rapidement au ciment une résistance élevée, son hydratation n'évolue pratiquement plus après 28 jours. Le C<sub>2</sub>S dont la cinétique est plus lente, permet au contraire d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme.

### **I.7.2.Hydratation d'aluminate C<sub>3</sub>A**

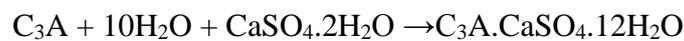
Le C<sub>3</sub>A est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>) qui se transforment en un aluminate de calcium hydraté C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>.

L'aluminate tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. L'addition de gypse permet d'éviter le phénomène de fausse prise due à la cristallisation quasi immédiate des aluminates hydratés qui entraîne une mauvaise ouvrabilité

de la pâte. Cet ajout de gypse provoque en effet la formation autour des grains de  $C_3A$  d'ettringite (tri sulfo aluminat de calcium hydraté).



La formation d'ettringite consomme 3 moles de sulfate de calcium par mole d'aluminat tricalcique. La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de  $C_3A$  par rapport au gypse. Lorsque le gypse est totalement consommé, la solution devient sous saturée par rapport à l'ettringite. Celle-ci se dissout et devient la nouvelle source de sulfate pour former avec l'aluminat excédentaire un nouveau composé : le monosulfoaluminat de calcium hydraté, avec une mole de sulfate de calcium pour une mole de  $C_3A$ .



### I.7.3. Hydratation du $C_4AF$

Est semblable à celle du  $C_3A$ , mais la vitesse de réaction est plus lente et les hydrates formés contiennent du fer. Les produits de réactions sont les mêmes que ceux issus du  $C_3A$  en substituant aux aluminates des alumino-ferrites.

Une pâte de ciment Portland hydraté contient approximativement 15 à 25 % (en masse) de portlandite, 60 à 70 % de C-S-H et 5 à 15% de phases aluminates [16].

Les produits d'hydratation des différentes phases du clinker sont récapitulés dans le tableau I-5.

**Tableau I-5 :** Produits d'hydratation du clinker [16].

Anhydres	Hydrates
$C_2S$ $C_3S$	C-S-H (silicates de calcium hydratés) CH (la portlandite)
$C_3A$	$C_3AH_6$ $C_4AH_{13}$ En présence de gypse : $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (ettringite) $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ (monosulfoaluminat de calcium hydraté)
$C_4AF$	$C_3(A, F)H_6$ $C_4(A, F)H_{13}$ En présence de gypse : $C_3(A, F) \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ $C_3(A, F) \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$

**I.8. Domaine d'utilisation des ciments****Tableau I-6 : Domaine d'utilisation des ciments [46].**

Ciment	Désignation	Utilisation	Contre – indication
Ciment portland Ciment composé	CEM I CEM II	Tous travaux de béton armé -Bonne résistance -Décoffrage rapide (préfabrication) -Bétonnage par temps froid	-Présence d'eaux agressives -Travaux souterrains -Bétonnage en grande masse
Ciment au laitier et pouzzolanique ou au laitier et cendre	CEM III CEM IV CEM V	-Béton de masse (barrage) -Béton de fondation (sol agressif) -Bétonnage en temps chaud -Eau usée -Travaux souterrains -Réservoir d'eau	-Bétonnage par temps froid -Béton préfabriqué -Résistance à jeune âge élevée

*Chapitre II :*  
*Procédés de fabrication de*  
*ciment*

## II. Procédés de fabrication de ciment

### II.1. Définition

Comme pour tous les procédés industriels, il est indispensable de décrire les procédés de fabrication d'une cimenterie [47].

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. [48]. Dans lequel les matières premières subissent des transformations physico-chimiques successives jusqu'à l'obtention du produit fini.

Ce procédé comprend deux phases essentielles :

La première phase du procédé comprend la fabrication du clinker suite à la cuisson d'un mélange cru (ou farine). Cette farine est composée en grande proportion de calcaire 80%, d'argile 15%, 4 % de sable et 1% de minerai de fer. Le clinker constitue en quelque sorte le ciment dans son état pur.

La deuxième phase est le broyage du clinker mélangé à des matières de corrections (ajouts) [49].

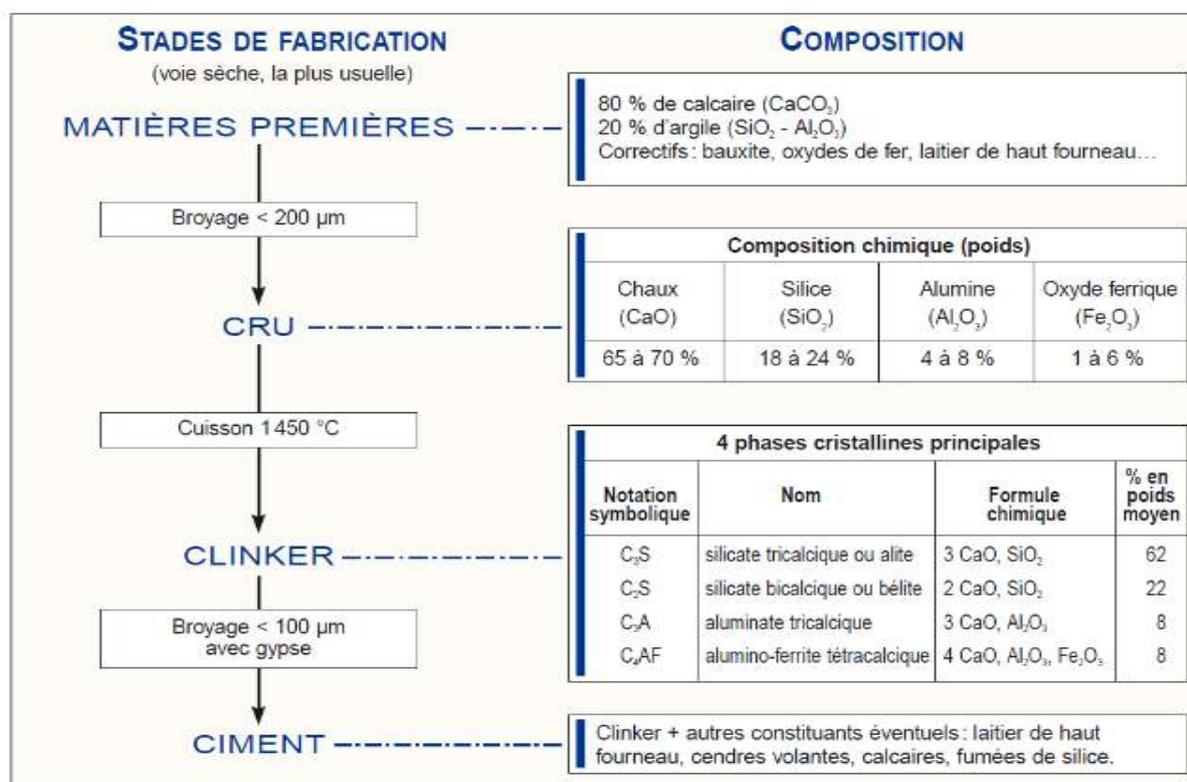


Figure II-1 : Différentes étapes de fabrication du Ciment [50].

## **II.2.Types des procédés**

On a alors, quatre grands procédés de fabrication du ciment : humide, semi-humide, semi sèche, et la voie sèche.

### **II.2.1.Fabrication par voie humide**

C'est le procédé le plus simple et le plus ancien mais nécessite une consommation en énergie considérable afin d'éliminer l'eau en excès .le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec de l'eau, jusqu'à l'obtention d'une pâte humide dont la teneur en eau varie entre 25 et 40 %.cette pâte est ensuite directement injectée dans le four [51].

Le clinker, à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs pour subir une trempe. La longueur du four environ 200 m ; une partie du four sert à évaporer l'eau de la pâte [20].

### **II.2.2.Fabrication par voie semi-humide**

Dans le processus semi-humide, on retrouve les mêmes étapes de préparation des matières premières [20], mais la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. «Le gâteau» de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru [52].

### **II.2.3.Fabrication par voie semi sèche**

Dans la voie semi-sèche, «la farine» mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons [52].

### **II.2.4.Fabrication par voie sèche**

La matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur, puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières (électrofiltres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...) [11].

#### **II.2.4.1.Extraction des matières premières**

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment, notamment le calcaire, sont extraites de carrières à ciel ouvert par abattage (à l'explosif ou à la pelle mécanique) ou par ripage au bulldozer. La roche est transportée par dumper jusqu'à un atelier de concassage.

### II.2.4.2. Concassage

Les matériaux sont ensuite réduits par un concasseur en éléments dont la taille ne doit pas dépasser 80 mm. Pour produire un ciment de qualité, toutes les matières premières doivent être soigneusement dosées et mélangées. Le but est d'obtenir une composition parfaitement régulière. Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : de 77 à 83%.
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14%.
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4%.
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3%.

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des divers ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) [53].

### II.2.4.3. Pré-homogénéisation

La matière première est étendue en couches horizontales successives, qui finissent par former un tas, dont la composition globale est celle désirée. Les couches sont ensuite reprises verticalement, ce qui permet de prélever en permanence une matière de composition identique [20].



**Figure II-2** : Halls de Pré-homogénéisation.

#### II.2.4.4.Séchage et le broyage

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures [53], les matières premières (calcaire plus des ajouts peuvent être nécessaires pour ajuster la composition du mélange cru) [20] doivent être séchées et broyées très finement, afin d'obtenir «la farine».

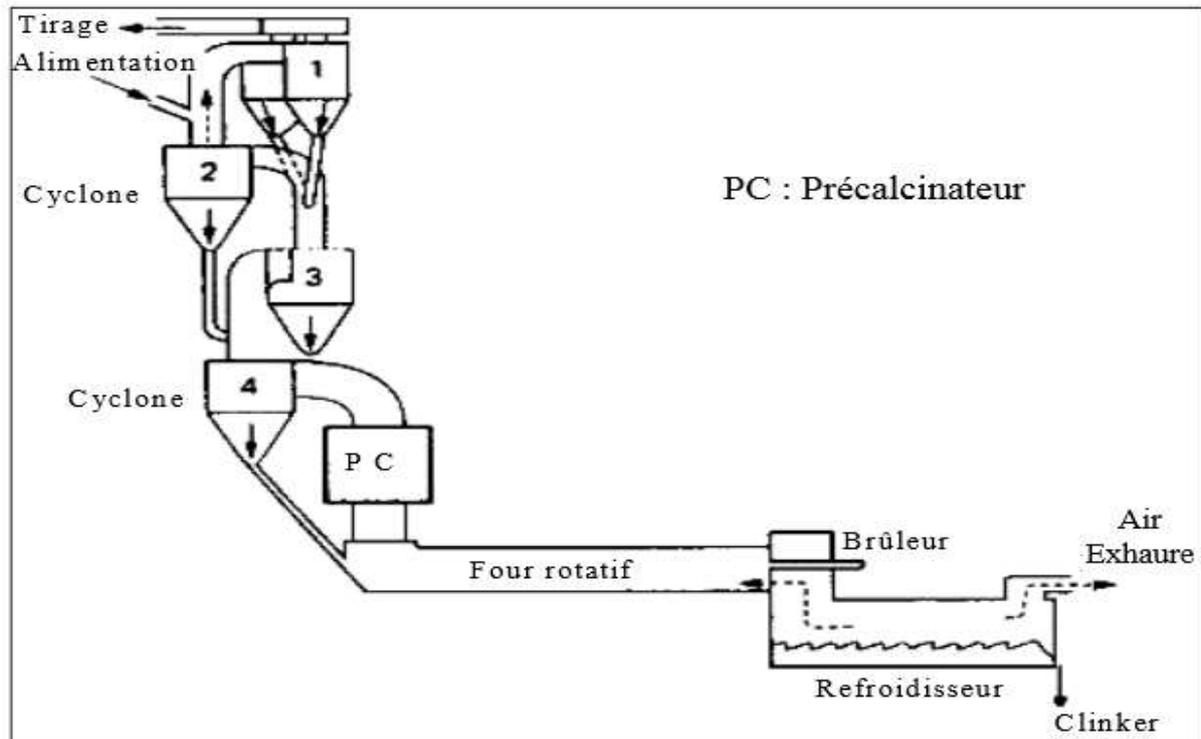
Les particules obtenues ne mesurent pas plus de quelques microns. On utilise pour cela des broyeurs à boulets ou des broyeurs à meules verticaux. La farine est ensuite soit introduite directement dans le four pour la cuisson (voie sèche) [53].



**Figure II-3 :** Broyeur à meules verticaux(VRM).

#### II.2.4.5.Zone de cuisson

Avant introduction dans le four, la farine est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones [54]. Les Installations de cuisson sont similaires et comportent trois parties [55].



**Figure II-4 :** Représentation d'un système de pré calcination [56].

#### II.2.4.5.1. Préchauffage

Un échangeur de chaleur comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four.

Elle se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie.

Une décarbonation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination).

La poudre est ainsi portée d'environ 800 à 1000 °C en un temps très court [55].

#### II.2.4.5.2. Four rotatif

Il s'agit dans la deuxième partie, d'un four horizontal cylindrique en tôle d'acier avec revêtement réfractaire intérieur de 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour /minute. Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C).

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 [55].

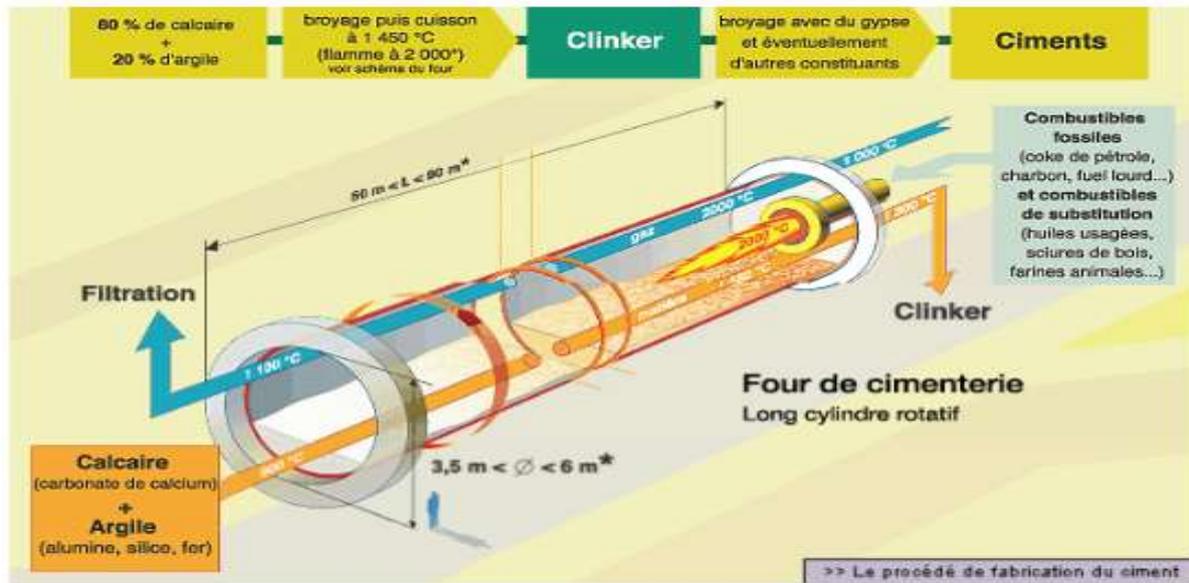
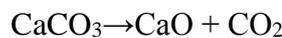


Figure II-5 : Four rotatif a ciment [57].

Les principales formations et réactions de la matière au cours de cuisson sont présentées par ces étapes suivantes :

❖ Décarbonatation :

Le calcaire (CaCO<sub>3</sub>) est décomposé en oxyde de calcium (CaO) + gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), ce dernier est évacué par la cheminée.

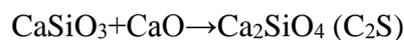


C'est une réaction fortement endothermique, à température environ 900 à 1000°C, pour 1 tonne (1000 kg) de CaCO<sub>3</sub>, on évacue par la cheminée 440 kg de CO<sub>2</sub>.

❖ Phase de transition

Il y a la combinaison de CaO avec :

- Le silicium (Si) pour former du C<sub>2</sub>S (silicate bi calcique), cette réaction est légèrement exothermique.

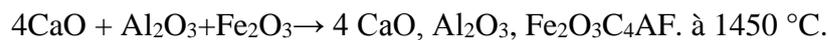


- L'aluminium (Al) pour former une solution solide d'aluminates de calcium



## ❖ Phase de cuisson

La température de la matière monte jusqu'à 1450°C. Une partie de la matière fond pour donner naissance à la phase liquide (constituée de phase aluminat et ferrite), cette étape demande beaucoup d'énergie. En parallèle, il y a formation de C<sub>3</sub>S (silicate tricalcique) : à partir de 1300 °C, le C<sub>2</sub>S se transforme en C<sub>3</sub>S en réagissant avec une partie du CaO non combiné. La réaction est exothermique.



La cristallinité et la composition de ces phases influent sur leurs propriétés (couleur par Exemple) et leur réactivité en présence d'eau [20].

La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie.

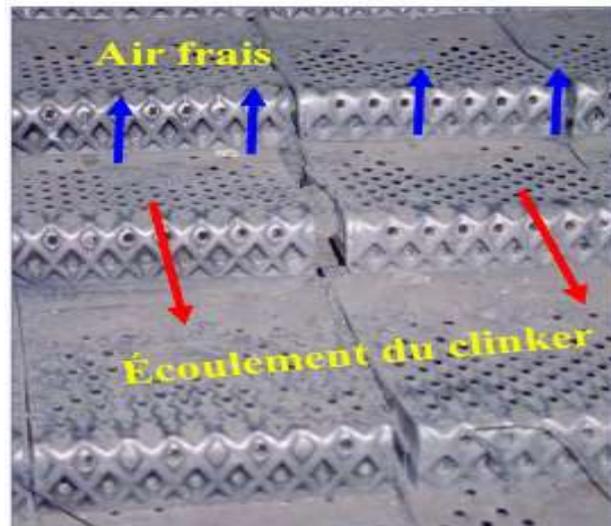
La source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : gaz naturel, fuel, charbon, coke de pétrole [55].

**Tableau II-1** : Récapitulatif des réactions mises en jeu [58].

Température (°C)	Réaction chimique	Nature	H298K (kcal/kg)
800-1250	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	Endotherme	+425
	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$	Exotherme	-175
	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CA}$	Exotherme	-24
	$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$	Endotherme	+18
	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$	Endotherme	+16
1250-1450	$\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} = \text{C}_3\text{S}$	Exotherme	-118

### II.2.4.5.3. Refroidisseur

A la sortie du four, le clinker tombe sur des refroidisseurs à grille qui ramènent sa température à 70 °C ; ce choc thermique donne naissance à des granules de diamètres variant entre 1 et 10 mm [55].



**Figure II-6 :** Refroidisseur à grille [59].

#### **II.2.4.6. Stockage du clinker**

Le clinker se présente sous la forme de granules de la grosseur d'un noisette/noix. Il est évacué par tapis vers le hall/silo à clinker où il sera stocké en attendant d'être broyé pour faire du ciment.

La capacité de stockage peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de tonnes (60 000 tonnes en bas) [59].



**Figure II-7 :** Silo de stockage de clinker.

#### **II.2.4.7. Broyage de clinker**

Le broyeur est assez souvent rempli de boulets en aciers spéciaux et tapissé de plaques de blindage. Le broyeur tourne à une vitesse calculée pour que boulets et clinker se percutent sans être centrifugés. La matière concassée est rejetée vers le centre du broyeur par les plaques de blindage légèrement relevées (comme des tuiles).

Les particules les plus fines finissent par passer à travers les grilles (en fond de broyeur) et passent dans une seconde chambre pour être broyées plus finement [59].



**Figure II-8 :** Broyeur à boulet [59].

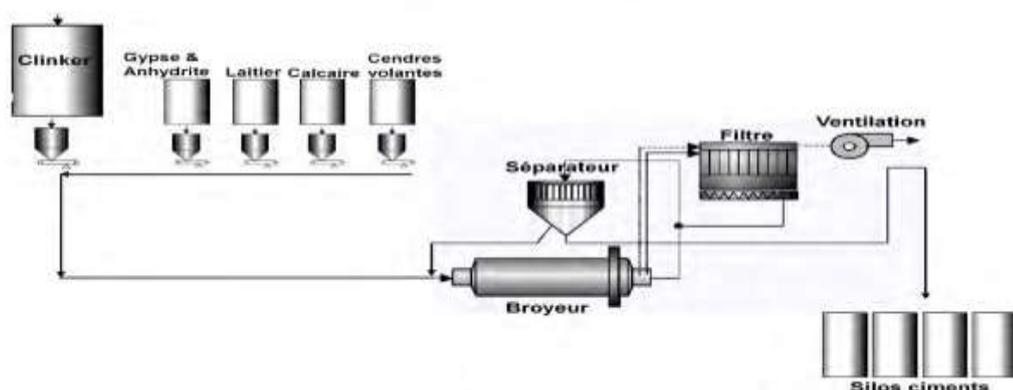
#### II.2.4.8. Transformation de clinker vers le ciment

Le ciment est fabriqué en broyant le clinker avec du sulfate de calcium (environ 5 %), qui sert de régulateur de prise, et éventuellement d'autres constituants minéraux. On utilise pour cela un ensemble d'équipements dont les plus importants sont les broyeurs et les séparateurs.

Selon le type de ciment qui est fabriqué, on introduit dans le broyeur le clinker avec les autres matières.

En sortie du broyeur tous les matériaux broyés sont entraînés dans un séparateur, qui renvoie les particules les plus grosses dans le broyeur, alors que les plus fines sont dirigées vers les silos de ciment.

L'air qui sert de moyen de transport est filtré et les particules récupérées sont envoyées également vers les silos de ciment [59].

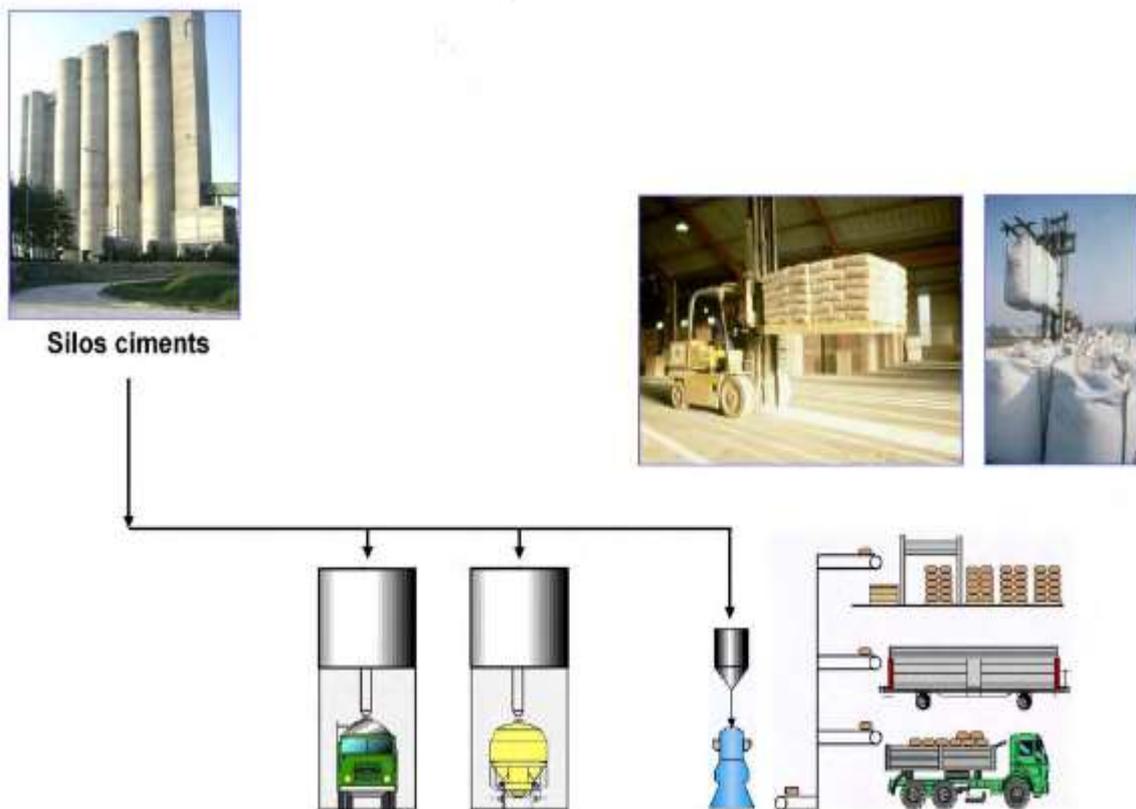


**Figure II-9 :** Transformation de clinker vers le ciment [59].

### II.2.4.9. Expéditions

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, tel que nous le connaissons sur les chantiers. Il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement.

Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur. Ensuite, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac [48].



**Figure II-10 :** Expéditions de ciment [59].

*Chapitre III :*  
*Matériel et méthodes*

### III. Matériel et méthodes

#### III.1.Introduction

Dans cette partie on va étudier l'influence des alcalis sur les compositions chimiques et sur le comportement physique et mécanique du ciment. Pour cela on a préparé cinq échantillons de ciment de différent pourcentage des alcalis pour trouver un mélange composé de certaine quantité de type de ciment CEM I 42.5 R et un quantité de poussière de by-pass (matière forte alcalin). Puis on va effectuer des analyses sur ces échantillons au sein du laboratoire, concernant la composition chimique et physique ainsi le comportement mécanique.

#### III.2.Matériaux utilisés

##### III.2.1.ciment Portland (CEM I 42.5 R)

Type de ciment le plus simple composé de :

- 95 % de clinker (k).
- 5% Sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

**Tableau III-1** : Caractéristiques physiques et mécaniques de CEM I 42.5 R.

Physique						Mécanique					
Refus (%)	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	La consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Expansion à chaude (mm)	Résistance a flexion (MPa)			Résistance à compression (MPa)		
						2J	7J	28J	2J	7J	28J
4.5	3246	25	180	270	0.5	4.8	6.5	8	30.1	44.5	54.3

**Tableau III-2** : Caractéristiques chimiques de CEM I 42.5 R.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	PAF	Humidité
19.286	4.516	3.168	61.710	2.565	2.406	0.537	0.262	0.187	0.035	2.55	0.548

### III.2.2. Poussière de By-pass

La poussière de By-pass est rejetées par le systèmes de By-pass des fours avec préchauffeur en suspension ,pré-calciateur et préchauffeur à grille, qui sont composées de matières d'alimentation du four entièrement calcinées a plus de 850 degrés , BpD est une matières fortement alcalines sous forme des grains fins ,elle est caractérisé par sa teneur forte en chlore ,les alcalis et les sulfate ,est un matériaux de poussière distinctif pour tous les matériaux de ciment connus avec les caractéristique suivantes :

La finesse de traction négative sur tamis de 90 $\mu$ m est  $\geq 35$  %.

Il produit à haut pression et se recueille dans la boîte à fumée.

La masse volumique varie selon le tirage est d'environ 900g/l.

Cette matière est la principale source d'alimentation du four et est tirée au milieu de la boîte à fumée avant le four, quand la pression est augmenté, pour éviter le colmatage de cru puis filtrée dans l'air dans des filtre quantitatives et jetée dans des trimés [60].

**Tableau III-3** : Caractéristiques chimiques de poussière de By-Pass.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	PAF
13.276	3.644	2.273	48.773	2.452	4.472	8.698	1.016	0.111	8.644	8.57

### III.3. Préparation des échantillons

Le premier échantillon c'est le type CEM I 42.5R en utilise cet échantillon comme un échantillon témoin. Les 4 autres échantillons se sont des mélange contient des pourcentages déférent de CEM I 42.5 R et la poussière de by-pass.

#### Exemple de calcule :

Pour 0.3 % by-pass :

$$2000\text{g} \longrightarrow 100\%$$

$$X \longrightarrow 0.3\%$$

Donc le mélange contient 6g by-pass + 1994 g de ciment.

Pour 0.65% by passe :

$$\begin{array}{l} 2000\text{g} \longrightarrow 100\% \\ X \longrightarrow 0.65\% \end{array}$$

Donc le mélange contient 13g by-pass + 1987 g de ciment.

Pour 0.8 % by-pass :

$$\begin{array}{l} 2000\text{g} \longrightarrow 100\% \\ X \longrightarrow 0.8\% \end{array}$$

Donc le mélange contient 16 by-pass + 1984 g de ciment.

Pour 1% by-pass :

$$\begin{array}{l} 2000\text{g} \longrightarrow 100\% \\ X \longrightarrow 1\% \end{array}$$

Donc le mélange contient 20 g by-pass + 1980 g de ciment.

Remarque : dans le calcul nous prenons en compte que le pourcentage de chlore dans le mélange ne dépasse pas 0.1%.

### III.4.Méthodes chimiques

#### III.4.1.Détermination de chlorure

##### III.4.1.1.Définition

Le pourcentage de chlorure contenu dans la matière [61].

##### III.4.1.2.Principe

Solubilisation des chlorures, précipitation des chlorures au moyen du nitrate d'argent. Suivi du titrage par potentiomètre au moyen d'une électrode d'argent en présence d'une solution observe une brusque variation de potentiel quand du nitrate d'argent est ajoutée en excès [61].

##### III.4.1.3.Mode opératoire

Le pourcentage du Cl dans l'échantillon est déterminé selon le protocole expérimental suivant :

- Peser 8g de l'échantillon et mélangé avec 100ml d'eau distillé dans un bécher.
- Agiter le mélange par un agitateur magnétique pendant 10min.

- Filtrer la solution travers un papier filtre dans un erlenmeyer.
- Ajouter 5 ml de l'acide nitrique  $\text{NH}_3$  concentré à 80ml de solution filtré et agiter pendant 1 à 2 min.
- Faire le titrage de la solution par  $\text{AgNO}_3$  (0.1M).
- L'appareil donne automatiquement le pourcentage de chlore.

Remarque : le pourcentage de chlorure dans le ciment ne dépasse pas la valeur 0.1%.



**Figure III-1** : Etapes de la détermination de chlorure.

### III.4.2. Détermination de la perte au feu (PAF)

#### III.4.2.1. Définition

La perte au feu est le pourcentage de matière éliminée au cours de la calcination à l'air d'un échantillon [61].

#### III.4.2.2. Principe

Par calcination à l'air, le gaz carbonique et l'eau sont volatilisés. Les éléments oxydables éventuellement présents peuvent être oxydés [61].

### III.4.2.3.Mode opératoire

Le pourcentage de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> dégagé pendant la calcination est déterminé selon le protocole expérimental suivant :

- Introduit l'échantillon dans un étuve pour éliminer l'humidité pendant 30 min.
- Peser le creuset en platine vide et noter P<sub>0</sub>.
- Peser une quantité P<sub>1</sub>= 1g de l'échantillon et l'introduit dans un creuset en platine.
- Mettre le creuset dans le four à 940 C<sup>0</sup> pendant une heure.
- Sortir le creuset du four et laisser refroidir quelques minutes dans un dessiccateur
- Peser la masse du creuset après perte au feu et noter P<sub>2</sub>.
- Calculer le pourcentage de la PAF selon la formule suivante :

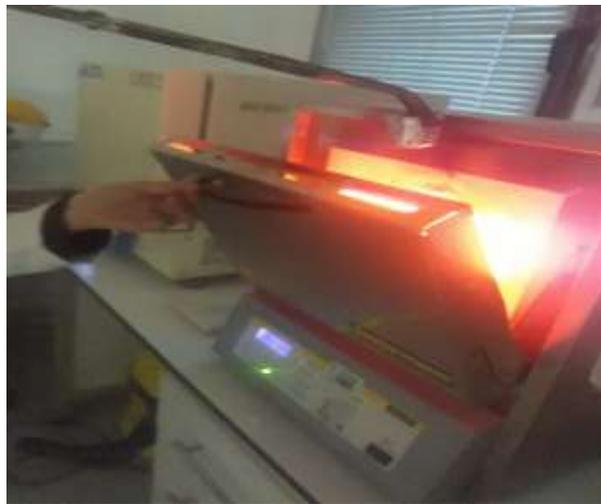
$$\text{PAF} = [(P_0+P_1)-P_2]/P_1*100$$

**PAF** : perte au feu.

**P<sub>0</sub>** : masse du creuset vide en g.

**P<sub>1</sub>** : prise d'essai 1g.

**P<sub>2</sub>** : masse final (creuset +matière calcinée).



**Figure III-2** : Four de calcination.

### III.4.3.Détermination d'humidité

#### III.4.3.1.Définition

L'humidité est la quantité d'eau contenue dans un échantillon quelconque et qui disparaît sous l'effet du chauffage, elle est quantifiée en masse perdue de matière par

dessiccateur à l'étuve dans des conditions déterminées (un séchage isotherme à une température de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) [62].

### III.4.3.2.Principe

Le taux d'humidité est calculé à partir de la différence de poids d'une prise d'essai avant et après séchage à l'étuve à une température de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 3 heures [62]

### III.4.3.3.Mode opératoire

- Peser le creuset vide noté  $P_0$ .
- Prise d'essai de 100g de l'échantillon  $P_1$ .
- Soumettre à l'étuve, le creuset contenant la matière à une température de  $103^{\circ}\text{C}$  pendant 1h-24 heure.
- Reprendre le creuset et le refroidir dans un dessiccateur.
- Procéder à une dernière pesée  $P_2$ .
- Calcule l'humidité selon la formule suivant :

$$\text{Humidité \%} = (P_2 - P_0) - P_1$$

**$P_0$**  : masse de creuset vide.

**$P_1$**  : masse de l'échantillon.

**$P_2$**  : masse final (creuset + matière séché).



**Figure III-3** : Etuve de séchage.

### III.4.4. Fluorescence X

#### III.4.4.1. Définition

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide [63].



**Figure III-4 :** Appareil de fluorescence X.

#### III.4.4.2. Principe

Lorsqu'un échantillon est bombardé par un rayonnement primaire émis par une source d'excitation énergétique, un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés de leurs orbitales atomiques (ou couches électroniques). Ainsi, un électron d'une couche électronique supérieure vient remplacer l'électron éjecté et libère à son tour de l'énergie sous forme de rayons X. Ce rayonnement secondaire constitue le phénomène de « Fluorescence ». Chaque élément chimique est caractérisé par un spectre de fluorescence X spécifique.

L'analyse de ce spectre permet d'identifier les éléments présents dans un échantillon et de déterminer leurs concentrations [64].

Pour faire les analyses avec les RX on utilise soit des perles soit des pastilles.

### III.4.4.3. Préparation des perles

- En mélange 1g de l'échantillon avec 10g de fondant CLAISSE (49.75%  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 49.75%  $\text{LiBO}_2$ , 0.5%  $\text{LiBr}$ ) dans un creuset en platine.
- Agitation manuel du mélange pour homogénéiser.
- Mettre le creuset dans le perleuse pendant 24 min a une température 1065 C<sup>0</sup>.
- Introduit la perle dans l'appareille de RX pour analyse en utilisant le programme correspond à l'échantillon à analysés qui est la perle.



Figure III-5 : Perleuse et une perle préparée.

## III.5. Méthodes physiques et mécaniques

### III.5.1. Détermination du pourcentage de refus

#### III.5.1.1. Définition

Elle a pour but de déterminer le pourcentage des refus de ciment après le broyage. Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage [65].

#### III.5.1.2. Mode Opérateur

- Faire sécher la matière à tamisé si nécessaire.
- Placer le tamis à utiliser sur l'appareil.
- Peser 10 g de l'échantillon et vider sur le tamis.
- Tamiser à l'aide d'un appareil appelé alpine avec un tamis de 45  $\mu$  pour le ciment et tamis de 90  $\mu$  pour le cru.
- Peser les particules au-dessus du tamis qui représentant le pourcentage des refus.



**Figure III-6 :** Appareil de tamisage alpine.

**Figure III-7 :** Tamis 45µm et 90µm.

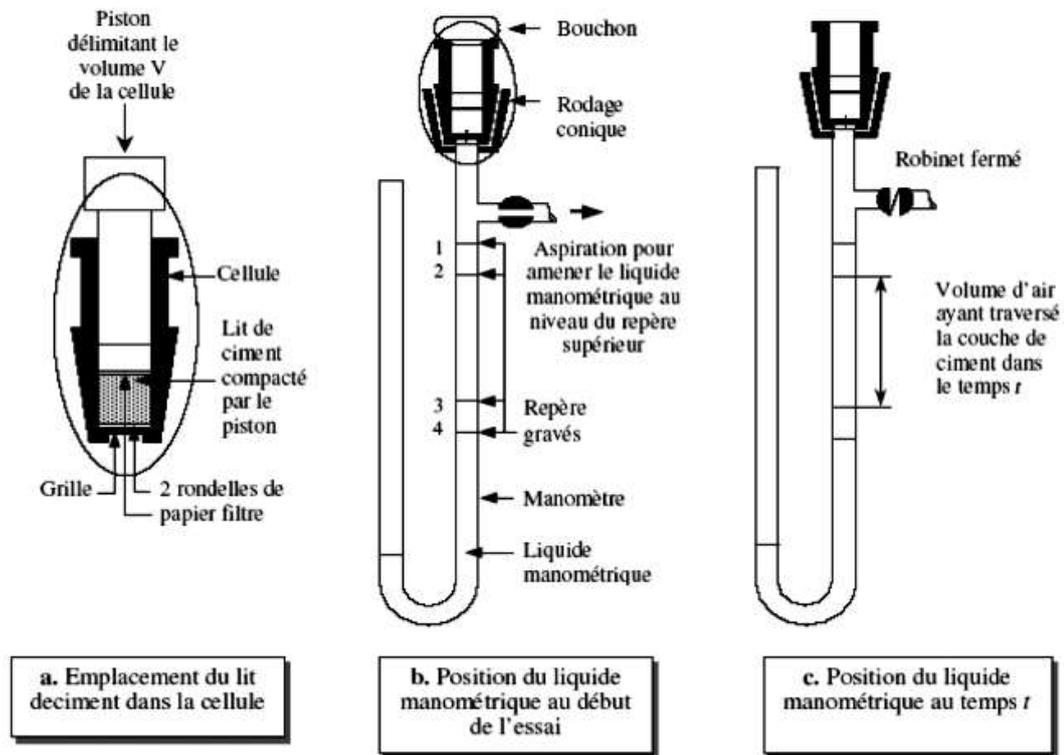
### **III.5.2.Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine**

#### **III.5.2.1.Définition**

La détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage. La finesse du ciment est mesurée sous forme de surface massique, exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , en observant le temps mis un volume fixé d'air pour traverser un lit de ciment compact à une porosité spécifique [11].

#### **III.5.2.2.Principe**

La détermination de la surface spécifique basée sur la méthode Blaine est réalisée en 3 étapes comme le montre la Figure III-8. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Plus la surface massique de cette poudre est importante, plus le temps  $t$  mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à  $t$ . L'appareil utilisé pour déterminer la surface spécifique Blaine comprend Un perméabilimètre de Blaine. Il se compose 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 niveau inférieur, d'une huile légère. La partie inférieure de la cellule est équipée d'une grille. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule selon un volume défini [11].



**Figure III-8 :** Principe de fonctionnement de la technique de Blaine [11].

### III.5.2.3. Mode opératoire

- Placer la grille au fond de la cellule.
- Appliquer sur cette grille au moyen d'une tige à face intérieure pleine, un disque neuf de papier filtre.
- Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.
- Placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre.
- Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.
- Retirer le piston lentement.
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur.
- Rodé de la cellule et la placer sur son ajutage de lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline. Veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.
- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur.
- Démarrer l'appareil qui déterminera automatiquement la SSB.

L'unité de la surface spécifique de Blaine est  $\text{cm}^2/\text{g}$  normes NA442/2000 :

Ciment sans ajouts 2900 à 3000  $\text{cm}^2/\text{g}$

Ciment avec ajouts  $> 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  (paramètre technologique).



**Figure III-9** : Appareil de SSB.

### **III.5.3.Consistance normale**

#### **III.5.3.1.Définition**

Consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire à un ciment pour avoir une consistance normalisée. La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire pour obtenir une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur des pâtes contenant différentes quantités d'eau [4].

#### **III.5.3.2.Pâte normale**

La Pâte normale est une pâte de consistance normale ; c'est-à-dire tel qu'en opérant avec l'appareil de Vicat, la lecture donnant l'épaisseur de la pâte restante entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule quand celle – ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids est de  $6 \text{ mm} \pm 1$  [65].

### III.5.3.3.Mode opératoire

#### III.5.3.3.1.Malaxage de la pâte de ciment

- Peser 500 g de l'échantillon.
- Prendre un volume d'eau distillé, par exemple 125 ml à l'aide de l'éprouvette, l'introduire dans la cuve du malaxeur.
- Ajouter soigneusement le ciment à l'eau pour éviter toute perte d'eau ou de ciment. La durée de cette opération 5 à 10 secondes. Noter la fin de cette opération comme le temps zéro.
- Mettre le malaxeur en marche immédiatement et le faire tourner à vitesse lente pendant 60 secondes.
- Au bout de ces 60 s, arrêter le malaxeur pendant lesquelles tout la pâte adhérant à la cuve de la zone de malaxage doit grattée et remise dans la gâchée.
- Mettre alors la machine en route à vitesse rapide pendant 90 s.



Figure III-10 : Malaxage de la pâte de ciment.

#### III.5.3.3.2.Remplissage du moule

Introduire immédiatement la pâte dans le moule tronconique, préalablement placé sur une plaque de verre plane, légèrement graissée et le remplir sans tassements ni vibrations excessif. Enlever l'excès de pate par un mouvement de va et vient effectuée avec précaution, avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.

#### III.5.3.3.3.Essai de pénétration

- Régler l'appareil de Vicat au préalable muni de la sonde.
- Placer le moule et la plaque de base sur l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat, abaisser la sonde avec précaution jusqu'au contact de la surface supérieure de la pâte.

- Observe une pause de 1 à 2 secondes (dans le but de donner une vitesse initiale aux parties mobiles de l'appareil).
- Libérer alors les parties mobiles de la sonde (la sonde doit pénétrer verticalement au centre de la pâte) la libération de la sonde doit avoir lieu 4 minutes après l'instant zéro.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de pénétration ou 30 secondes après libération.
- La lecture doit être acceptée si elle est de 6 mm du bord inférieure de la surface de la pâte.
- Placer l'éprouvette dans l'armoire humide pour raison de déterminer les prises du ciment.
- Reprendre les essais avec d'autres quantités d'eau, si ces valeurs ne sont pas réalisées.

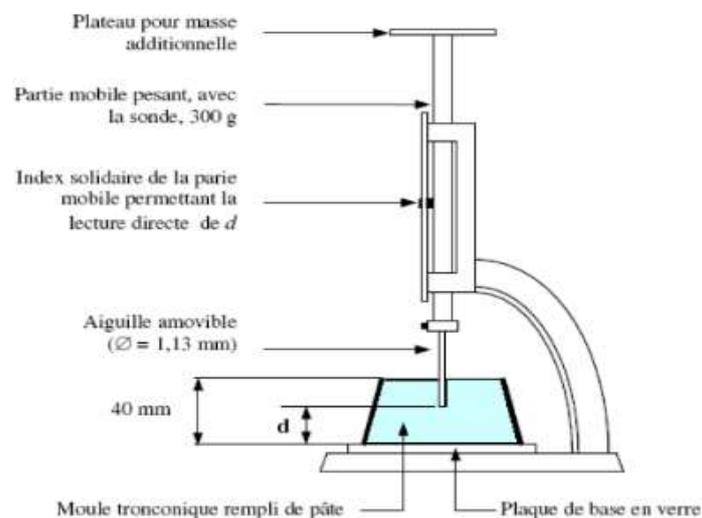


Figure III-11 : Appareil de Vicat manuel [4].

### III.5.4.Essais de prise

#### III.5.4.1.Définition

Ont utilisé l'essai de prise pour déterminer le temps de prise, c'est à dire qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise et fin de prise.

#### ❖ Début de prise

Le début de prise est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du début de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat s'arrête à une distance du fond du moule supérieur à  $4 \text{ mm} \pm 1$

### ❖ Fin de prise

C'est la période qui sépare le début de gâchage de ciment jusqu'au moment où la sonde porte aiguille ne s'enfonce plus la pâte.

#### III.5.4.2.Principe

On détermine le début de prise ou fin de prise à l'aide de l'appareil de Vicat manuel ou automatique s'enfonçant dans un moule tronconique rempli de pâte [8].

**RQ:** L'essai de prise est normalement effectué sur pâte normale, il est exécuté sur moule tronconique.

#### III.5.4.3.Mode opératoire

- C'est la même pâte utilisée dans l'essai de consistance.
- Mettre le moule tronconique qui placera dans l'armoire humide dans l'appareil Vicat automatique qui donne automatiquement la valeur de début de prise et la fin de prise.



**Figure III-12 :** Appareil de vicat automatique.

### III.5.5.Essai d'expansion

#### III.5.5.1.Définition

La stabilité du ciment est exprimée par son aptitude à développer une expansion en volume lors de sa mise en œuvre. L'expansion provient essentiellement et est reliée à la présence de la chaux libre (CaO) dans le ciment ou la périclase (MgO) cristallisée [61].

### III.5.5.2.Principe

Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 3cm de hauteur et de 3cm de diamètre contenus dans des moules déformables. Sur la périphérie du moule sont soudées deux aiguilles qui amplifient la déformation.

La mesure de l'écartement des deux aiguilles se fait au début et à la fin de l'expérience.

Pour accélérer la réaction d'hydratation, on précède avec un traitement thermique dans une bouilloire Le Chatelier [11].

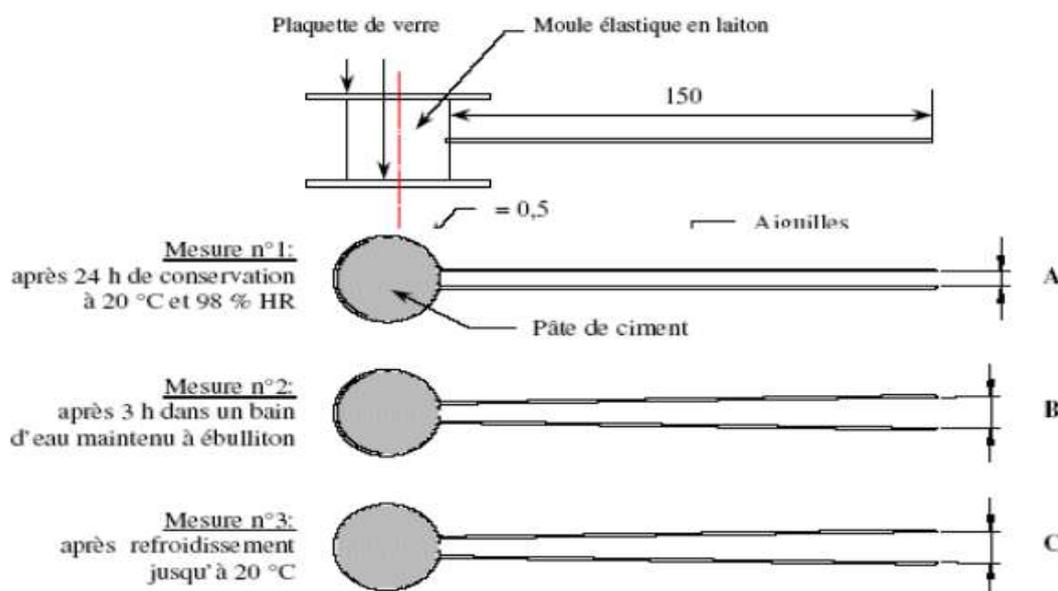


Figure III-13 : Principe de l'essai d'expansion [66].

### III.5.5.3.Mode opératoire

- La pâte une fois normalisée .elle servira au remplissage des moules le Chatelier.
- Remplir le moule d'expansion par la pâte préparée.
- Mettre sur plaque de verre et arroser la surface à l'aide d'une truelle.
- Couvrir d'une plaque de verre.
- Conserver les aiguilles dans l'armoire humide pendant une journée.
- Après 24 heures, enlever les aiguilles de l'armoire humide, on marque l'écartement entre les deux aiguilles et les mettre dans un bouloire, pendant 3 heures.
- Ensuite, on mesure après cette durée l'écart (pendant la confection du moule). La variation de l'écartement représente l'expansion à chaud.



**Figure III-14 :** Moule le Chatelier.

### **III.5.6.Essais mécaniques (flexion–compression)**

#### **III.5.6.1.Définition**

Ils ont pour but de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps.

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques [8].

#### **III.5.6.2.Objectif de l'essai**

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type donc, il s'agit de définir la qualité de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier [61].

#### **III.5.6.3.Principe de l'essai**

L'essai consiste à étudier les résistances à la flexion et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique, la résistance de mortier est alors considérée comme significative de la résistance de ciment [61].

#### **III.5.6.4.Préparation du mortier**

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques de ciment et notamment la résistance à la compression.

**Tableau III-4 : Compositions du mortier.**

Composants	Dosage pondéral
Ciment	450g
Sable normalisé (Norme EN 196-1)	1350g
Eau de gâchage	225ml
le rapport E/C	0.5

- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment soigneusement.
- Mettre alors le malaxeur en marche à petite vitesse.
- Après 30 seconde, introduire le sable normalise et continuer à malaxer.
- Enlever à l'aide d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérant aux parois.

**Figure III-15 : Malaxage d'un mortier.**

### III.5.6.5. Préparation des éprouvettes

- Préparer une série des moules de dimensions 4×4×16 cm (figureIII-16)

**Figure III-16 : Moule des mortiers.**

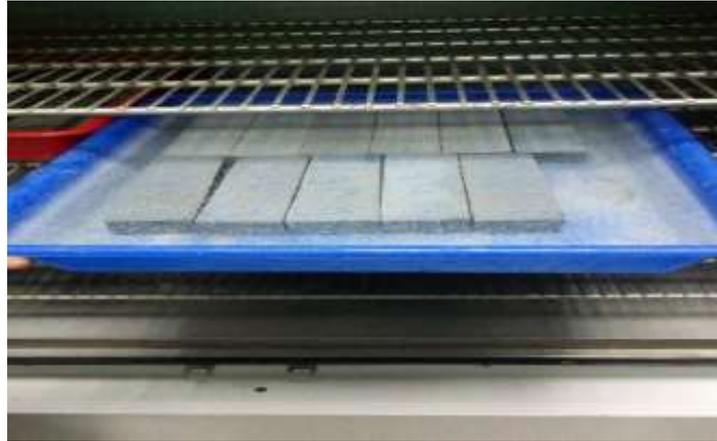
- Le moule et sa hausse fermement fixes à la table à choc.
- Remplir avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci.
- Etaler la couche uniformément en utilisant une spatule adéquate (la tenir verticalement et avec des mouvements de va et vient)
- Démarrer ensuite l'appareil a choc pour 60coups
- Introduire la seconde couche, niveler avec la spatule et démarrer l'appareil pour 60 autre coups
- Retirer avec précaution le moule de la table et ôter la hausse, enlever immédiatement l'excès de mortier avec une règle métallique plate .anime de lents mouvement.
- Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat
- Etiqueter les moules pour identification
- Placer sans tarder les moules dans une armoire humide a régulation de température pendant 24h
- Apres 24h de cure ainsi faire sortir le moule et procéder au démoulage des éprouvettes.
- Immerger sans tarder les éprouvettes dans un bain d'eau a régulation de température à 20 C<sup>0</sup>.
- L'éprouvette pour 2 jours, 1 éprouvette pour 7 jours et 1 éprouvette pour 28 jours.



**Figure III-17** : Appareil a choc.



**Figure III-18** : Armoire humide.



**Figure III-19** :Eprouvettes.

### III.5.6.6.Essais des éprouvettes

#### III.5.6.6.1.Résistance à la flexion

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui.
- Appliquer la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à rupture



**Figure III-20** : Appareil de résistance à la flexion.

#### III.5.6.6.2.Résistance à la compression

- Placer le demi-prisme en compression sur les faces latérales de moulage.
- Centrer chaque demi-prisme dans le compartiment d'essai.
- Applique la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à rupture. La résistance est en MPa.



**Figure III-21** : Appareil de résistance à la compression.

### III.6. Analyse du béton

#### III.6.1. Préparation de béton

**Tableau III-5** : Compositions du béton.

Composants	Dosage pondéral
Ciment (nos échantillons)	7000g
Sable fin	5000g
Sable 0.4	7000g
Gravier 8/16	9000g
Gravier 15/25.	13000g
Eau	chaque échantillon consommé certain quantité d'eau

#### III.6.2. Test d'affaissement

En fait le test d'affaissement au mélange que nous obtenant.

##### III.6.2.1. But du test

Essai d'affaissement est lancé pour évaluer la conformité du mélange de béton. En général, il est entrepris pour vérifier soit la capacité d'adaptation du mélange de béton est à la norme ou non [67].

### III.6.2.2.Mode opératoire

- Tout d'abord nettoyer le cône avec une brosse ou un peu d'eau. Assurez-vous que le cône ne soit pas trempé ou complètement sec car il peut provoquer une modification du contenu de l'eau de mélange.
- Le cône est disposé sur une surface dure, et il est nécessaire de saisir fermement le cône par l'opérateur.
- Le béton est coulé en trois couches en maintenant la hauteur à peu près identique. Toutes les couches doivent être tassées 25 fois à l'aide de la tige de damage.
- Lorsque cône est emballé, le béton nécessaire est pris avec une spatule.
- Cône est ensuite élevé en position verticale légèrement. Des soins appropriés devraient être maintenue tout en élevant parce que l'inclinaison peut entraîner la modification de la prise.

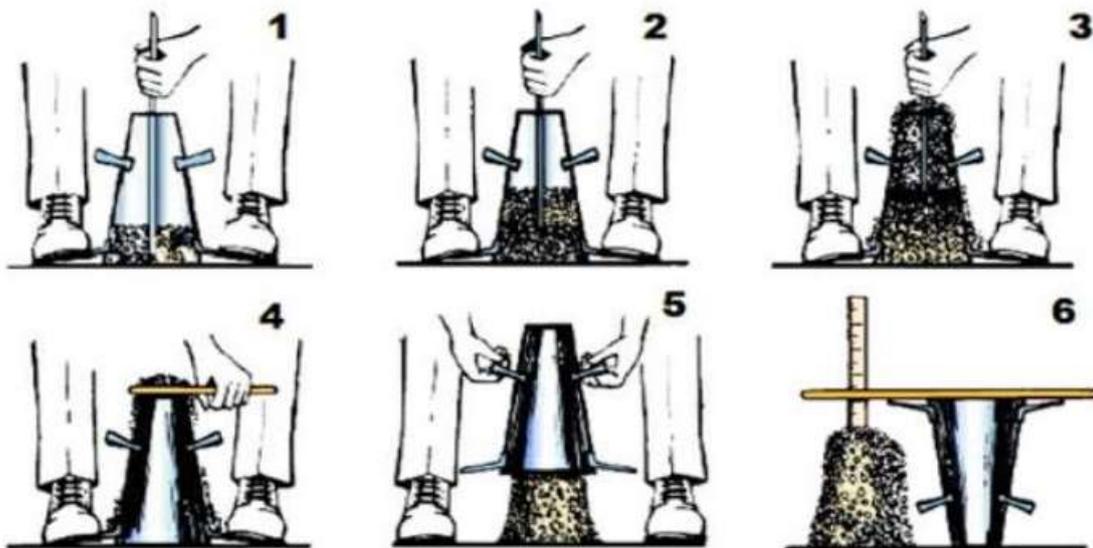


Figure III-22 : Test d'affaissement [67].

### III.6.3.Détermination de la résistance

#### III.6.3.1.Préparation des éprouvettes

- Remplir les moules par le mélange (le béton).
- laisse sécher et ensuite on a fait le démoulage.
- Une éprouvette pour 2j ,7j ,28j.



**Figure III-23** : Préparation des éprouvettes.

### III.6.3.2. Test de résistance

- Centrer l'éprouvette dans le compartiment d'essai.
- Applique la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à rupture.
- On retient pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et on calcule la résistance (R) par la relation suivante :

$$R = F/S$$

Où :

F : est la charge maximale (en KN).

S : est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carrée.

R : la résistance à la compression exprimée en MPa.



**Figure III-24** : Appareil de résistance.

*Chapitre IV :*  
*Résultats et discussion*

## IV. Résultats et discussion

### IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux obtenus du programme d'essai et l'analyse ainsi que la discussion de derniers pour l'élaboration d'un ciment à base de différents pourcentages des alcalis.

Les résultats obtenus sont rapportés dans des tableaux et représentés par des figures afin de bien montré l'influence des alcalis sur les caractéristiques physico-chimiques, et mécanique du ciment.

Remarque : Pour calculé la teneur en alcalis on utilise la formule suivante :

$$\text{Na}_2\text{O} + 0.658 * \text{K}_2\text{O}$$

- Pour l'échantillon témoin on a 0.615 % des alcalis.
- Pour l'échantillon de 0.3% de by-pass on a 0.634% des alcalis.
- Pour l'échantillon de 0.65% de by-pass on a 0.645% des alcalis.
- Pour l'échantillon de 0.8% de by-pass on a 0.707% des alcalis.
- Pour l'échantillon de 1% de by-pass on a 0.728% des alcalis.

### IV.2. Analyses chimiques des échantillons

Les tableaux au-dessous sont présentés les résultats des analyses chimiques. Tous les résultats des analyses chimiques obtenus sont conformes aux normes algériennes tableau I-4.

**Tableau IV-1 : Résultats du chlorure.**

	<b>CEM I 42.5 R</b>	<b>0.3% By-pass</b>	<b>0.65% By-pass</b>	<b>0.8% By-pass</b>	<b>1% By-pass</b>
<b>Chlore Cl (%)</b>	<b>0.035</b>	<b>0.042</b>	<b>0.066</b>	<b>0.075</b>	<b>0.093</b>

**Tableau IV-2 : Résultats de la perte au feu.**

	<b>CEM I 42.5 R</b>	<b>0.3% By-pass</b>	<b>0.65% By-pass</b>	<b>0.8% By-pass</b>	<b>1% By-pass</b>
<b>PAF (%)</b>	<b>2.55</b>	<b>2.39</b>	<b>2.53</b>	<b>2.72</b>	<b>2.8</b>

**Tableau IV-3 : Résultats d'humidité.**

	<b>CEM I 42.5R</b>	<b>0.3% By-pass</b>	<b>0.65% By-pass</b>	<b>0.8% By-pass</b>	<b>1% By-pass</b>
<b>Humidité</b>	<b>0.548</b>	<b>0.486</b>	<b>0.516</b>	<b>0.5</b>	<b>0.567</b>

Les valeurs d'humidité sont considérées comme niveau acceptable pour le ciment.

**Tableau IV-4 : Résultats de la fluorescence X.**

	<b>CEM I 42.5R</b>	<b>0.3% By-pass</b>	<b>0.65% By-pass</b>	<b>0.8% By-pass</b>	<b>1% By-pass</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>19.286</b>	<b>19.035</b>	<b>19.029</b>	<b>19.199</b>	<b>19.147</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>4.516</b>	<b>4.653</b>	<b>4.680</b>	<b>4.621</b>	<b>4.617</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>3.168</b>	<b>3.121</b>	<b>3.264</b>	<b>3.273</b>	<b>3.262</b>
<b>CaO</b>	<b>61.710</b>	<b>61.490</b>	<b>65.046</b>	<b>64.693</b>	<b>65.029</b>
<b>MgO</b>	<b>2.565</b>	<b>2.508</b>	<b>2.575</b>	<b>2.531</b>	<b>2.627</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>2.406</b>	<b>2.405</b>	<b>2.493</b>	<b>2.475</b>	<b>2.498</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0.537</b>	<b>0.581</b>	<b>0.601</b>	<b>0.622</b>	<b>0.678</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0.262</b>	<b>0.252</b>	<b>0.250</b>	<b>0.298</b>	<b>0.282</b>
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>0.187</b>	<b>0.181</b>	<b>0.155</b>	<b>0.164</b>	<b>0.157</b>
<b>Equivalent des alcalis</b>	<b>0.615</b>	<b>0.634</b>	<b>0.645</b>	<b>0.707</b>	<b>0.728</b>

### IV.3. Analyses physiques et mécaniques des échantillons élaborés

#### IV.3.1. Refus

Le tableau IV-5 présente les résultats du refus ou la finesse 45 $\mu$  des échantillons.

Les valeurs ne dépassent pas la valeur 5% donc sont à la norme.

**Tableau IV-5 : Résultats de la finesse 45 $\mu$ .**

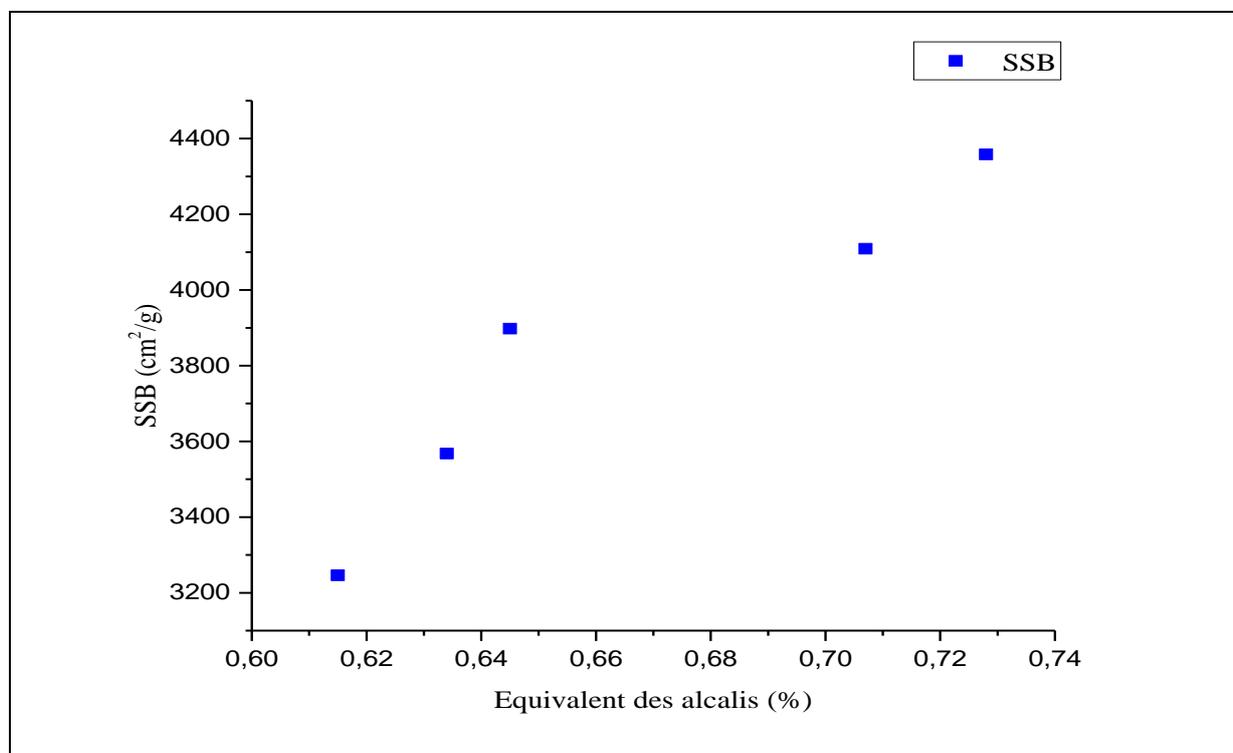
	<b>CEM I 42.5R</b>	<b>0.3% By-pass</b>	<b>0.65% By-pass</b>	<b>0.8% By-pass</b>	<b>1% By-pass</b>
<b>Refus (%)</b>	<b>4.5</b>	<b>4.6</b>	<b>4.5</b>	<b>4.8</b>	<b>4.7</b>

### IV.3.2.Surface spécifique par la méthode Blaine

Le tableau IV-6 présente l'effet des alcalis sur la surface des échantillons préparés. D'après la figure IV-1 on constate une augmentation de la finesse du ciment avec l'augmentation du pourcentage des alcalis dans le ciment. Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation de la quantité des alcalis incorporés dans le ciment a un effet significatif sur la surface spécifique (Blaine) de ciment.

**Tableau IV-6 :** Variation de SSB en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	3246	3568	3898	4109	4358



**Figure IV-1 :** Variation de SSB en fonction du pourcentage des alcalis.

### IV.3.3.Consistance

Le tableau IV-7 illustre l'effet des alcalis sur la consistance normale des échantillons préparés.

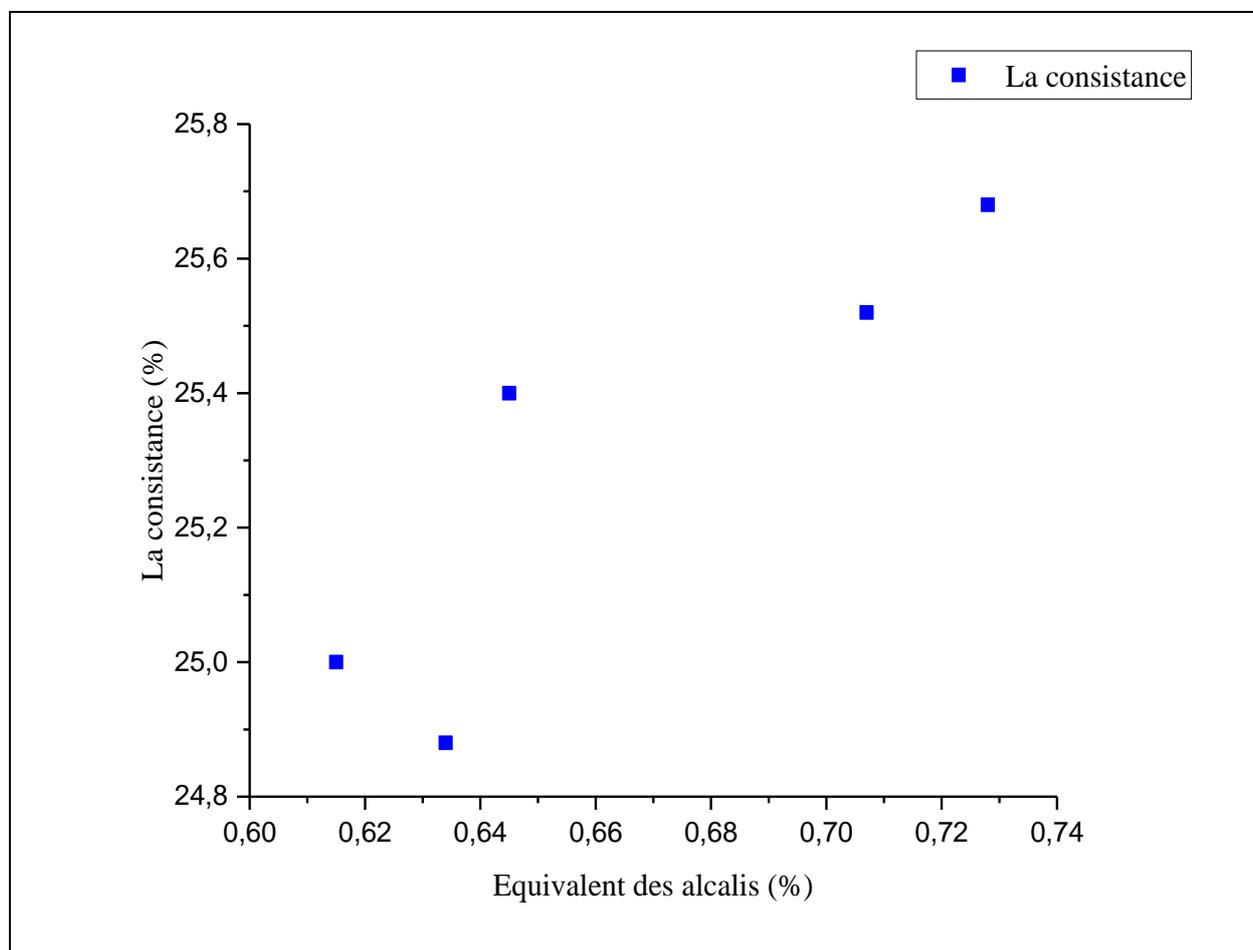
D'après la figure IV-2 qui montre la variation du rapport du taux de l'eau (E) sur le rapport de ciment (C) E/C en fonction du pourcentage des alcalis. On remarque qu'il ya presque une stabilité de la valeur de consistance entre l'échantillon témoin et l'échantillon de

0.634% des alcalis (diminution négligeable de 0.1%). En suit on constate une augmentation de la consistance normalisé (E/C) avec l'augmentation des quantités des alcalis.

Pour expliquer cette augmentation on peut dire que le taux en eau croît proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture du liant qui contribue à une augmentation de la consistance de la pâte de ciment.

**Tableau IV-7 :** Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
La consistance (%)	25	24.88	25.4	25.52	25.68



**Figure IV-2 :** Variation du rapport E/C (consistance) en fonction du pourcentage des alcalis.

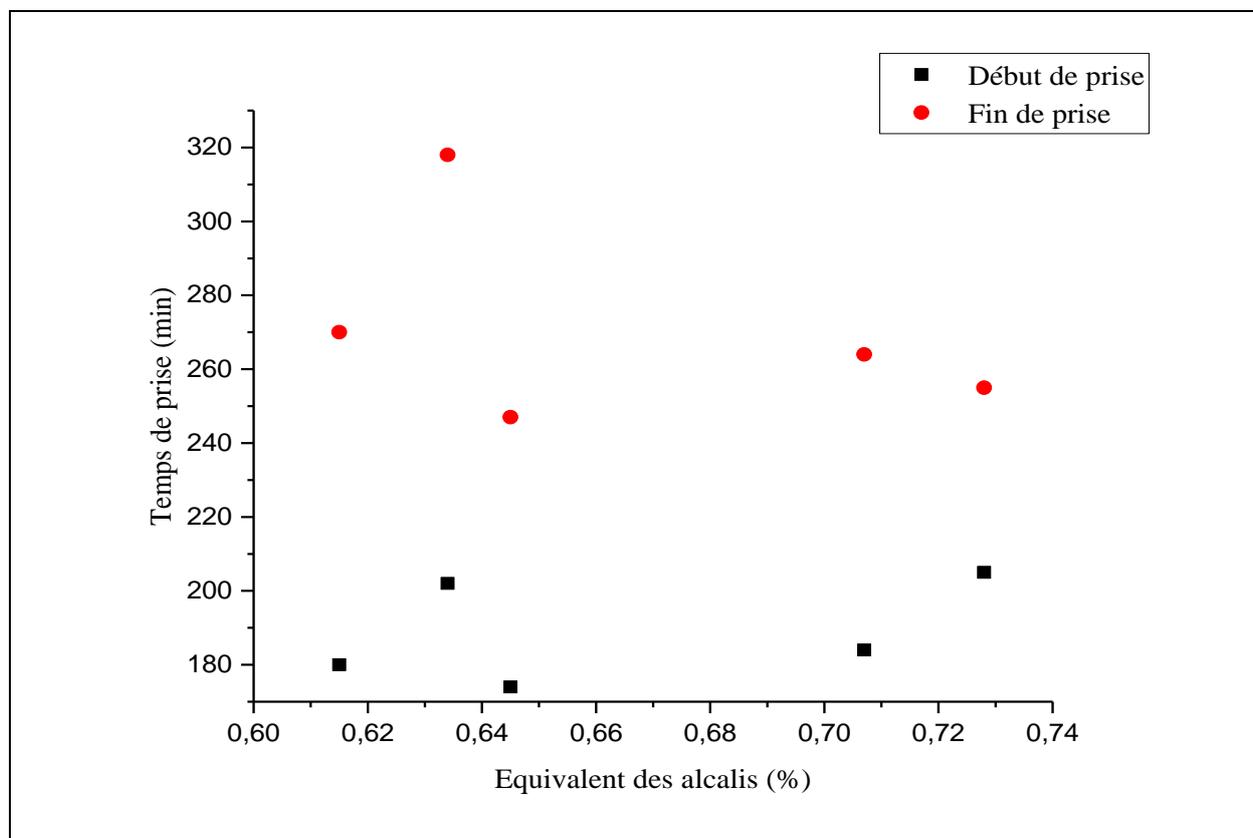
#### VI.3.4. Temps de prise

Le tableau IV-8 ci-dessous présente l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure de temps de prise en variant le pourcentage des alcalis.

D'après la Figures IV-3, généralement on note qu'il ya une perturbation aux valeurs du début et fin de prise.

**Tableau IV-8** : Variation du temps de prise en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
Début de prise (min)	180	202	174	184	205
Fin de prise (min)	270	318	247	264	255



**Figure IV-3** : Variation du temps de prise en fonction du pourcentage des alcalis.

#### IV.3.4.Expansion à l'eau chaude

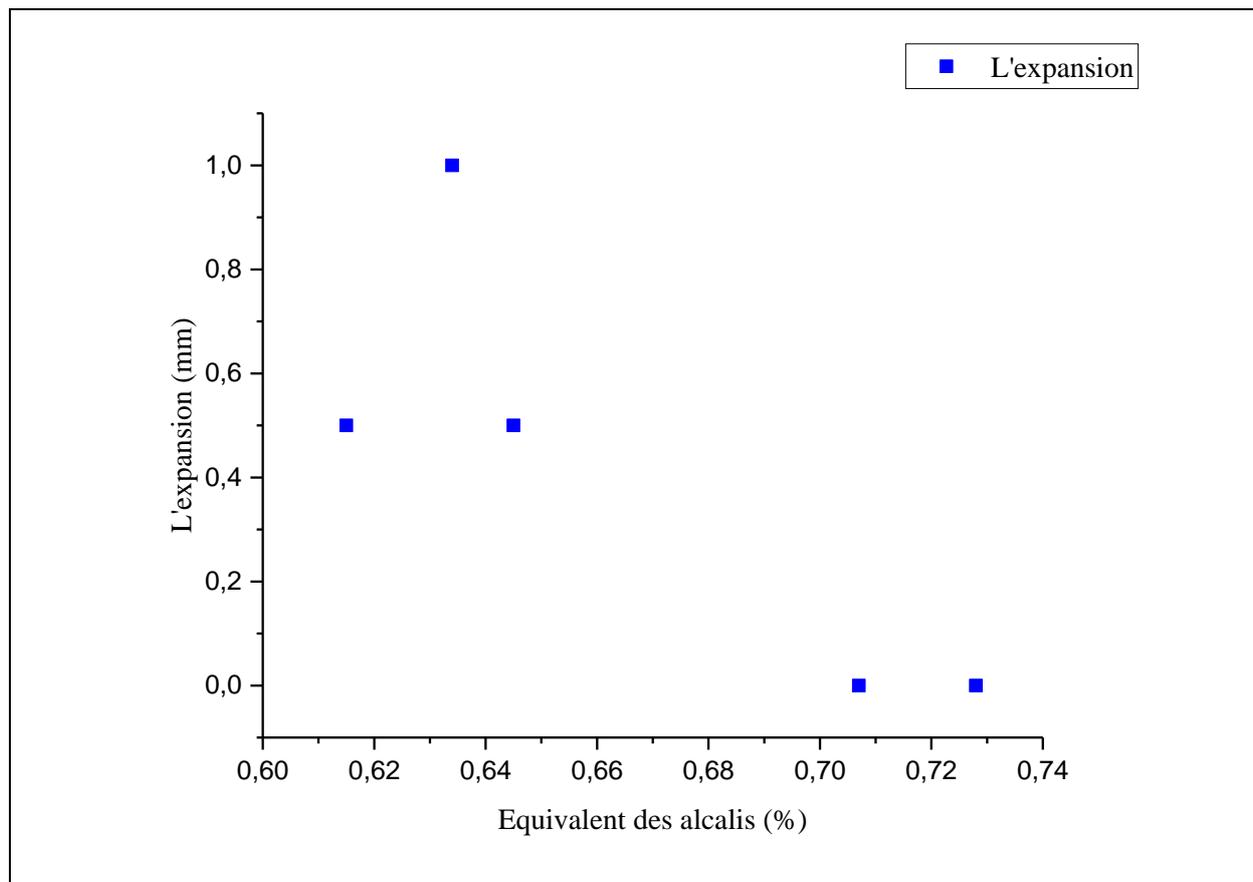
Le tableau IV-9 ci-dessous montre l'effet des alcalis sur la stabilité (expansion) du ciment élaboré. D'après la figure IV-4, on remarque une augmentation de l'expansion jusqu'à la valeur 1mm, et après cette valeur on constate une diminution jusqu'à la valeur zéro.

Donc on peut dire que nos échantillons à base de ciment ont une faible expansion plutôt minimale où on peut dire que les alcalis n'ont pas des effets significatifs sur la stabilité

du ciment (reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme NA 230 qui est de 10 mm). Cette stabilité peut être expliquée par le taux minimal de MgO dans les échantillons préparés.

**Tableau IV-9** : Variation de l'expansion en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
Expansion à chaude (mm)	0.5	1	0.5	0	0



**Figure IV-4** : Variation de l'expansion à l'eau chaude en fonction du pourcentage des alcalis.

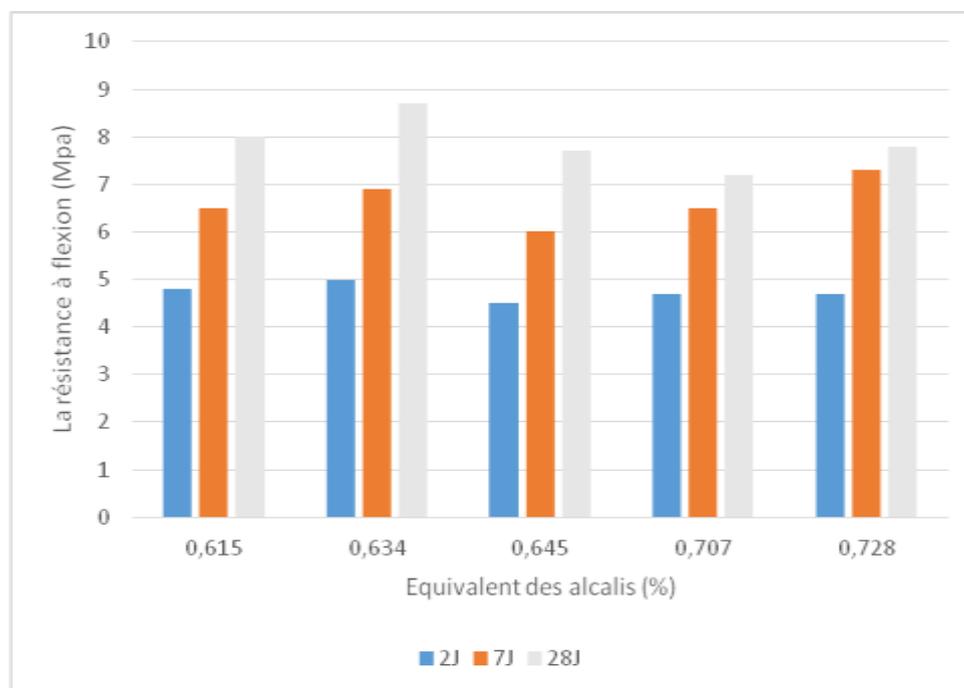
#### IV.3.5. Résistance à flexion et résistance à la compression

Les résultats des essais mécaniques (flexion et compression) réalisés sur les éprouvettes de mortier contenant des différents pourcentages des alcalis et testées aux différents durés de durcissement (2, 7 et 28 jours) sont rapportés successivement dans les tableaux IV- 10 et IV-11 et présentés par les histogrammes IV-5 et IV-6.

D'après ces figures, on remarque que l'accroissement des résistances en fonction de l'âge de durcissement est pratiquement identique pour tous les échantillons testés. Alors que pour le même durée de durcissement on constate que la résistance à la compression et à la flexion diminues avec l'augmentation de taux des alcalis par rapport à l'échantillon témoin. Mais on remarque aussi que cette diminution reste dans les normes. On not que l'incorporation de 0.634% des alcalis dans l'échantillon à base de ciment (avec l'addition de 0.3% de by-pass) améliore la résistance mécanique.

**Tableau IV-10** : Variation de la résistance à flexion en fonction du pourcentage des alcalis.

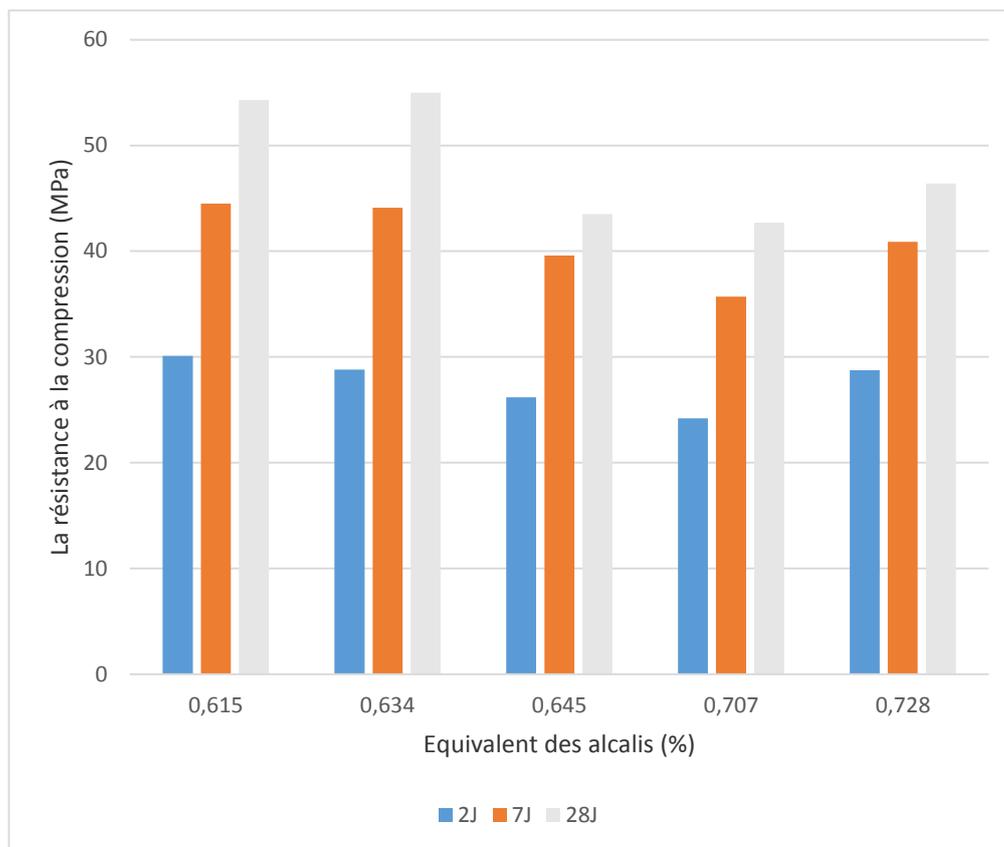
Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
2J	4.8	5	4.5	4.7	4.7
7J	6.5	6.9	6	6.5	7.3
28J	8	8.7	7.7	7.2	7.8



**Figure IV-5** : Histogramme de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage des alcalis.

**Tableau IV-11** : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
2J	30.1	28.8	26.2	24.2	28.75
7J	44.5	44.1	39.6	35.7	40.9
28J	54.3	55	43.5	42.7	46.4

**Figure IV-6** : Histogramme de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des alcalis

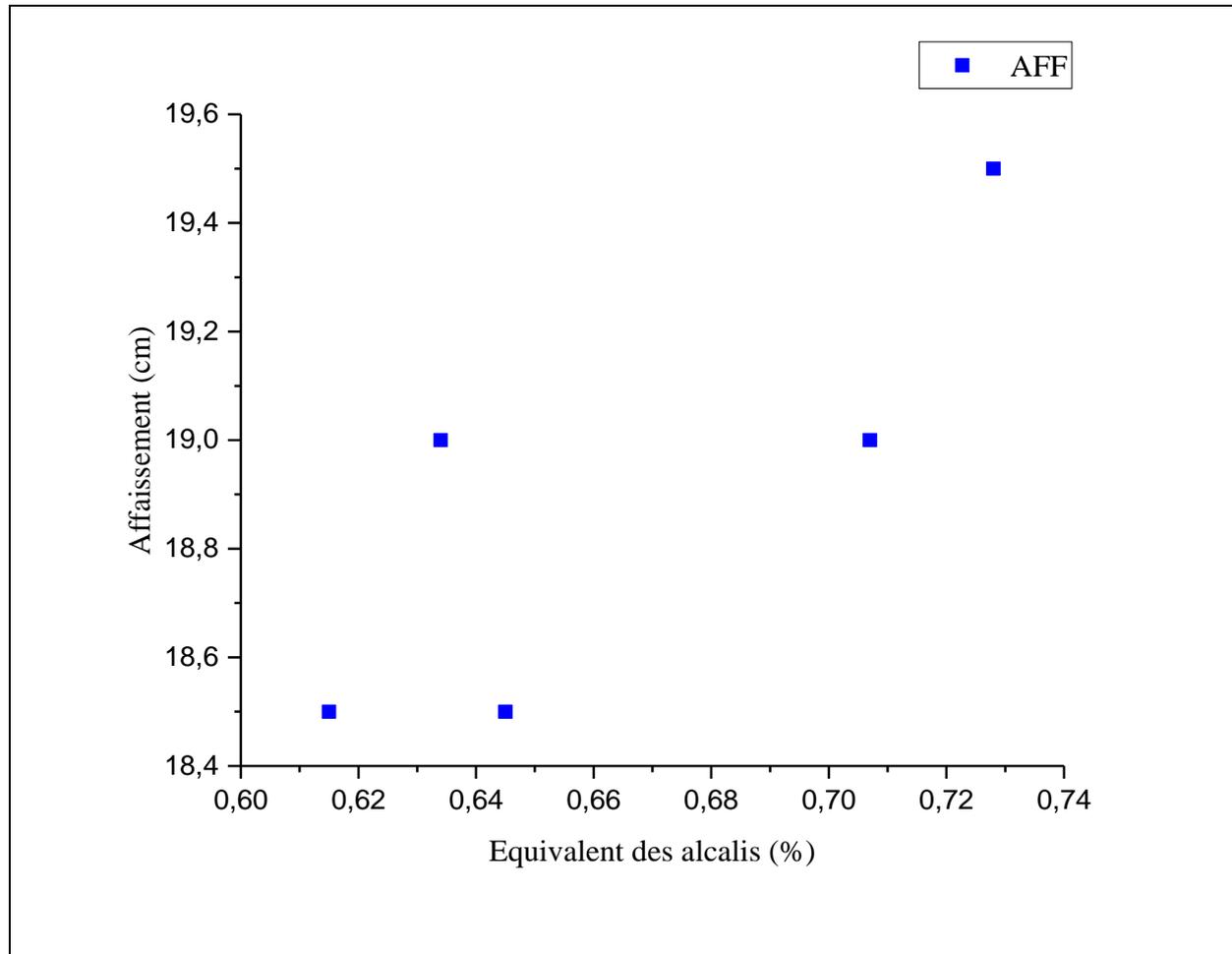
## IV.4. Analyse du béton

### IV.4.1. Affaissement

Le tableau IV-12 ci-dessous présente l'effet des alcalis sur l'affaissement du béton élaboré. D'après la figure IV-7 on remarque une augmentation de l'affaissement avec l'augmentation des pourcentages des alcalis. Les valeurs de l'affaissement sont variées entre 18.5 et 19.5cm, ce qui permet de dire que la capacité d'adaptation du mélange de béton est à la norme.

**Tableau IV-12** : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
AFF (cm)	18.5	19	18.5	19	19.5

**Figure IV-7** : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage des alcalis.

#### IV.4.2.E/C dans le béton

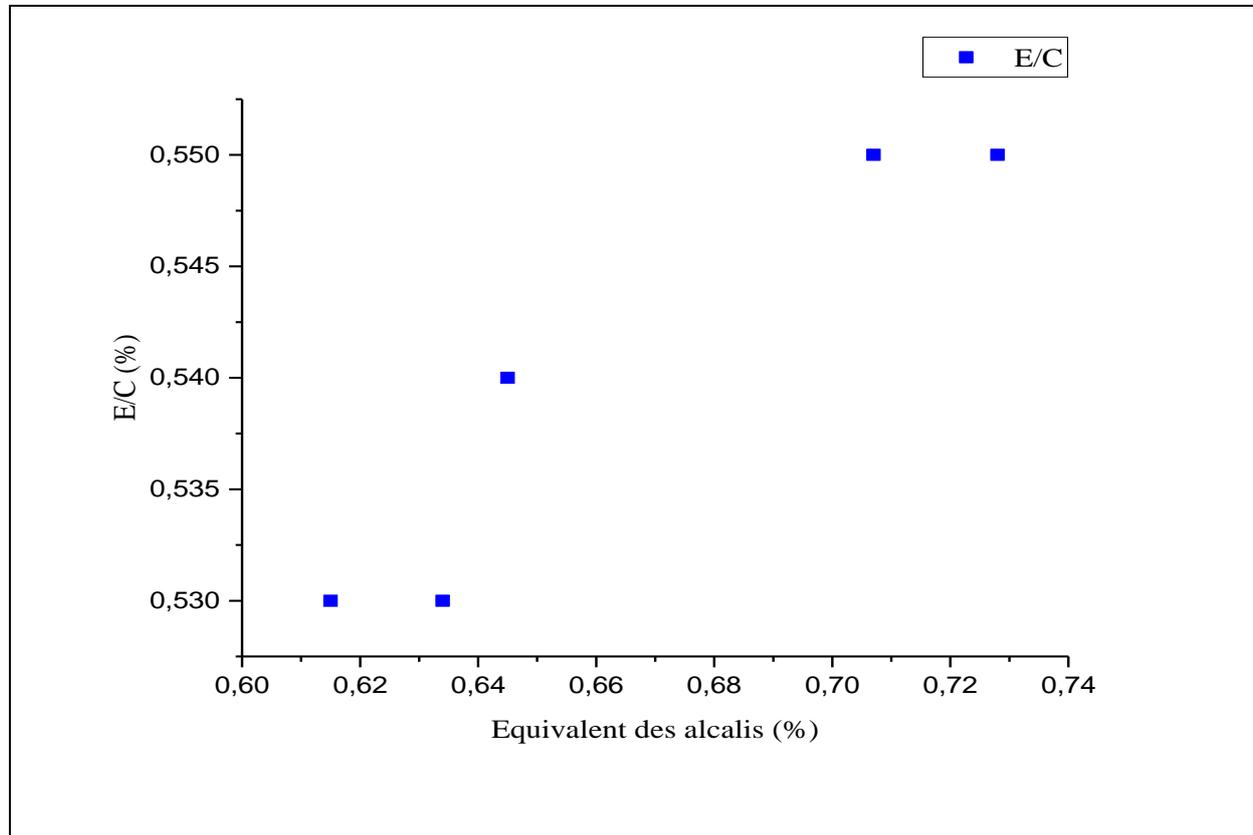
Le tableau VI-13 illustre l'ensemble des résultats obtenus lors de l'évaluation d'E/C de béton en variant le pourcentage des alcalis ajouté.

D'après la figure VI-8 on remarque la présence de trois stades :

- 0.615-0.634 : une stabilité à une valeur de 0.53%
- 0.634-0.707 : une augmentation de 0.53% jusqu'à 0.55%
- 0.707-0.708 : une stabilité à une valeur de 0.55%

**Tableau IV-13** : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
E/C (%)	0.53	0.53	0.54	0.55	0.55

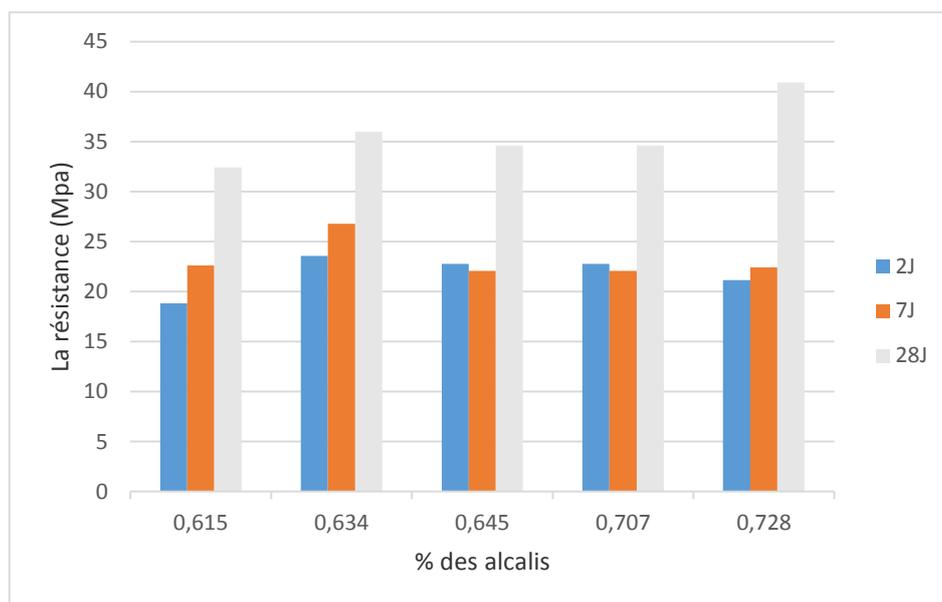
**Figure IV-8** : Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage des alcalis.

#### IV.4.3. Résistance à la compression

Le tableau IV-14 ci-dessous présente l'effet des alcalis sur la résistance mécanique à la compression du béton. D'après la figure IV – 9 on remarque que la résistance à la compression augmente d'une façon remarquable avec l'addition des alcalis par rapport à l'échantillon témoin. Donc on peut dire que les alcalis ont un effet positif sur la résistance à la compression du béton.

**Tableau IV-14 :** Variation de la résistance du béton en fonction du pourcentage des alcalis.

Les alcalis (%)	0.615	0.634	0.645	0.707	0.728
2j	18.81	23.57	22.76	18.62	21.14
7j	22.59	26.77	22.07	22.5	22.41
28j	32.42	35.99	34.61	32.89	40.90



**Figure IV-9 :** Histogramme de la résistance du béton en fonction du pourcentage des alcalis.

*Conclusion  
générale*

## Conclusion générale

Cette étude a permis d'évaluer expérimentalement l'impact des alcalis sur les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment.

L'analyse chimique montre que :

- L'augmentation des alcalis augmente les valeurs de chlore et de la PAF.

Les essais physiques et mécaniques montrent que l'augmentation du taux des alcalis dans la matrice de ciment :

- Augmente la surface spécifique de ciment.
- Augmente la consistance normale de la pâte cimentière.
- Diminue l'expansion à l'eau chaude.
- Diminue la résistance à flexion et à compression du ciment.
- Augmente l'affaissement du béton.
- Augmente le rapport E/C du béton.
- Augmente la résistance mécanique du béton.

Les pourcentages des alcalis incorporés dans le ciment sont conformes à la norme algérienne NA. Le ciment devient non conforme dès qu'un seul paramètre devient au-dessus ou au-dessous de la norme.

La valeur optimale d'alcali dans la matrice de ciment qui donne une meilleure résistance mécanique est la valeur de 0.634% qui correspond à 0.3% de poussière de By-pass.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] G. Bensedik « Optimisation du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dans le ciment », mémoire de licence, Université sidi Mohamed ben abdallah, Fès, Maroc (2018).
- [2] H. Benoit « Méthodes avancées et analyses multi-échelles pour l'étude de l'auto-cicatrisation des fissures dans les matériaux cimentaires », thèse de doctorat, Université de Gand, Belgique (2015).
- [3] S. Wahl « Nouvelle technologie de concentration de  $\text{CO}_2$  intégrée à la cimenterie : étude d'un nouveau procédé de décarbonatation », thèse de doctorat, Université de Toulouse, France (2018).
- [4] N. Savadogo « Élaboration et caractérisation d'un éco-ciment à base de poudre de mâchefer de charbon », thèse de doctorat, université Bretagne Loire, Rennes, France (2017).
- [5] A. Govin « Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois », thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France (2004).
- [6] M. Khouadjia « Étude des propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières : expérimentation et modélisation », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie (2016).
- [7] Disponible en ligne : <https://www.techniqueingenieur.fr/basedocumentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/cimentsc920/naissance-de-l-industrie-cimentiere-c920niv10003.html> consulté le 10/06/2020.
- [8] A. Ghermaoui « Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane », mémoire de master, université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie (2015).
- [9] M. Mouzali « effets des adjuvants sur les propriétés physico-mécaniques des bétons a hauts performances », mémoire de magister, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie (2015).
- [10] A. Merouane « Synthèse et caractérisation d'un ciment belitique riche en  $\text{C}_2\text{S}$  et de haute réactivité hydraulique », mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie (2009).

- [11] M. Yahya « Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment » mémoire de master, université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie (2016).
- [12] P. Lalan « Influence d'une température de 70°C sur la géochimie, la microstructure et la diffusion aux interfaces béton / argile » thèse de doctorat, université de recherche paris sciences et lettres, France (2016).
- [13] M. Haïfi « Formulation des bétons autoplacants », mémoire de magister, université Mentouri, Constantine, Algérie (2011).
- [14] F. Benali « Elaboration et caractérisation d'un réfractaire monolithique à base de kaolin » université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie (2015).
- [15] Disponible en ligne : [https%3A%2F%2Ftravauxbeton.fr](https://travauxbeton.fr) consulté le 15/03/2020.
- [16] M. Codina « Les bétons bas PH Formulation, caractérisation et étude à long terme », thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées (2007).
- [17] Disponible en ligne : [http://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/dossiers-ciment-2008/fr/T5-FR-Ciments Belges.pdf](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-2008/fr/T5-FR-Ciments Belges.pdf) consulté le 10/12/2019.
- [18] Disponible en ligne : [http://www.holcim.be/sites/belgium/files/atoms/files/guide\\_pratique-fr.pdf](http://www.holcim.be/sites/belgium/files/atoms/files/guide_pratique-fr.pdf) consulté le 10/12/2019.
- [19] Document Chef de poste Algérie, Juin (2014).
- [20] H. Mebarki « Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications », mémoire de master, université de Tlemcen, Algérie (2013).
- [21] C. Noguera « Les argiles : des nanomatériaux modernes, au passé millénaire ». CNRS-UPMC Institut des Nanosciences de Paris, France, Matériaux & Technique, N° 2, P.98-101 (2010).
- [22] K. Bouali « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires », mémoire de magister, université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie (2014).
- [23] Disponible en ligne : <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Minerai%20de%20fer/fr-fr/> consulté le 15/03/2020.

- [24] N. Mokrane et H. Sadli « Valorisation du gypse dans le domaine para-pharmacologie Cas pratique : élaboration d'un savon dermatologique », mémoire de master, université Abderahmane Mira, Bejaia, Algérie (2017).
- [25] F. Ben mostefa et K. Bouhafs « Etude de la Durabilité des mortiers à base de pouzzolane », mémoire de master, centre universitaire Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent, Algérie (2017).
- [26] Disponible en ligne : <http://leonardvinci.e-monsite.com/medias/files/ex5.bauxite.pdf> consulté le 15/03/2020.
- [27] Disponible en ligne : <https://construction.maison.ooreka.fr/astuce/voir/617185/les-differents-types-de-sable> consulté le 15/03/2020.
- [28] A. Benaissa et Y. Hassinoui « Optimisation du Taux Des Incuits Dans le Ciment CEM II/A 42,5 », mémoire de master, Centre universitaire Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent, Algérie (2018).
- [29] D. Aliouane « La durabilité des fibres de verre dans une matrice de ciment », mémoire de magister, université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie (2012).
- [30] N. Boualla « Etude de l'influence de l'ajout de pouzzolane sur les caractéristique physico-chimique des ciments », mémoire de licence, université d'Oran, Algérie (2011).
- [31] G. Nigri « Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment », mémoire de magister, université de Guelma, Algérie (2005).
- [32] C. Amouri « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », thèse de doctorat, université Mentouri, Constantine, Algérie (2009).
- [33] A. Karoute « Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali –réaction », Ecole Hassania des travaux publics (2003).
- [34] T. Guimer « Contribution de l'addition minérale sur les caractéristiques physico-mécaniques des liants et mortiers », mémoire de magister, université Mohammed Khider, Biskra, Algérie (2007).
- [35] N. Hyvert « Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton », thèse de doctorat, université de Toulouse, France (2009).

- [36] M. Benaïssa « Valorisation de la bentonite de M'sila dans la formulation des bétons autoplaçant », thèse de doctorat, université Abdelhamid ibn Badis, Mostaganem, Algérie (2017).
- [37] Z. Benarima « Etude du comportement thermique des Ciments lors du durcissement par analyse calorimétrique », thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie (2019).
- [38] R. Elodie « Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker », thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, Algérie (2006).
- [39] W. Ladaoui « Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro- Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs », thèse de doctorat, Université de Toulouse, France (2010).
- [40] S. Bouraoui « Effet des sulfates alcalins sur les propriétés des ciments avec et sans super plastifiant », mémoire de maîtrisées sciences appliquées, université de Sherbrooke, Québec, Canada (1997).
- [41] Journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire conventions et accords internationaux –lois et décrets arrêtes, décisions, avis, communication et annonces, N27 (2016).
- [42] A. Belhocine et N. Nagoudi « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux », mémoire de master, université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie (2014).
- [43] S. Samai « Formulation d'un mortier avec ajout de pouzzolane naturelle soumis à températures élevées », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie (2016).
- [44] A. Almaleki « Caractérisation expérimentale des mortiers a base des déchets de briques », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie (2018).
- [45] K. Salhi « Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton », mémoire de magister, université Mohamed Khider, Biskra, Algérie (2007).
- [46] N. Belmokhtar et A. Zeraig « Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment », mémoire de master, Université M'Hamed Bougera, Boumerdes, Algérie (2017).

- [47] J. Herting « Etude d'impact sur l'environnement », cas d'un projet routière et d'une cimenterie, p173.
- [48] w. Azzouz et M. Rezig « Valorisation des poussières de farine crue issues de l'industrie cimentière dans le traitement des eaux urbaines », mémoire de licence, Université Moulay Tahar, Saida, Algérie (2014).
- [49] F. Dahou « L'influence de la surface spécifique du Blaine sur le ciment », mémoire de Licence université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, Algérie (2018).
- [50] M. Kadri et S. Rouigueb et H. Chikh « Contribution à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf », mémoire de master, université Abou bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie (2017).
- [51] M. Renaut « Calcination des déchets industriels : synthèse de ciment et stabilisation /solidification des résidus de combustion », thèse de doctorat, université D'Artois, France (2017).
- [52] S. Rebouh « Impact de la pollution de l'air provoqué par la cimenterie Tahar Djouad sur la sante publique et le cadre bâti –cas de Hamma Bouziane », mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, Algérie.
- [53] Document « fabrication de ciment \_hc ».
- [54] Disponible en ligne : [http://www.planete.com/IMG/pdf/Les\\_étapes\\_de\\_fabrication\\_du\\_ciment\\_cle5d8828.pdf](http://www.planete.com/IMG/pdf/Les_étapes_de_fabrication_du_ciment_cle5d8828.pdf) consulté le 15/03/2020
- [55] F. Ghomari « cours Science des matériaux de construction », Université Aboubekr Belkaid, Algérie (2006).
- [56] D. Touil « Modélisation des dégradations d'énergie dans l'industrie du ciment Approches industrielle et de laboratoire », thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie (2006).
- [57] M. Bouhidel « Application d'analyse du cycle de vie (ACV) pour un développement durable : cas des cimenteries algériennes », mémoire de magister, université El-Hadj Lakhdar Batna, Algérie (2009).

- [58] K. Moussi « Modélisation d'un four rotatif à ciment : Cas de l'unité de Sour El-Ghozlane », mémoire de magister, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie (2007).
- [59] Ch. Charron Holcim «l'industrie de ciment données générales », école thématique(2008).
- [60] Y. Madoui « Recyclage d'un déchet industriel (poussière de By-pass) », mémoire de master, université Mohamed Khider, Biskra, Algérie (2019).
- [61] Documentation de SPA BISKRIA CIMENT.
- [62] ISO 662 .1998.Détermination de la teneur en eau et en matières volatiles.
- [63] S. Bouregaya « Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur », thèse de doctorat, université de Toulouse, France (2018).
- [64] I. Bayouli « Application de la spectrométrie de fluorescence x à l'analyse in situ des métaux dans les sols contaminés », mémoire présenté comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie de l'environnement, université de Québec, Canada (2016).
- [65] H. Haddou « Comportement des mortiers à base d'un ciment portland et ciment composé de Béni-Saf dans un milieu agressif », mémoire de master, université de Tlemcen, Algérie (2015).
- [66] A. Benguedouar « Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (CSH) hybrides, mémoire de magister, université Constantine I, Algérie (2013).
- [67] Fichier « Utile d'essai d'affaissement sur le béton ».

# *Annexes*

## Annexes

### 1. Temps de début de prise

Déterminé selon la NA 230, le temps de début de prise doit satisfaire aux exigences du tableau I ci-dessous.

### 2. Stabilité (expansion)

Déterminée selon la NA 230, l'expansion doit satisfaire aux exigences du tableau I ci-dessous.

### 3. Exigence mécanique

La résistance courante d'un ciment est déterminée conformément à la norme NA 234, mesurée à 28 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau I ci-dessous.

**Tableau I :** Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques.

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours	min	mm
32,5 L	–	$\geq 12$	$\geq 32,2$	$\leq 52,5$	$\geq 75$
32,5 N	–	$\geq 16$			
32,5 R	$\geq 10$	–			
42,5 L	–	$\geq 16$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\geq 60$
42,5 N	$\geq 10$	–			
42,5 R	$\geq 20$	–			
52,5 L	$\geq 10$	–	$\geq 52,5$	–	$\geq 45$
52,5 N	$\geq 20$	–			
52,5 R	$\geq 30$	–			

**Tableau II :** Liste de diffusion : Responsables Fabrication, Qualité, Procédés.

Paramètres	Ancienne cible
% Calcaire	4
% Finesse 45 $\mu$	5

#### 4. Explication de système de By-pass

Lorsque la descente de la farine fraîche pour alimenter le système de four à travers l'embout, et précisément au troisième étage et dans le degré de la température de convergence de 500 °C degrés Celsius déclencher des réactions qui résume par: des composés ou volatils, tels que les composants de gaz de chlore et de dioxyde de soufre de chaque groupe Ceci est le résultat des interactions de démolition et d'autres gaz déplacer ce gaz avec la matière se déplacent verticalement selon la tour avant de le chauffer à fumer une boîte à l'entrée du four à une température d'environ 950 ° C produit notre poussière contient ces matériaux accumulés sont la pression en poudre et élevée peut empêcher l'écoulement de matériau à partir du cinquième étage et peut provoquer un blocage dans les tubes Article en présence En haut de la boîte à fumée, la soupape s'ouvre et se ferme lorsque la pression augmente, la soupape s'ouvre pour extraire la substance poussiéreuse cette pression est un obstacle à la matière et les empêche de pénétrer dans le four et le confinement de ce *soufre* de poussière matériel et le dioxyde de chlore poly chlorés à des taux élevés nocifs au four et le monde surnaturel des lois de ciment, nous conduit à tirer hors de la boîte.

Ce matériau poussiéreux est filtré de l'air dans des filtres quantitatifs et placé dans des silos, puis extrait dans des réservoirs de ciment à haute pression pour être éliminé à l'extérieur de l'usine. Nous essayons actuellement de mettre ce matériau dans le ciment pour s'en débarrasser, mais malheureusement les usines de chlore nous empêchent parce que la norme légale dans le ciment a dépassé la limite qui permet d'augmenter le matériel ainsi nous avons recours pour jeter ces déchets.

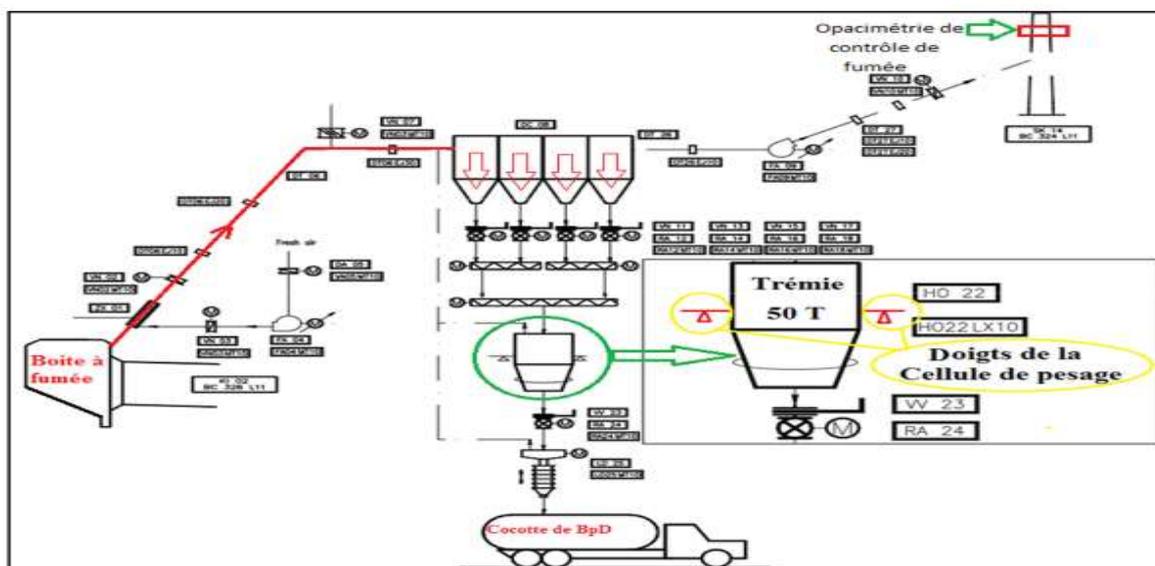


Figure I : Schéma de l'extraction de poussière de By-pass et la trémie.

## Résumés

Cette étude s'articule sur la comparaison de l'évolution des propriétés chimiques, physiques et le comportement mécanique de cinq formulations des mortiers avec des pourcentages différents des alcalis. Il s'agit quatre formulations des mortiers avec ajout des alcalis, et une formulation d'un mortier sans ajout (témoin).différents analyses ont été faits tels que : étude chimique, physique et mécanique. Les résultats obtenus montrent que le bon comportement des mortiers correspondant à l'échantillon de 0.634% des alcalis ce qui améliore la résistance mécanique à flexion et à la compression.

Mots clés : ciment, mortier, béton, Alcalis, étude chimique de ciment, analyses physique et mécaniques de ciment

## Abstract

This study based on the comparison of the evolution of the chemical, physical properties and the mechanical behavior of five formulations of mortars with different percentages of alkalis. These are four formulation of mortars with addition of alkalis, and one without addition (witness).various analyzes were carried out such as chemical, physical and mechanical study. The results obtained show that the good behavior of the mortars corresponding to the sample of 0.634% of alkalis, which improves the mechanical resistance to bending and to compression.

Key words: cement, mortar, concrete, alkalis, chemical study of cement, physical and mechanical analyzes of cement.

## ملخص

تعمد هذه الدراسة على مقارنة تطور الخواص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية لخمسة تركيبات من الملاط بنسب مختلفة من القلويات. اربعة منها تمت إضافة القلويات لها وعينة واحدة بدون إضافة (شاهدة). اجريت تحليلات مختلفة كيميائية، فيزيائية وميكانيكية. اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها السلوك الجيد للعينة التي تحتوي على 0.634 % من القلويات مما يحسن المقاومة الميكانيكية للانحناء والضغط.

الكلمات المفتاحية: الاسمنت، الملاط، الخرسانة، القلويات، الدراسة الكيميائية للإسمنت، التحليلات الفيزيائية والميكانيكية للإسمنت.