



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

Ministère de l'Enseignement Supérieure  
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



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

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie  
(ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment

Dirigé par :  
Pr.BEDDAR Miloud  
Dr.MEDDAH Abdelaziz

Présenté par :  
YAHIA Mohamed

Promotion : 2015/2016

## **REMERCIEMENTS**

La présente étude a été réalisée au sein du Département de Génie Civil de l'Université de « MOHAMED BOUDIAF » de M'sila :

Je remercie Monsieur BEDDAR Miloud et monsieur MEDDAH Abdelaziz pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'encadrer ce travail, pour leurs disponibilités, pour leurs écoutes, pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'ils ont bien voulu montrer pour ce travail qu'ils ont guidé par de judicieux conseils.

Je remercie Mr. BOUBAKRI Mohamed, Mr. NAOUI Haddad et Mr. DAHMANI Bachir et toutes les personnes du laboratoire de qualité et de l'industrie de ciment LAFARGE qui m'ont aidé durant toute la période des travaux.

Je remercie très chaleureusement tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

# Sommaire

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**ملخص**

**Résumé**

**Abstract**

**Introduction générale**

## **CHAPITRE I : Généralités sur les ciments**

I-1 Introduction .....	4
I-2 Aperçu historique .....	4
I-3 Définition d'un ciment.....	5
I-4 les différents ajouts incorporés au ciment .....	5
I-5 Procèdes et techniques de fabrication du ciment.....	5
I-6 Techniques de fabrication.....	7
I-6-1 Extraction des matières premières .....	7
I-6-2 Stockage et broyage des matières premières .....	7
I-6-3 Cuisson pour obtention du clinker.....	8
I-6-4 Broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment.....	10
I-6-5 Stockage, ensachage et expédition .....	10
I-7 Constituants principaux du ciment et les additions .....	11
I-7-1 Le clinker.....	11
I-7-1-1 La composition chimique .....	11
I-7-1-2 La Composition minéralogique .....	11
I-7-1-3 Composition minéralogiques moyennes de clinker.....	13
I-7-2 Le sulfate de calcium.....	13
I-7-3 Les ajouts minéraux.....	13
I-8 Catégories des ciments .....	14
I-9 La prise et l'hydratation du ciment portland .....	15
I-9-1 La portlandite.....	16
I-9-2 Les C-S-H.....	16
I-9-3 L'ettringite et les phases AFt .....	17
I-9-4 Le monosulfo-aluminate AFm.....	17
I-9-5 Les aluminates hydratés.....	17

I-10 Caractéristiques du ciment.....	18
I-10-1 Caractéristiques physico-chimiques .....	18
I-10-1-1 Indice d'hydraulicité.....	18
I-10-1-2 Prise .....	18
I-10-1-3 Durcissement .....	19
I-10-1-4 Fausse prise.....	19
I-10-1-5 Chaleur d'hydratation.....	19
I-10-1-6 Finesse de mouture .....	19
I-10-1-7 Retrait .....	20
I-10-1-8 Expansion .....	21
I-10-2 Exigences chimiques .....	21

## **CHAPITRE II : Valorisation des déchets**

II-1 Introduction .....	23
II-2 Les déchets .....	23
II-2-1 Définition .....	23
II-2-1-1 Définition officielle de la loi de 1975 .....	23
II-2-1-2 Définitions officielles de la loi de 1992 .....	23
II-2-2 Classifications des déchets .....	24
II-2-2-1 Distinction en fonction de l'activité à l'origine du déchet .....	24
II-2-2-2 Distinction en fonction de la nature du déchet .....	24
II-3 Valorisation des déchets en Algérie .....	25
II-3-1 Un double bénéfique pour l'environnement .....	25
II-3-1-1 La valorisation matière .....	26
II-3-1-2 La valorisation énergétique .....	26
II-3-2 Valorisation des déchets en science des matériaux .....	26
II-3-2-1 Liants hydraulique et matériaux de structure .....	26
II-3-2-2 Autres types de déchets utilisés en cimenterie .....	28
II-4 Présentation de déchet étudié : le ciment hydraté .....	30
II-4-1 La chaîne de fabrication de ciment .....	30
II-4-1-1 L'impact des déchets collectés .....	30
II-4-2 Déchets de BTP .....	31
II-4-3 Valorisation de ciment hydraté .....	32
IV-5 Conclusion .....	32

## Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés

III-1 Introduction .....	34
III-2 Caractéristiques des matériaux utilisés .....	34
III-2-1 Le ciment avec ajout des déchets cimentaire .....	34
III-2-1-1 Mélange ciment hydraté .....	34
III-2-1-2 Composition chimique de ciment hydraté .....	34
III-2-1-3 Composition minéralogique de ciment hydraté .....	35
III-2-2 Le clinker .....	35
III-2-2-1 Composition chimique du clinker .....	35
III-2-3 Le gypse .....	36
III-2-3-1 Composition chimique .....	36
III-3 procédés de préparation des différents ciments .....	36
III-3-1 Composition pondérale des différents ciments .....	36
III-3-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés .....	37
III-4 Formulation des mortiers normalisés .....	37
III-4-1 L'eau de gâchage .....	38
III-4-2 Sable normalisé .....	38
III-4-2-1 Les caractéristiques de sable normalisé .....	39
III-5 Méthodes d'essais .....	41
III-5-1 Essai sur ciment anhydre .....	41
III-5-1-1 Masse volumique absolue .....	41
III-5-1-2 Mesure de la finesse du ciment .....	42
III-5-1-3 Analyse granulométrique (méthode Alpine) .....	44
III-5-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment) .....	46
III-5-2-1 Essai de consistance .....	46
III-5-2-2 Essai de Prise .....	47
III-5-2-3 Essai de stabilité .....	48
III-5-3 Essai sur mortier .....	50
III-5-3-1 Mortier normalisé .....	50
III-5-3-2 Essais de retrait et de gonflement .....	51
III-5-3-3 La Chaleur d'hydratation (la méthode semi-adiabatique) .....	54
III-5-3-4 Essai de compression .....	58

## CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

IV-1 Introduction .....	60
VI-2 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur le poids spécifique du ciment .....	60
IV-3 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur la surface spécifique du ciment .....	61
IV-4 L'effet de l'ajout de ciment hydraté sur l'analyse granulométrique à 45µm,90µm .....	62
IV-5 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur les teneurs en oxydes .....	63
IV-6 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur la pâte de ciment .....	64
IV-6-1 Influence de la teneur en ciment hydraté sur la consistance .....	64
IV-6-2 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur le temps de prise .....	65
IV-6-3 Influence de la teneur en ciment hydraté sur la stabilité du ciment .....	66
IV-7 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur le mortier .....	67
IV-7-1 Effet du taux d'ajout de ciment hydraté sur le retrait et gonflement .....	67
IV-7-2 Effet de l'ajout de ciment hydraté sur la chaleur d'hydratation .....	69
IV-7-2-1 Effet de la chaleur d'hydratation sur temps de prise .....	70
IV-7-3 Résistance à la Compression .....	71
IV-8 Comparaison entre les ciments préparés et les produits de l'usine LafargeHolcim .....	73

<b>Conclusion générale</b> .....	76
----------------------------------	----

### **Bibliographie**

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I : Généralités sur les ciments

Tableau I-1 : Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire .....	11
Tableau I-2 : les quatre phases cristallines principales .....	13
Tableau I-3 : Principales catégories de ciment.....	14
Tableau I-4 : Principaux hydrates d'une pâte de ciment .....	16
Tableau I-5 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants .....	21

## CHAPITRE III : Caractéristiques des matériaux utilisés

Tableau III-1 : Composition chimique de ciment hydraté .....	34
Tableau III-2 : Principaux constituants du cru de clinker .....	35
Tableau III-3 : Principaux constituants chimique du clinker .....	35
Tableau III-4 : Composition minéralogique du clinker.....	35
Tableau III-5 : Composition chimique du gypse.....	36
Tableau III-6 : Compositions pondérales des huit ciments préparés .....	36
Tableau III-7 : Composition chimique des ciments préparés.....	37
Tableau III-8 : Composition du mortier normal.....	38
Tableau III-9 : Propriétés physiques et chimiques de sable de sable normalisé .....	39
Tableau III-10 : l'analyse chimique de sable .....	40
Tableau III-11 : les résultats de l'analyse granulométrique .....	40
Tableau III-12 : Masse volumique absolue des ciments .....	42
Tableau III-13 : SSB des ciments préparés .....	44
Tableau III-14 : Caractéristiques de la granulométrie des différents ciments.....	45
Tableau III-15 : Composition des mortiers. ....	50

## CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

Tableau VI-1 : Poids spécifique des ciments préparés.....	60
Tableau IV-2 : Surface spécifique des ciments préparés .....	61
Tableau IV-3 : Variation de l'analyse granulométrique en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté.....	62

Tableau IV-4 : Evolution de la consistance normale en fonction ciment hydraté .....	64
Tableau IV-5 : Temps de prise de ciment préparés.....	65
Tableau IV-6 : Expansion à chaud des ciments préparés.....	66
Tableau IV-6 : Evolution des résistances à la Compression en fonction du taux d'ajout .....	67
Tableau IV-7 : Retrait et gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté.....	69
Tableau IV-8 : Effet du taux d'ajout de ciment hydraté sur la chaleur d'hydratation.....	70
Tableau IV-9 : effet de chaleur d'hydratation sur le temps de prise.....	71
Tableau IV-10 : Evolution des résistances à la compression du mortier en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté .....	
Tableau IV-11 : Comparaison des résultats entre les ciments préparé et ciment Lafarge .....	73

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I : Généralités sur les ciments

Figure I-1 : Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté l'alite est le composé majoritaire du clinker.....	6
Figure I-2 : Schéma de tour échangeuse .....	8
Figure I-3 : Four rotatif à ciment 'le cœur de la cimenterie' .....	10
Figure I-4 : Composition chimique du clinker. ....	11
Figure I-5 : Hydratation des grains d'alite et de bélite .....	15
Figure I-6 : Photographie au microscope électronique de portlandite .....	16

## CHAPITRE II : Valorisation des déchets

Figure II-1 : déchet de ciment hydraté dans la cimenterie Lafarge – Hammam Dalaa.....	30
Figure II-2 : déchets de béton provenant de démolition des structures .....	31
Figure II-3 : ciment hydraté utilisé dans la fabrication des nouveaux ciments.....	32

## CHAPITRE III : Caractéristiques des matériaux utilisés

Figure III-1 : Distillateur .....	38
Figure III-2 : sachet de sable normalisé .....	39
Figure III-3 : la courbe granulométrique du sable de sable normalisé.....	40
Figure III-4 : Voluménoètre Le Chatelier .....	41
Figure III-5 : Principe de fonctionnement de la technique de Blaine .....	43
Figure III-6 : Perméabilimètre de Blaine manuel.....	43
Figure III-7 : Tamiseuse Alpine .....	44
Figure III-8 : Appareil de Vicat manuel.....	47
Figure III-9 : L'appareil de Vicat.....	48
Figure III-10 : les Aiguillé de Chatelier .....	49
Figure III-11 : chambre d'humidité.....	52
Figure III-12 : Rétractomètre pour mesure des essais de retrait et de gonflement .....	53
Figure III-13 : Calorimètre Langavant .....	57
Figure III-14 : Dispositif de rupture en compression.....	58

## CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

Figure IV-1 : Variation du poids spécifique de ciment en fonction du ciment hydraté.....	60
Figure IV-2 : Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de ciment hydraté.....	61
Figure IV-3 : Variation de l'analyse granulométrique en fonction de ciment hydraté.....	62
Figure IV-4 : Variation de la teneur des oxydes en fonction de ciment hydraté.....	63
Figure IV-5 : Variation de la teneur des oxydes en fonction de ciment hydraté.....	63
Figure IV-6 : Variation du rapport E/C (consistance normale) en fonction de ciment hydraté ....	64
Figure IV-7 : Variation des temps de prise en fonction de ciment hydraté .....	65
Figure IV-8 : Expansion à chaud en fonction de ciment hydraté.....	66
Figure IV-9 : Evolution du retrait du mortier en fonction de la teneur en ciment hydraté .....	68
Figure IV-10 : Evolution du gonflement du mortier en fonction de la teneur ciment hydraté .....	68
Figure IV-11 : Evolution de chaleur d'hydratation en fonction de la teneur ciment hydraté .....	69
Figure IV-12 : Evolution de temps de prise sur l'effet de chaleur d'hydratation .....	70
Figure IV-13 : Effet du Taux d'ajout de ciment hydraté sur la résistance à la compression.....	72
Figure IV-14 : Evolution de résistance à la compression en fonction de temps .....	72
Figure IV-15 : Comparaison de résistance entre les ciments préparés et ciment Lafarge .....	73
Figure IV-16 : Comparaison de consistance entre les ciments préparés et ciment Lafarge.....	74
Figure IV-17 : Comparaison de temps de prise entre les ciments préparés et ciment Lafarge .....	74

## ملخص:

لأسباب اقتصادية وبيئية، وفي إطار الاستغلال، تتم دراسة إعادة استخدام نفايات مواد البناء على نحو متزايد. هذه الدراسة التجريبية تركز على المساهمة في تعزيز استغلال نفايات الاسمنت الرطبة في صناعة نوع جديد من الاسمنت.

يهدف هذا البحث إلى إضافة نسب من الاسمنت الرطب إلى الكنكر ومعرفة قيمة استخدام هذه النفايات واستبدالها جزئياً في الكنكر، على البيئة وعلى الأداء الميكانيكي للإسمنت الذي أدخل عليه.

وتظهر النتائج المتحصل عليها أنه من المجدي جدا استغلال هذه النفايات لصناعة اسمنت صديق للبيئة، والذي له خصائص مماثلة تقريبا أو أفضل ريولوجيا وميكانيكيا مقارنة مع الاسمنت العادي.

بشكل عام يظهر البحث أن استخدام الاسمنت الرطب يساهم بشكل إيجابي في تحسين الخواص الكيميائية والفيزيوميكانيكية للإسمنت، وبدوره يؤثر على الملاط. استخدام هذا النوع من الإسمنت المصنوع أساسا من نفايات الاسمنت الرطب يسمح لنا بالتقليل من استهلاك الطاقة، وتقليل انبعاثات CO<sub>2</sub> والتسيير العقلاني لهذه النفايات، والذي يؤدي إلى الحصول على إسمنت أكثر اقتصادا وأقل تلويثا للبيئة.

## مفاتيح:

إسمنت رطب، نفايات، استغلال.

## **Résumé :**

Pour des raisons économiques et environnementales, la valorisation, du la réutilisation des déchets de matériau de construction sont plus en plus étudiées.

Cette étude expérimentale consiste à contribuer à la valorisation de déchet de ciment hydraté dans la fabrication d'un nouveau ciment.

Le travail a comme but d'introduire des pourcentages de ciment hydraté au clinker et voir l'intérêt d'utiliser ce déchet en substitutions partielle au clinker sur l'environnement et sur les performances mécaniques des ciments dans lesquels il a été incorporé.

Les résultats obtenue montre qu'il est très faisable de valoriser ce matériau et fabriquer un ciment éco-environnementale qui présente des caractéristiques rhéologiques et mécaniques presque analogue ou meilleurs à celle d'un ciment ordinaire.

En générale le travail montre que l'utilisation des ciments hydratés contribue d'une façon positive à l'amélioration des caractéristiques chimiques et physico-mécaniques de ciment et par conséquence celle du mortier. L'utilisation de ce type de ciment élaboré à base des déchets de ciment hydraté nous permet de réduire la consommation d'énergie, minimiser l'émission de CO<sub>2</sub> et faire bien gérer ce type de déchet, ce qui revient à obtenir un ciment plus économique et moins polluant.

### ***Mots clés :***

*Ciment hydraté, déchet, valorisation.*

## **Abstract:**

For economic reasons and environmental, valorization, re-use of the construction material scrap more in are studied.

This experimental study consists in contributing to the valorization of cement scrap hydrated in the manufacture of new cement.

Work has like drank to introduce percentages of cement hydrated with the clinker and to see the interest to use this waste substituted some partial for the clinker on the environment and the mechanical performances of cements in which it was built-in.

Results obtained watch that it is very feasible to develop this material and to manufacture cement éco-environmental which shows characteristics rheological and mechanical almost similar or better to that of ordinary cement.

In general work shows that the use of hydrated cements contributes in a positive way to the improvement of the chemical and physicommechanical characteristics of cement and by consequence that of the mortar. The use of this type of cement worked out containing the hydrated cement scrap enables us to reduce the consumption of energy, to minimize the CO<sub>2</sub> emission and to make well manage this type of waste, which amounts obtaining more economic cement and less pollutant.

### ***Key words:***

*Hydrated cement, waste, valorization.*

# INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du ciment occupe une place prépondérante dans les économies de toutes les nations. Elle est un élément nécessaire pour la réalisation des projets de construction dans les domaines industriels, économiques, sociaux et culturels tout en répondant aux exigences futures de la conservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement.

En Algérie, la production du ciment est basée deux raisons essentielles :

- a) Répondre à la demande croissante des consommateurs de cette matière dans notre pays en augmentant la production annuelle des cimenteries par l'apport des ajouts inertes.
- b) Exploitation et l'utilisation des matières premières et déchets industriels non exploités au para-avant.

Dans le contexte du deuxième point et vu que dans le processus de fabrication du ciment, il y a toujours les pertes en matière de ciment, la tendance de valoriser ces pertes est une solution favorable et efficace pour résoudre ce problème et par conséquent à l'élimination d'un déchet nuisible pour l'environnement et pour l'économie des cimenteries.

Ce déchet qui n'est pas qu'un ciment hydraté accumulé généralement à l'air libre, au sein des cimenteries et avec grandes quantités vu l'absence d'un système de récupération. Ce ciment hydraté est dû aux pertes au niveau de système de remplissage, la déchirure des sacs, le rechargement aux camions-citernes. Ce déchet (ciment hydraté) peut être existé dans le cas de stockage abandonné des sacs de ciment à long terme, sous l'effet des conditions climatiques extrême en absence des moyens de stockage réglementaire et dans le cas d'ou le béton démoli (séisme, dégradation, rénovation...).

Notre travail consiste à valoriser ce type de déchets par leur incorporation au clinker avec différents pourcents variant de 0 à 35%. Le programme expérimental entrepris vise à voir l'effet de l'incorporation du ciment hydraté sur les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de nouveau ciment.

Pour réaliser ce travail qui contient tous les résultats et l'interprétation de ces résultats, on a structuré notre mémoire en 5 chapitres :

- **Chapitre I : Généralité sur les ciments**

Le premier chapitre est destiné à l'étude bibliographique, basé sur les notions générales de ciment portland, fabrication et leur propriété.

- **Chapitre II : La valorisation des déchets dans les applications du génie civil**

La valorisation des déchets en science des matériaux et les produits qui sont élaborés à partir de résidus

- **Chapitre III : Les caractéristiques des matériaux utilisés**

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation, cette partie est basée sur la caractérisation des matériaux utilisés (Clinker, déchet de ciment, gypse ... etc.) et les méthodes d'essais réalisés sur les ciments produisant à base des déchets.

- **Chapitre IV : Résultats expérimentaux et interprétation**

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les commentaires appropriés aux résultats de cette étude.

- **La conclusion générale**

## **CHAPITRE I : Généralités sur les ciments**

### **I-1 Introduction :**

Le ciment est un matériau de base dans les secteurs du bâtiment et du génie civil. Il est utilisé dans la fabrication du béton, qui est le deuxième matériau le plus utilisé sur la planète. C'est un matériau de construction durable, versatile et totalement recyclable.

Le ciment est fabriqué dans plus de 150 pays dans des centaines d'usines locales. Sa production progresse régulièrement depuis le début des années cinquante. Elle ne cesse d'augmenter dans les pays en voie de développement en particulier en Asie, qui s'est taillé la part du lion dans l'augmentation de la production mondiale de ciment pendant la dernière décennie. Cette augmentation de productivité est due à l'apparition d'unités de production de plus en plus grandes, à la mise en œuvre de la conduite automatique des procédés et à l'utilisation d'un personnel moins nombreux mais plus qualifié requis par cette automatisation.

Les marchés du ciment sont avant tout locaux. Il existe cependant un commerce mondial et dans certains cas l'expédition internationale de ciment est économiquement viable. La concurrence internationale est surtout une menace pour les usines au niveau individuel. Ce chapitre est construit autour du fil conducteur de la production cimentière. Il présente les techniques et les procédés dont sont issues les ciments, après avoir connaître les matières utilisées pour la fabrication ce liant hydraulique, et ses types.

### **I-2 Aperçu historique :**

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice.

L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation et les secrets de fabrication de ce matériau se sont ensuite perdus à la chute de l'Empire face au retour de la maçonnerie en pierre. [1]

J. Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile. En 1817, Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. J. Apsdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Mais la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, moulable avec une bonne résistance à la compression et qui rend inutile la taille de la pierre. [2]

## I-3 Définition d'un ciment :

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

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. [3]

Il existe deux grandes familles de Ciments :

1. Les ciments Portland, constitués majoritairement de silice et de chaux et qui utilisée principalement dans les bétons de bâtiments et les ouvrages de génie civil ;
2. Les ciments alumineux qui se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont développés au début du 20<sup>ème</sup> siècle par Bied. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour la confection de sols industriels, d'ouvrage d'assainissements ou des mises en service rapides, et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière. [4]

## I-4 les différents ajouts incorporés au ciment :

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- du calcaire ;
- du laitier de haut fourneau ;
- des cendres volantes ;
- des fines calcaires ;
- de la pouzzolane naturelle ;
- des schistes calcinés ;
- des fumées de silice ;

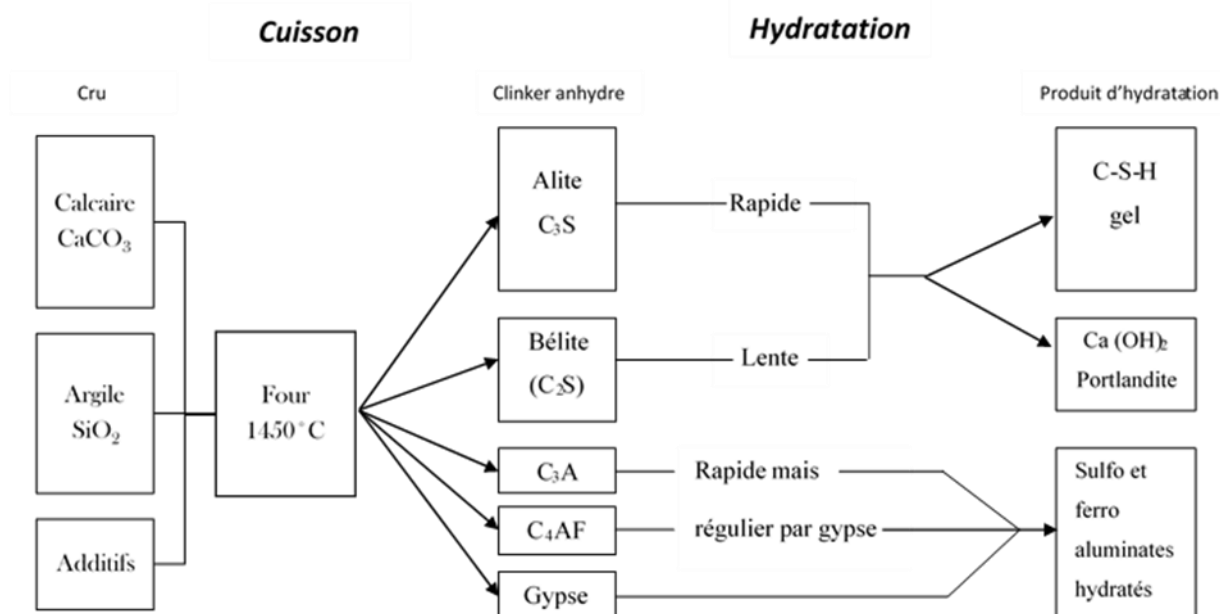
Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques. [5]

## I-5 Procèdes et techniques de fabrication du ciment :

La production du ciment dans l'Union européenne est environ 10,5 % de la production mondiale. En 2008, on dénombrait dans l'Union européenne 268 installations produisant du clinker et du ciment fini, regroupant 377 fours au total. On recensait également 90 usines de broyage (broyeurs à ciment) et deux installations de production de clinker sans broyeur. En règle générale, les fours ont une capacité d'environ 3 000 tonnes de clinker/jour.

La production du ciment en Algérie est d'environ 18 millions de tonnes /an. Le pays compte 15 installations de cimenteries, 12 publiques et 3 privées (Lafargeholcim), réparties à travers le nord du territoire.

Le ciment portland est constitué principalement de clinker. Ce dernier est obtenu par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%) : l'argile ou le kaolin. Le cru est ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker. [6]



**Figure I-1 : Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté l'alite est le composé majoritaire du clinker [7]**

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide ;

- Dans le **procédé par voie sèche**, la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air-through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivore, mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières (électrofiltres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

- Dans le **procédé par voie semi-sèche**, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre 'Grille LEPOL' puis dans le four.

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

- Dans le **procédé par voie humide**, La farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire : c'est pourquoi avec le 1er choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche.

**I-6 Techniques de fabrication :**

Les opérations suivantes sont communes à tous les procédés : [8]

- Extraction des matières premières,
- Stockage et broyage des matières premières,
- Cuisson pour obtention du clinker,
- Broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment,
- Conditionnement et expédition.

**I-6-1 Extraction des matières premières :**

Les gisements calcaires et argiles naturels (comme les roches calcaires, les marnes, la craie et l'argile) fournissent les matières premières. La silice, l'oxyde de fer et l'alumine présents dans différents minerais et minéraux peuvent être ajoutés pour assurer une même qualité du mélange indépendamment de la qualité de la matière première. Les cendres de centrales thermiques, les laitiers de hauts fourneaux et autres résidus industriels peuvent également être utilisés comme substituts partiels des matières premières naturelles.

Par abattage à l'explosif ou par ripage au bulldozer, les matières premières sont extraites des parois rocheuses de la carrière à ciel ouvert. Les blocs sont repris par dumpers ou bande transporteuse vers un atelier de concassage et réduits dans en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

**I-6-2 Stockage et broyage des matières premières :**

L'utilisation de halls de stockage dépend des conditions climatiques et de la quantité de matière fine (farine ou cru) produite par l'installation de concassage. Pour une usine d'une capacité de production de 3000 tonnes/jour, ces bâtiments peuvent contenir de 20000 à 40000 tonnes de matériaux.

Le pesage et le dosage précis des matériaux introduits dans le broyeur sont importants car ils déterminent la constance de la composition chimique du cru, essentielle pour la stabilité de fonctionnement du four et pour l'obtention d'un ciment de qualité.

- Pour procédés en voie sèche et semi-sèche : Les matières premières, dans des proportions soigneusement contrôlées, sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur.
- Pour procédés en voie humide ou semi-humide : Les matières premières contenant plus de 20% d'eau en masse peuvent être broyées avec de l'eau. Le mélange est envoyé dans un délayeur où il est décheté et écrasé par des herses rotatives ce qui le transforme en une pâte. Quand celle-ci est suffisamment fine, elle passe dans des tamis montés dans la paroi du broyeur puis elle est pompée et stockée dans des cuves. Il faut souvent la broyer une nouvelle fois pour obtenir une granulométrie satisfaisante, en particulier si on lui ajoute une autre matière première comme le sable.

En sortant du broyeur, le cru ou la pâte doivent être malaxés et homogénéisés une nouvelle fois pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru homogénéisé et stocké dans des silos, sa composition est dans des proportions bien définies :

- carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : 77 à 83 % ;
- silice totale ( $\text{SiO}_2$ ) : 13 à 14 % ;
- alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : 2 à 4 % ;
- oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : 1,5 à 3 %.

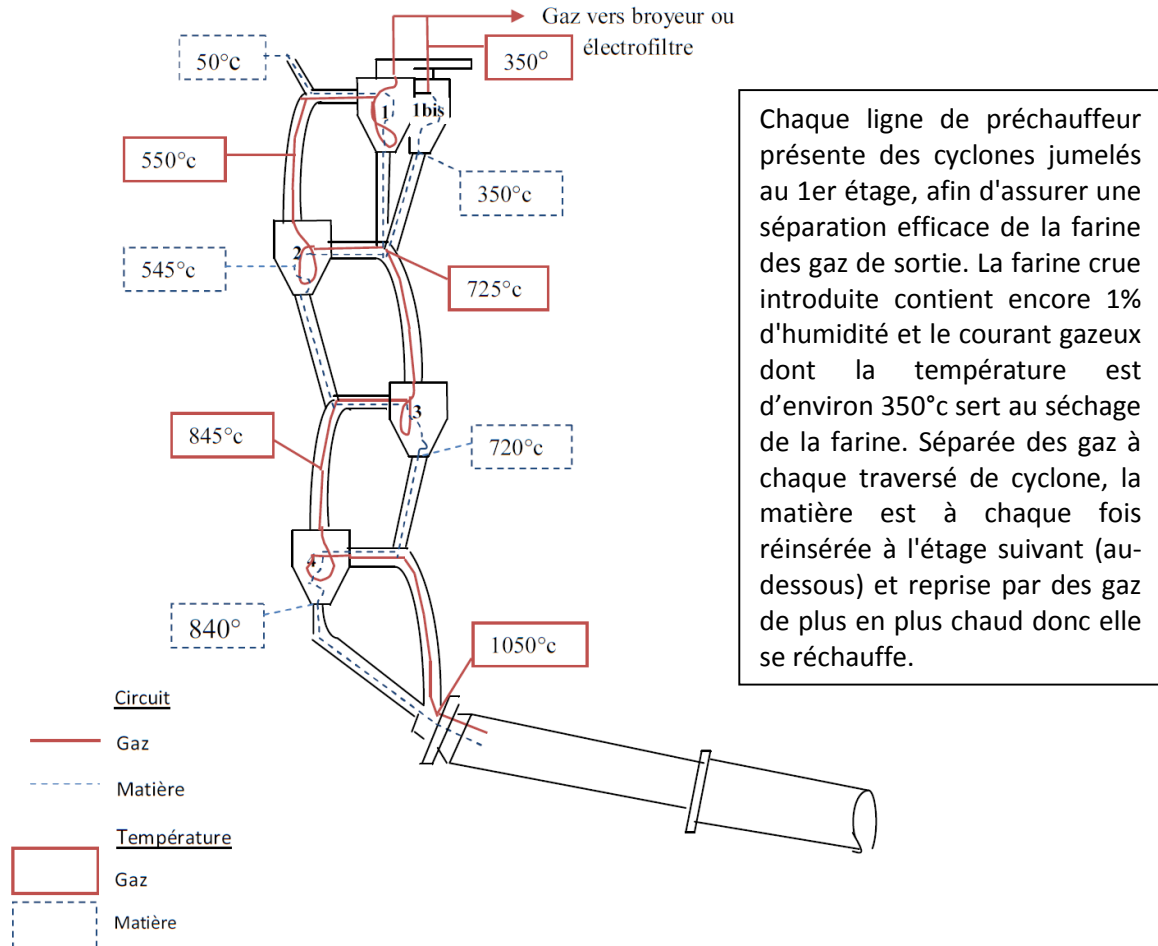


Figure I-2 : Schéma de tour échangeuse

**I-6-3 Cuisson pour obtention du clinker :**

Chacune des opérations impliquées dans le processus est importante et doit être correcte, faute de quoi le ciment risque de ne pas avoir la qualité exigée pour son emploi. Cependant la cuisson est sans doute l'opération la plus sensible et la plus importante en termes de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit.

En effet, La farine crue (ou la pâte pour la voie humide) est introduite sous forme pulvérulente dans un préchauffeur à cyclone. Cet échangeur gaz/matière réalise la décarbonatation partielle de la farine crue (25% à 30%) qui doit être prête aux réactions du clinkérisation dans le four.

Le four rotatif est constitué d'un cylindre en acier de chaudière, animé d'une vitesse réglable lente (0.67 à 2 tr/mn), et présente une inclinaison de 3% dans le sens de l'écoulement de matière. Ce tube appelé aussi virole repose par l'intermédiaire de bandages, au nombre de trois,

sur des galets, il est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires qui protègent les tôles de température élevées (1850°C pour les gaz et 1450°C pour la matière).

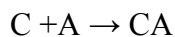
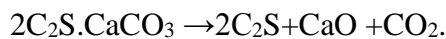
En amont, la matière pénètre à la température de 800°C. En aval les gaz à 1850°C sont injectés à l'aide de la tuyère. Il se produit un échange à contre-courant entre les gaz et la matière. Au fur et à mesure que la matière avance, elle se chauffe et se transforme. Un groupe d'entraînement donne au four le mouvement de rotation nécessaire, à la fois au brassage de la matière et à la descente régulière de celle-ci de la zone amont (zone de décarbonatation) à la zone aval (zone de clinkérisation).

A la sortie, les granules incandescents sont refroidis rapidement au contact de l'air injecté dans des tubes, ce qui permet de leur donner les structures cristallographiques optimales.

Les réactions chimiques réagissant à la formation du clinker sont donc : [10,11]

### - Zone de décarbonatation des calcaires et dolomies :

**600 à 800 °c** : début de décarbonatation :



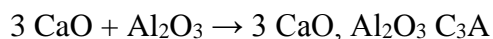
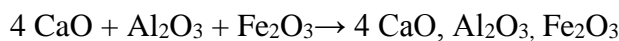
**800 à 850 °c** : formation de Bélite  $\text{C}_2\text{S}$  et de certaines combinaison intermédiaire des aluminés  $\text{C}_2\text{A}$ ,  $\text{C}_2\text{A}$ ,  $\text{C}_2\text{A}_7$  et ferrites.

**850 à 900 °c** : formation de  $\text{C}_3\text{A}$ .

### - Zone de transition :

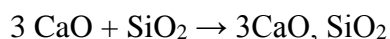
**900 à 1000 °c** : CaO libre devient excédentaire.

**1000 à 1250 °c** : formation de  $\text{C}_4\text{AF}$ .



### - Zone de cuisson :

**1250 à 1350 °c** : commencement de formation de l'Alite  $\text{C}_3\text{S}$  (début de clinkérisation)



**1350 à 1450 °c** : réaction de formation de l'Alite  $\text{C}_3\text{S}$  et cristallisation de l'Alite et la Bélite (clinkérisation)

### - Zone de refroidissement :

**1450 à 1200 °c** : refroidissement.

**1200 à 80 °c** : refroidissement totale et stabilisation de  $\text{C}_3\text{S}$  « minéraux de bogue ».

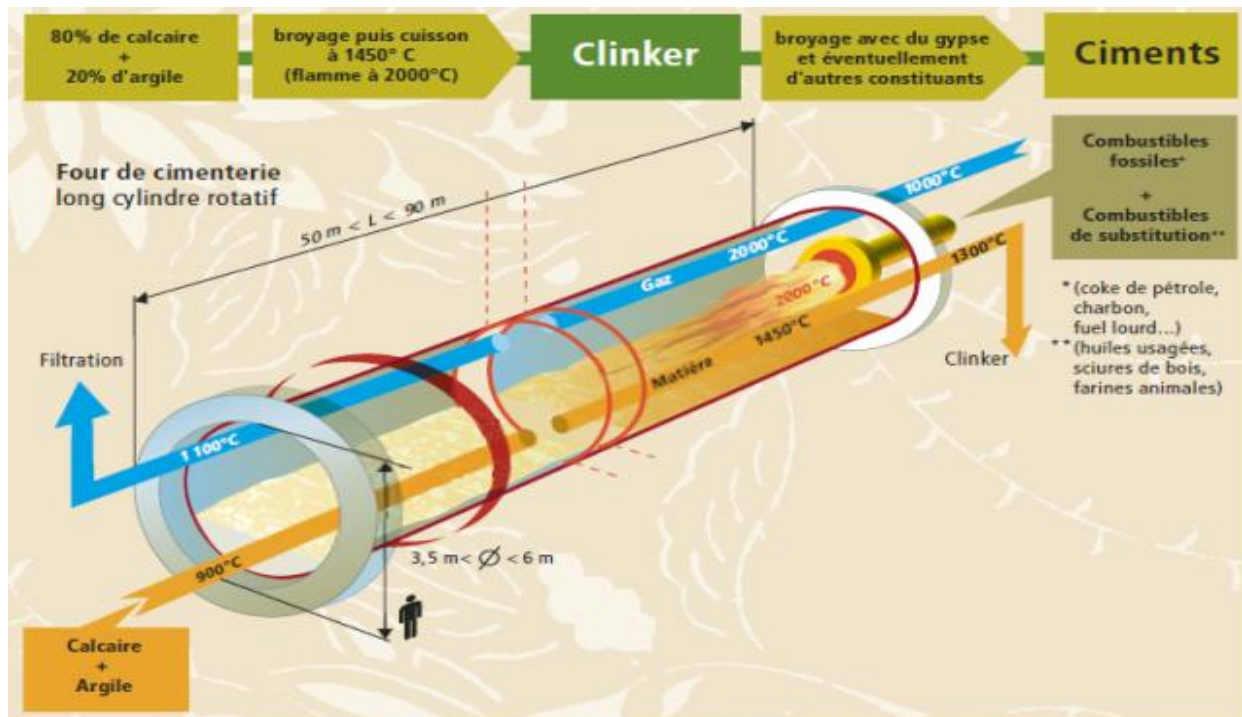


Figure I-3 : Four rotatif à ciment ‘le cœur de la cimenterie’ [9]

#### I-6-4 Broyage du clinker et d’additifs pour obtenir le ciment :

Pour les ciments composés, du gypse et des constituants secondaires (pigments, résines, laitiers des hauts fourneaux, pouzzolanes) peuvent être ajoutés pour donner au ciment des propriétés spécifiques. La matière est broyée très finement (grains inférieurs à 40 microns) à l’aide de l’un des broyeurs :

- broyeur en circuit fermé avec séparateur aérodynamique ou séparateur à cyclones ;
- broyeur vertical à galets (bien adapté aux additions minérales importantes du fait de sa capacité de séchage ainsi qu’au broyage séparé des additions minérales) ;
- broyeur à rouleaux (additions minérales relativement limitées, si non sèches ou préséchées).
- Le ciment sera acheminé ensuite vers des silos de stockage à compartiment unique ou à plusieurs compartiments.

#### I-6-5 Stockage, ensachage et expédition :

À la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L’ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu’environ 30 % de la production de ciment, s’effectue dans des sacs en papier kraft à l’aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure.

La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches. [5]

**I-7 Constituants principaux du ciment et les additions :**

**I-7-1 Le clinker :**

Produit obtenue par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%) : l'argile ou le kaolin .le cru et ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker.

Les granules de clinker, d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm, sont finement broyées avec addition de gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$  de 3 à 5 % en masse) dont le rôle est de réguler la prise. [6]

**I-7-1-1 La composition chimique :**

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux : l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), représentant environ 95% en masse.

La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau suivant :

Composants du clinker	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
Notations cimentière	S	A	F	C	M	S	K	N
% (en masse)	19-25	2-9	1-5	62-67	0-3	1-3	0.6	0.6

Tableau I-1 : Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire [3]

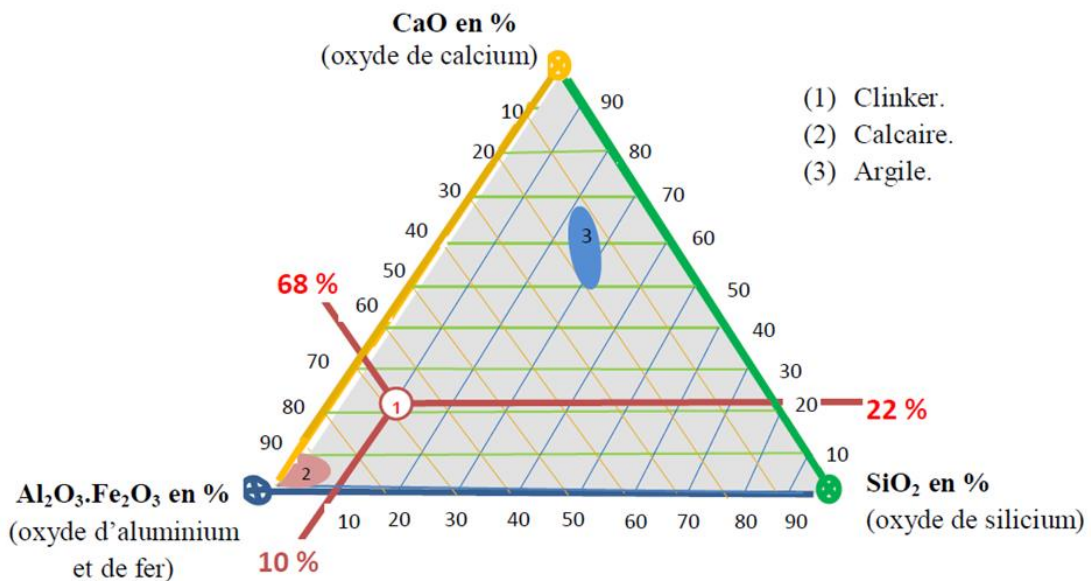


Figure I-4 : Composition chimique du clinker.

**I-7-1-2 La Composition minéralogique :**

Divers composés chimiques se forment, dont les principaux sont :

- Le silicate tricalcique  $\text{C}_3\text{S}$  (alite) :  $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$  [45 à 65 %] ;
- Le silicate bicalcique  $\text{C}_2\text{S}$  (bélite) :  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$  [10 à 30 %] ;
- L'aluminate tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  (célite) :  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  [5 à 15 %] ;
- L'alumino-ferrite tétracalcique  $\text{C}_4\text{AF}$  (Aluminoferrite) :  $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$  [5 à 15 %].

Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins deux tiers, en masse, de silicates de calcium  $[(\text{CaO})_3.\text{SiO}_2]$  et  $[(\text{CaO})_2.\text{SiO}_2]$ , la partie restante contenant de l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'autres oxydes. [12]

Parmi les quatre composant minéralogiques du clinker, ce sont surtout les silicates de calcium ( $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ ) qui génèrent les performances mécaniques,  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  permettent surtout la fabrication du clinker à une température industriellement réalisable ( $\pm 1450^\circ\text{C}$ ).

#### a- Alite ou $\text{C}_3\text{S}$ :

L'alite, ou hatrurite pour son équivalent naturel, est le principal constituant du clinker avec une proportion dépassant généralement les 60-65%. Ce silicate tricalcique ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) est un nésosilicate, il est composé de tétraèdres de silice  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  isolés et liés aux ions  $\text{Ca}^{2+}$  coordonnés octaédriquement. Seuls trois octaèdres sont liés aux ions  $\text{Si}^{4+}$ .

En fonction de la température et des ions de substitutions du  $\text{Ca}^{2+}$ , il existe plusieurs polymorphes de structures cristallines différentes : une rhomboédrique de haute température (supérieure à  $1070^\circ\text{C}$ ), trois monocliniques de moyenne température (de  $980^\circ\text{C}$  à  $1070^\circ\text{C}$ ) que l'on retrouve dans le clinker et trois tricliniques de basse température (inférieure à  $980^\circ\text{C}$ ). [13]

#### b- Bélite ou $\text{C}_2\text{S}$ :

Ce silicate Bicalcique ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) est la deuxième phase en importance dans les clinkers. Comme l'alite, il possède un polymorphisme très compliqué et encore mal connu. La bélite, ou larnite pour son homologue naturel, est aussi un nésosilicate de système cristallin monoclinique. La concentration en ions se substituant au  $\text{Ca}^{2+}$  est plus importante que dans le silicate tricalcique. Les plus communs sont :  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

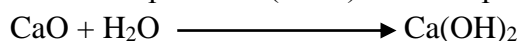
#### c- Célite ou $\text{C}_3\text{A}$ et Ferrite ou $\text{C}_4\text{AF}$ :

Aux températures de clinkérisation, les cristaux de silicates de calcium sont entourés par un liquide interstitiel. Ce liquide, après solidification, se compose globalement d'un mélange intime d'une phase riche en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la célite ou aluminate tricalcique ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) et d'une phase riche en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la ferrite, ou brownmillérite pour son équivalent naturel, qui est un alumino-ferrite tétracalcique (solution solide de  $\text{Ca}_2(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5$  pour  $x < 0,7$ ).

L'aluminate tricalcique, qui a un système cristallin cubique, n'est pas polymorphe et ne possède pas d'équivalent naturel. C'est un cyclo-aluminate composé de tétraèdres d'alumine  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  disposés en anneaux constitués de six  $(\text{AlO})^+( \text{Al}_6\text{O}_{18})^{18-}$ . Il peut incorporer des ions  $\text{Na}^+$  en substitution des ions  $\text{Ca}^{2+}$ . [13]

#### d- La chaux $\text{CaO}$ libre :

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



Volume molaire :  $56/3.18 = 17.6 \text{ cm}^3$   $74/2.34 = 31.6 \text{ cm}^3$   $100 \Delta V/V = 80\%$  Extinction de la chaux provoque un gonflement important ce qui conduit à des désordres en cas d'hydratation tardive de  $\text{CaO}$ .

**I-7-1-3 Composition minéralogiques moyennes de clinker (équation de bogue) :**

La composition minéralogique des clinkers peut être évaluée par des ratios calculés ou modules qui tiennent uniquement compte des éléments majeurs. Parmi les formules servant à calculer la teneur en composants ‘la formule de Bogue’ [14] qui donne, à titre d’exemple pour un clinker ordinaire les relations suivantes :

$$C_3S = 4.071 C - 7.602 S - 6.719 A - 1.430 F$$

$$C_2S = 8.602 S + 5.068 A + 1.079 F - 3.070 C \text{ où } 2.868 S - 0.754 C_3S$$

$$C_3A = 2.650 A - 1.692 F$$

$$C_4AF = 3.043 F$$

Dans ces conditions, il est établi que le clinker est principalement constitué en proportions variables de :

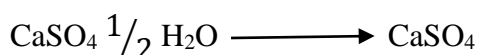
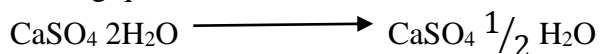
Nom	Formule chimique	Notation symbolique	Teneur %
Silicate tricalcique ‘Alite’	3CaO.SiO	C <sub>3</sub> S	45.0<60<79.7
Silicate bicalcique ‘Bélite’	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	5.7<25<29.8
Aluminate tricalcique	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	1.1<5<14.9

**Tableau I-2 : les quatre phases cristallines principales [14]**

**I-7-2 Le sulfate de calcium (Le gypse – CaSO<sub>4</sub>) :**

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C<sub>3</sub>A) qui s’hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent. Il s’ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d’autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l’hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble l’hydrosulfoaluminate de calcium (3CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaSO<sub>4</sub>, 31H<sub>2</sub>O) .La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C<sub>3</sub>A dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l’action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial. Il faut noter aussi la présence de composés mineurs comme des sulfates alcalins, de la chaux libre et des sulfates de calcium sous forme d’anhydrite ou de bassanite (représentant moins de 5 % de la masse de ciment et permettant de contrôler la réaction d’hydratation du C<sub>3</sub>A) [15].

Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment.



**I-7-3 Les ajouts minéraux :**

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

**I-8 Catégories des ciments :**

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent.

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier - pouzzolanes - cendres -calcaires - schistes - fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94 %	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CLK-CEM III/C		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	36 h 55 % comme ci-dessus.	0 à 5 %
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC-CEM V/B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus.	0 à 5 %

(\*) Le pourcentage de fillers est limité à 5%.

**Tableau I-3 : Principales catégories de ciment**

**I-9 La prise et l'hydratation du ciment portland :**

En "gâchant" le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment réagissent avec les molécules d'eau et des phénomènes d'absorption, d'hydrolyse, de dissolution, ou de cristallisation ont lieu. Dans une poudre de ciment Portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) réagit en premier, se dissout et recristallise. L'hydrolyse et la recristallisation de C<sub>3</sub>A sont rapides et sont limitées par l'ajout de gypse.

1<sup>ère</sup> étape (avant la prise) :



L'eau forme un réseau de capillaire autour des grains du clinker

2<sup>ème</sup> étape (le gâchage) :



Formation d'un gel autour des grains de C<sub>2</sub>S et C<sub>3</sub>S. Puis, diminution des interstices capillaires, apparition d'une raideur dans la pâte.

3<sup>ème</sup> étape (le durcissement)



Les interstices se combler, la pâte acquiert une résistance.

4<sup>ème</sup> étape (durcissement ultérieur)



La résistance continue à augmenter, le gel se développe. C'est un phénomène lent qui nécessite la présence d'eau

**Figure I-5 : Hydratation des grains d'alite et de bélite. [16]**

Ensuite, les silicates de calcium, C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S s'hydratent : un gel forme une pellicule autour des grains et des ions Ca<sup>2+</sup> sont mis en solution et cristallisent en Ca(OH)<sub>2</sub> sous forme de plaquettes hexagonales. L'hydratation des silicates de calcium, forme un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment (Figure I-5).

Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre, réduisant les interstices capillaires entre les grains, donnant une rigidité au matériel par la création d'un squelette. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. Les réactions d'hydratation du ciment Portland se poursuivent après la prise, et constituent le durcissement. L'évolution des

caractéristiques mécaniques est très rapide dans les premières heures mais continue pendant plusieurs mois, plus lentement.

Les principales phases de l'hydratation des ciments sont présentées dans le Tableau (I-4). L'hydratation des ciments correspond à la formation de phases hydratées à partir des constituants du clinker.

Nom	notation cimentière	Formules chimiques
silicate de calcium hydraté	C-S-H	$1,7\text{CaO}.\text{SiO}_2.2,4\text{H}_2\text{O}$
Portlandite	CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Ettringite	$\text{C}_6\text{A}\underline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ (AFt)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3(\text{CaO}.\text{SO}_3).32\text{H}_2\text{O}$
Monosulfo-aluminate	$\text{C}_4\text{A}\underline{\text{S}}\text{H}_{12}$ (AFm)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{SO}_3.12\text{H}_2\text{O}$
Katoïte	$\text{C}_3\text{AH}_6$	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{H}_2\text{O}$

Tableau I-4 : Principaux hydrates d'une pâte de ciment. [17], [18]

### I-9-1 La portlandite :

Elle est la seule phase solide présente sous forme pure (absence d'ions étrangers). Elle cristallise en plaquettes hexagonales parfois massives, Figure (I-8).

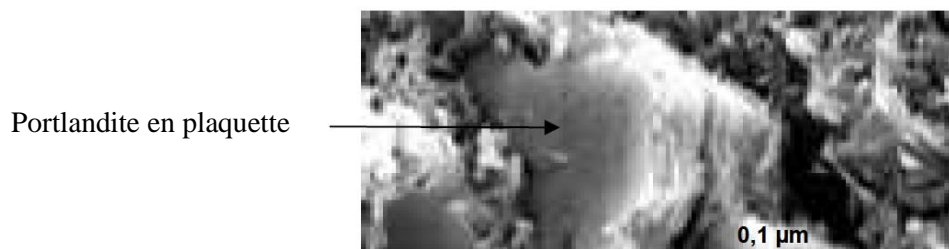


Figure I-6 : Photographie au microscope électronique de portlandite

### I-9-2 Les C-S-H :

Le terme C-S-H désigne une famille de composés du système ternaire  $\text{CaOSiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Il s'agit de composés mal cristallisés du fait de leur germination rapide. Ils sont souvent appelés "gel de C-S-H" en raison de leur forte teneur en eau et de leur faible degré de cristallisation (gel organisé sur quelques centaines de nanomètres [19]) Il leur est associé la formule chimique suivante :  $n\text{CaO}.\text{SiO}_2.(n+0,8).\text{H}_2\text{O}$  avec  $0,8 \leq n \leq 1,7$ .

Pour les ciments produisant peu de portlandite la valeur de n est faible. Pour un ciment Portland classique n avoisine la valeur maximale de 1,7. La composition des C-S-H est généralement définie par le rapport molaire  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  (noté C/S). De nombreuses études ont été consacrées à la détermination de la composition et de la solubilité des C-S-H ([19]; [20]; [21]). Les ions  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  peuvent entrer dans la structure des C-S-H jusqu'à concurrence d'un ion étranger pour 6 siliciums. Environ un tiers de l'aluminium du ciment, mais aussi une grande partie du soufre, finissent par être incorporés aux C-S-H, probablement par intégration d'un mélange microscopique d'ettringite et de monosulfate.[19]

La structure en feuillets des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est responsable de la prise et de la résistance mécanique de la pâte : le C<sub>3</sub>S joue un rôle prépondérant dans la résistance à court terme et dans la prise finale, le C<sub>2</sub>S intervient dans la résistance à plus long terme.

### I-9-3 L'ettringite et les phases AFt :

L'ettringite du ciment Portland a théoriquement la formule suivante :

C<sub>3</sub>A.3CS.H<sub>32</sub>. L'aluminium peut partiellement être remplacé par du fer et du silicium, le sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) par du carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) ou des hydroxydes (OH<sup>-</sup>) et le calcium (Ca<sup>2+</sup>) par du magnésium (Mg<sup>2+</sup>) [20]. Le rapport Fe/Al dans l'ettringite est de 1/30, le rapport Si/Al de 1/6, le rapport Mg/Ca de 1/160 et le rapport S/Ca de 1/3 (au lieu de 1/2, rapport stœchiométrique de la phase pure idéale). L'ettringite présente dans les ciments a deux origines pouvant être différenciées selon l'échéance de cristallisation. L'AFGC (Association Française du Génie Civil) propose la nomenclature suivante :

- a- L'ettringite d'hydratation précoce, non nuisible, indispensable pour réguler la prise du ciment et se formant au plus jeune âge de l'hydratation du ciment par action des sulfates du gypse sur l'aluminate tricalcique ;
- b- L'ettringite tardive ou différée (DEF : Delayed Ettringite Formation), nuisible car provoquant un gonflement et à terme, une désagrégation du matériau durci. Les sulfates ont une origine interne ou externe. L'ettringite différée se forme par réaction entre le gypse tardif (provenant d'une substitution entre la portlandite et les sulfates solubles) et les aluminates de calcium. Les mécanismes d'expansion liés à la formation d'ettringite différée (DEF) sont une expansion par absorption d'eau ou par cristallisation (pression de l'ordre de 70 à 240 MPa). Les conditions de formation de l'ettringite différée sont facilitées par la présence de fractures, des ratios SO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 0,7 et les cycles humidification / séchage.

### I-9-4 Le monosulfo-aluminate AFm :

Les phases solides C<sub>3</sub>A.CS.H<sub>12</sub> et C<sub>3</sub>AF.CS.H<sub>12</sub> correspondent également à une solution solide. Le calcium peut être substitué par du magnésium, l'aluminium par du fer et le soufre par des hydroxydes et du silicium [21]. Une partie de la phase AFm faiblement cristallisée serait intimement mélangée aux C-S-H.

### I-9-5 Les aluminates hydratés :

Les aluminates de calcium hydratés sont fortement liés aux aluminosilicates de calcium. Il existe deux types d'aluminosilicates de calcium stables : la gehlenite hydratée (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>) et une solution solide d'hydrogrenat variant de l'aluminate de calcium hydraté à l'aluminosilicate de calcium. Ces deux pôles sont C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> et C<sub>3</sub>AS<sub>3</sub>. En présence de portlandite, la gehlenite hydratée est instable. Elle réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former l'hydrogénât [22]. Les deux autres formes d'aluminates hydratés qui apparaissent dans le schéma réactionnel d'hydratation (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> et C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>) sont des formes métastables et seront remplacées respectivement par C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> et la solution solide d'hydrogénât.

**I-10 Caractéristiques du ciment :****I-10-1 Caractéristiques physico-chimiques :**

Comme cela a été étudié précédemment, le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique :  $C_3S$  ;
- Silicate bicalcique :  $C_2S$  ;
- Aluminate tricalcique :  $C_3A$  ;
- Ferro-Aluminate tetracalcique :  $C_4AF$ .

Une fois la poudre de ciment mélangé à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydrates avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Les réactions chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le ciment et la rapidité de prise.

**I-10-1-1 Indice d'hydraulicité :**

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

$$I = \frac{\text{Fraction acide}}{\text{Fraction basique}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

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 :

$$1,40 < \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} < 1,45$$

$$0,45 < \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} < 0,50$$

**I-10-1-2 Prise :**

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- le type du ciment, certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;
- la finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande ;
- la température ambiante, la prise étant stoppée à  $0^\circ\text{C}$ , alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse  $30^\circ\text{C}$  ;
- la présence de matières organiques dans l'eau ;

- l'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur.
- 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 R.

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.

#### **I-10-1-3 Durcissement :**

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

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 CA qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance.

#### **I-10-1-4 Fausse prise :**

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau :  $\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$ ). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre [ $\text{SO}_4\text{Ca}, \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ] dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse.

#### **I-10-1-5 Chaleur d'hydratation :**

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en  $\text{C}_3\text{A}$  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 CHF-CEM I/B et 300 J/g pour certains CPA-CEM I.

La finesse de mouture a également une action sur l'exothermie.

#### **I-10-1-6 Finesse de mouture :**

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

Elle est, d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (pour mémoire rappelons que la finesse s'exprimait auparavant en  $\text{cm}^2/\text{g}$  et que de nombreux utilisateurs continuent à l'exprimer ainsi ; il ressort qu'une finesse de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  correspond à 3000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Certains ciments tels les ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieur à 450  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

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'événement du ciment sont accrus.

**I-10-1-7 Retrait :**

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4x4 cm. conservées dans l'air à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %.

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les ciments Portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32.5 ;
- 1000  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour des types de ciment identiques mais des classes 32.5 R, 42.5 et 42.5R.

**Remarque :** Sous le terme général de retrait, on peut distinguer :

- le retrait plastique avant prise, qui est dû essentiellement à la perte prématurée, par évaporation, d'une partie de l'eau de gâchage et dont l'amplitude est d'environ dix fois celle du retrait hydraulique classique. Ce retrait peut provoquer dans le béton frais non protégé de l'ensoleillement ou du vent et dont la résistance à la traction est pratiquement nulle, des contraintes susceptibles d'entraîner l'apparition de crevasses peu profondes mais d'une ouverture supérieure au millimètre qu'il est d'ailleurs possible de refermer avant la fin de prise par un talochage serré;
- le retrait thermique, dû à la contraction du béton ou du mortier lors de son refroidissement, qui est prépondérant pour les pièces massives ;
- le retrait hydraulique qui découle de la contraction du béton ou du mortier en séchant.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment (la proportion de certains constituants a une action défavorable sur la valeur totale du retrait) ;
- La finesse de mouture ;
- Le dosage en ciment, dans le béton ;
- le dosage en eau ;
- La propreté et la nature des granulats ;
- La protection après coulage.

Il est parfois utile d'avoir une estimation de la grandeur du retrait du béton, le ciment n'étant pratiquement jamais utilisé pur. À défaut de mesures au cas par cas, le BAEL 91 indique, en fonction des conditions climatiques, les valeurs suivantes dans le cas de pièces non massives, à l'air libre, comportant un pourcentage moyen d'armatures :

- $1,5 \times 10^{-4}$  dans les climats très humides ;
- $2 \times 10^{-4}$  en climat humide ;
- $3 \times 10^{-4}$  en climat tempéré sec ;
- $4 \times 10^{-4}$  en climat chaud et sec ;
- $5 \times 10^{-4}$  en climat très sec ou désertique.

**I-10-1-8 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.

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur, spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5 % pour les CPA-CHM I ainsi que pour le clinker.

**I-10-2 Exigences chimiques :**

Les exigences les plus importantes à respecter sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale (%)
<b>Perte au feu</b>	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes les classes	< 5
<b>MgO</b>	CPA-CEM I	Toutes les classes	< 5
<b>Résidu insoluble</b>	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes les classes	< 5
<b>S<sub>03</sub></b>	CPA-CEM I Et CPJ-CEM II (*)	32.5 32.5R 42.5	< 3.5
	CPZ-CEMIV Et CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5R Toutes les classes	< 4
<b>Chlorures</b>	Tous les types de ciment (**)	52.5R	< 0.05
		Toutes les autres classes	< 0.10

**Tableau I-5 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants.**

(\*) Valable pour les CPJ-CEM II/A et B à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituant, autre que le clinker, pour lesquels la limite est de 4.5 % pour toutes les classes de résistance.

(\*\*) Les CHF-CEM II/A et B et les CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0.10% de chlorures mais dans ce cas la teneur doit être déclarée.

## CHAPITRE II : Valorisation des déchets

### II-1 INTRODUCTION :

Si la meilleure des politiques réside dans la réduction des déchets à la source, une quantité énormément élevée de déchets est produite chaque année à travers le monde. Le traitement de certains d'entre eux, dont le réemploi est impossible (pneus, huiles usagées et farines animales), est un enjeu majeur pour la collectivité, les pouvoirs publics et les industriels. Il est indispensable de mettre en place des solutions écologiques et pérennes pour les valoriser sans danger pour l'environnement et les riverains. A titre d'exemple près d'un million de tonnes de déchets par an sont ainsi valorisés par l'industrie cimentière en France.

Grâce à la valorisation des déchets dans les cimenteries et les centrales à béton, ces industries participent depuis de nombreuses années à l'effort collectif pour la préservation des ressources naturelles et le traitement des déchets.

La valorisation de déchets s'effectue dans des conditions particulièrement strictes. Ne sont ainsi utilisés que des déchets sélectionnés pour leur compatibilité avec le procédé de fabrication et la qualité finale des produits (ciments et bétons).

### II-2 Les déchets :

#### II-2-1 Définition :

Outre leur texte fondamental, les lois de 1975 et 1992 ont permis d'énoncer des définitions officielles.

##### II-2-1-1 Définition officielle de la loi de 1975 :

• **Déchet** : « tout résidu de production, de transformation et d'utilisation, toute substance, tout matériau ou produit ou plus généralement tout bien meuble que son propriétaire abandonne ou destine à l'abandon ».[23]

Cette définition devrait être revue : en effet, un résidu recyclé n'est plus un déchet. Quand un déchet devient-il un déchet et quand cesse-t-il de l'être ? Pour répondre à cette question, la loi de 1992 a défini le déchet ultime.

##### II-2-1-2 Définitions officielles de la loi de 1992 :

- **Valorisation** : « réemploi, recyclage, ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ».
- **Déchets industriels spéciaux** : « déchets qui, en raison de leurs propriétés dangereuses, figurent sur une liste fixée par décret et ne peuvent pas être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres catégories de déchets ».
- **Déchet ultime** : « déchet résultant ou non du traitement d'un déchet et qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant et dangereux ». Cette définition est, par nature, instable dans le temps. [24]

**II-2-2 Classifications des déchets :**

Suivant les cas, on distingue les déchets en fonction de leur origine : déchets ménagers ou déchets industriels ou en fonction de leur nature (dangereux, non dangereux, inertes...). [24]

**II-2-2-1 Distinction en fonction de l'activité à l'origine du déchet :****A- Les déchets ménagers et assimilés (DMA) :**

Les déchets ménagers et assimilés sont les déchets produits par les ménages, les commerçants, les artisans, et même les entreprises et industries quand ils ne présentent pas de caractère dangereux ou polluant : papiers, cartons, bois, verre, textiles, emballages.

Ces déchets sont collectés par la commune si, eu égard à leurs caractéristiques et aux quantités produites, ils peuvent être éliminés sans sujétions techniques particulières et sans risques pour les personnes ou l'environnement.

Pour traiter ces déchets, les communes doivent mettre en place une redevance spéciale.

Les commerçants, les artisans, et les petites entreprises sont tenus de faire valoriser leurs déchets d'emballages. [24]

**B- Les déchets industriels :**

- **Les déchets industriels non dangereux ou "banals" (DND ou DIB) :** Ce sont les déchets des entreprises non dangereux qui sont aussi appelés "déchets assimilés aux déchets ménagers".
- **Les déchets industriels dangereux ou "spéciaux" (DD ou DIS) :** Ce sont les déchets des entreprises qui, en raison de leurs propriétés dangereuses, sont indiqués dans la par un astérisque. Ils ne peuvent pas être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres catégories de déchets.

**II-2-2-2 Distinction en fonction de la nature du déchet :****A- Les déchets dangereux :**

Les déchets sont considérés comme dangereux s'ils présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes : explosif, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, corrosif, infectieux, toxique pour la reproduction, mutagène, écotoxique.

**B- Les déchets toxiques en quantités dispersées (DTQD) :**

Les déchets toxiques en quantités dispersées sont des déchets dangereux produits en petites quantités par les ménages, les commerçants ou les PME (garages, coiffeurs, laboratoires photo, imprimeries, laboratoires de recherche, etc.).

**C- Les déchets non dangereux :**

Les déchets non dangereux sont les déchets qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives à la "dangerosité"(toxique, explosif, corrosif, etc.).

Ce sont les déchets "banals" des entreprises, commerçants et artisans (papiers, cartons, bois, textiles, etc.) et les déchets ménagers.

**D- Les déchets inertes :**

Les déchets inertes sont des solides minéraux qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante : pavés, sables, gravats, tuiles, béton, ciment, carrelage.

Ils proviennent des chantiers du bâtiment et des travaux publics, mais aussi des mines et des carrières.

**E- Les déchets ultimes :**

Est ultime un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

Le caractère ultime d'un déchet n'est pas fonction des caractéristiques "physico-chimiques" du déchet mais s'apprécie en fonction du système global de collecte et de traitement. Cette notion est locale et doit normalement être précisée dans le cadre des plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés. [24]

**II-3 Valorisation des déchets en Algérie :**

La récupération des déchets en Algérie est une importante opportunité à saisir vis-à-vis l'environnement, les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes/an, soit un kilogramme par habitant par jour, dont près de la moitié peut être récupérée. Environ 45% de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes sont recyclables. Parmi ces 6,1 millions de tonnes, il y a 1,8 million de tonnes de papiers, 1,22 millions de tonnes de plastiques, 1,6 millions de tonnes de textiles et 300.000 tonnes de métaux. Ceux-ci pour une valeur approximative de 23 milliards de DA. C'est un véritable gisement. Or, il n'existe que 247 micro-entreprises qui opèrent dans la récupération des déchets et qui ne valorisent à peine que 5 ou 6% de ce potentiel dont une partie est exportée.

L'Etat mise beaucoup sur le développement d'une industrie de récupération et de recyclage. Elle est au cœur même du programme national de gestion des déchets municipaux (PROGDEM), qui constitue le principal cadre de référence en termes de gestion et de valorisation des déchets ménagers. Il existe deux (02) types de filières : classiques (plastiques, papiers, métaux, textiles, verres, bois et matières organiques) et complexes (pneus usagés, huiles usagées, piles et batteries et autres déchets d'équipements électriques et électroniques). [25]

**II-3-1 Un double bénéfice pour l'environnement :**

Les déchets sont utilisés de deux façons :

- En remplacement partiel des constituants de base (calcaire, argile, sable,...) : c'est la valorisation matière.
- En remplacement des combustibles fossiles (coke de pétrole, charbon, fioul lourd,...) : c'est la valorisation énergétique.

**II-3-1-1 La valorisation matière :**

L'industrie du ciment et du béton utilisent depuis longtemps des sous-produits issus d'autres industries comme les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres volantes en remplacement de certains constituants du ciment ou du béton sans en modifier la qualité.

Traditionnellement, l'industrie cimentière emploie 80% de calcaire et 20% d'argile pour fabriquer le ciment. Or, cette argile peut être en partie remplacée par des cendres provenant de centrales thermiques au charbon. Ainsi, ces déchets n'ont pas à être éliminés par d'autres moyens.

**II-3-1-2 La valorisation énergétique :**

Depuis une vingtaine d'années, les cimentiers réduisent leur consommation d'énergie d'origine fossile (charbon, fioul lourd, coke de pétrole,...) grâce à l'utilisation de déchets sélectionnés comme combustibles. L'industrie cimentière a été sollicitée par les pouvoirs publics pour la destruction des farines animales en raison de sa capacité à assurer une valorisation totale des déchets.

**II-3-2 Valorisation des déchets en science des matériaux : [23]**

La valorisation des déchets en science des matériaux est très développée dans la mesure où les produits que l'on désire fabriquer ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Donc ce ne seront pas les matériaux "nobles" (semi-conducteurs, monocristaux, matériaux pour électronique, biomatériaux, etc...) qui seront élaborés à partir de résidus, compte tenu des limitations très strictes dans leurs propriétés et de la nécessité d'employer des matières premières souvent très pures, mais par contre, les matériaux de grande diffusion, fabriqués à fort tonnage et de prix assez modeste (matériaux de structure, verres et céramiques, matières plastiques,...) qui vont être un débouché tout à fait indiqué pour les déchets et sous-produits disponibles en grande quantité, et de faible valeur marchande. C'est donc ce domaine des matériaux qui va être abordé dans ce chapitre, sans perdre de vue cependant que la valorisation n'est pas applicable à tous les résidus et que les produits fabriqués doivent toujours obéir à des spécifications assez précises.

**II-3-2-1 Liants hydraulique et matériaux de structure :**

La fabrication des liants hydrauliques et matériaux de structure met en œuvre un certain nombre d'opérations où peuvent intervenir les déchets comme matières premières de substitution avec ou sans caractère énergétique. Nous allons en donner quelques exemples.

**II-3-2-1-1 Ciments au laitier :**

L'existence d'une analogie entre la composition chimique des laitiers et celle des ciments portlands a été remarquée par VICAT dès 1818. Les premiers ciments au laitier ont été fabriqués industriellement en Allemagne à la fin du siècle dernier sous les dénominations de ciments portlands de fer (à 30 % de laitier) puis vers 1917 sous le nom de ciments de haut fourneau (à 70% de laitier). L'emploi du ciment au laitier est apparu en France en 1928 et son utilisation a été largement développée après la guerre de 39-45 pour des raisons d'économie d'énergie (charbon à l'époque). Actuellement le même problème se pose dans l'industrie cimentière où l'on incite à l'emploi d'ajouts (dont les laitiers) pour pallier la crise du fuel.

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

➤ **Avantages d'utilisation de laitier :**

On peut citer essentiellement :

- faible retrait donc intérêt pour la construction des ouvrages massifs.
- augmentation de la résistance finale.
- résistance élevée aux agents chimiques (milieu acide, milieu salin, eaux sulfatées et eau de mer) car fixation de la chaux formée par hydratation des liants du clinker.
- résistance au gel après durcissement.
- bonne stabilité et longévité des ouvrages.
- bonne compacité et maniabilité.

D'où leurs très nombreux emplois (barrages, ciment pour construction en mer, galeries d'égouts, réservoirs d'eau, travaux souterrains, etc...).

### **II-3-2-1-2 Ciment aux cendres :**

Il existe différentes catégories de cendres, matériaux qui sont récupérés par dépoussiérage des fumées des installations de combustion, mais c'est incontestablement les cendres de centrales thermiques (cendres volantes) qui constituent la plus forte production.

Les centrales thermiques fournissent également les cendres de foyer (recueillies dans les cendriers des foyers des chaudières à charbon pulvérisé) et les cendres fondues (produites dans les chaudières à cendres fondues et qui sont granulées comme un laitier par refroidissement brusque dans l'eau), mais ces deux autres types de cendres ne trouvent pas les applications des cendres volantes.

#### **a- Production et caractéristiques des cendres volantes :**

Les cendres volantes, résidus de combustion de charbon pulvérisé, sont véhiculées par les fumées et sont recueillies à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou collecteurs mécaniques, ou par voie humide. Leur passage à haute température (1400°C) suivi d'une trempe leur confère l'état vitreux.

#### **b- Fabrication des ciments aux cendres volantes :**

Les cendres volantes peuvent être utilisées comme matière première en cimenterie lors de la confection de la pâte crue dans le procédé par voie humide (utilisation des cendres humidifiées qui remplacent l'argile en apportant  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Le plus souvent les cendres sont utilisées sèches et ajoutées au broyeur avec les autres constituants (clinker, gypse, laitier) : le broyage lui-même en est amélioré, les débits pouvant augmenter de 5 à 10 % quand on passe d'un CPA à un CPAC. Comme dans le cas des laitiers, les cendres volantes sont utilisées pour leur activité pouzzolanique (libération de silice qui réagit sur la portlandite du ciment durci) pour

donner des silicates de calcium hydratés, lesquels renforcent la cohésion due à la prise des constituants hydrauliques du ciment.

**c- Utilisation des cendres volantes dans les bétons :**

Les cendres volantes agissant par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique, améliorent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons, ce qui est d'autant plus marqué que les cendres sont plus fines (dans un ciment aux cendres volantes, la cendre a une surface spécifique de l'ordre de 5000 cm<sup>2</sup>/g). Il existe, dans chaque cas, un pourcentage optimum de cendres (30 %) qui donne la meilleure ouvrabilité.

L'addition de cendres permet en outre : de diminuer la quantité d'eau de gâchage pour une même ouvrabilité, d'augmenter l'homogénéité et la compacité du béton et d'améliorer sa mise en place, et d'obtenir un meilleur aspect au décoffrage.

L'addition des cendres au béton (30 à 100 kg/m<sup>3</sup> de béton) permet de compléter la granulométrie, de corriger éventuellement les sables manquant d'éléments fins, et peut même remplacer 20 à 30 % du sable, ce qui est intéressant dans le cas de béton sec, faiblement dosé en ciment.

Les cendres sont utilisées dans les centrales à béton, dans les usines de béton manufacturé (confection de blocs, tuyaux, boisseaux de cheminée,...), dans certains ouvrages d'art (réfrigérants, cheminées de centrales thermiques) et pour la fabrication de béton cellulaire autoclavé.

**d- Avantages et inconvénients de l'emploi des cendres volantes :**

Plusieurs avantages sont incontestables :

- Réduction du prix liant.
- Augmentation des résistances finales.
- Améliorations de nombreuses propriétés (ouvrabilité, facilité de démoulage, résistance aux eaux pures ou sulfatées, résistance au feu et au choc thermique, etc...).

Parmi les inconvénients on peut citer modification de la couleur du ciment, affaiblissement des résistances initiales en particulier aux basses températures, tenue un peu moins bonne au gel. Mais les avantages tant techniques qu'économiques l'emportent beaucoup sur les quelques inconvénients signalés.

**II-3-2-2 Autres types de déchets utilisés en cimenterie :**

Les déchets utilisés dans les principaux postes d'une cimenterie sont particulièrement nombreux et variés :

**a- Fabrication du clinker :**

Ont été utilisés par exemple ;

- Les déchets des industries extractives (déchets d'ardoises, de kaolin, de baryte, d'enrichissement des phosphorites pauvres en P et contenant CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, ...).
- Des déchets métallurgiques : déchets ferrugineux de la métallurgie du Ni (Ni présent n'a pas d'influence défavorable sur les propriétés du ciment obtenu) ; déchets de fusion de l'aluminium

(mélange d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , d'Al métal, d'alliage, de nitrure et de carbure d'aluminium,...) pour la fabrication de ciments alumineux ; poussières d'aciéries, etc...

- Les pâtes de néphéline (résidu d'extraction de l'alumine en U.R.S.S.) pour l'obtention de clinker de ciment pour forage.
- Des déchets combustibles de houille maigre (améliorent la cuisson), des huiles résiduelles industrielles, ou des déchets urbains,
- Les goudrons de houille et de raffinage du pétrole, coke, mazout, lignite.
- Les résidus du grillage oxydant des pyrites ou déchets de production de zinc (blanc de zinc).
- Les sels résiduels tels que :
  - agglomérés d'aluminate de soude (sous-produits de la récupération de la soude), ou agglomérés obtenus par cuisson à 1200-1300°C de boues rouges.
  - sulfates de calcium résiduels (phosphogypses, fluoroanhydrite,...).
  - carbonate de calcium résiduel provenant de la fabrication de  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ , de la préparation de NaOH par action de la chaux sur le carbonate de soude, ou de l'industrie sucrière.

#### b- Addition au ciment :

On peut citer :

- **Comme retardateur de prise** : les boues rouges (mais elles accélèrent la prise des ciments de laitier), le sulfate ferreux résiduel, les résidus de distillation du furfurole,...
- **Comme agent tensio-actif** : les liqueurs sulfatiques résiduelles ou solides obtenus à partir de ces liqueurs, l'agent actif étant l'acide lignosulfonique (ou un sel de cet acide).
- **Comme antigel ou agent de déverglaçage** : les sels résiduels des mines de potasse, additions de  $\text{CaCl}_2$ , de sel de mer et d'alcool, ou le chlorure de calcium résiduel.

Les déchets de mines de charbon préalablement calcinés donnent des ciments équivalents aux ciments de cendres volantes. Les déchets d'enrichissement du sulfate d'aluminium confèrent au ciment des propriétés analogues à celles des ciments expansifs utilisables en construction souterraine.

#### c- Recyclage direct des résidus de cimenterie ou de centrale à béton :

Les eaux usées des cimenteries par voie humide et les poussières de fabrication du clinker lui-même peuvent être recyclées, avec certaines limitations en ce qui concerne les poussières de filtres qui concentrent le soufre et le potassium sous forme de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  lequel doit être si possible extrait avant recyclage car il modifie très sensiblement les propriétés du ciment.

Certains déchets des centrales à béton prêt à l'emploi sont recyclés : ainsi les boues récupérées dans ces installations peuvent être additionnées au béton (2,5 %) ce qui diminue le début et la fin de prise, mais aucune différence notable n'apparaît dans les résistances ou dans le retrait dû au séchage jusqu'à 3 mois. Ajoutées à une teneur maximale de 5 % par rapport au poids de ciment, ces boues peuvent remplacer le sable dans les mélanges à plus faible teneur en ciment, moyennant une utilisation simultanée d'agents tensio-actifs qui permet de remédier à la diminution d'ouvrabilité observée.

L'utilisation de l'eau de drainage décantée d'une centrale à béton comme eau de gâchage et de lavage, ou du précipité (contenant de 1 à 2 % en poids du produit fabriqué) comme addition, modifie peu les propriétés du béton si cette addition est limitée à 1 % et pour des faibles valeurs du taux de gâchage (E/C=55 %). Les résistances du béton diminuent cependant lorsque cette addition excède 1 % et pour des taux de gâchage plus élevés.

#### II-4 Présentation de déchet étudié : le ciment hydraté

Le ciment hydraté est un déchet cimentaire qui vient de :

##### II-4-1 La chaîne de fabrication de ciment :

C'est le ciment ; collecté des sacs déchirés, coincé dans les canons d'air lors le transport vers les silos de stockage ou le ciment disperser pendant l'expédition en vrac dans les camions. Dans notre cas ce déchet collecté a formé une montagne d'une quantité importante, qui nécessite une valorisation immédiate afin d'éviter tout sorte de pollution possible sur l'environnement et sur l'être humain.



Figure II-1 : déchet de ciment hydraté dans la cimenterie Lafarge – Hammam Dalaa

##### II-4-1-1 L'impact des déchets collectés :

###### a- Les poussières (particules) :

La pollution par les poussières représente la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Les poussières fines restent en suspension dans l'atmosphère alors que les plus grosses sont appelées à se déposer sur le sol à différentes distances de la source selon leur taille.[26]

###### - Effets sur la santé :

La partie du corps de l'être humain la plus touchée par les polluants rejetés par les cimenteries sont les poumons qui sont une vaste surface d'échange (75 m<sup>2</sup>) L'appareil respiratoire a une fonction essentielle, celles des échanges gazeux (apport d'oxygène et élimination de gaz carbonique).

- **A court terme**, les poussières fines inférieures à  $1 \mu$  atteignent les alvéoles et peuvent pénétrer dans le sang. Elles peuvent transporter d'autres polluants qui y sont adsorbés. Elles sont associées aux hospitalisations et aux décès pour cause respiratoire et cardio-vasculaire
- **A long terme**, ces polluants peuvent provoquer des maladies respiratoires telles :
  - asthme, bronchite, emphysème (poussières,  $SO_2$ ).
  - cancer des poumons (particule et  $NO_2$ ).

#### - Effets sur l'environnement :

La pollution de l'air constitue à la fois une atteinte à notre qualité de vie et à notre santé. Elle est aussi néfaste pour l'environnement et le climat.

Les effets des polluants se ressentent sur les écosystèmes mais aussi sur les bâtiments (corrosion, noircissement, encroûtement et altérations diverses) Les dépôts de poussières le long des axes de circulation entraînent une multiplication des feuillaisons des arbres, et accentuent le stress d'implantation des jeunes pieds de rosiers qui s'accumulent difficilement, alors que les plantes âgées semblent bien s'adapter. Mais la pollution a un impact esthétique plus qu'économique : elle n'entraînera pas de changement fondamental dans la gestion des arbres urbains.

En revanche, les particules et les macromolécules présentent essentiellement un risque de contamination de la chaîne alimentaire.

#### II-4-2 Déchets de BTP :

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde après l'eau. Les professionnels de la construction, de plus en plus confrontés aux questions liées à la préservation de l'environnement, font face depuis quelques années à une double problématique. D'un part, le nombre croissant de construction conduit à des difficultés d'approvisionnement en matière première. D'autre part, le secteur du bâtiment des millions de tonnes de déchets, qui sont aujourd'hui encore trop souvent déposés en installation de stockage. Il devient évident que la valorisation de ces déchets est un enjeu environnemental majeur, et que leur réutilisation permettrait la préservation des ressources naturelles, mais également une limitation de la pollution par enfouissement.



Figure II-2 : déchets de béton provenant de démolition des structures

Dans le béton, le ciment représente une quantité importante (plus de 80% des fines), cette quantité peut être recyclée après un traitement approprié (broyage et tamisage très fin). Au niveau écologique, cette valorisation nous permet de diminuer les quantités des déchets de béton laissé tomber au contact direct

#### **II-4-3 Valorisation de ciment hydraté :**

La composition et la structure physique de ciment hydraté nous a permet d'utiliser dans la fabrication de ciment, avec un remplacement partiel du clinker par l'ajout de ciment hydraté.



**Figure II-3 : ciment hydraté utilisé dans la fabrication des nouveaux ciments**

Dans le béton, aucune étude n'a été réalisée pour élaborer l'effet de ciment hydraté sur les bétons.

#### **II-5 Conclusion :**

La voie reste ouverte, à d'autres utilisations et possibilités, permettant ainsi d'élargir la gamme des matériaux de construction, de réduire les déchets à la source et de développer l'utilisation des matériaux recyclés dans les chantiers.

## CHAPITRE III : Caractéristiques des matériaux utilisés

### III-1 Introduction :

On présentera dans ce chapitre l'ensemble des matériaux utilisés pour l'élaboration des différents ciments étudiés, leur mise en œuvre, ainsi que les techniques expérimentales permettant leur caractérisation.

L'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'effet de déchet de ciment sur la qualité ciment lui-même, qu'il soit poudre, frais ou durci. Nous avons choisi de varier les différents pourcentages de ciment hydraté ajouté (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, et 35%).

### III-2 Caractéristiques des matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés à la préparation des différents ciments étudiés sont :

- Clinker ;
- Gypse ;
- Déchets de ciment (ciment hydraté).

#### III-2-1 Le ciment avec ajout des déchets cimentaire :

La préparation des ciments avec l'addition de ciment hydraté ainsi que la détermination de leurs caractéristiques chimiques et physiques et les essais mécaniques des mortiers confectionnés à leurs bases ont été réalisés au laboratoire de Lafarge (Cimenterie de Hammam Dalaa) Wilaya de M'sila.

##### III-2-1-1 Mélange ciment hydraté :

Le ciment hydraté utilisé dans notre étude expérimentale est de déchet cimentaire provenant de sacs déchirés, ciment collecté lors le transport vers les silos de stockage ou l'expédition en vrac dans les camions.

Le ciment a été substitué partiellement à différents pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% et 35%) par rapport au poids massique de clinker par un ajout calcaire.

##### III-2-1-2 Composition chimique de ciment hydraté :

La composition chimique est indiquée dans le Tableau III-1. Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafarge Hammam Dalaa.

L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé ( $\leq 80 \mu\text{m}$ ), afin de déterminer sa composition chimique.

Elément	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	PF
Ciment hydraté	59,40	17,53	3,72	2,96	1,36	1,80	0,81	0,17	0,02	11,04

Tableau III-1 : Composition chimique de ciment hydraté

**III-2-2 Le clinker :**

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de C<sub>3</sub>S.

Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de Hammam Dalâa et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau III-3.

<b>Clinker</b>	<b>Clinker de Hammam Dalaa</b>
<b>Ingrédient du clinker</b>	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Boussaâda)
	Minerai de fer (khanchla)
<b>Densité apparente</b>	1,42
<b>Dureté</b>	14,3

**Tableau III-2 : Principaux constituants du cru de clinker**

**III-2-2-1 Composition chimique du clinker :**

Les compositions chimiques du clinker utilisé sont présentées dans le Tableaux III-4. L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie Lafarge (Hammam Dalaa).

<b>Eléments</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Free lime</b>
<b>%</b>	20.98	4.92	3.33	66.18	1.80	1.10	0.64	0.10	1.38

**Tableau III-3 : Principaux constituants chimique du clinker**

**III-2-2-1 Composition minéralogique du clinker :**

La composition minéralogique du clinker déterminée d'après la formule de BOGUE.

<b>Minéraux du clinker</b>	<b>Clinker</b>	<b>Exigences</b>
Alite ( <b>C3S</b> ) Silicate tricalcique	65.47	50-70
Bélite ( <b>C2S</b> ) Silicate bicalcique	10.78	10-30
Célite ( <b>C3A</b> ) Aluminate tricalcique	7.41	2-15
Célite ( <b>C4AF</b> ) Alumino -ferrite-tétracalcique	0.12	0-15

**Tableau III-4 : Composition minéralogique du clinker.**

**III-2-3 Le gypse :**

**III-2-3-1 Composition chimique :**

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a été maintenu constant à 5%. Dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.

Les compositions chimiques du gypse sont données par le tableau III-5.

Eléments(%)	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	CL	LOI
<b>Gypse de Biskra</b>	2,46	0,41	0,56	32,15	3,27	40	0,15	0	0,023	23,490

**Tableau III-5 : Composition chimique du gypse**

**III-3 procédés de préparation des différents ciments :**

**III-3-1 Composition pondérale des différents ciments :**

Les différents ingrédients (clinker, ciment hydraté et gypse) ont été concassés à une dimension inférieure à 1mm, puis mélangés soigneusement à différentes proportions.

Types de ciment	Clinker (%)	Gypse (%)	Ciment hydraté (%)
<b>CEM 1</b>	95	5	0
<b>CEM 2</b>	90	5	5
<b>CEM 3</b>	85	5	10
<b>CEM 4</b>	80	5	15
<b>CEM 5</b>	75	5	20
<b>CEM 6</b>	70	5	25
<b>CEM 7</b>	65	5	30
<b>CEM 8</b>	60	5	35

**Tableau III-6 : Compositions pondérales des huit ciments préparés**

**III-3-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés :**

Les résultats de la composition chimique des huit (08) ciments préparés sont présentés dans le Tableau III-7.

Dans cette étude, on a varié le pourcentage de l'ajout de déchet de ciment dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par déchet) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition de ciment hydraté et le comportement mécanique du mortier.

<b>Eléments</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Cl</b>	<b>LOI</b>
<b>Ciments Préparés</b>										
<b>CEM 1 (0%)</b>	20,24	4,95	3,45	62,32	2,11	3,02	0,69	0,11	0,018	1,65
<b>CEM 2 (5%)</b>	19,82	4,82	3,4	62,22	2,1	3	0,64	0,1	0,017	2,02
<b>CEM 3 (10%)</b>	19,63	4,65	3,38	62,18	2,12	2,98	0,62	0,11	0,016	2,52
<b>CEM 4 (15%)</b>	19,02	4,41	3,41	62,02	2,11	2,85	0,6	0,1	0,016	3,35
<b>CEM 5 (20%)</b>	18,92	4,21	4,12	61,92	2,1	2,84	0,6	0,12	0,018	3,86
<b>CEM 6 (25%)</b>	18,66	4,68	3,58	61,87	2,09	2,81	0,58	0,15	0,017	4,6
<b>CEM 7 (30%)</b>	18,42	4,65	3,51	61,88	2,13	2,82	0,58	0,014	0,017	5,52
<b>CEM 8 (35%)</b>	18,08	4,62	3,44	59,86	2,14	2,89	0,59	0,15	0,016	5,94

**Tableau III-7 : Composition chimique des ciments préparés**

➤ La composition chimique est un facteur déterminant de la résistance des ciments aux agents agressifs. On voit que le pourcentage en teneur d'anhydride sulfurique (SO<sub>3</sub>) est inférieur à 4%. Ceci est conforme à la norme NF EN 197-1.

**III-4 Formulation des mortiers normalisés :**

Nous avons choisi de mettre en œuvre des mortiers pour l'étude expérimentale. Ces mortiers auront la particularité d'avoir un squelette granulaire composé d'un sable normalisé ayant un fuseau granulométrique très serré. L'utilisation d'un sable normalisé permet de reproduire sans difficulté majeure les mêmes types de mortier. Le mortier servant de base à cette étude est donné dans le tableau III-8.

<b>Composants</b>	<b>Dosage pondéral</b>
Sable normalisé (Norme EN 196-1)	1350 kg
Ciment préparé	450 kg
Eau	225 kg
Eau/Ciment	0.5

**Tableau III-8 : Composition du mortier normal (EN 196-1)**

**III-4-1 L'eau de gâchage :**

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillée préparé au laboratoire de la cimenterie (Lafarge M' sila).



**Figure III-1 : Distillateur (Lafarge laboratoire)**

**III-4-2 Sable normalisé (Norme EN 196-1) :**

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\ 350 \pm 5$  g. Les livraisons se font en cartons de 20 sachets pesant 27.5 kg et en palettes de 36 à 45 cartons d'une masse brute de 1 005 kg à 1 253 kg protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).



Figure III-2 : sachet de sable normalisé (EN 196-1)

III-4-2-1 Les caractéristiques de sable normalisé :

a-Propriétés physiques et chimiques :

<b>Indications générales :</b>	
<b>Forme :</b>	solide cristallin en grain subangulaire
<b>Couleur :</b>	gris ocre
<b>Teneur en silice :</b>	> 95 %
<b>Odeur :</b>	néant
<b>Changement d'état</b>	Point de fusion : 1610 °C
	Point d'ébullition : 2230 °C
<b>Point d'inflammation :</b>	néant
<b>Température d'inflammation :</b>	néant
<b>Danger d'explosion :</b>	non
<b>Limites d'explosion :</b>	Inférieure : néant
	Supérieure : néant
<b>Pression de vapeur à 20° :</b>	néant
<b>Densité à 20° C :</b>	2600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Solubilité dans/miscibilité avec l'eau à 20°C :</b>	insoluble
<b>Viscosité :</b>	Dynamique à 20° C solide

Tableau III-9 : Propriétés physiques et chimiques de sable de sable normalisé (EN 196-1)

**b- Analyse chimique de sable :**

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	Cl	PAF
94,780	1,000	0,650	1,090	0,130	0,080	0,300	0,030	

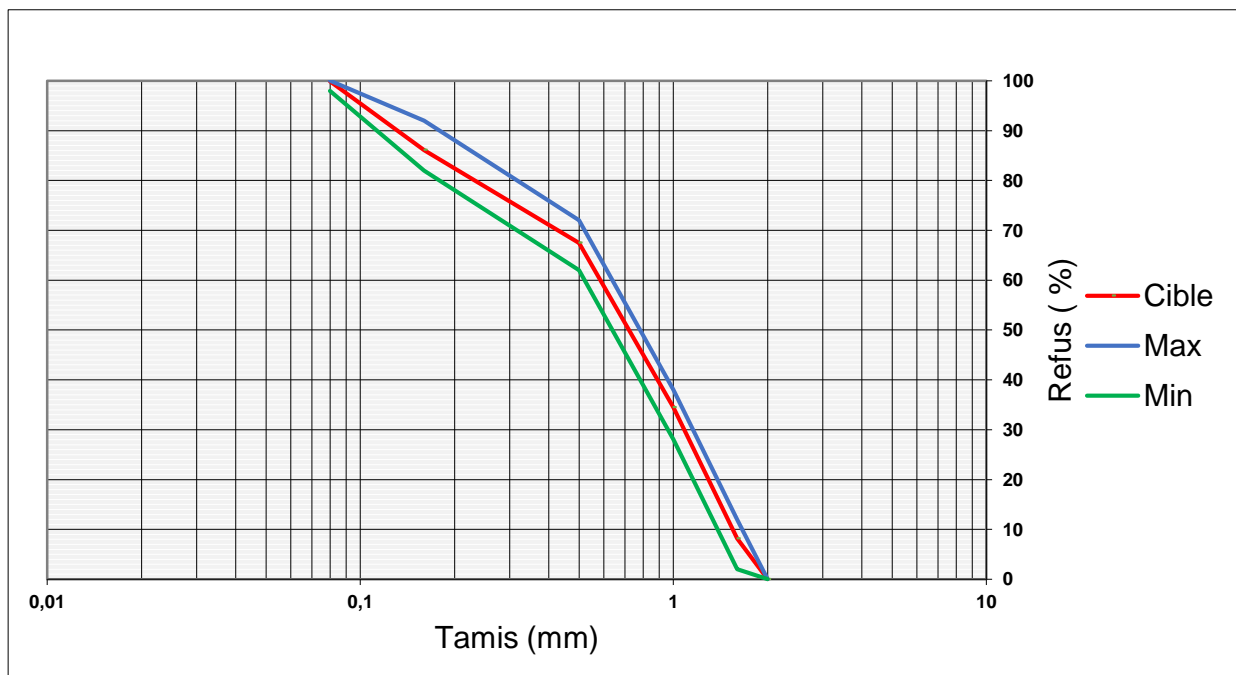
**Tableau III-10 : l'analyse chimique de sable**

**c- Composition granulométrique du sable normalisé :**

Cet essai est réalisé suivant la norme NF P18-560. Les résultats obtenus sont regroupée dans le tableau suivant :

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
2	0	0	100
1.6	110.2	8.16	91.84
1	465.3	34.47	65.53
0.5	911.1	67.49	32.51
0.16	1162.3	86.10	13.90
0.08	1348.5	99.89	0.11
Fond	1500	100	0

**Tableau III-11 : les résultats de l'analyse granulométrique**



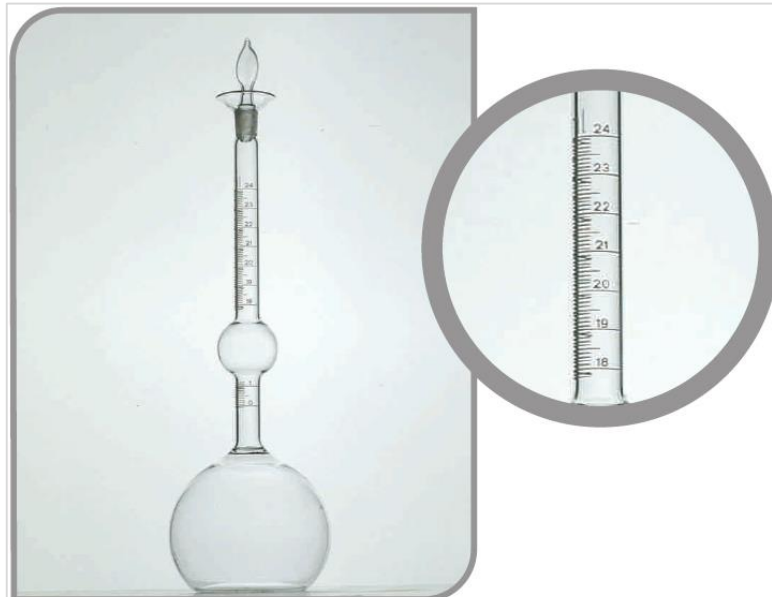
**Figure III-3 : la courbe granulométrique du sable de sable normalisé (EN 196-1)**

**III-5 Méthodes d'essais :****III-5-1 Essai sur ciment anhydre :****III-5-1-1 Masse volumique absolue :**

L'objectif de l'essai est de faire mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre.

**a- Principe de l'essai :**

Le ciment est un corps réagissant avec l'eau, on utilise un liquide qui ne réagit pas avec le liant. La méthode utilisée est celle de l'appareil "le densimètre de le Chatelier", la méthode est basée sur la lecture de graduations.



**Figure III-4 : Voluménoètre Le Chatelier**

**b- Conduite de l'essai :**

- Peser 64 g de ciment.
- Introduire le benzène ou kérosène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation
- Inférieure trait marqué 0 soit  $V_0$ .
- Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).
- Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- Introduire la poudre de ciment dans le Densimètre.
- Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre.
- Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit  $V_1$ .

❖ Calcul de la masse volumique absolue par la relation : 
$$\gamma_c = \frac{M}{V_1 - V_0}$$

<b>Ciments préparés</b>	CEM 1 (0%)	CEM 2 (5%)	CEM 3 (10%)	CEM 4 (15%)	CEM 5 (20%)	CEM 6 (25%)	CEM 7 (30%)	CEM 8 (35%)
<b>Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3.17	3.15	3.13	3.11	3.09	3.07	3.05	3.01

**Tableau III-12 : Masse volumique absolue des ciments**

**III-5-1-2 Mesure de la finesse du ciment (Norme NF P 15-442 -EN-196-6) :**

La finesse du ciment est mesurée sous forme de surface massique, exprimée en cm<sup>2</sup> par gramme, en observant le temps mis par une quantité d'air fixée pour traverser un lit de poudre compactée à des dimensions et des porosités spécifiques.

La mesure exacte de cette surface est généralement approchée par une mesure de la surface spécifique Blaine exprimée en cm<sup>2</sup>/g plus simple que l'utilisation d'un appareil basé sur la méthode BET. Cette méthode fait l'objet de la norme française homologuée NF-EN-196-6 d'Août 1990. [27]

La surface massique du ciment est proportionnelle à un temps t nécessaire à une quantité d'air donnée pour traverser le lit de ciment compacté.

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre. La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue.

La détermination de la surface spécifique basée sur la méthode Blaine est réalisée en 3 étapes comme le montre la Figure III-5. 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.
- Une balance de précision 0,001 g.
- Un chronomètre précis à 0,2 s près.
- Un ciment de référence de surface massique (S0) et de masse volumique (ρ0) connues.
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule.
- Du mercure pour mesurer le volume de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air.

La surface spécifique est calculée à l'aide de la formule suivante :  $S = k \cdot \frac{\sqrt{e^3 \cdot t}}{\rho (1-e)\sqrt{\eta}}$

Avec :

$S$  : Surface spécifique ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

$k$  : Constante de l'appareil.

$e$  : Porosité de la couche tassée

$t$  : Temps mesuré en secondes.

$\rho$  : Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

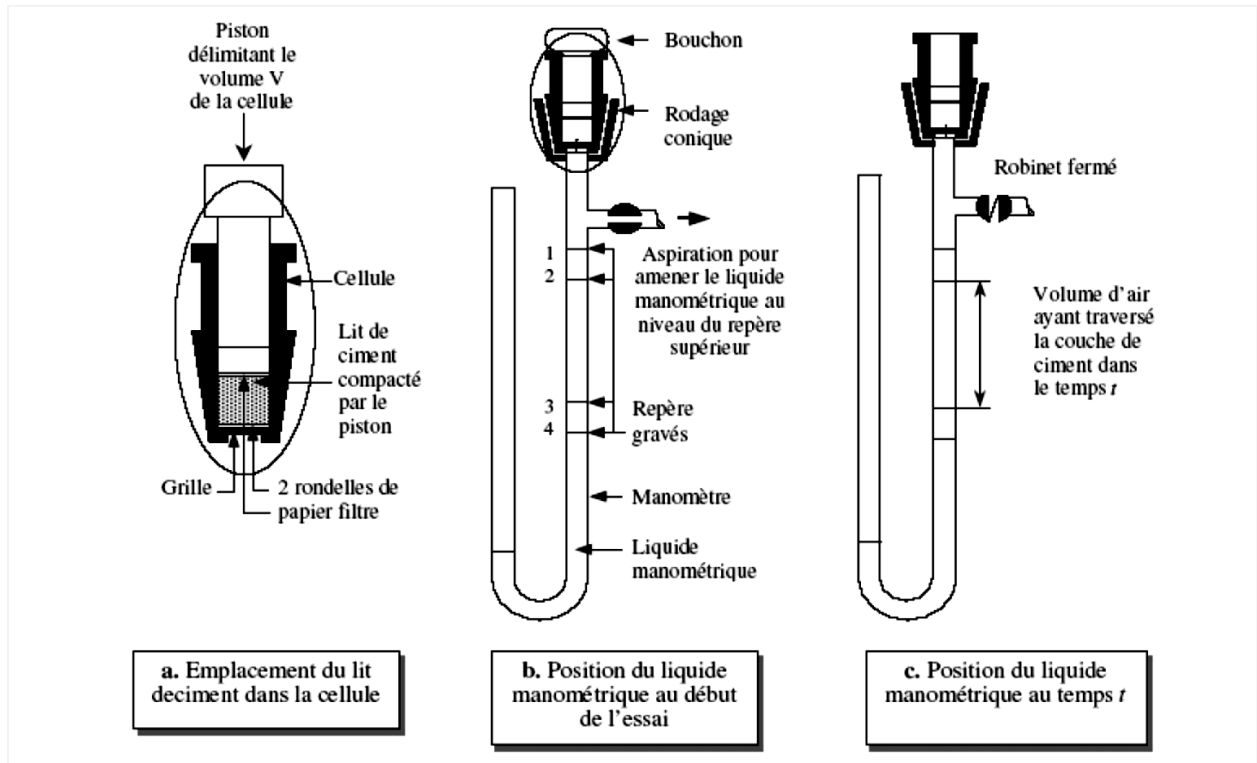


Figure III-5 : Principe de fonctionnement de la technique de Blaine



Figure III-6 : Perméabilimètre de Blaine manuel

Ciments préparés	CEM 1 (0%)	CEM 2 (5%)	CEM 3 (10%)	CEM 4 (15%)	CEM 5 (20%)	CEM 6 (25%)	CEM 7 (30%)	CEM 8 (35%)
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	3800	3880	3970	4070	4160	4260	4350	4410

Tableau III-13 : SSB des ciments préparés

**III-5-1-3 Analyse granulométrique (Méthode alpine) :****a- Objectif :**

Ce mode opératoire a pour but de décrire le mode d'emploi d'utilisation de la tamiseuse ALPINE référencé M0212.

**b- Domaine d'application :**

Le tamis à air ALPINE est un appareil utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière.

**c- Appareillage :**

Figure III-7 : Tamiseuse Alpine

**d- Description :**

Le tamis à air ALPINE fonctionne sans aucun mouvement mécanique du tamis ou des autres parties en contact avec la matière, mais simplement par courant d'air.

Il consiste dans l'utilisation contrôlée du courant d'air, pour disperser la matière, entraîné le fin (les fines) à travers les mailles du tamis, nettoyer le tamis.

L'ensemble de l'appareil comprend :

- le tamis Alpine avec manomètre en U.
- le ventilateur.
- le dépoussiéreur (filtre).
- le tambour tamisant.
- un filtre pour recueillir les fines (éventuellement)
- deux tamis : 45 $\mu$ m, 90  $\mu$ m.

**e- Mode opératoire :**

Détermination du rejet en utilisant un seul tamis, voici les étapes à suivre :

- faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- mettre en place le couvercle en plexiglas.
- brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min avec le bouton molleté.
- mettre en route l'aspiration.

La minuterie étant branchée, la lance fendue commence à tourner, le ventilateur et l'aspiration de poussière démarrent, le tamisage commence. A travers le plexiglas, on peut observer directement le tamisage.

Si au début de l'opération, une partie de la matière se colle au couvercle, il faut la décoller, aussi longtemps que nécessaire, en donnant toutes les 10 secondes environ quelques coups sur le bouton du couvercle avec le marteau en matière plastique.

Par la suite, la matière grossière soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle. L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels.

Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière.

- Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement Couper alors l'aspiration.
- Peser la matière restant sur le tamis.

Soit **P** le poids trouvé en grammes.

**Rejet = P × 10 (%).**

Taille (µm)	Rejet (%)							
	CEM 1 (0%)	CEM 2 (5%)	CEM 3 (10%)	CEM 4 (15%)	CEM 5 (20%)	CEM 6 (25%)	CEM 7 (30%)	CEM 8 (35%)
<b>45</b>	12,5	12,0	11,4	11,0	10,5	9,9	9,5	9,0
<b>90</b>	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,7
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	3800	3880	3970	4070	4160	4260	4350	4410

**Tableau III-14 : Caractéristiques de la granulométrie (Refus 45& 90µm) des différents ciments**

**III-5-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment) :****III-5-2-1 Essai de consistance (Norme EN 196-3 2005) :****a- Objectif de l'essai :**

L'essai de consistance permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant afin d'obtenir une pâte normale. La pâte obtenue à une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée

**b- Principe de l'essai :**

L'essai est réalisé pour trouver la quantité d'eau qui doit être mélangé toujours suivant le même processus avec une masse de liant, dans laquelle la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de  $(6 \pm 1)$  mm du fond du moule.

**c- Appareillage :**

Balance, permettant de peser à 1g près ; Cylindre ou burette graduée permettant de mesurer 1% du volume mesuré ; Malaxeur, conforme à l'EN 196-1 L'appareil de Vicat avec sa sonde cylindrique de diamètre  $(10,00 \pm 0,05)$  mm et de longueur effective  $(50 \pm 1)$  mm. La masse totale des parties mobiles doit être de  $(300 \pm 1)$  g. Le moule Vicat destiné à contenir la pâte pendant l'essai doit être en caoutchouc dur de la forme tronconique, d'une profondeur  $(40,0 \pm 0,2)$  mm et de diamètre inférieurs et supérieurs de  $(70 \pm 0,5)$  mm et  $(80 \pm 0,5)$  mm respectivement. Ce tronc de cône doit reposer sur une plaque en verre d'au moins 2,5 mm.

**d- Conduite de l'essai :**

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur pour obtenir les résultats estimés.

1. Peser  $500g \pm 1g$  de ciment et le verser dans le godet du malaxeur.
2. Gâcher le ciment avec une quantité d'eau (on commence avec un rapport de masse E/C = 0.24).
3. Malaxer la pâte *pendant 90 secondes, à vitesse lente*
4. Arrêter pendant 15 secondes, démonter le godet et remettre avec une spatule toute la pâte adhérente à la cuve au-delà de la zone de malaxage
5. Remonter le godet et malaxer durant *90 secondes à vitesse rapide*
6. Remplir le moule tronconique avec la pâte obtenue, et araser la surface en prenant appui sur le bord du moule.
7. Porter le moule plein sur l'appareil de Vicat, et régler le niveau zéro de la sonde (la sonde est tangente avec le bord du moule).
8. Centrer le moule dans l'axe de la sonde, abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, jet desserrer la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.
9. Après 30 secondes, noter la valeur de l'enfoncement « *d* » lue sur l'index de l'appareil (Figure III-8)
  - Si  $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , l'essai est concluant et la consistance est normale.
  - Si  $d = 5 \text{ mm}$ , la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.
  - Si  $d = 7 \text{ mm}$ , la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.

10. Répéter l'essai avec des teneurs en eau différentes jusqu'à trouver une donnant une distance de  $6\text{mm} \pm 1\text{ mm}$ . Enregistrer cette teneur en eau de cette pate exprimé à 0,5% près comme teneur en eau pour l'obtention de la consistance normalisée.

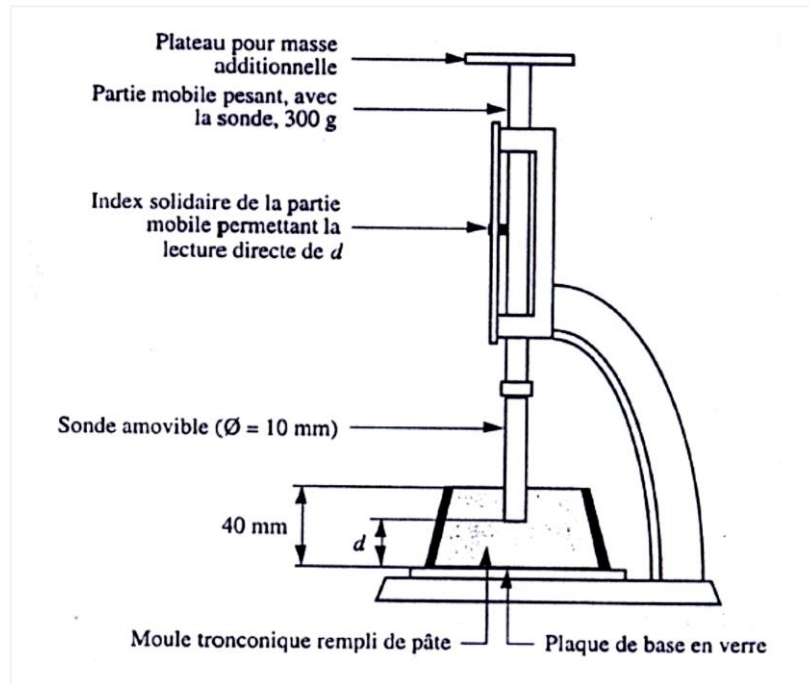


Figure III-8 : Appareil de Vicat manuel

### III-5-2-2 Essai de prise :

#### a- Objectif de l'essai :

Il consiste à déterminer le début et la fin de prise des pâtes pures des ciments étudiées conformément à la norme EN 196-3.

#### b- Principe de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat manuel ou automatique. (Figure III-9).

Le Vicat manuel équipée d'une aiguille de 1.13mm de diamètre ; sous l'effet d'une charge de 300g, l'aiguille s'enfonce à une distance  $d$  du fond du moule.

Si  $d = 6\text{mm} \pm 3$  On dit que c'est le début de prise, le temps est mesuré à partir du temps 0 du début de malaxage.

Si l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte vaut  $d = 0.5\text{mm}$ . On dit que c'est la fin de prise, alors la pâte devient un bloc rigide.

#### c- Equipement utilisé :

Une armoire climatique maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et une humidité relative supérieure à 90% et l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm.

#### d- Conduite de l'essai (Norme EN 196-3) :

Il s'agit de confectionner une pâte de ciment normalisée. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur, l'aiguille est amené à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale. Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30s d'attente).

On relève la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille à la plaque de base. On recommence l'opération à intervalle de temps convenablement espacés jusqu'à ce que  $d = (6 \pm 3)$  mm cet instant mesuré à 5 mn près correspond au temps de début de prise.

On continue l'opération on faisant tourner le moule sur l'autre face le temps de fin de prise correspond à l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte que de 0.5mm pour la première fois.

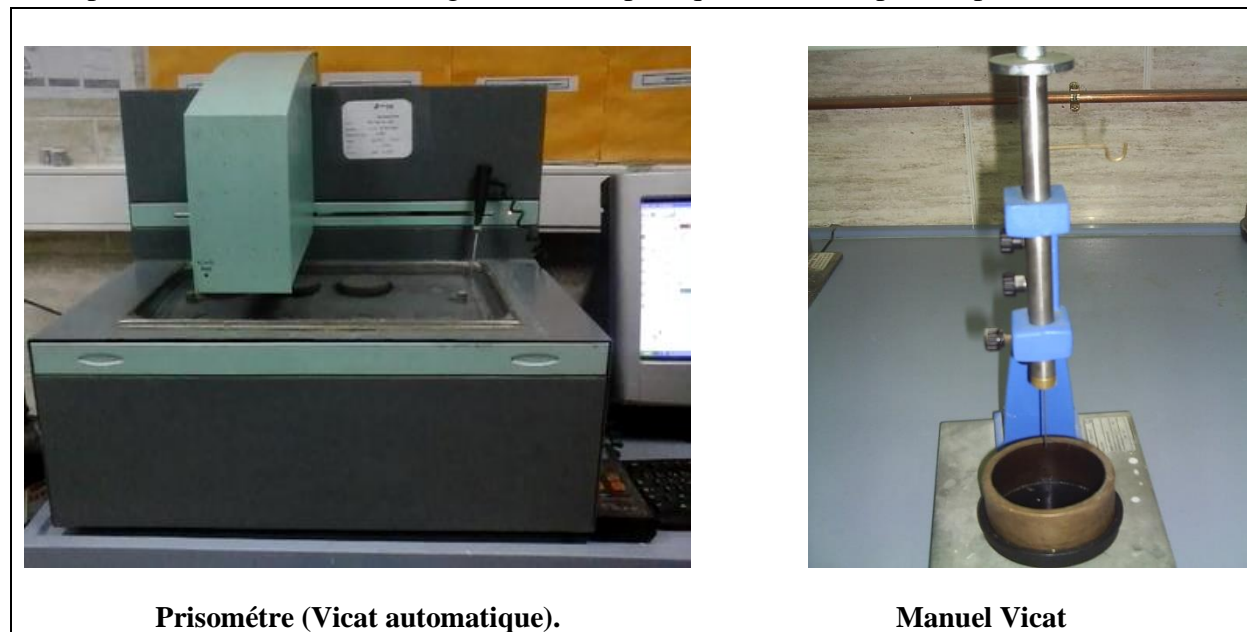


Figure III-9 : L'appareil de Vicat

### II-5-2-3 Essai de stabilité :

Les expansifs des ciments sont le gypse ajouté au moment du broyage afin de régulariser la durée de prise, la chaux libre et la magnésie libre.

#### a- Objectif de l'essai :

Ces essais permettent de découvrir la présence de matières expansives dans un liant, en particulier le gypse et la magnésie contenu dans le ciment.

Ces éléments indésirables peuvent conduire à de graves menaces pour la pérennité des constructions car elles peuvent provoquer l'éclatement du béton.

#### b- Principe de l'essai :

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.

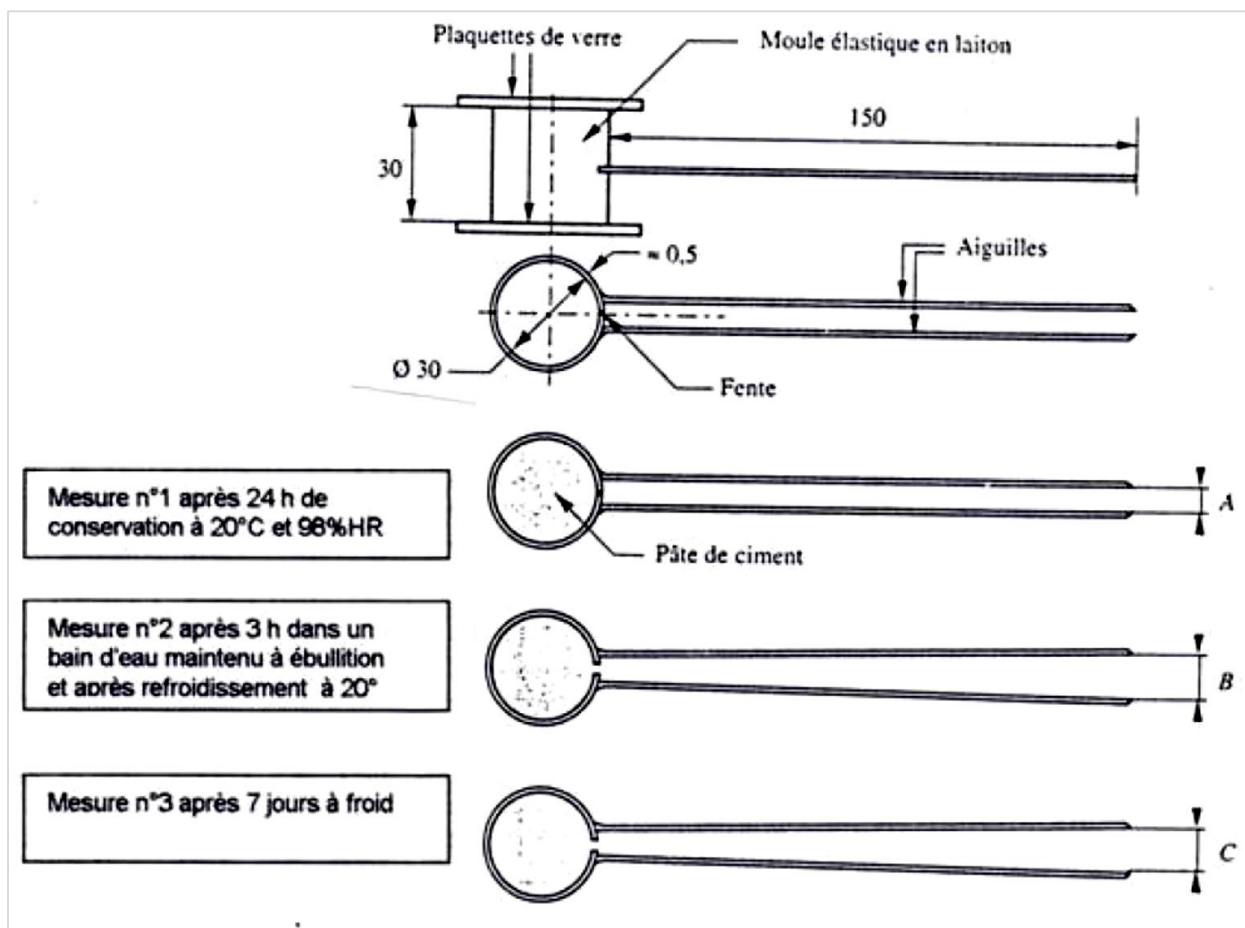


Figure III-10 : les Aiguillé de Chatelier

### c- Conduite de l'essai :

Le mortier normal ou la pâte normale sont préparés comme pour les essais sur les liants. Vérifier avant l'essai que les moules sont libres dans le sens de l'expansion, propres et les aiguilles droites et indépendantes.

1- Placer les moules sur des plaques de verre, les remplir de pâte normale ou de mortier normal, et les recouvrir chacun d'une autre plaque de verre légèrement lestée.

2- Immerger aussitôt les moules dans le bain provisoire à 20°C et mesurer l'écartement initiale des aiguilles A.

3- Après 24 heures du temps de moulage, enlever les plaques de verre avec précaution et porter les moules dans leurs bains.

- **Essai d'expansion à chaud :** les moules sont immergées dans le bain thermostatique dont on porte l'eau à l'ébullition pendant 3 heures. Puis mesurer de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles B.
- **Essai d'expansion à froid :** les moules sont immergées dans un bain d'eau froide maintenue à une température de 20°C pendant 7 jours. Puis mesurer alors la valeur de l'écartement final des pointes des aiguilles C.

**III-5-3 Essai sur mortier :**

**III-5-3-1 Mortier normalisé :**

Dans le but de confirmer l'évolution des résistances mécaniques, des éprouvettes contenant un mélange de ciment préparé (clinker, gypse et ciment hydraté) ont été coulés selon la norme EN 196-3 et EN 196-1.

Nous avons choisi un taux de substitution du ciment Portland de 0%, 5%,10%, 15%, 20%,25%, 30%, et 35%, selon la norme EN 196-1 NFP18-508.

Type de ciment	Constituant du Ciment (%)			Composition des mortiers		
	Clinker (%)	Gypse (%)	Ciment hydraté(%)	Ciment préparé (g)	L'eau (ml)	Sable Normalisée(g)
<b>CEM 1</b>	95	5	0	450	225	1350
<b>CEM 2</b>	90	5	5			
<b>CEM 3</b>	85	5	10			
<b>CEM 4</b>	80	5	15			
<b>CEM 5</b>	75	5	20			
<b>CEM 6</b>	70	5	25			
<b>CEM 7</b>	65	5	30			
<b>CEM 8</b>	60	5	35			

**Tableau III-15 : Composition des mortiers.**

**III-5-3-1-1 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques :**

Sa composition est définie par la norme EN 196-1. Le mortier doit être composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable normalisé et d'une demi partie d'eau (E/C = 0.50). Chaque gâchée pour trois éprouvettes d'essai doit comporter 450 g ± 2 g de ciment, 1350 g ± 5 g de sable et 225 g ± 1 g d'eau. Le ciment, le sable, l'eau et l'appareillage doivent être à la température du laboratoire (20°C ± 2°C). Les pesées doivent être effectuées au moyen d'une balance dont la précision est de ± 1 g.

**a- Malaxage du mortier :**

Il faut malaxer chaque gâchée de mortier mécaniquement au moyen du malaxeur spécifié. Le malaxeur étant en position de marche (mais pas en fonctionnement) :

1. Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment.
2. Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30 s, introduire régulièrement tout le sable (pendant les 30 s suivantes).
3. Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 30s supplémentaires.
4. Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
5. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

**b- Préparation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont de forme prismatique 40 mm x 40 mm x 160 mm. Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier.

Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs.

Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée.

**c- Conservation des éprouvettes :**

Le moule rempli de mortier est convenablement identifié, puis placé jusqu'au moment du démoulage couvert d'un couvercle, sur un support horizontal dans une armoire humide ( $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$ , humidité relative supérieure ou égale à 90 %).

Le démoulage est effectué entre 20 h et 24 h après le moulage. Les éprouvettes sont alors marquées convenablement avec un crayon résistant à l'eau.

**d- Conservation des éprouvettes dans l'eau :**

Les éprouvettes marquées sont immergées dans l'eau à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  dans des récipients adéquats jusqu'au moment de l'essai. Les éprouvettes doivent être retirées de l'eau, essuyées au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté.

**III-5-3-2 Essais de retrait et de gonflement :**

Pratiquement, le retrait est proportionnel au logarithme du temps. Ensuite, l'augmentation du retrait est assez faible.

Le retrait est d'autant plus élevé que l'humidité relative est plus faible. Le retrait après prise est beaucoup plus lent à se manifester que le retrait avant prise.

Après gâchage, les mortiers et les bétons gonflent en présence d'eau. Certains gonflements entraînent des désordres dans les ouvrages (baisse de résistance mécanique, fissures, défauts d'étanchéité, etc.). Le phénomène du gonflement est observé même en présence d'un ciment parfaitement stable et sans ajouter aucun élément expansif.

**a- Objectif de l'essai :**

Déterminer le retrait et le gonflement observés sur des mortiers ou des bétons et leurs conséquences pratiques.

**b- Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer les variations de longueur de trois éprouvettes prismatiques identiques et les comparants à la longueur après démoulage aux âges de 3, 7 et 28 jours.

Entre les mesures, les éprouvettes sont conservées suivant les prescriptions ordinaires :

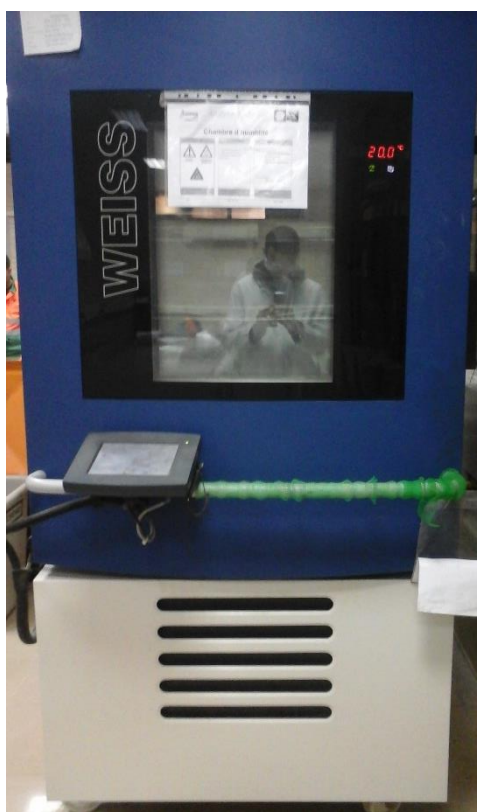
- Dans l'eau à  $20^{\circ}\text{C}$  pour l'essai de gonflement.
- Dans l'air plus ou moins sec, pour l'essai de retrait (à  $20^{\circ}\text{C}$  et à humidité 50%).

**c- Conduite de l'essai :****- Préparation des éprouvettes :**

- 1- Préparer les moules de dimensions 4 x 4 x 16 munis de leur accessoires : plots de mesure, appareil à démouler.
- 2- Graisser les faces intérieures des moules pour faciliter le démoulage, les plots restent scellés dans le mortier.
- 3- Gâcher un mortier normal à base de liant à tester.
- 4- Introduire dans chacun des compartiments des moules une fraction du mortier en première couche.
- 5- Vibrer ces moules a raison de 60 chocs sur l'appareil à choc.
- 6- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche.
- 7- Araser le mortier avec une règle métallique.
- 8- Etiqueter les éprouvettes : date, opérateur, références.

**- Conservation avant démoulage :**

Les éprouvettes sont conservées dans une chambre humide de l'ordre de 20°C et une humidité relative 90%.



**Figure III-11 : chambre d'humidité**

- **Démoulage et conservation :**

Le démoulage se fait après 24 heures du gâchage, les éprouvettes sont délicatement démoulées avec précaution .par la suite elles sont placées dans leur ambiance définitive de conservation.

- **Mesure des variations de longueur :**

Avant chaque série de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

1- Sortir les éprouvettes conçus à l'essai de leur bac, et les essayer.

2- Mettre l'éprouvette sur le rétractomètre : les billes l'une solidaire au comparateur et l'autre à la base du support.

3- Lire l'indication «  $\Delta l$  » du comparateur.

Soit  $dl(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$  (3 ,7 et 28 jours), la longueur de l'éprouvette est :

$$L(t) = L_0 + dl(t)$$

La variation de longueur au temps  $t$  (3, 7 et 28 jours) est :

$$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de la longueur est :

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [dl(t) - dl(t_0)] / L_0$$

$\Delta l(t)$  est la moyenne des trois éprouvettes issues de la même confection du mortier.

- Si les éprouvettes sont conservées dans l'air,  $\Delta l(t)$  est négatif et on parle de retrait.
- Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau,  $\Delta l(t)$  est positif et on parle de gonflement.

4- Refaire les mêmes opérations pour les autres éprouvettes.

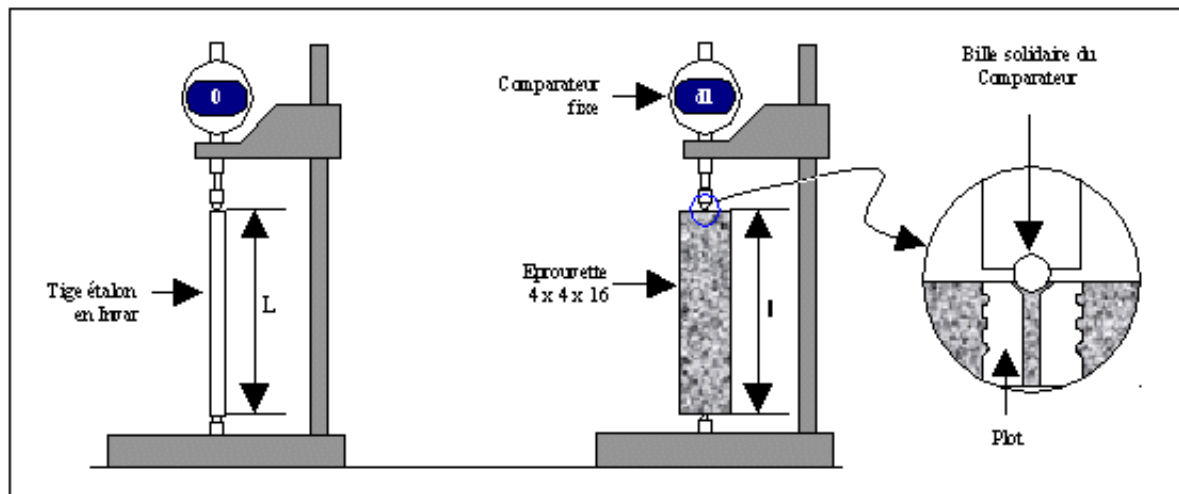


Figure III-12 : Rétractomètre pour mesure des essais de retrait et de gonflement

**III-5-3-3 La chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique) :****Principe :**

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence.

L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

**a - Appareillage :****1- Calorimètre :**

Constitué d'un vase isotherme fermé par un bouchon isolant et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support.

**2- Calorimètre de référence :**

De même construction et caractéristiques que le calorimètre d'essai (voir 1). Il doit comporter une boîte à mortier contenant un échantillon de mortier gâché au moins 12 mois auparavant (et considéré comme inerte).

**3- Thermomètres à résistance de platine :**

Pour le calorimètre de référence et chaque calorimètre d'essai, dont la graduation doit couvrir, au moins, l'échelle de 19 °C à 75 °C. Si les conducteurs de la résistance électrique sont en cuivre, ils ne doivent pas avoir, dans la partie qui traverse le bouchon, une section supérieure à 0,25 mm<sup>2</sup>.

S'ils sont en un autre métal, la résistance thermique totale par centimètre de conducteur doit être supérieure à 0,10 K.mW<sup>-1</sup> (résistance thermique équivalant à celle d'un conducteur en cuivre de 0,25 mm<sup>2</sup> de section et de 1 cm de longueur). La puissance calorifique dissipée par le thermomètre ne doit pas dépasser 3 mW.

L'alimentation en courant continu, qui constitue un apport d'énergie, doit être évitée si la puissance calorifique dissipée excède 0,2 mW. Il est recommandé de s'assurer de la précision de l'ensemble du dispositif de mesure et d'enregistrement de la température.

La température de l'échantillon d'essai doit être mesurée avec une précision de  $\pm 0,3$  °C. Lorsque le calorimètre est étalonné in situ avec les conducteurs utilisés pour les essais de chaleur d'hydratation, la section totale des conducteurs sera au maximum de 0,80 mm<sup>2</sup> (quatre fils de 0,5mm de diamètre), mais doit être telle que le coefficient de déperdition thermique du calorimètre soit inférieur à 100 J.h<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour un échauffement de 20 K.

La gaine de protection de ces conducteurs doit être fabriquée en matériau de faible conductibilité thermique.

**4- Boîte à mortier :**

Consistant en un récipient cylindrique muni d'un couvercle, d'un volume d'environ  $800\text{cm}^3$ , conçu pour contenir l'échantillon de mortier à essayer.

La boîte à mortier, perdue après chaque essai, doit être étanche à la vapeur d'eau. Ceci doit être vérifié pendant l'utilisation en pesant la boîte à mortier après chaque essai.

Elle doit être en fer-blanc contre-soudé électriquement et avoir une épaisseur nominale de 0,3 mm, un diamètre d'environ 80 mm et une hauteur d'environ 165 mm. Sa hauteur doit réserver un espace libre d'environ 10 mm entre le sommet de la boîte à mortier et le bouchon.

Le couvercle de la boîte à mortier doit être muni, en son centre, d'un étui pour thermomètre en forme de tube cylindrique fermé à sa base.

Le diamètre intérieur de l'étui doit être légèrement supérieur à celui du thermomètre. Sa longueur doit être comprise entre 100 mm et 120 mm environ afin de lui permettre d'atteindre le cœur de l'échantillon.

**5- Appareil d'enregistrement de la température :**

Capable d'enregistrer les mesures prises par chaque thermomètre.

**6- Malaxeur à mortier :**

Conforme à l'EN 196-1.

**b- Détermination de la chaleur d'hydratation :****- Laboratoire :**

La température du laboratoire où le mortier est gâché doit être maintenue à  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . La salle d'essais où la calorimétrie a lieu doit être maintenue à une température de  $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ .

La température affichée par le calorimètre de référence doit être considérée comme étant la température ambiante et doit être maintenue à  $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$ .

La distance entre chacun des calorimètres doit être d'environ 12 cm. La vitesse de l'air de ventilation autour des calorimètres doit être inférieure à  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Lorsque plusieurs essais sont effectués simultanément, on doit compter au moins un calorimètre de référence pour six calorimètres d'essai ; lorsque plusieurs calorimètres d'essai sont utilisés avec un calorimètre de référence, un agencement hexagonal doit être organisé avec le calorimètre de référence au centre.

**- Mode opératoire :****a- Composition du mortier :**

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de  $(1575 \pm 1) \text{ g}$ .

Chaque gâchée de mortier doit être constituée de  $(360,0 \pm 0,5) \text{ g}$  de ciment ;  $(1080 \pm 1) \text{ g}$  de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et  $(180,0 \pm 0,5) \text{ g}$  d'eau distillée.

Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à 1575 g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues.

**b- Malaxage :**

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments en contact avec le mortier dans la salle d'essais.

- Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ;
- homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ;
- verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ;
- régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s.

Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court. C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans EN196-1 a été raccourci.

**c-Mise en place de l'échantillon d'essai :**

- Aussitôt après le malaxage, peser ( $1\ 575 \pm 1$ ) g de mortier dans la boîte qui a été pesée au préalable, avec son couvercle, à  $\pm 0,5$  g.
- Mettre en place le couvercle en s'assurant qu'il assure l'étanchéité.
- Remplir l'étui pour thermomètre de ( $2,5 \pm 0,5$ ) cm<sup>3</sup> d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.
- Peser la boîte à mortier à  $\pm 0,5$  g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle.
- Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon.
- Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture.
- Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic.
- Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6min.
- En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à  $\pm 0,5$  g.
- En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

**d- Mesure de l'échauffement :**

- Prendre le moment où l'on verse de l'eau comme origine des temps.
- La mesure de l'échauffement consiste à relever, à des instants déterminés, la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence.
- Faire au moins un relevé au cours des 30 premières minutes, suivi par des relevés effectués au moins toutes les :
  - 1 h pendant les premières 24 h.
  - 4 h au cours du deuxième jour.
  - 6 h jusqu'à la fin de la période d'essai.
- La fréquence de ces mesures peut être accrue en fonction des caractéristiques du ciment étudié.
- Consigner l'instant de chaque relevé de température en heures et minutes.
- À chaque relevé de température déterminer l'échauffement de l'échantillon d'essai,  $ht$ , comme la différence entre la température de l'échantillon d'essai,  $T_s$ , et celle de l'échantillon inerte,  $T_{r0}$ , placé dans le calorimètre de référence.



**Figure III-13 : Calorimètre Langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila)**

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- La finesse de mouture : plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- La nature des constituants : les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C3A) et silicate tricalcique (C3A et C3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- La température extérieure.

III-5-3-4 Essai de compression :

L'essai consiste à étudier les résistances à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est le type de ciment préparé ; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Et leurs résistances progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiquée sur la Figure III-14. Si  $F_C$  est la charge de rupture, la contrainte de rupture deviendra :

$$R_c = \frac{F_C}{b^2}$$

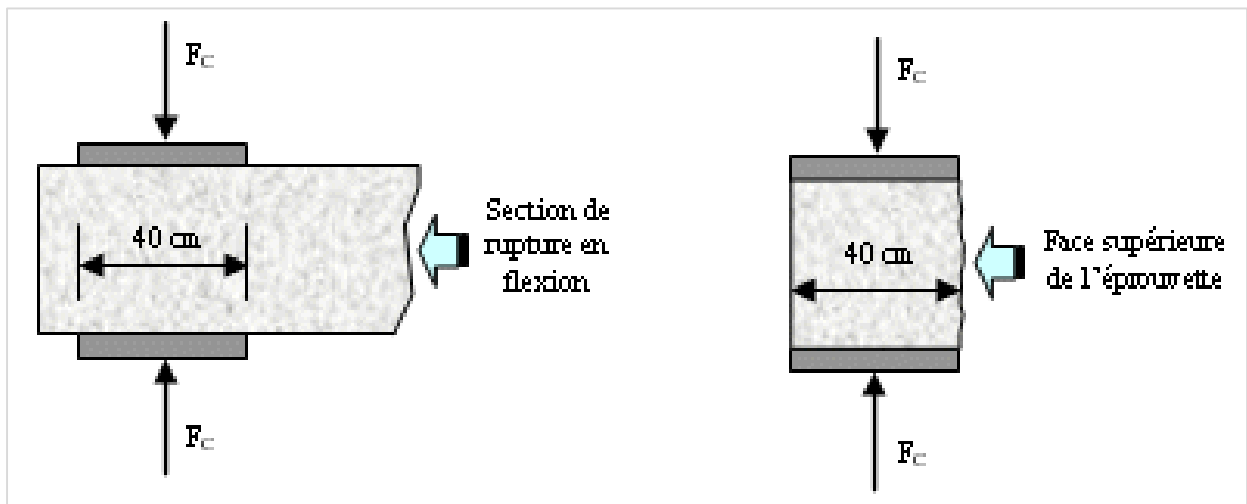


Figure III-14 : Dispositif de rupture en compression.

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si  $F_C$  est exprimée en newton, cette résistance exprimée en MPa vaut :  $R_c \text{ (MPa)} = \frac{F_C}{1600} \text{ (N)}$ .

La norme EN 196-1 [28] décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie mortier normalisé), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule une vibration de 120 seconds. Après le moule est rasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide. Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 C° ±1 C° jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV197-1 et NFP 15-301 [29,30] définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours.

## CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

### IV-1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux obtenus du programme d'essai et l'analyse ainsi que l'interprétation de derniers pour l'élaboration d'un ciment à base de de différents pourcentage de ciment hydraté qui est considéré dans notre cas comme un déchet qui peut être valorisé.

Les résultats obtenus sont rapportés dans des tableaux et représentés par des figures afin de bien montré l'influence de ce type de déchet sur les caractéristiques physico-chimiques, mécanique et écoenvironnemental de ce produit.

### VI-2 Influence du Taux d'ajout de ciment hydraté sur le poids spécifique du ciment :

Le tableau VI-1 ci-dessus présente l'ensemble des résultats obtenus lors de l'évaluation de la densité de ciment en variant le pourcentage de ciment hydraté ajouté au nouveau produit.

D'après la figure VI-1 on constate :

- Une légère diminution du poids spécifique entre les différents ciments préparés (en fonction des taux d'ajouts de ciment hydraté)
- Le poids spécifique, comme il est illustré dans la figure IV-1, diminue au fur et à mesure que le taux d'ajout de ciment hydraté augmente.
- Le ciment avec 35% d'ajout de ciment hydraté présent un poids spécifique de 3,01 g/cm<sup>3</sup> qui représente une diminution de 5% vis-à-vis au ciment témoin. Cette diminution peut être considéré comme négligeable mais il peut être expliqué par la présence des pores (vides) dans le ciment hydraté et le transfert d'une partie de Portlandite à la calcite (éléments poreux) avec le temps et en présence d'air.

Ciment hydraté %	0	5	10	15	20	25	30	35
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	3.17	3.15	3.13	3.11	3.09	3.07	3.05	3.01

Tableau VI-1 : Poids spécifique des ciments préparés

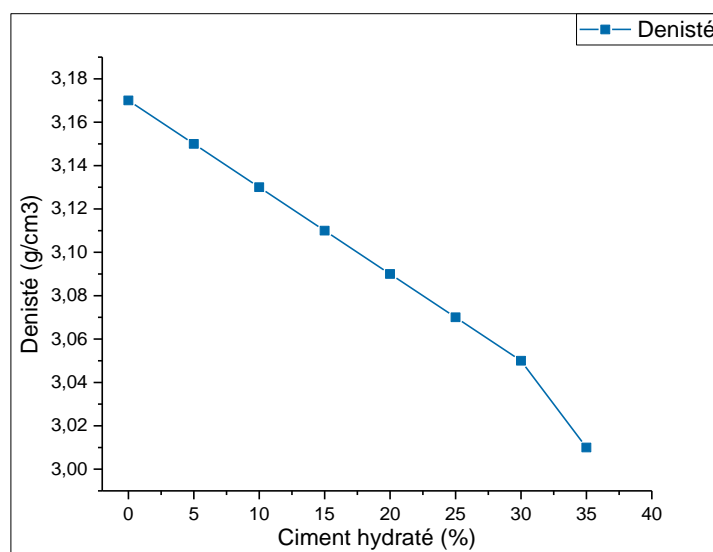


Figure IV-1 : Variation du poids spécifique de ciment en fonction du ciment hydraté

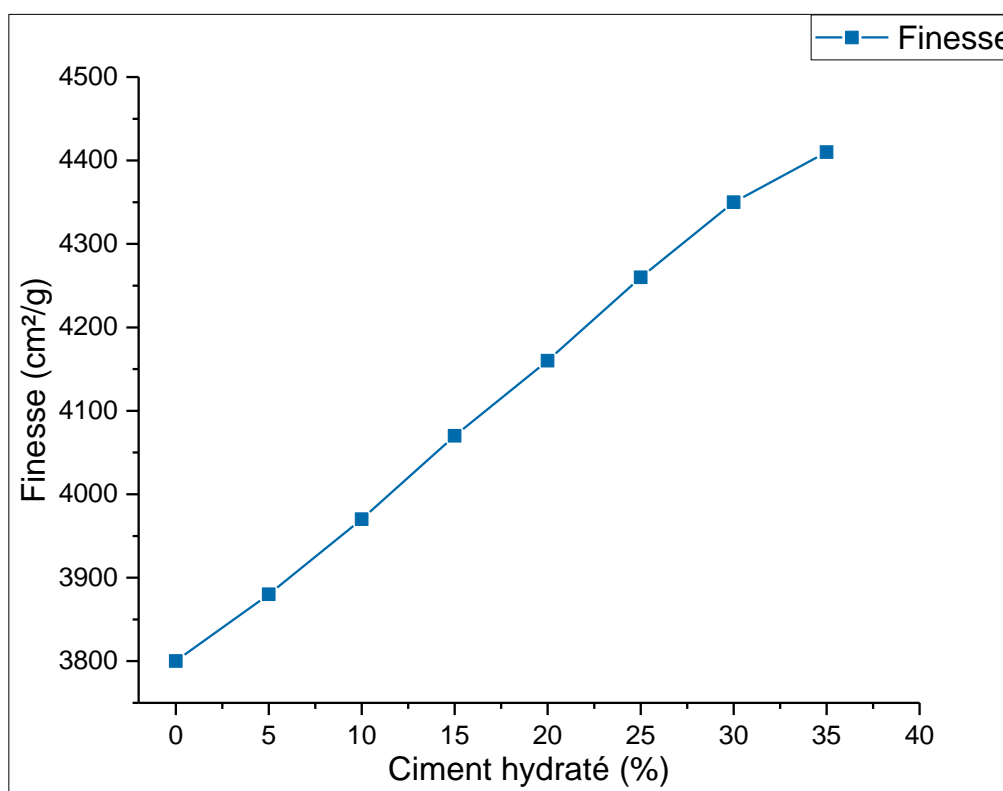
**IV-3 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur la surface spécifique du ciment :**

Le tableau IV-2 ci-dessous présente l'effet de l'ajout de ciment hydraté sur la surface des ciments préparés. D'après la figure IV-2 on constate une augmentation de la finesse du ciment au fur et à mesure que le taux d'ajout de ciment hydraté. La surface spécifique d'un ciment témoin est mesurée dans les conditions normaux ( $20 \pm 2$  °C,  $50 \pm 5$  % d'humidité). Elle est égale à 3800  $\text{cm}^2/\text{g}$ , alors qu'avec 35% d'ajout de ciment hydraté la surface spécifique de Blaine (SSB) arrive à 4410  $\text{cm}^2/\text{g}$ . C'est une augmentation de 13.83%.

Pour expliquer cette augmentation on peut dire qu'avec 35% d'ajout représente un facteur qui favorise la finesse de ce nouveau ciment (le ciment hydraté est fin alors que le ciment témoin avec 100% des particules).

<b>Ciment hydraté %</b>	0	5	10	15	20	25	30	35
<b>Finesse (<math>\text{cm}^2/\text{g}</math>)</b>	3800	3880	3970	4070	4160	4260	4350	4410

**Tableau IV-2 : Surface spécifique des ciments préparés**



**Figure IV-2 : Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de ciment hydraté**

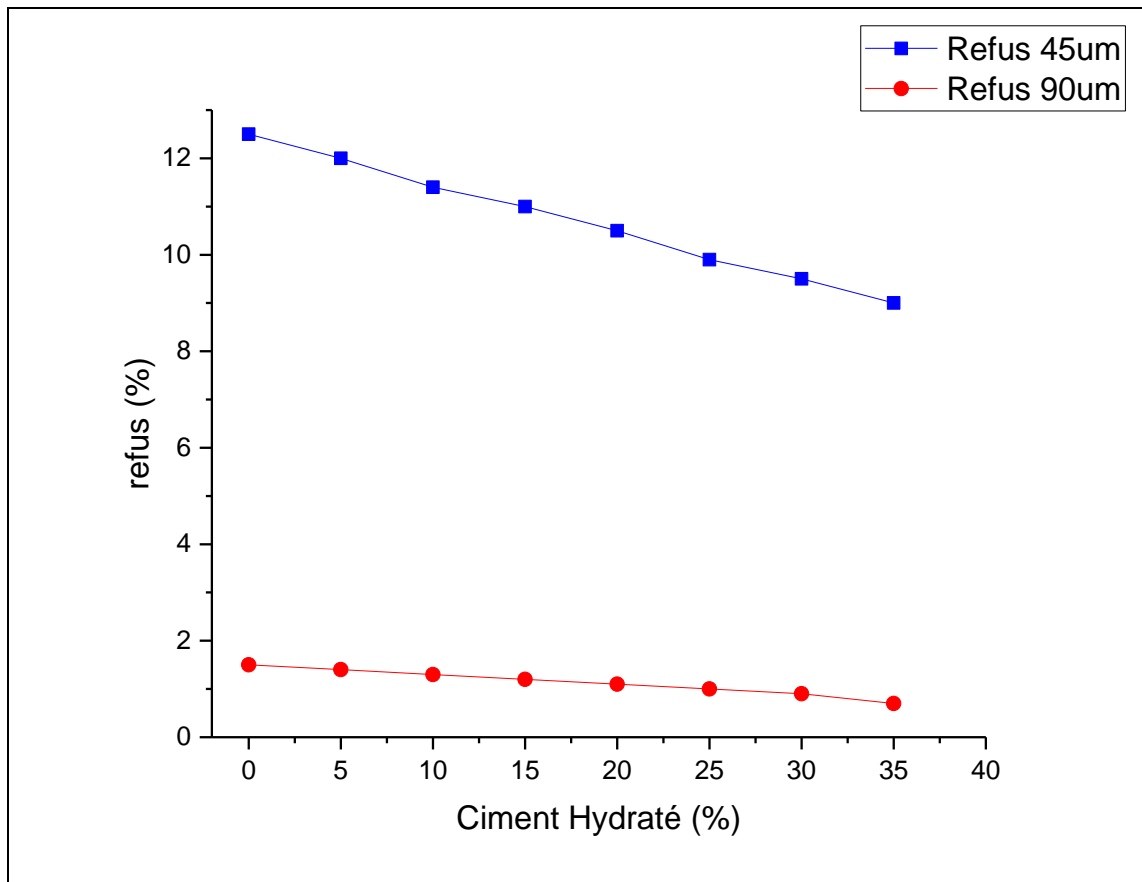
**IV-4 L'effet de l'ajout de ciment hydraté sur l'analyse granulométrique à 45 µm et 90µm :**

Les résultats expérimentaux obtenus dans le tableau IV-3 présentent l'effet du taux d'ajout de ciment hydraté sur l'analyse granulométrique à 45 µm et 90µm.

Selon la Figures (IV-3), on note que la relation de surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse, et comme on a indiqué dans la partie (IV-2), l'ajout de ciment hydraté représente un facteur qui favorise la finesse de ce nouveau ciment qui diminue les particules de grande dimension.

Ciment hydraté Taille (µm)	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
45	12,5	12,0	11,4	11,0	10,5	9,9	9,5	9,0
90	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,7
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	3800	3880	3970	4070	4160	4260	4350	4410

**Tableau IV-3 : Variation de l'analyse granulométrique en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté**

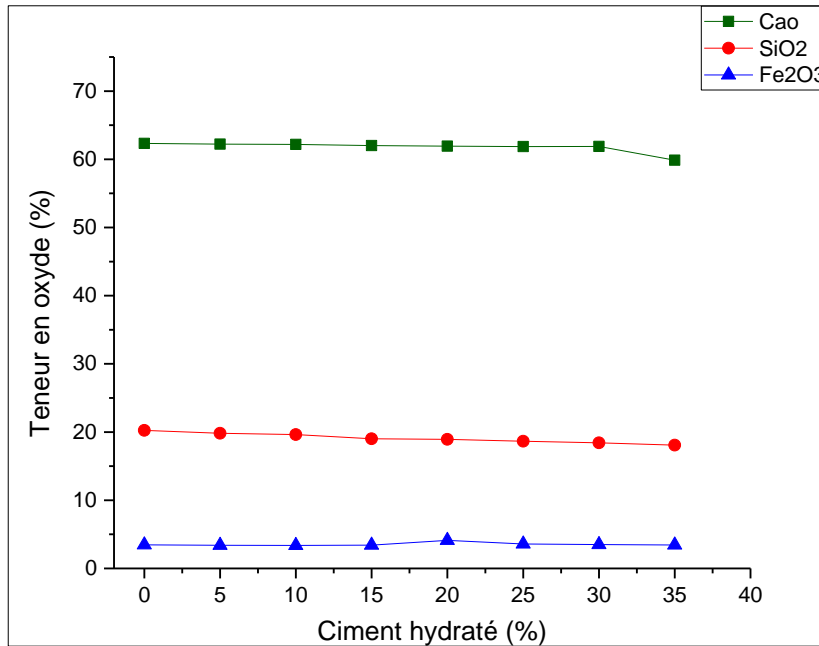


**Figure IV-3 : Variation de l'analyse granulométrique en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté**

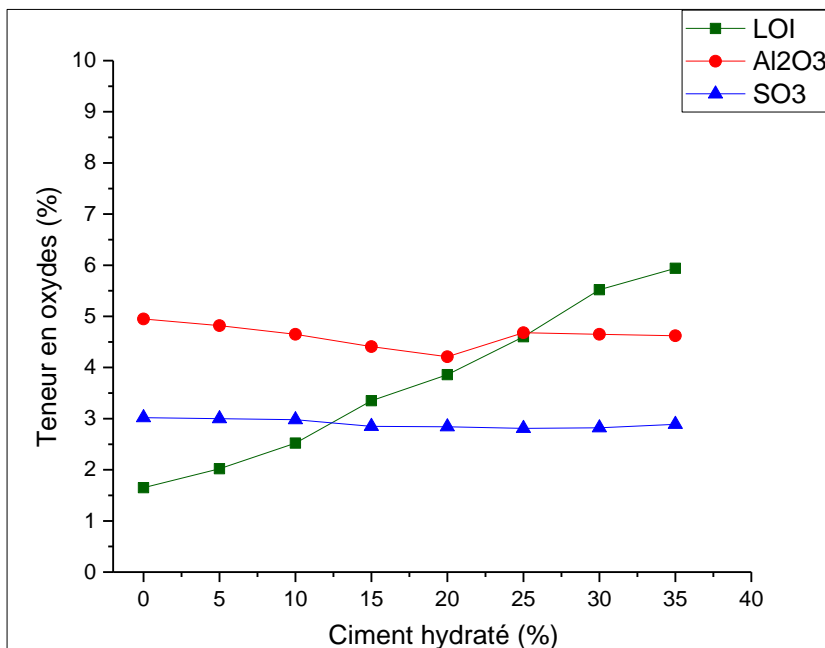
**IV-5 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur les teneurs en oxydes :**

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau III-7) représentent la variation des taux des principaux oxydes (la silice, la chaux, le fer, l'alumine) ainsi que la perte au feu dans le ciment en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté.

D'après les figures (IV-4 et IV-5) on constate que l'augmentation de ciment hydraté ajouté n'a commis aucun développement remarquable sur les principaux oxydes (la silice, la chaux, le fer, l'alumine). Mais ce qui concerne la perte au feu, l'évolution de taux d'ajout de ciment a commis une augmentation importante. Cette augmentation peut s'expliquer par la présence d'eau dans le ciment déjà hydraté et la formation de nouveaux composants.



**Figure IV-4 : Variation de la teneur des oxydes en fonction du Taux d'ajout de ciment hydraté**



**Figure IV-5 : Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté**

**IV-6 Influence du taux d'ajout de ciment hydraté sur la pâte de ciment :**

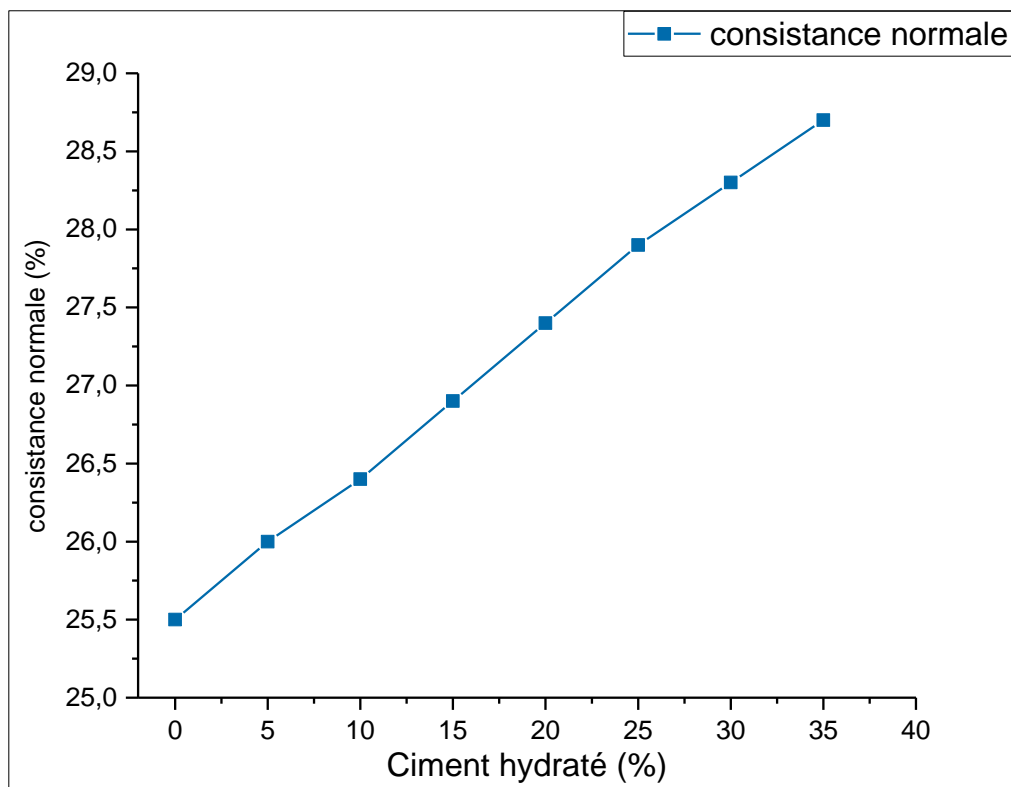
**IV-6-1 Influence de la teneur en ciment hydraté sur la consistance :**

Le tableau IV-4 ci-dessous présente l'effet du taux d'ajout (ciment hydraté) sur la consistance normale de ciment préparé.

D'après la figure IV-6, on constate une augmentation de 11.14% de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale par rapport le ciment témoin. Pour expliquer cette augmentation on peut dire que la demande 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. Cela est dû au fait que la surface de mouillage du liant augmente au fur et à mesure que le ciment est broyé plus finement.

<b>Ciment hydraté (%)</b>	0	5	10	15	20	25	30	35
<b>Consistance (%)</b>	25.5	26	26.4	26.9	27.4	27.9	28.3	28.7

**Tableau IV-4 : Evolution de la consistance normale en fonction ciment hydraté**



**Figure IV-6 : Variation du rapport E/C (consistance normale) en fonction de ciment hydraté**

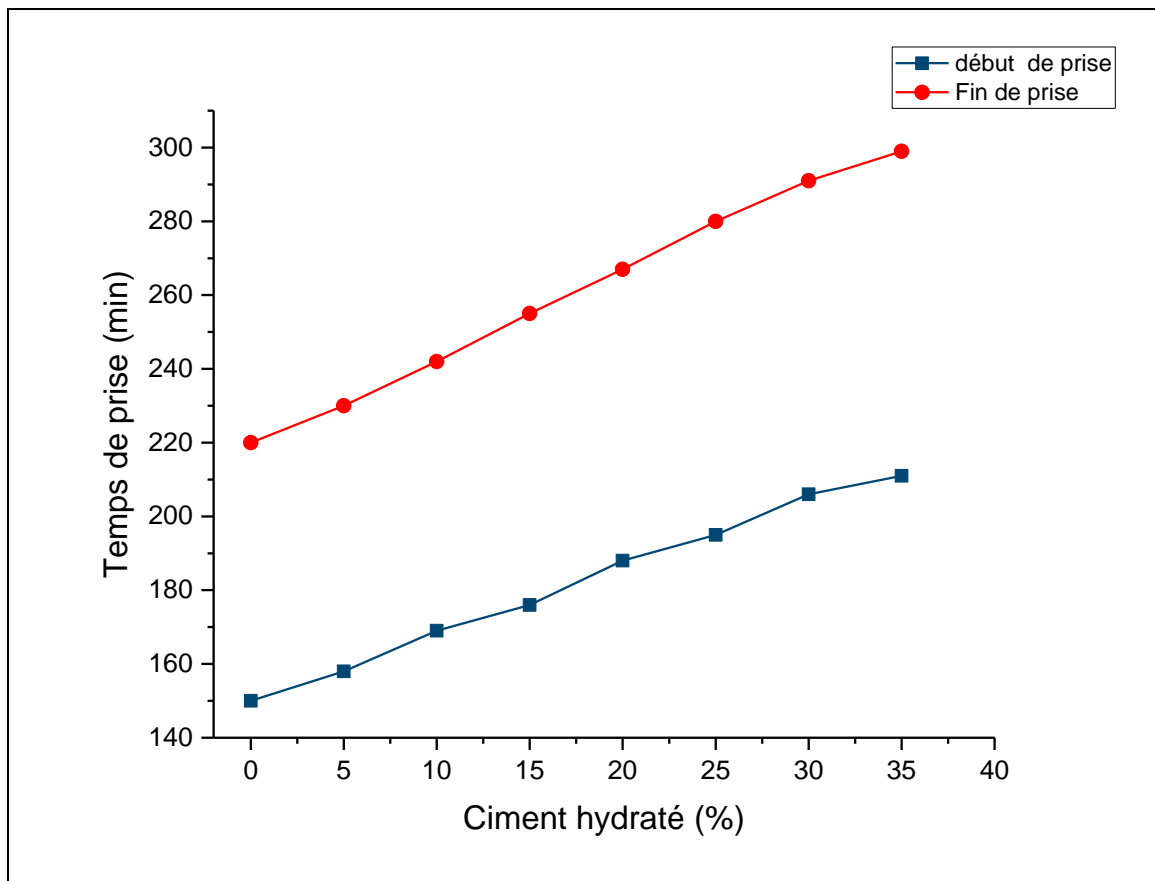
**IV-6-2 Influence du Taux d'ajout de ciment hydraté sur le Temps de Prise :**

Le tableau IV-5 ci-dessous présente l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure de temps de prise en variant le pourcentage de ciment hydraté du ciment préparé.

D'après la Figures IV-7, on remarque que les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de ciment hydraté ajouté. Cela s'explique par le fait que la réaction chimique est retardée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de l'augmentation de la quantité du ciment hydraté. Par conséquent les cristaux de CSH (élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte) existent uniquement en faible quantité aux très jeunes âges.

Ciment hydraté %	0	5	10	15	20	25	30	35
Début de prise (min)	150	158	169	176	188	195	206	211
Fin de prise (min)	220	230	242	255	267	280	291	299

**Tableau IV-5 : Temps de prise de ciment préparés**



**Figure IV-7 : Variation des temps de prise en fonction de ciment hydraté**

**IV-6-3 Influence de la teneur en ciment hydraté sur la stabilité du ciment :**

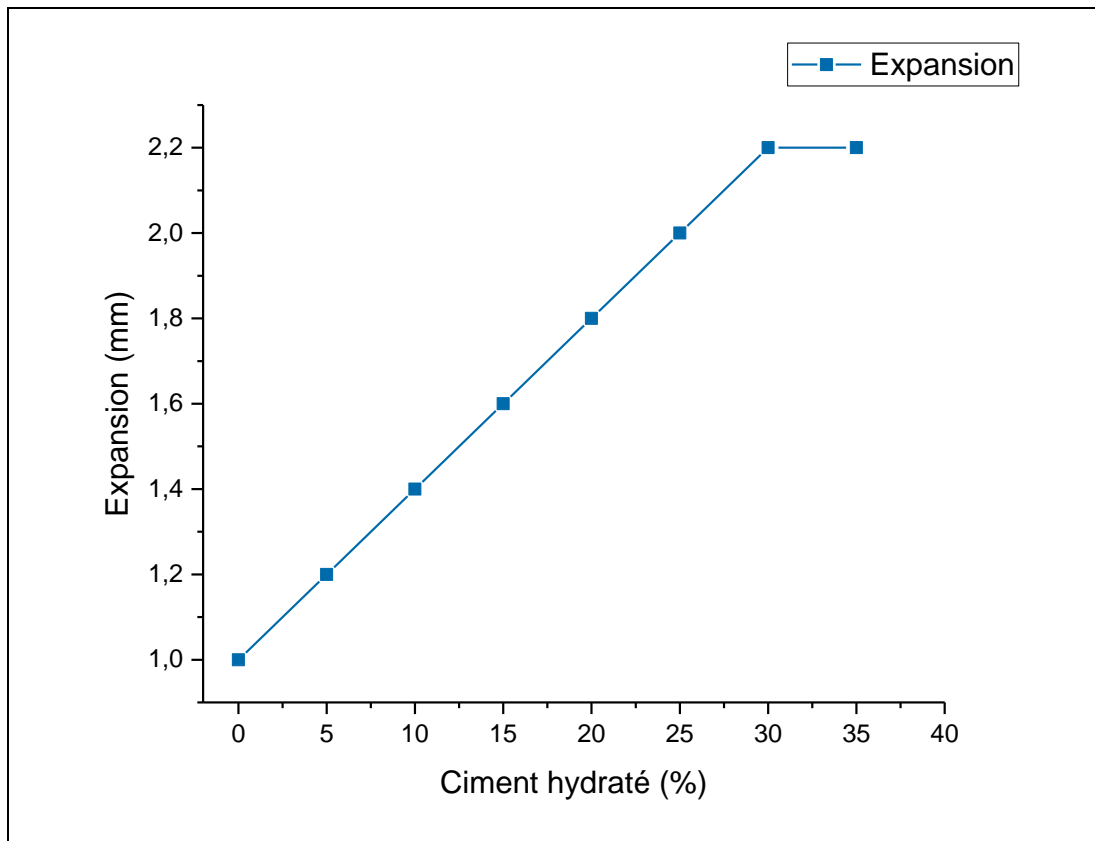
Le tableau IV-6 ci-dessous présente l'effet du taux d'ajout (ciment hydraté) sur la stabilité du ciment élaboré.

D'après la figure IV-8, les ciments sont stable et présente une faible expansion plutôt minime de l'ordre 1,2mm et n'a pas d'effet significatif sur la stabilité du ciment et reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme EN 196-3 qui est de 10 mm.

Cette stabilité peut expliquer par le taux minimal de MgO dans les ciments préparés qu'elle ne dépasse pas 2% (Tableau III-7).

<b>Ciment hydraté %</b>	0	5	10	15	20	25	30	35
<b>Expansion à chaud (mm)</b>	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,2

**Tableau IV-6 : Expansion à chaud des ciments préparés**



**Figure IV-8 : Expansion à chaud en fonction de ciment hydraté**

**IV-7 Influence du Taux d'ajout de ciment hydraté sur le mortier :**

**IV-7-1 Effet du Taux d'ajout de ciment hydraté sur le retrait et gonflement :**

Les résultats du retrait et du gonflement du mortier normal en fonction de l'ajout de ciment hydraté sont représentées dans les Tableaux (IV-7).

D'après les résultats obtenus et la figure (IV-9), on constate que le retrait augmente avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau des pores capillaires des amas d'hydrates formés et à la dessiccation. Les Retraits des ciments avec ajout de ciment hydraté à différents pourcentages (à partir 5%) sont supérieurs à ceux du ciment à 0% d'ajout.

d'après la figure (IV-10) remarque que le gonflement dans les ciments contenant l'ajout de ciment hydraté est supérieur au gonflement dans le ciment de 0% d'ajout.

A partir des résultats obtenue on peut affirmer que tous les ciments préparés provoquent un faible retrait et gonflement sur les mortiers étudiés.

On remarque aussi que les retraits à 28 jours sont inférieurs aux valeurs fixées par la norme NF P 15-433 et NA 440 qui sont pour les ciments CPA –CEM I et CPJ-CEM II :

- ≤ 800 µm/m pour la classe 32,5.
- ≤ 1000 µm/m pour la classe 42,5.

<b>Ciment hydraté %</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>
<b>Retrait et gonflement (µm/m)</b>								
<b>Retrait à 03 jours (µm/m)</b>	152	165	198	220	274	311	352	420
<b>Retrait à 07 jours (µm/m)</b>	321	368	393	425	471	521	553	593
<b>Retrait à 28 jours (µm/m)</b>	565	572	582	635	702	712	736	798
<b>Gonflement à 03 jours (µm/m)</b>	22,2	31,3	35,5	41,1	43,5	48,2	53,5	63,5
<b>Gonflement à 07 jours (µm/m)</b>	35,5	42,5	49,6	56,2	62,5	77,4	84,5	86,6
<b>Gonflement à 28 jours (µm/m)</b>	97,5	101,2	112,5	120,5	132,2	150,2	153,5	161,5

**Tableau IV-7 : Retrait et gonflement du Mortier normal en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté**

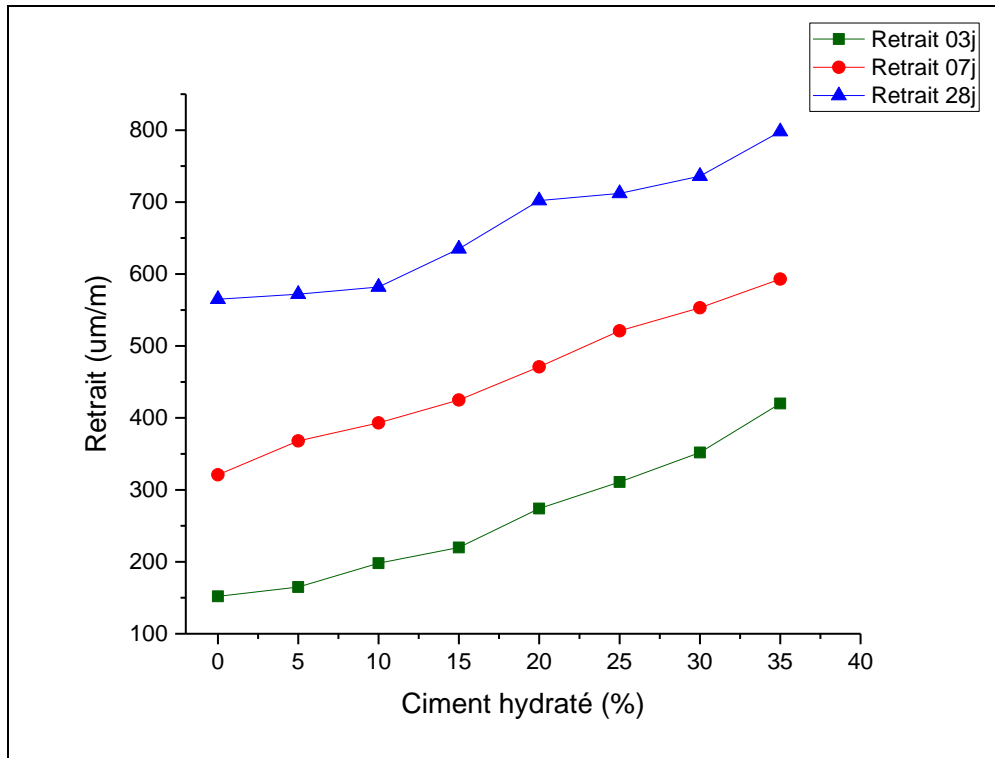


Figure IV-9 : Evolution du retrait du mortier en fonction de la teneur en ciment hydraté

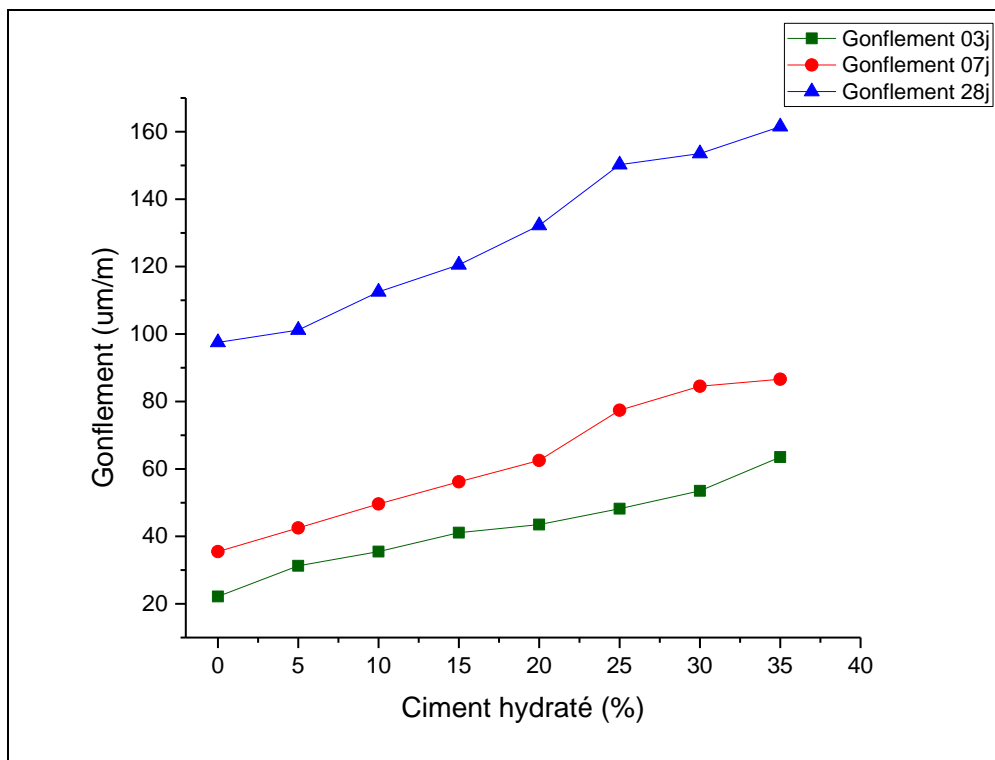


Figure IV-10 : Evolution du gonflement du mortier en fonction de la teneur ciment hydraté

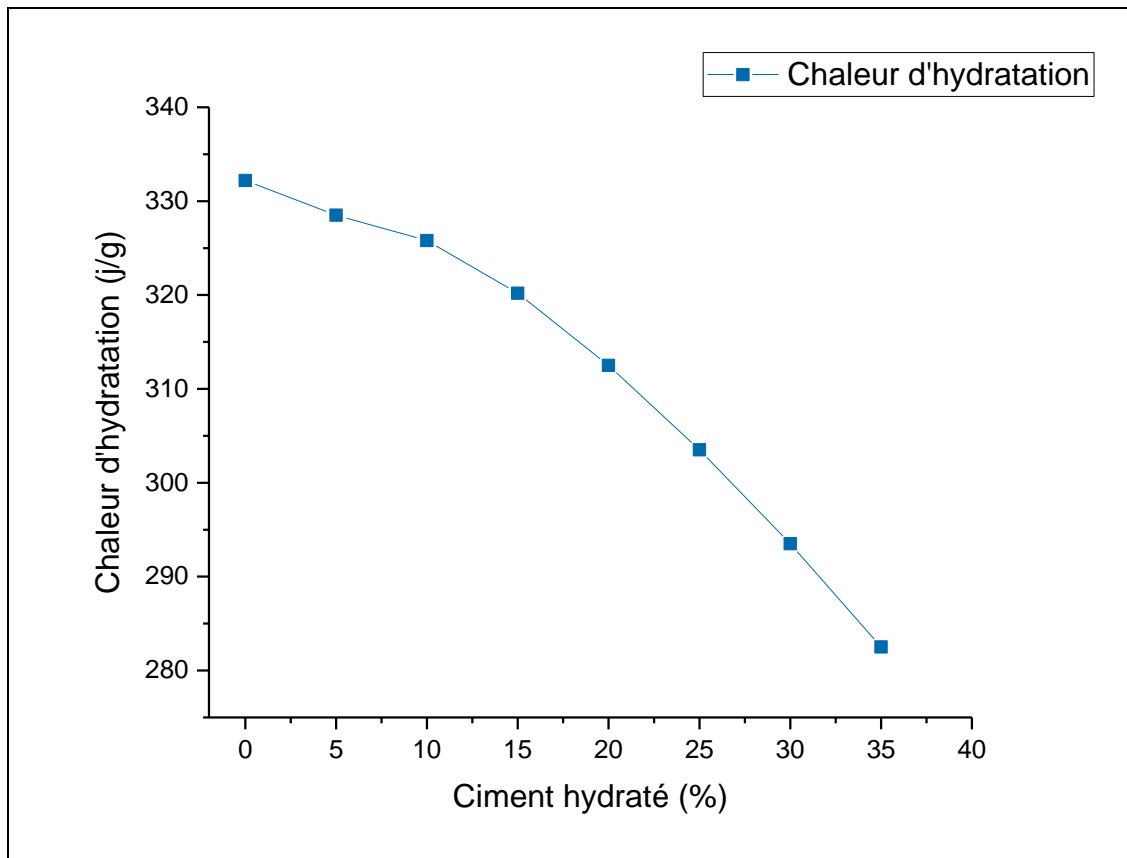
**IV-7-2 Effet de l'ajout de ciment hydraté sur la chaleur d'hydratation :**

Le tableau (VI-8) ci-dessus présente l'ensemble des résultats obtenus lors de l'évaluation de chaleur d'hydratation de ciment en variant le pourcentage de ciment hydraté ajouté au nouveau produit.

D'après la figure (VI-11) on constate que la chaleur d'hydratation se diminue en augmentant le taux d'ajouts de ciment hydraté. Cette diminution est due à la réduction du clinker (réduction de C3A ; responsable de l'hydratation).

Ciment hydraté %	0	5	10	15	20	25	30	35
Chaleur d'hydratation (j/g)	332	329	326	320	313	304	294	283

**Figure IV-8 : Effet du taux d'ajout de ciment hydraté sur la chaleur d'hydratation**



**Figure IV-11 : Evolution de chaleur d'hydratation du mortier en fonction de la teneur ciment hydraté**

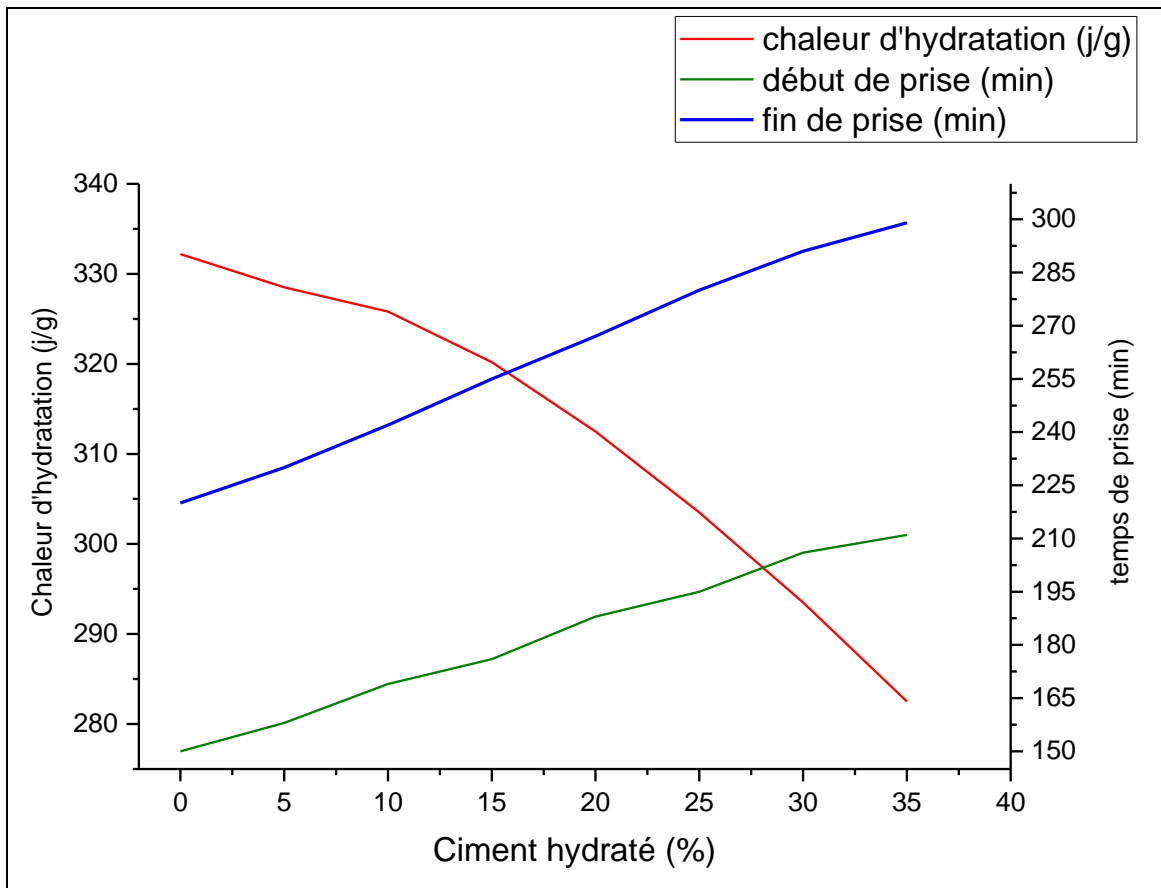
**IV-7-2-1 Effet de la chaleur d'hydratation sur temps de prise :**

Le tableau IV-9 ci-dessous présente l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure de temps de prise et la chaleur d'hydratation en variant le pourcentage de ciment hydraté du ciment préparé.

On remarque dans la figure (IV-12) que la chaleur d'hydratation diminue par rapport à l'augmentation du taux d'ajout de ciment hydraté et le temps de prise. Cette contradiction a une relation à la quantité de C<sub>3</sub>A qui diminue avec l'augmentation de taux d'ajout de ciment hydraté.

Ciment hydraté %	0	5	10	15	20	25	30	35
Chaleur d'hydratation (j/g)	332	329	326	320	313	304	294	283
Début de prise (min)	150	158	169	176	188	195	206	211
Fin de prise (min)	220	230	242	255	267	280	291	299

**Tableau IV-9 : effet de chaleur d'hydratation sur le temps de prise**



**Figure IV-12 : Evolution de temps de prise sur l'effet de chaleur d'hydratation**

**IV-7-3 Résistance à la Compression :**

Les résultats des essais mécaniques réalisés sur les éprouvettes de mortier contenant des différents pourcentages de ciment hydraté et testées aux différents âges de durcissement (2, 7, 14, 28 et 90 jours) sont rapportés dans le tableau IV-10 et présentés par les figures IV-13et IV-14.

D’après cette figure, 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 âge de durcissement on constate que la résistance à la compression diminue avec l’augmentation du ciment hydraté de 5 à 35% (avec un intervalle de 5%). Cette diminution s’explique par le fait que l’incorporation de ciment hydraté entraîne systématiquement une réduction des minéraux C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S. Ces derniers, sont donc les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme.

<b>Ciment hydraté %</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>
<b>Résistance à la compression 02 jours (MPa)</b>	30,80	29,20	27,90	26,50	25,30	24,10	22,60	21,10
<b>Résistance à la compression 07 jours (MPa)</b>	45,30	43,70	42,50	41,10	40,20	39,00	36,30	33,50
<b>Résistance à la compression 14 jours (MPa)</b>	50,10	48,50	47,90	45,90	45,60	44,30	39,60	37,70
<b>Résistance à la compression 28 jours (MPa)</b>	56,20	53,70	52,40	51,10	49,80	47,60	44,90	42,10
<b>Résistance à la compression 90 jours (MPa)</b>	64,10	60,90	59,90	58,80	57,60	55,30	53,10	51,10

**Tableau IV-10 : Evolution des Résistances à la Compression Mortier en fonction du taux d'ajout de ciment hydraté**

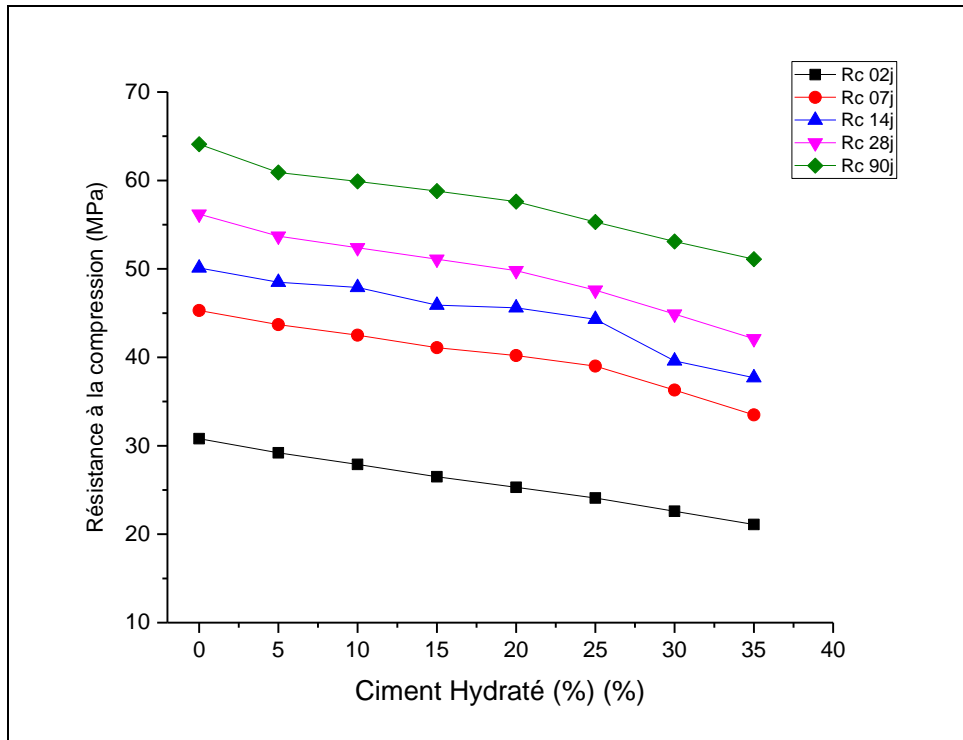


Figure IV-13 : Effet du Taux d'ajout de ciment hydraté sur la Résistance à la Compression

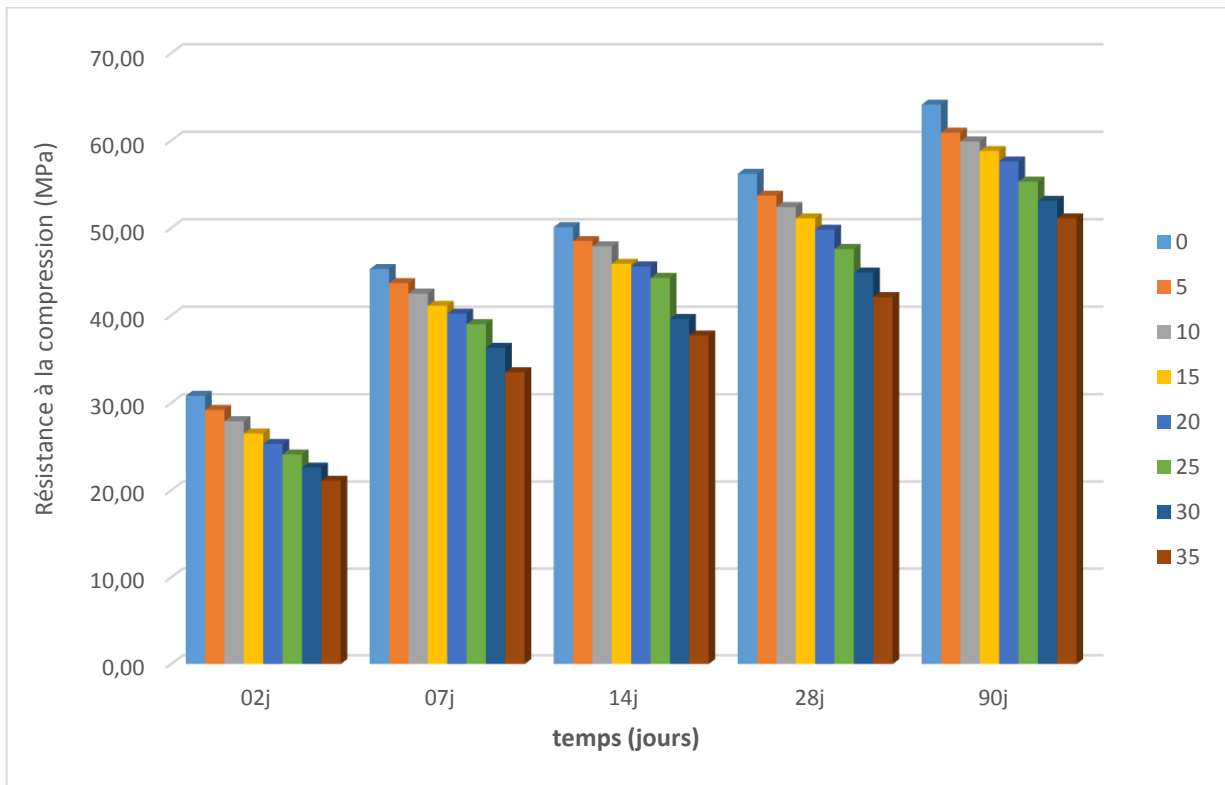


Figure IV-14 : Evolution de résistance à la compression en fonction de temps

**IV-8 Comparaison entre les ciments préparés et les produits de l'usine LafargeHolcim :**

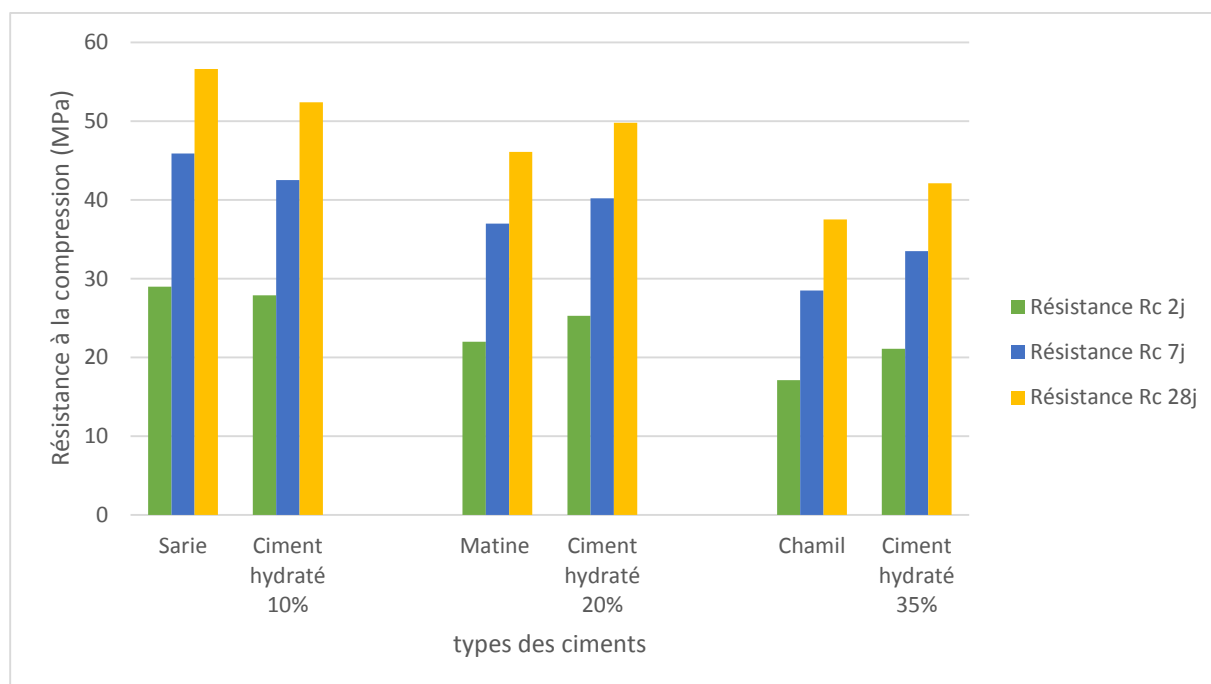
On a comparées les résultats de la résistance mécanique, la consistance et le temps de prise des ciments préparés à 10%, 20% et 35% e celle des ciments fabriqués par l'usine Lafarge Sarie, Matine et Chamil respectivement.

Les résultats obtenus dans le tableau IV-11 montrent que l'ajout de ciment hydraté à 20% et 35% présente une résistance plus élevé que Matine et Chamil.

Ce qui concerne la consistance et le temps de prise les nouveaux ciments élaborés présentent des résultats très proches aux produits Lafarge.

	Résistance (MPa)			E/C (%)	D.P (min)	F.P (min)
	Rc 2j	Rc 7j	Rc 28j			
<b>Sarie</b>	29	45,9	56,6	29,4	168	236
<b>Ciment hydraté 10%</b>	27,9	42,5	52,4	26,4	169	242
<b>Différence</b>	-1,1	-3,4	-4,2	-3	1	6
<b>Matine</b>	22	37	46,1	28,3	191	245
<b>Ciment hydraté 20%</b>	25,3	40,2	49,8	27,4	188	267
<b>Différence (%)</b>	3,3	3,2	3,7	-0,9	-3	22
<b>Chamil</b>	17,1	28,5	37,5	28,5	196	255
<b>Ciment hydraté 35%</b>	21,1	33,5	42,1	28,7	211	299
<b>Différence (%)</b>	4	5	4,6	0,2	15	44

**Tableau IV-11 : Comparaison des résultats entre les ciments préparé et ciment Lafarge**



**Figure IV-15 : Comparaison de résistance entre les ciments préparés et ciment Lafarge**

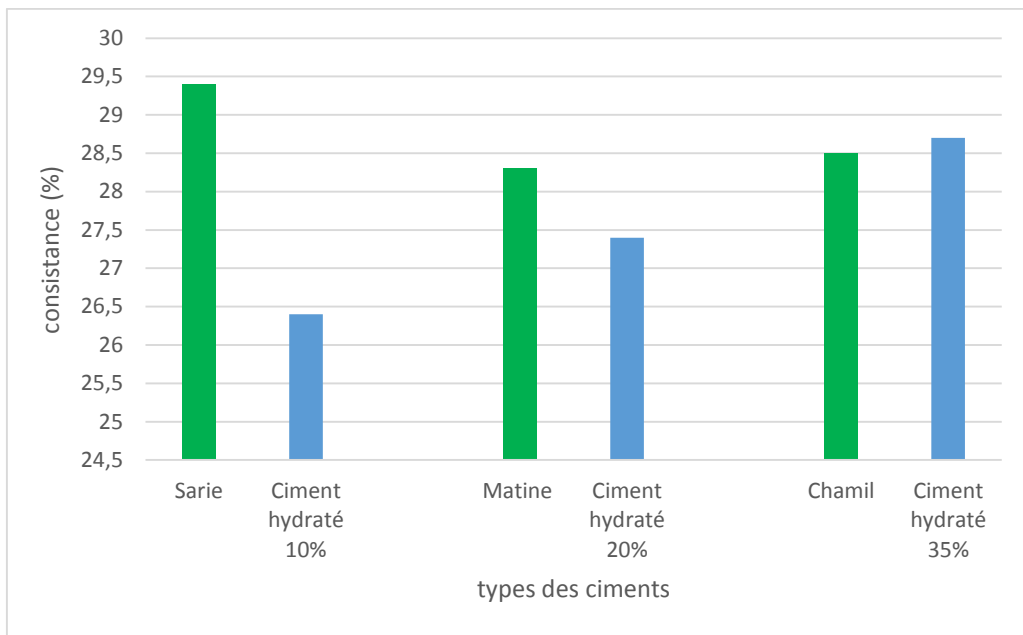


Figure IV-16 : Comparaison de consistance entre les ciments préparés et ciment Lafarge

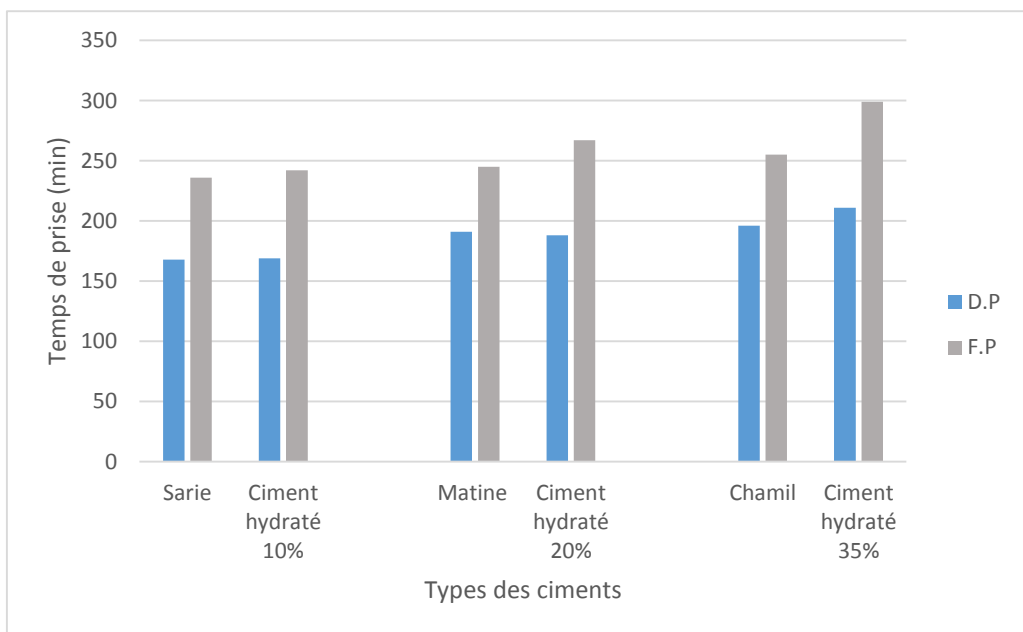


Figure IV-17 : Comparaison de temps de prise entre les ciments préparés et ciment Lafarge

## Conclusion générale

Les travaux de recherche dans le domaine de valorisation des déchets sont encore peu avancés car ils demandent un investissement important, mais ils s'inscrivent dans une véritable volonté de développer des outils d'aide à la conception.

Le recyclage des déchets de ciment hydraté comme ajout est moins coûteux et ne demande pas pour son élaboration un matériel ou des stations spéciales comme celles conçues à l'élaboration des granulats recyclés à base de déchets de démolition et de construction.

Le recyclage des déchets de cimenterie pour produire d'un nouveau ciment contribue à :

- la mise en décharge de ces déchets ;
- réduction de prix de revient du ciment produit ;
- la conservation de la matière première et l'énergie de fabrication.
- la pris en compte des exigences liées à l'environnement.

L'étude des caractéristiques d'ajout à base de déchet de ciment hydraté et les propriétés des mortiers à base de cet ajout ainsi que l'analyse des résultats de la recherche bibliographique, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible de valoriser les déchets de ciment hydraté comme ajout pour la fabrication du ciment.
- Le recyclage du ciment hydraté génère, en général, des résistances plus élevées par rapport à ciment normal.
- Les résistances mécaniques du mortier varient en fonction du pourcentage de ciment hydraté. Donc la fabrication d'un ciment moins couteux sera plus pratique.
- Les nouveaux ciments produits à base de déchet de ciment hydraté répondent à tous les conditions et les normes en vigueur pour la fabrication du ciment portland.

En général, il est important de rechercher d'autres applications pratiques pour valoriser le déchet de ciment hydraté dans la confection de béton.

Toutefois, la valorisation de déchet du ciment hydraté, dans le processus de la fabrication de nouveaux ciments constitue une solution économique, environnementale et technique.

### **Recommandations :**

Pour compléter ce travail nous recommandons de :

- Faire des analyses par diffraction aux rayons (X) sur des mortiers à base de ciment binaire composé de (CPO + déchet de ciment hydraté) à long terme afin de voir l'évolution des réactions dans le temps.
- Faire des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) pour déterminer la morphologie des hydrates formés.

## Références bibliographiques

- [1] **D.Platel**, ''impact de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physico-chimiques des coulis de ciment '', thèse de doctorat 'Université Pierre et Marie Curie, Physique et Chimie des Matériaux, 2004.
- [2] **D.Trembley** ''Béton de ciment'', Modulo Editeur, 1983.
- [3] **H.F.W. Taylor**, ''Cement chemistry'', 2nd edition, University of Aberdeen, 2007.
- [4] **J.M.Auvray**, ''Elaboration et caractérisation à haute température de bétons réfractaire à base d'alumine Spinelle'' thèse de doctorat, université de Limoges Science et technologie de santé 2003.
- [5] **Jean FESTA**, Georges DREUX, nouveau guide du béton et ses constituants, 8<sup>ème</sup> édition, EYROLLES, 2007.
- [6] **A, Govin**, ''Aspects Physico -Chimique de l'interaction bois-ciment modification de l'hydratation du ciment par le bois'' thèse de Doctorat de l'université de Limoges ,2004.
- [7] **M.N. Noirfontaine**, Étude structurale et cristallographie du composé majoritaire du ciment anhydre : le silicate tricalcique'' thèse de doctorat, école polytechniques, 2000.
- [8] **Cembureau**, 1997. Procédés et techniques de fabrication du ciment. Bruxelles, Belgique, Available from: URL: [www.ciments-calcia.fr](http://www.ciments-calcia.fr)
- [9] **Defossé, C**, 2004. Chimie du ciment –valorisation des déchets en cimenterie. Laboratoire de chimie industrielle, FDSA, Université Libre de Bruxelles.
- [10] **Mouss, Dj**, 2005. Modélisation et simulation d'un procédés industriel par approche à base de connaissance - cas de SCIMAT, Ain Touta. Département de génie industriel, Batna.
- [11] **Bogue,R.-H**, 1952. La chimie du ciment portland.
- [12] **NF EN 197-1 (P15-101-1)** : Ciment-partie1 : composition, spécifications et critères de conformité de ciment courants.
- [13] **Rompaey, G. V.** (2006), Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloré. 372 pp, ULB,Bruxelles.
- [14] **Signes-Frehel, M, Maes P., Haehnel,C.**, 1996. Etude des phases d'un clinker par diffractometrie des rayons X - vers la quantification. Centre Technique, Groupe Italcementi-Cements, Volume 6. Guerville, France. available at <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1996414>
- [15] **Senisna Zoubida**, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux (thèse de Master), Université Kasdi Merbah – Ouargla, Année universitaire 2010/2011.
- [16] **Phoummavong V**, Matériaux de construction, cours en ligne du Campus Numérique rancophone de Vientiane, accédé septembre 2006,<http://www.la.refer.org/materiaux/default.html>

- [17] **Baron J**, 1982, Les principes de composition du béton de porosité minimale. In : Le béton hydraulique. Coordonné par J. Baron et R. Sauterey. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 131-142.
- [18] **Harrisson A. M**, Winter N. B. & Taylor H. F. W., 1986, An examination of some pure and composite Portland cement pastes using scanning electron microscopy with X-ray analytical capability. in 8th Int. Congress on Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986, Vol. 4, p. 170.
- [19] **Berner U.R**, 1992, Evolution of pore water chemistry during degradation of cement in a radioactive waste repository environment, Waste Management, Vol. 12, pp. 201–219.
- [20] **Taylor, H. F. W**, 1990, Cement Chemistry. New York, Academic Press, Inc.- 222.
- [21] **Taylor H. F. W**, 1993, Nanostructure of C-S-H: current status, Advances in Cement Based Materials, Vol. 1, p. 38-46.
- [22] **Taylor H.F.W**, 1992, Cement chemistry, 2nd edition, London : Academic Press, 475p.
- [23] **Michel MURAT**, Valorisation des déchets et des sous-produits industriels, Masson, Paris, 1981.
- [24] **Gestion des déchets** : Catégories des déchets et leur nomenclature - Modifié le 10/12/2012 visé le 25/04/2016, <http://www.wikiterritorial.cnfpt.fr/xwiki/wiki/econnaissances/view/Notions-Cles/LagestiondesdechetsLescategoriesdesdechetssetleurnomenclature#H1.LesdiffE9rentescatE9goriesdedE9chets>.
- [25] **BOUALI Khaled** : Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires (Mémoire de Magister-UMBB-2014).
- [26] **Commission Européenne**, (2010), « Document de référence sur les meilleures techniques disponibles Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie », Ministère de l'énergie et du développement durable et de la mer en France, Paris.
- [27] **NF-EN-196-6**, Détermination de la granularité, (1990).
- [28] Norme EN 196-1, Méthodes d'essai des ciments, Partie I: Détermination des résistances mécaniques, (1995).
- [29] **Norme ENV 197-1**, Les constituants du Ciment, (1992).
- [30] **NFP 15-301**, Liants hydrauliques. Ciments courants. Composition, spécifications et critères de conformité, (1994).

## ملخص:

أسباب اقتصادية وبيئية، وفي إطار الاستغلال، تتم دراسة إعادة استخدام نفايات مواد البناء على نحو متزايد. هذه الدراسة التجريبية تركز على المساهمة في تعزيز استغلال نفايات الاسمنت الرطبة في صناعة نوع جديد من الاسمنت. يهدف هذا البحث إلى إضافة نسب من الاسمنت الرطب إلى الكلنكر ومعرفة قيمة استخدام هذه النفايات واستبدالها جزئيا في الكلنكر، على البيئة وعلى الأداء الميكانيكي للإسمنت الذي أدخل عليه. وتظهر النتائج المتحصل عليها أنه من المجدي جدا استغلال هذه النفايات لصناعة اسمنت صديق للبيئة، والذي له خصائص مماثلة تقريبا أو أفضل ريولوجيا وميكانيكا مقارنة مع الاسمنت العادي. بشكل عام يظهر البحث أن استخدام الاسمنت الرطب يساهم بشكل إيجابي في تحسين الخواص الكيميائية والفيزيوميكانيكية للإسمنت، وبدوره يؤثر على الملاط. استخدام هذا النوع من الإسمنت المصنوع أساسا من نفايات الاسمنت الرطب يسمح لنا بالتقليل من استهلاك الطاقة، وتقليل انبعاثات CO<sub>2</sub> والتسيير العقلاني لهذه النفايات، والذي يؤدي إلى الحصول على إسمنت أكثر اقتصادا وأقل تلويثا للبيئة.

## مفاتيح:

إسمنت رطب، نفايات، استغلال.

## Résumé :

Pour des raisons économiques et environnementales, la valorisation, du la réutilisation des déchets de matériau de construction sont plus en plus étudiées.

Cette étude expérimentale consiste à contribuer à la valorisation de déchet de ciment hydraté dans la fabrication d'un nouveau ciment.

Le travail a comme but d'introduire des pourcentages de ciment hydraté au clinker et voir l'intérêt d'utiliser ce déchet en substitutions partielle au clinker sur l'environnement et sur les performances mécaniques des ciments dans lesquels il a été incorporé.

Les résultats obtenue montre qu'il est très faisable de valoriser ce matériau et fabriquer un ciment éco-environnementale qui présente des caractéristiques rhéologiques et mécaniques presque analogue ou meilleurs à celle d'un ciment ordinaire.

En générale le travail montre que l'utilisation des ciments hydratés contribue d'une façon positive à l'amélioration des caractéristiques chimiques et physico-mécaniques de ciment et par conséquence celle du mortier. L'utilisation de ce type de ciment élaboré à base des déchets de ciment hydraté nous permet de réduire la consommation d'énergie, minimiser l'émission de CO<sub>2</sub> et faire bien gérer ce type de déchet, ce qui revient à obtenir un ciment plus économique et moins polluant.

## Mots clés :

Ciment hydraté, déchet, valorisation.

## Abstract:

For economic reasons and environmental, valorization, re-use of the construction material scrap more in are studied.

This experimental study consists in contributing to the valorization of cement scrap hydrated in the manufacture of new cement.

Work has like drank to introduce percentages of cement hydrated with the clinker and to see the interest to use this waste substituted some partial for the clinker on the environment and the mechanical performances of cements in which it was built-in.

Results obtained watch that it is very feasible to develop this material and to manufacture cement éco-environmental which shows characteristics rheological and mechanical almost similar or better to that of ordinary cement.

In general work shows that the use of hydrated cements contributes in a positive way to the improvement of the chemical and physicomécanical characteristics of cement and by consequence that of the mortar. The use of this type of cement worked out containing the hydrated cement scrap enables us to reduce the consumption of energy, to minimize the CO<sub>2</sub> emission and to make well manage this type of waste, which amounts obtaining more economic cement and less pollutant.

## Key words:

Hydrated cement, waste, valorization.