



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Faculté de Technologie

Département de GENIE CIVIL



**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE: Matériaux

THEME

**Influence du rapport E/C sur la durabilité
des ciments et mortier à base de laitier exposés
aux milieux agressifs**

Dirigé par:

Dr : Boualleg Saida

Dr : Ouzandja djamel

Présenté par:

HAMRIT Abdelbasset

DARFALOU Abderrazaq

Année universitaire : 2020 /2021

Résumé

Les mortiers confectionnés avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études. Toutes fois aucune loi générale n'a encore été dégagée pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des propriétés des mortiers, et notamment leur résistance aux agressions des milieux environnants.

Ce présent travail a pour but d'étudier la durabilité du laitier conservé dans les sulfates la résistance à la compression, la porosité comme paramètre d'évaluation et essayer d'apporter une contribution à la compréhension des principaux paramètres de l'étude tel que le dosage de laitier et, le rapport E/C ainsi le milieu de conservation.

Le présent travail s'inscrit un peu plus dans cette optique des résultats prennent en compte la valorisation des déchets dans la fabrication des mortiers et ciment avec différents rapport E/C. Étudiés les différentes propriétés de mortier au laitier d'El Hadjar

Les résultats expérimentaux montrent que le laitier est plus sensible au sulfate que le ciment ordinaire, ce qui rend le développement des résistances des ciments au laitier conservé moins favorable qu'à l'eau. Le ciment peut être substitué partiellement par le laitier jusqu'à 30%. La prédiction de l'évolution des résistances du mortier au laitier soumis au sulfate variable est possible à partir des résistances de référence en utilisant la méthode du temps équivalent

Mots clefs : Laitier, résistance, mortier, porosité, milieu agressif, sulfate, durabilité.

ملخص

كان ملاط الاسمنت (الخبث) المصنوع من المعادن موضوعاً للعديد من الدراسات. ومع ذلك لم يتم تحديد أي قوانين عامة لتحديد آثار هذه الإضافات على خصائص ملاط الاسمنت ، ولا سيما مقاومتها للهجمات من البيئات المحيطة. يهدف هذا العمل الحالي إلى دراسة متانة الخبث المحفوظ في الكبريتات وقوة الانضغاط والمسامية كمعامل تقييم ومحاولة المساهمة في فهم المعلمات الرئيسية للدراسة مثل جرعة الخبث والمعامل ماء/اسمنت وكذلك وسط الحفظ. يتماشى العمل الحالي قليلاً مع هذا ، وتأخذ النتائج في الاعتبار استعادة النفايات في تصنيع الملاط والأسمنت بمعامل ماء/اسمنت دراسة مختلف خصائص ملاط اسمنت الحجار.

تظهر النتائج التجريبية أن الخبث أكثر حساسية للكبريتات من الأسمنت العادي ، مما يجعل تطوير مقاومة الأسمنت للخبث المخزن أقل ملاءمة من الماء.

يمكن استبدال الأسمنت جزئياً بخبث يصل إلى 30%. يمكن التنبؤ بتطور مقاومة ملاط الخبث المعرض للكبريتات المتغيرة من المقاومة المرجعية باستخدام طريقة الزمن المكافئ.

الكلمات المفتاحية: الخبث ، المقاومة ، الملاط ، المسامية ، البيئة العدوانية ، الكبريتات ، المتانة.

Abstract

Mortars made with mineral addition have been the subject of numerous studies. However, no general laws have yet been identified to quantify the effects of such additions on the properties of mortars, and in particular their resistance to attacks from surrounding environments.

This present work aims to study the durability of slag preserved in sulphates, compressive strength, porosity as an evaluation parameter and try to make a contribution to the understanding of the main parameters of the study such as the dosage. slag and the W / C ratio and the preservation medium.

The present work is a little more in line with this, the results take into account the recovery of waste in the manufacture of mortars and cement with different W / C ratios. Studied the different properties of El Hadjar slag mortar

Experimental results show that slag is more sensitive to sulphate than ordinary cement, which makes the development of strengths of cements in stored slag less favorable than in water. Cement can be partially substituted by slag up to 30%. Prediction of the evolution of the resistance of the slag mortar subjected to variable sulfate is possible from the reference resistances using the equivalent time method

Keywords: Slag, resistance, mortar, porosity, aggressive environment, sulphate, durability.

DEDICACE

Ce travail est dédié tout d'abord a mes parents :

Ma mère et mon père, a mes frères et mes sœurs à tous les

membres de la famille Hamrit

Et la famille Darfalou

Avec tous mes sentiments de respect et de

reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour

m'élever dignement et assurer mon éducation dans

les meilleures conditions

A mes Amies: Aouina Adnan, Hadji Imad, Tayeb Amroune,

Mohamed Dougha, Sofian Bakhti

Aux étudiants de génie civil et toute la promotion

2020/2021

Hamrit Abdelbasset

Remerciements

Nous voudrions exprimer également nos vifs remerciements à notre encadreur pour son attention, ses conseils et sa précieuse aide.

Boualleg Saïda

Nous remercions nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous remercions également tous les enseignants du département de Génie civil ainsi que ceux du membre du jury et tous les professeurs qui ont participé à mon cursus (scolaires et universitaire).

Pour cette occasion Nous remercions les ingénieurs du Laboratoire de génie civil surtout

« Bakhti Yammna ».

En fin, Nous voudrions exprimer ma reconnaissance à tous mes amis pour leurs soutiens moral et matériel

Hamrit Abdelbasset et Darfalou Abderrazaq

INDEXE DES FIGURES

Chapitre I: Revue générale sur les ciments

Figure I.1: Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment Portland.....	3
Figure I.2: Schéma représentatif des matériaux dans la chaîne de fabrication du ciment.....	5
Figure I.3: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.....	7
Figure I.4: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.	7
Figure I.5: l'appareil de Vicat	8
Figure I.6: Détermination du temps de début de prise	8
Figure I.7: Détermination du temps de fin de prise.....	8
Figure I.8: Influence du E/C sur le temps de prise	9
Figure I.9: Aiguilles de le Châtelier.....	9
Figure I.10: Moule pour moulage des éprouvettes de mortier.....	10
Figure I.11: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	11
Figure I.12: Dispositif de rupture en compression.....	11
Figure I.13: Table à secousses.....	12
Figure I.14: Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.....	12
Figure I.15: Appareillage pour la mesure du retrait	13
Figure I.16: Poudre de ciment courant.....	15
Figure I.17: Les principaux minéraux du Clinker	17
Figure I.18: Etape de l'extraction des matières premières aux niveaux de la carrière.....	21
Figure I.19: Etape de concassage.....	22
Figure I.20: Hall de Préhomogénéisation.....	23
Figure I.21: bassin de délayage (alimenté d'eau).....	23
Figure I.22: Four Rotatif.....	24

INDEXE DES FIGURES

Figure I.23: Le broyeur de la matière première.....	25
Figure I.24: remplis les sacs de ciment.....	26
Figure I.25: Comparaison de la resistance à la compression des phases du ciment en cours d'hydratation.....	27
Figure I.26: Organigramme de mécanisme d'hydratation du C3S.....	28
Figure I.27: Représentation schématique de la courbe calorimétrique l'hydratation du ciment d'après Bensted.....	29

Chapitre II : Les ajouts cimentaire (Laitier)

Figure II.1: Ajouts cimentaire.....	31
Figure II.2 : Situation du laitier de haut fourneau dans le système (CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃).....	34
Figure II.3: Principaux traitement de Laitier	34
Figure II.4: Laitier cristallisé poreux (Alexandre Sebileau,).....	35
Figure II.5: laitier bouleté (Alexandre et Sebileau,).....	36

Chapitre III: La Durabilité

Figure III.1: Fissuration causée par la corrosion des armatures.....	42
Figure III.2: Détérioration de la surface du béton par Les cycles de gel dégel.....	42
Figure III.3: Dégradations causées par les attaques chimiques.....	43
Figure III.4: Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton.....	44
Figure III.5: Dégradations causées par les attaques Sulfatiques.....	45
Figure III.6: Influence du rapport E/C sur la résistance finale à la compression.....	47
Figure III.7: représentation du matériau poreux imperméable et perméable.....	48
Figure III.8: Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.....	49

INDEXE DES FIGURES

Figure III.9: échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté.....**49**

Figure III.10: Influence du E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons.....**50**

Chapitre IV : les caractéristiques des matériaux utilise

Figure IV.1: Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé.....**53**

Chapitre V : Résultats et interprétation

Figure V.1 : Détermination de début et fin de prise.....**56**

Figure V.2 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CT.....**58**

Figure V.3 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL15%.....**58**

Figure V.4 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL30%.....**58**

Figure V.5 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CT.....**58**

Figure V.6 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL15%.....**58**

Figure V.7 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL30%.....**59**

Figure V.8 : Porosité à l'âge de 28 jours.....**59**

Figure V.9 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CT.....**60**

Figure V.10 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL15%.....**60**

Figure V.11 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL30%.....**60**

Figure V.12 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CT.....**60**

Figure V.13 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL15%.....**60**

Figure V.14 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL30%.....**61**

Figure V.15 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CT**61**

Figure V.16 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL15%.....**61**

Figure V.17 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL30%.....**62**

Figure V.18 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CT..... **62**

Figure V.19 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL15%.....**62**

Figure V.20 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL30%.....**62**

INDEXE DES TABLEAUX

Chapitre I : Revue générale sur les ciments

Tableau I.1 : Compositions chimiques limite du clinker.....	4
Tableau I.2 : Composition chimique du clinker.	16
Tableau I.3 : Composition minéralogiques du clinker.	16
Tableau I.4 : Classe des ciments selon la norme NA 442 :2000.....	19
Tableau I.5 : Utilisation des différents ciments.....	20
Tableau I.6: Classe de résistance du ciment.....	21
Tableau I.7 : Durée de stockage en fonction des conditions de stockage.....	26

Chapitre II : Les ajouts cimentaire (Laitier)

Tableau II.1 : Utilisation annuelle (tonnes) des différentes au béton en Europe	32
Tableau II.2 : Ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.....	32
Tableau II.3 : Variation de la composition chimique du laitier.....	33

Chapitre IV : les caractéristiques des matériaux utilise

Tableau IV.1 : Composition chimique du ciment (%).....	51
Tableau IV.2 : Composition minéralogique du ciment (Bogue).....	52
Tableau IV.3 : Analyse chimique du laitier granulé.....	52
Tableau IV.4: Caractéristiques chimiques d'eau.....	53
Tableau IV.5 : composition chimique du sable naturel utilisé (Fluorescence aux rayons X).54	
Tableau IV.6 : caractéristique physique du sable utilisé.....	54

Chapitre V : Résultats et interprétation

Tableau V.1 : mélange des ciments.....	55
Tableau V.3: La finesse de mouture des matières premières.....	56
Tableau V.2 : La consistance et début de prise et fin de prise.....	56

Sommaire

Chapitre I : Revue générale sur les ciments

I.1. Un peu d'histoire

I.2. Naissance de l'industrie cimentière

I.3. La fabrication des ciments courants

I.3.1. Extraction et préparation des matières premières

I.3.2. Phase de préhomogénéisation

I.3.3. Séchage et broyage

I.3.4. Cuisson

I.3.5. Refroidissement du clinker

I.3.6. Broyage du clinker

I.4. Prise et durcissement du ciment

I.5. Principales caractéristiques

I.5.1. Caractéristiques de la poudre

I.5.1.1. La finesse de mouture (finesse de Blaine)

I.5.1.2. La masse volumique apparente

I.5.1.3. La masse volumique absolue

I.5.2. Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normale »

I.5.2.1. Le début de prise

I.5.2.2. Stabilité de volume

I.5.2.3. Les résistances mécaniques

I.5.2.4. Ouvrabilité

I.5.2.5. Retraits et gonflements

I.6. Normalisation des ciments

I.6.1. Historique de la normalisation européenne des ciments

I.6.2. Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants)

I.6.2.1. Définition d'un ciment

I.6.2.2. Les constituants du ciment

I.6.3. Les différents types de ciments

I.6.4. Les cinq types de ciments courants

I.6.5. Domaine d'utilisation des différents ciments

I.6.6. Les classes de résistance des ciments

I.6.6.1. Définition des classes de résistance

I.7. Méthodes de fabrication des ciments portland

I.8. Conservation et stockage du ciment

I.9. L'hydratation du ciment portland:

I.9.1. Hydratation des composants du ciment portland

I.9.2. Effet des sulfates sur l'hydratation du ciment

I.9.3. Évolution de l'hydratation

Chapitre II: Les ajouts cimentaires (laitier)

II.1. INTRODUCTION

II.2. Les ajouts cimentaires

II.3. Les différents types d'ajouts au ciment

II.4. LE LAITIER

II.4.1. Définition

Sommaire

II.4.2. Caractéristiques du laitier

II.4.3. Traitement du laitier

II.5. Les différentes formes de laitiers

- 1) Laitier rocheux (ou cristallisé)
- 2) Laitier bouleté
- 3) Laitier expansé
- 4) Laitier granulé

II.6. Méthode de granulation du laitier

- 1) Voie humide
- 2) Voie demi – sèche
- 3) Voie sèche

II.7. ACTIVITE DU LAITIER

- 1) Le rapport de basicité
- 2) Le rapport d'activité

II.8. Facteur influent sur l'activité de laitier

II.9. Utilisations des laitiers

Chapitre III : La durabilité

III.1. Définition de la durabilité

III.2. Durabilité Des Matériaux Cimentaire

III.2.1. Durabilité des bétons

III.3. Causes de dégradation des ouvrages

III.3.1. Dégradations mécaniques

III.3.2. Dégradations Chimiques

III.3.2.1. Corrosion des armatures

III.3.2.2. Détérioration par le gel-dégel

III.3.2.3. Attaques chimiques

III.3.2.4. Les acides

III.3.2.5. Sels et alcalis

III.3.2.6. Attaques sulfatiques

III.3.2.7. Réactivité alcali-agrégat

III.3.2.8. Abrasion / Érosion

III.3.3. Dégradations Physiques

III.4. L'agressivité des sulfates est plus ou moins forte en fonction du cation associé à

l'anion SO_4^{2-}

Sommaire

- 1) Les sulfates de calcium
- 2) Les sulfates de sodium ou de potassium
- 3) Le sulfate de magnésium

III.5. Critères généraux de durabilité de composite cimentaire

- 1) La résistance
- 2) Le rapport E/C
- 3) La porosité
- 4) La nature de ciment et le dosage

Chapitre IV : Les caractéristiques des matériaux utilisés

IV.1. Introduction

IV.2. Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers

- IV.2.1. La composition chimique de ciment
- IV .2.2. Le laitier
 - IV .2.2.1. Module de basicité
 - IV .2.2.2. Module d'activité
 - IV .2.2.3. Diffractogramme du laitier
- IV.2.3. Eau de gâchage
 - IV .2.3. 1. composition chimique de l'eau utilisée
- IV. 2.4. Le Sable
 - IV. 2.4.1. Composition chimique du sable
 - IV. 2.4.2. Caractéristique physique du sable utilisé

Chapitre V : Résultats et interprétations

V.1. Introduction

V.2. Les mélange des ciments étudiés

V.3. Essai sur la pâte de ciment

- V.3.1. La consistance normalisée
- V.3.2. L'essai de prise
- V.3.3. La finesse de mouture

V.4. Etude de mortier

- V.4.1. La résistance
- V.4.2. Influence de milieu de conservation
- V.4.3. Essais de porosité

V.5. Influence du rapport E/C= 0.64 et le milieu de conservation

- V.5.1. La masse volumique
- V.5.2. La résistance à la compression
- V.5.3. Influence du rapport E/C = 0.64 sur la porosité

V.6. Influence du rapport E/C= 0.70

- V.6.1. La masse volumique
 - V.6.2. La résistance à la compression
-

Sommaire

V.7. Influence du rapport $E/C= 0.50$

V.7.1. La masse volumique

V.7.2. La résistance à la compression

Conclusion générale et perspectives

1.1 Introduction

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit industriel à faible coût d'énergie et ayant des propriétés hydrauliques acceptables dans l'industrie du ciment. Vu les propriétés hydrauliques latentes ou pouzzolaniques de ce matériau, une contribution effective et positive des performances des bétons est réalisée en les incorporant au ciment portland, tel que l'amélioration de la réactivité, l'ouvrabilité, la résistance, et la durabilité.

De par ses caractéristiques physiques et mécaniques, comparables à celles des matériaux naturels, le laitier présente une composition chimique proche de celle d'un ciment portland, qui lui confère un caractère hydraulique latent. Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple ajout d'eau.

2. Objectifs de l'étude :

Étudié la durabilité de laitier dans le mortier afin de recouvrer, aux jeunes âges, un niveau de performance équivalent à celui obtenu dans les mortiers témoin. L'étude sur mortier a été pour but de définir l'influence de différents paramètres tels que le taux du laitier, et le milieu de conservation sur différentes propriétés (la masse volumique, la compression, porosité).

3. Structure de mémoire

Introduction, objectif de l'étude, structure de mémoire.

Chapitre I : revue générale sur le ciment (les ciments, les propriétés des ciments classification des ciments).

Chapitre II: les ajouts cimentaires (laitier)

Chapitre III: la durabilité

Chapitre IV : caractéristique des matériaux utilisés

Chapitre V : Résultat et interprétation

Conclusion générale et perspectives.

I.1. Un peu d'histoire

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolanique », qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux.

En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexplicée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement: le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née. Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait les performances de la pierre de cette région. [01]

I.2. Naissance de l'industrie cimentière

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux: four rotatif et broyeur à boulets en particulier.

Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse: en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes.

En France, avant la dernière guerre, la production était faible, comme l'indiquent les statistiques suivantes:

- en1880:100000t;
- en1920:800000t;
- en1938:3800000t.

Le ciment s'est surtout développé à partir de 1950 (7,4 Mt) du fait de l'essor du béton et des besoins de la reconstruction. La production a progressé de façon régulière jusqu'en 1974, date à laquelle le niveau le plus haut a été atteint avec 33,5 Mt. En 2004, elle était de 21 Mt

[01]

I.3. La fabrication des ciments courants

La fabrication du ciment se résume principalement aux cinq étapes majeures suivantes :

- L'extraction,
- Le pré homogénéisation.
- Le séchage et le broyage.
- La cuisson
- Le broyage.

La Figure I.1 présente un organigramme indiquant les étapes et le chemin suivi pour la fabrication du ciment. [02]

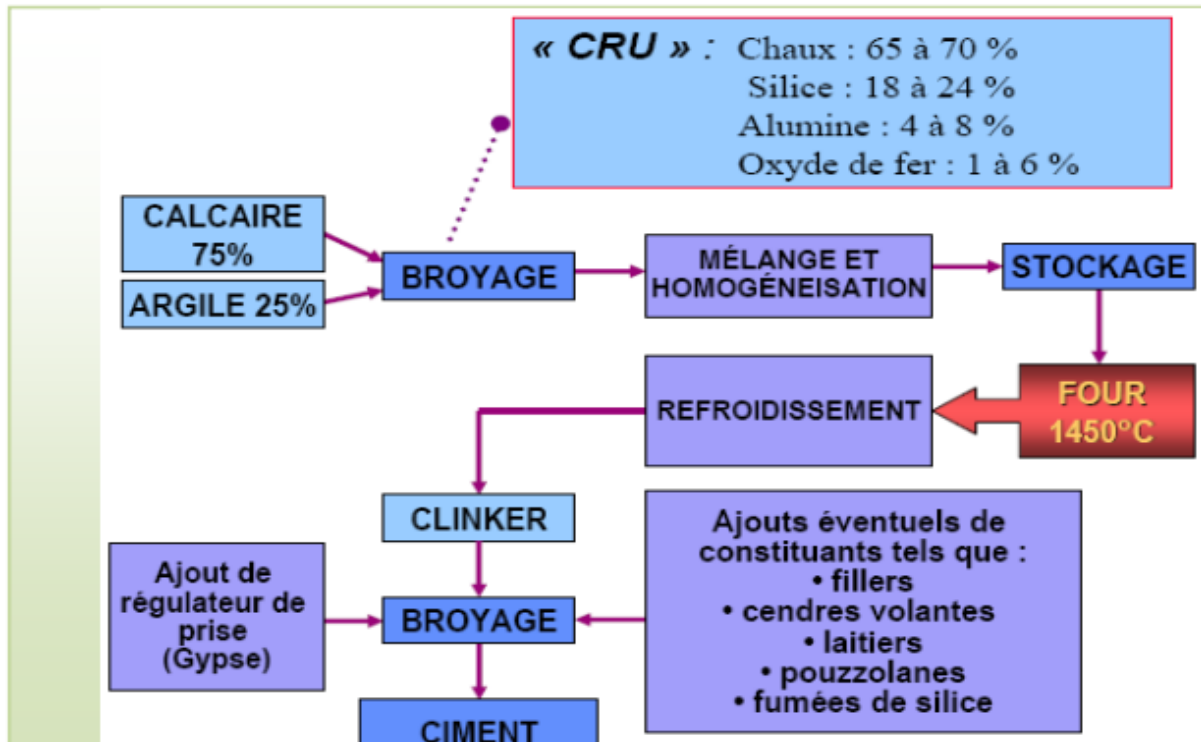


Figure I.1: Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment Portland

I.3.1. Extraction et préparation des matières premières

Les matières premières sont extraites des carrières, le plus souvent à ciel ouvert. Dans la plupart des cas, la carrière est constituée de calcaire plus au moins marneux, vu l'importance de ce dernier dans la production du ciment. Des explosifs sont utilisés pour l'extraction du calcaire dur, des engins mécaniques tels que le bulldozer, scraperetc, pour l'extraction du calcaire tendre. Alors que pour l'argile, on utilise simplement l'excavateur ou la pelle mécanique. D'autre part, l'ensemble des matières premières est stocké dans des réserves après concassage.

Pour la préparation du mélange cru, les matières premières reprises du stock, dosées et éventuellement préhomogénéisées, sont envoyées dans des broyeurs qui les réduisent en poudre à grains de diamètre inférieurs à 0,2 mm. Ce broyage peut se faire à sec (procédé sec), ou en présence d'eau (procédé humide), qui est pratiquement abandonné pour sa forte consommation d'énergie lors de la cuisson.

I.3.2. Phase de préhomogénéisation

Dans cette phase, on crée un mélange homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement.

I.3.3. Séchage et broyage

Cette étape vise à favoriser les réactions chimiques ultérieures. Les matières premières sont séchées et broyées très finement (de l'ordre de micron) dans des broyeurs à boulets (ou plus

récemment, dans des broyeurs verticaux à meules, plus économes en énergie).

On distingue trois types principaux de "voies de séchage" en fonction du type de préparation. Dans les deux dernières techniques, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées sous forme de « cru » ou de « farine ».

- La voie humide : C'est la technique la plus ancienne et la plus gourmande en énergie nécessaire à l'évaporation de l'excédent d'eau.
- La voie sèche : La farine est introduite directement dans le four sous forme pulvérulente, après un préchauffage dans une tour à échangeurs thermiques.
- La voie semi sèche : Avant introduction dans le four, la farine est transformée en "granules" par humidification dans de grandes « assiettes » rotatives inclinées.

I.3.4. Cuisson

Une fois le cru est préparé, il est acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6 mètres de diamètre et de 50 à 150 mètres de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5° de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450°C ; en s'approchant de cette zone, le cru subi des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le clinker. On donne dans ce qui suit un exemple sur les étapes de cuisson d'un cru humide :

- Jusqu'à 100°C : Evaporation de l'eau libre.
- T>100°C : Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- T>600°C : Décomposition des matières argileuses.
- T>850°C : Décarbonatation du calcaire.



- T>900°C : début des processus d'interaction et de combinaisons chimiques entre la chaux et les oxydes d'argile.
- T=1450°C : Clinkérisation.

I.3.5. Refroidissement du clinker

A la sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle il est soufflé par l'air froid (la trempe). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker. En effet, un refroidissement rapide permet de figer le clinker dans l'état où il se trouve aux hautes températures de cuisson. La forme minéralogique acquise lors de la clinkérisation est alors conservée aux températures ambiantes. La vitesse de refroidissement, particulièrement à partir de hautes températures, affecte donc la texture de cristallisation des composés du clinker et, par là même, leur réactivité

I.3.6. Broyage du clinker

Le clinker est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise. Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tels que, le laitier de haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment. La composition chimique du clinker est donnée dans les limites suivantes (Tableau I.1).

Oxydes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O+ K ₂ O
(%)	62-65	19-25	2-9	1-5	0-3	0-1.5

Tableau I.1. Compositions chimiques limite du clinker

La composition chimique du clinker dépend des paramètres suivants :

- + la nature des matières premières ;
- + la température de cuisson ;
- + le mode de refroidissement.

Il existe deux modes de broyage :

a- Broyage en circuit ouvert : Dans lequel le clinker traverse trois compartiments contenant des agents broyant de tailles différentes.

b- Broyage à circuit fermé : Dans lequel le clinker traverse deux compartiments et à la sortie,

le produit est envoyé dans un séparateur qui élimine les grains de grands diamètres qui seront néanmoins recyclés.

Chacun des broyeurs est alimenté par deux ou plusieurs doseurs qui permettent de régler les proportions du clinker, gypse et ajouts. Les grains de ciment récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage de capacité pouvant atteindre 10000 tonnes avant d'être expédiés.



Figure I.2: Schéma représentatif des matériaux dans la chaîne de fabrication du ciment

I.4. Prise et durcissement du ciment

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Le ciment Portland contient quatre constituants principaux: le silicate tricalcique $3 \text{ CaO}, \text{ SiO}_2$ (ou, par abréviation, C3S); le silicate bicalcique $2 \text{ CaO}, \text{ SiO}_2$ (ou C2S); l'aluminate tricalcique $3 \text{ CaO}, \text{ Al}_2\text{O}_3$ (ou C3A); l'aluminoferrite tétracalcique 4

CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ (ou C₄AF).

- Ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise ». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures. Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives.

I.5. Principales caractéristiques

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, de sable et d'eau défini par la norme NF EN 196-1).

I.5.1. Caractéristiques de la poudre

I.5.1.1. La finesse de mouture (finesse de Blaine) [03]

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue: Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à.

$$\sqrt{t}$$

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur (Figure I.4). Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (n° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

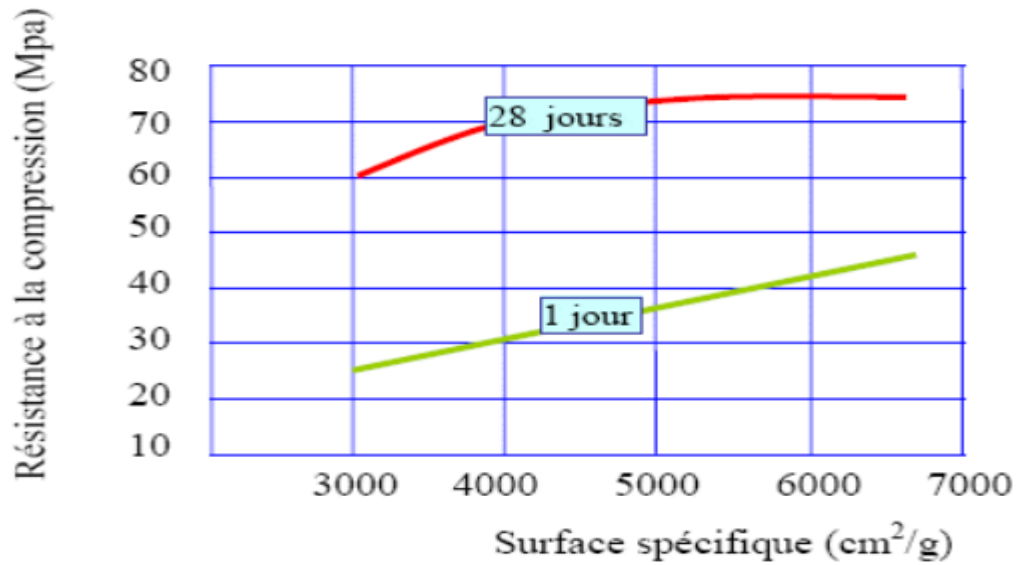


Figure I.3: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression

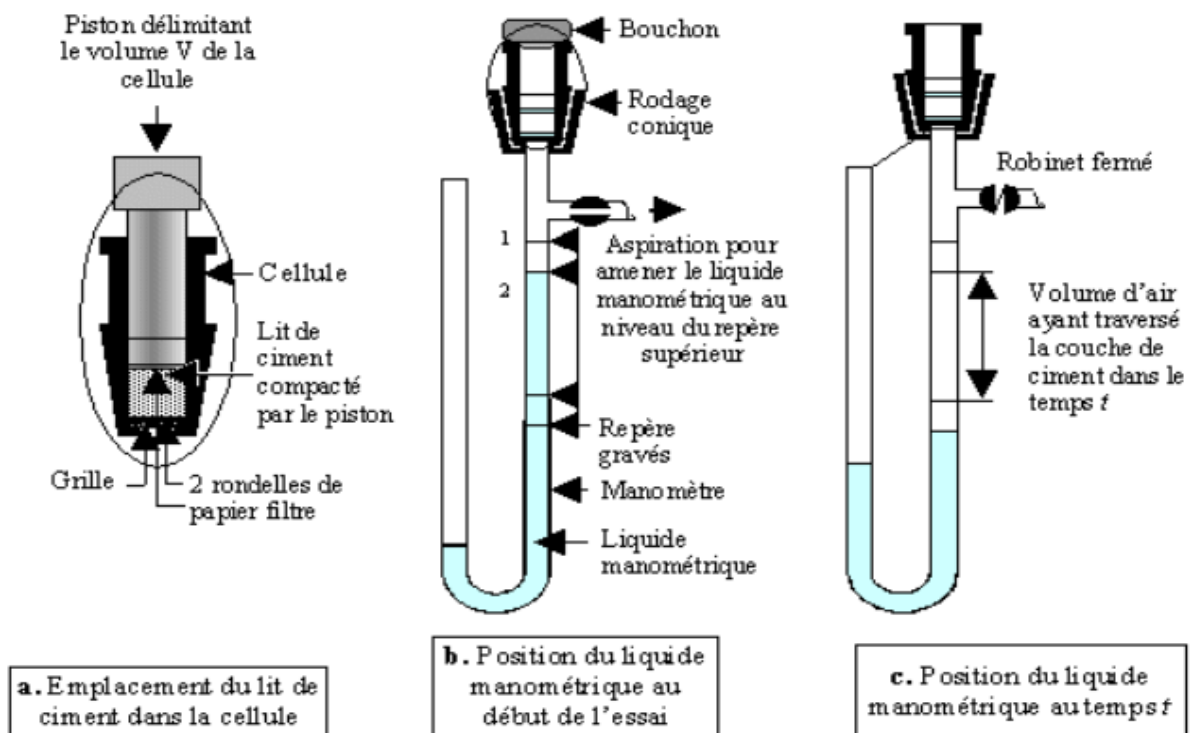


Figure I.4: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine

I.5.1.2. La masse volumique apparente représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

I.5.1.3. La masse volumique absolue représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

I.5.2. Caractéristique mesurées sur pâte ou sur « mortier normale »

I.5.2. 1. Le début de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.



Figure I.5: l'appareil de Vicat

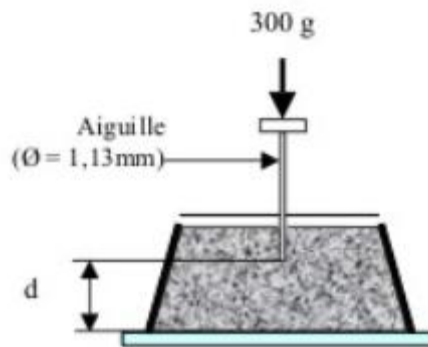


Figure I.6: Détermination du temps de début de prise

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

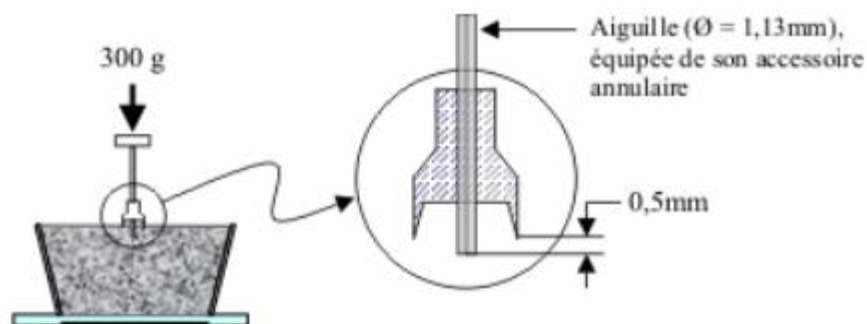


Figure I.7: Détermination du temps de fin de prise

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- la nature du ciment,
- La finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,



Figure I.8: Influence du E/C sur le temps de prise

I.5.2. 2. Stabilité de volume [03]

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

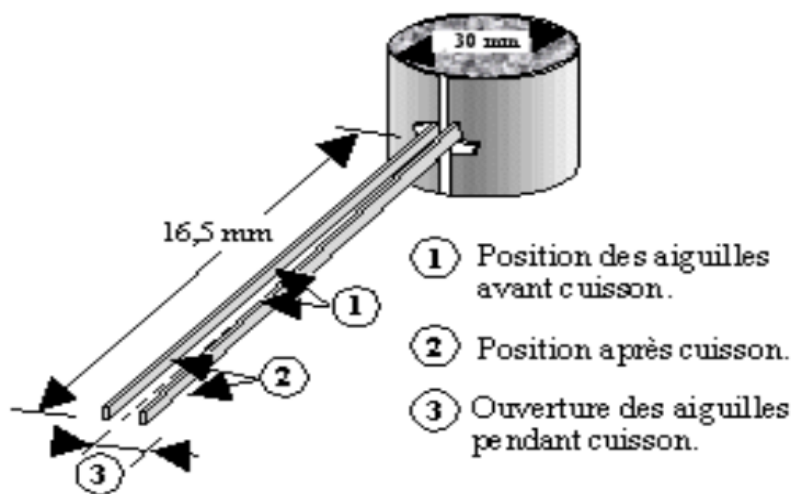


Figure I.9: Aiguilles de le Châtelier

Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps.

On simule l'effet du temps en accélérant les processus de durcissement par une cuisson à 100 °C

pendant 2 heures d'une pâte durcie de ciment à consistance normale âgée de 24 heures. Pour mesurer l'expansion, on utilise les aiguilles de Le Châtelier (Figure I.9). La différence d'ouverture des aiguilles avant et après cuisson doit rester inférieure à 10 mm.

Ouverture d'aiguille causée par cuisson à 10 mm.

L'essai d'étuvage a été supprimé pour les ciments Portland, car depuis de nombreuses années, il n'y a jamais eu de ciment Portland défectueux selon cet essai. On continue par contre à utiliser ce type d'essai pour contrôler la stabilité de volume des chaux hydrauliques.

Aujourd'hui on contrôle la pureté et la stabilité des ciments portland par voie chimique tels:

- Perte au feu
- Insoluble
- Teneur en SO₃, en MgO, en C3A etc...

I.5.2. 3. Les résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.

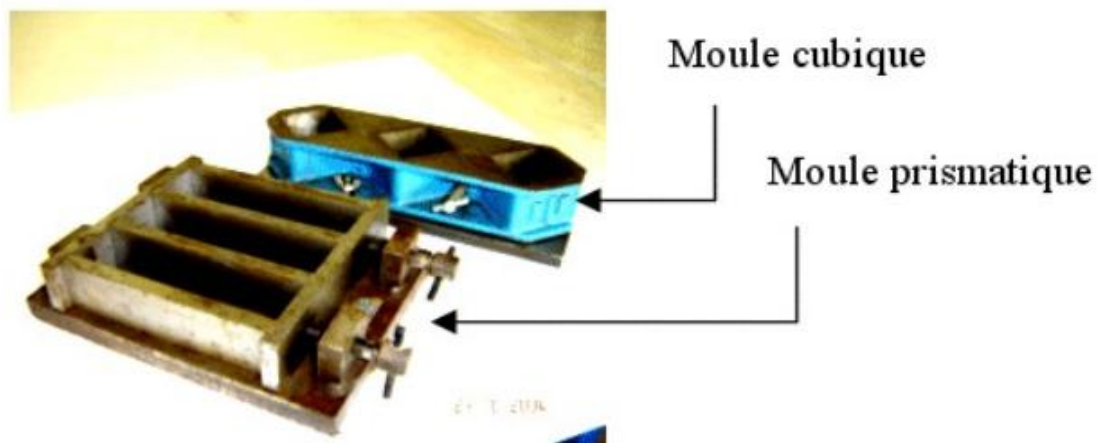


Figure I.10: Moule pour moulage des éprouvettes de mortier

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

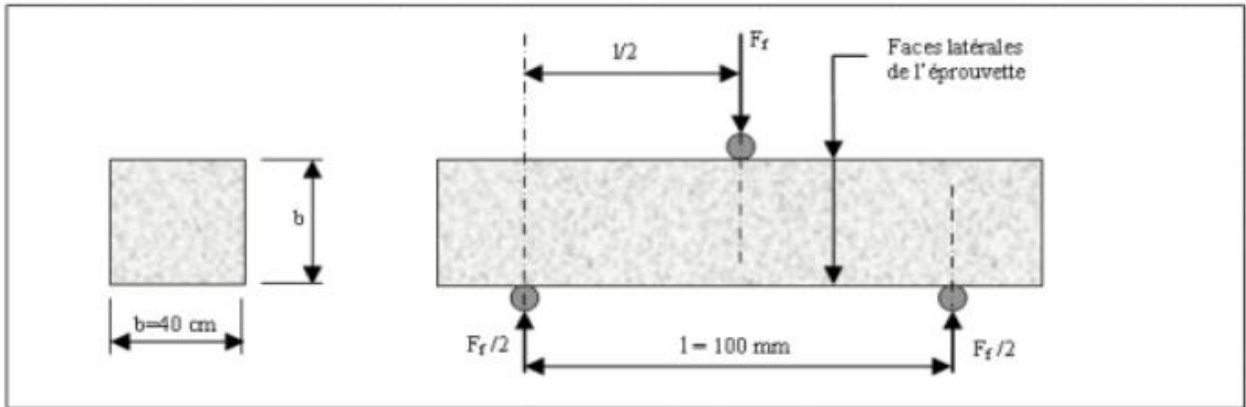


Figure I.11: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

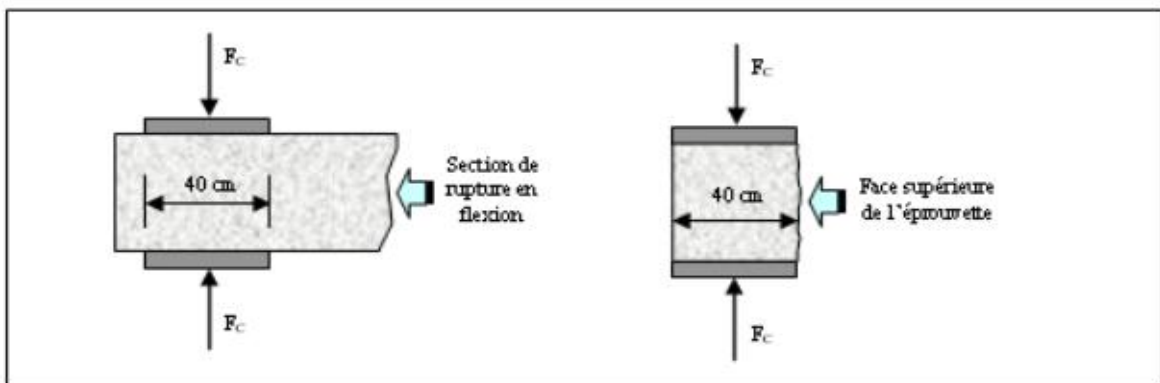


Figure I.12: Dispositif de rupture en compression.

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment;
- rapport C/E;
- granulométrie et nature du sable;
- énergie de malaxage et mise en œuvre;
- protection les tous premiers jours.

I.5.2.4. Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) **La table à secousses:** le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique,

reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

Avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

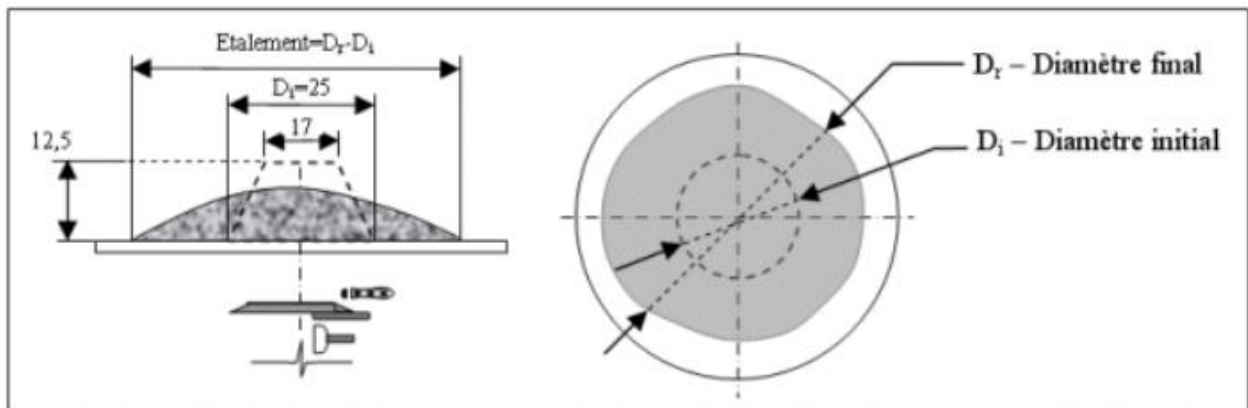


Figure I.13: Table à secousses

b) **Le maniabilimètre du LCPC:** il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

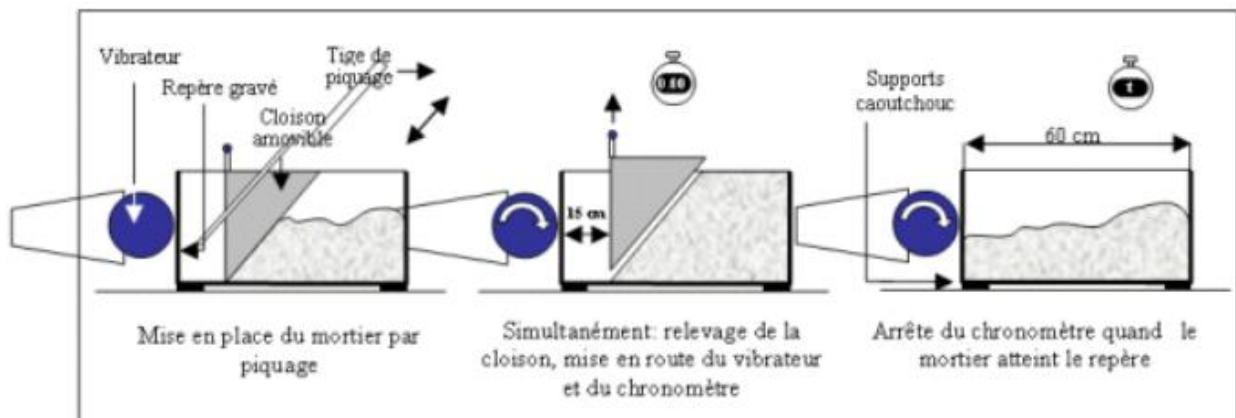


Figure I.14: Principe de fonctionnement du maniabilimètre B

c) **Le cône:** dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

I.5.2.5. Retraits et gonflements

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10 mm).

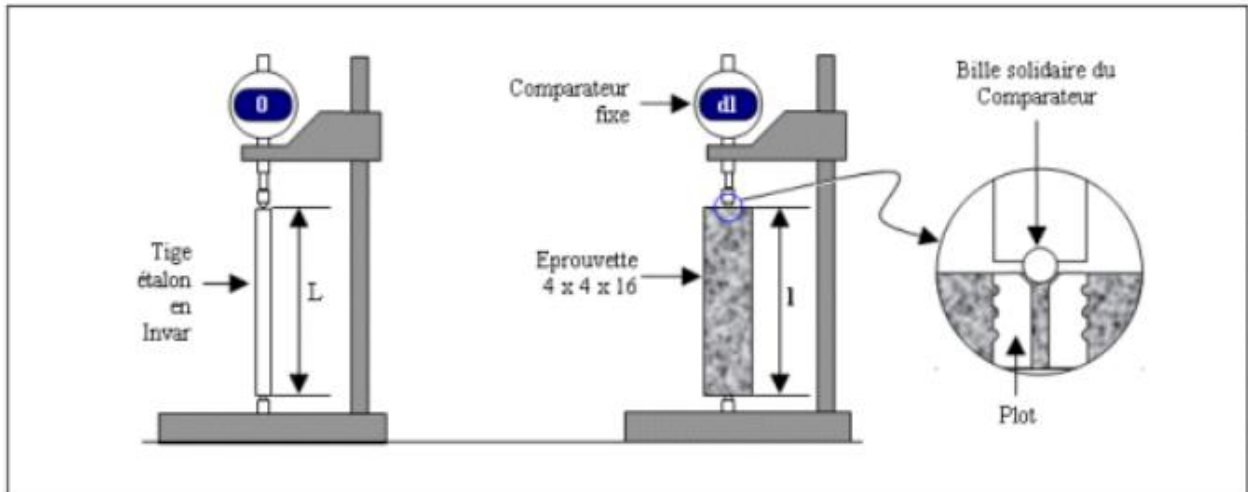


Figure I.15: Appareillage pour la mesure du retrait

I.6. Normalisation des ciments

I.6.1. Historique de la normalisation européenne des ciments

Les travaux de normalisation européenne dans le domaine des ciments ont débuté en 1969, de façon totalement volontaire, entre les six pays signataires du traité de Rome. À partir de 1973, les travaux ont été poursuivis dans le cadre du CEN, au sein du comité technique 51 (Ciment et chaux de construction). L'objectif des travaux était double: élaborer des normes d'essais communes pour tous les pays membres et rédiger des normes de spécifications de produits.

Les normes d'essais ont été adoptées en 1987 et 1989. Dès 1990, les performances de tous les ciments ont donc été évaluées de la même façon dans tous les pays membres du CEN ce qui a constitué un pas décisif pour la simplification des échanges transfrontaliers.

L'adoption, en 1989, de la Directive Produits de Construction (DPC) et a entraîné le rejet d'un projet de norme de spécifications qui ne s'appliquait pas à tous les ciments traditionnels et éprouvés.

Le CEN/TC 51 a ensuite repris ses travaux et inclut tous les ciments dans le texte qui a été adopté comme prénorme ENV 197-1, en 1992. De nombreux pays ont alors révisé leurs normes nationales pour reprendre très largement, voire totalement, les dispositions de cette prénorme

En particulier la France, qui adopta en 1994 la norme NF P 15-301 relative aux ciments courants qui reprenait le texte de la prénorme européenne en maintenant certains aspects de la version de 1981. La même démarche, effectuée simultanément dans les différents pays de

l'UE, a permis d'accomplir l'essentiel du chemin vers une norme européenne. Le dernier pas a été franchi avec l'adoption le 21 mai 2000 du projet de norme EN 197-1 à l'unanimité des pays membres du CEN.

La norme EN 197-1 est la première norme européenne harmonisée adoptée dans le cadre défini par la DPC. Depuis le 1er avril 2002, dans tous les états membres, les ciments courants mis sur le marché sont conformes à la norme EN 197-1 et portent le marquage CE sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac.

La norme européenne EN 197-1 est publiée par AFNOR sous la référence NF EN 197-1 « Ciment – partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon leur composition:

- CEM I Ciment Portland
- CEM II Ciment Portland composé
- CEM III Ciment de haut fourneau
- CEM IV Ciment pouzzolanique
- Cem V Ciment composé.

I.6.2. Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants)

La norme NF EN 197-1 concerne les ciments courants. D'autres normes existent concernant soit des propriétés particulières (prise mer, résistance aux eaux sulfatées...) soit des ciments ayant des normes spécifiques: ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel. La norme NF EN 197-1 est subdivisée en trois rubriques:

- la première partie est descriptive, elle définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments courants;
- la deuxième partie fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques;
- la troisième partie est consacrée aux critères de conformité, aux fréquences d'essais et aux valeurs limites.

I.6.2.1. Définition d'un ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450 oC) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable de faire prise et de durcir progressivement [04] et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [05].



Figure I.16: Poudre de ciment courant

I.6.2.2. Les constituants du ciment

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes:

- **des propriétés hydrauliques**, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau;
- **des propriétés pouzzolaniques**, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables;
- **des propriétés physiques** qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.).

- **Clinker Portland (K)**

Le clinker Portland est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile fixé avec précision et contenant des proportions visées de CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃. Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants.

Le clinker portland est constitué principalement selon [06] de :

- ✓ Silicate tricalcique : [3CaO, SiO₂] que l'on écrit : C3S (alite)
- ✓ Silicate bicalcique : [2CaO, SiO₂] que l'on écrit : C2S (belite)
- ✓ Aluminate tricalcique : [3CaO, Al₂O₃] que l'on écrit : C3A (celite)
- ✓ Alumino – ferriques tétracalcique : [4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃] que l'on écrit : C4AF

- **Composition chimique du clinker :**

Les compositions chimiques du clinker sont comprises dans les limites données par le (tableau I.2) : [07]

Éléments	Minimum	Maximum
Perte au feu	0.2	1.1
SiO ₂	20.0	24.3
Al ₂ O ₃	3.7	7.1
Fe ₂ O ₃	1.7	5.7
CaO	61.0	68.1
MgO	1.7	4
SO ₃	0.05	1.3
K ₂ O	0.05	1.4
Na ₂ O	0.05	0.7
TiO ₂	0.15	0.4
Mn ₂ O ₃	0.05	1.2
P ₂ O ₅	0.05	0.6
Cl	0.00	0.1

Tableau I.2 : Composition chimique du clinker.

▪ **Composition minéralogique**

Les compositions minéralogiques des ciments Portlands est fonction du mélange (clinker + 5% de gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [08].

		Minimum	Maximum
Alite	C ³ S	45.0	79.7
Bélite	C ² S	5.7	29.8
Aluminate	C ³ A	1.1	14.9
Aluminoferrite	C ⁴ AF	2.0	16.5
Périclase	MgO	0	5.8
Chaux libre	CaO	0.6	2.8

Tableau I.3 : Composition minéralogiques du clinker.

On peut déterminer la composition minéralogique en se basant sur les formules données par Bogue [09] :

$$\% C_3S = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times \% Al_2O_3) - (1,43 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3)$$

$$\% C_2S = (2,876 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times \% C_3S)$$

$$\% C_3A = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3)$$

$$\% C_4AF = (3,043 \times \% Fe_2O_3)$$

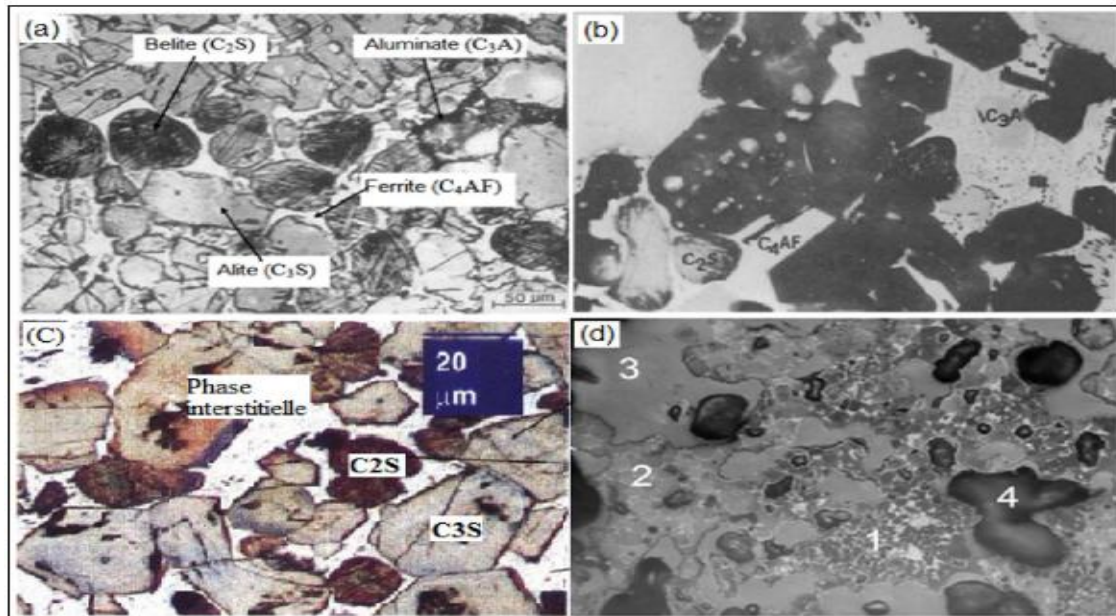


Figure I.17: Les principaux minéraux du Clinker

- a) Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker (H. Taylor, 1997) ;
 b) Photomicrographie montrant les quatre principaux constituants du clinker (Soroka, 1997) ;
 c) Micrographie de clinker (Philip, 2001) ;
 d) Microstructure du clinker: 1–alite, 2–belite, 3–C3A and C4AF, 4–pores (Marcela, Dominik and Karel, 2017).

Autres Constituants Des Ciments :

- **Laitier granulé de haut fourneau (S)**
 Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment
- **Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q)**
 Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.
- **Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)**

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

- **Schistes calcinés (T)**
 Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzalaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

- **Calcaires (L, LL)**
Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %.
- **Fumées de silice (D)**
Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.
- **Sulfate de calcium**
Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.
- **Constituants secondaires**
Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus (sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment). Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment.
- **Additifs**
Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs (à l'exception des pigments éventuellement ajoutés) doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment.

I.6.3. Les différent type de ciments

Principaux Types	Notation des produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) ¹⁾								
		Constituants principaux								
		Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D³⁾	Pouzzolanes Naturelles Z	Cendres volantes		Schistes calcinés T	Calcaires L	Constituants secondaires ²⁾
Silicieuse V	Calciques W									
Ciment Portland	CPA -CEM I	95 – 100	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Ciment Portland composé	CPJ -CEM II/A	80 – 94	← 6-20 ^{4) 5)} →							
	CPJ -CEM II/B	65-79	← 21-35 ^{4) 5)} →							
Ciment de haut-fourneau	CHF -CEM III/A	35-64	36-65 ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	0-5
	CHF -CEM III/B	20-34	66-80 ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	0-5
	CLK -CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
Ciment pouzzolanique	CPZ -CEM IV/A	65-90	-	← 10-35 ⁵⁾ →		-	-	-	-	0-5
	CPZ -CEM IV/B	45-64	-	← 36-55 ⁵⁾ →		-	-	-	-	0-5
Ciment au laitier et cendres	CLC -CEM V/A	40-64	18-30 ⁵⁾	-	← 18-30 ⁵⁾ →		-	-	-	0-5
	CLC -CEM V/B	20-39	31-50 ⁵⁾	-	← 31-50 ⁵⁾ →		-	-	-	0-5

1). Les valeurs indiquées se réfèrent au noyau du ciment, à l'exclusion des sulfates de calcium et des additifs. à la somme des constituants principaux et secondaires.
 2). Les constituants secondaires peuvent être du filler ou bien un ou plus des constituants principaux, sauf lorsque ceux-ci sont incorporés en tant que constituants principaux du ciment.
 3). La proportion de fumées de silice est limitée à 10 % dans tous les ciments.
 4). La proportion de filler est limitée à 5 %.
 5). le fabricant est tenu à une déclaration de composition stipulant les constituants utilisés et la proportion de chacun deux ; il s'engage à ne pas faire varier ces proportions au delà à une fourchette de ± 5 points. Le clinker étant aussi un constituant. La forme et les modalités d'application de cette déclaration sont définies dans l'annexe B de la norme NA 442 :2000.

Tableau I.4 : Classe des ciments selon la norme NA 442 :2000.

I.6.4. Les cinq types de ciments courants

• **Le ciment Portland: CEM I**

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

• **Le ciment Portland composé: CEM II/A ou B**

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants: laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes,

calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

- **Le ciment de haut fourneau: CEM III/A ou B...**
Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker
- **...et CEM III/C** (anciennement ciment de laitier au clinker)
Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker
- **Le ciment composé: CEM V/A ou B** (anciennement ciment au laitier et aux cendres)
Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.

I.6.5. Domaine d'utilisation des différents ciments : [10]

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

Tableau I.5 : Utilisation des différents ciments.

I.6.6. Les classe de résistance des ciments

I.6.6.1. Définition des classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa (1 MPa = 1 N/mm² = 10 bars). Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le Tableau I.6.

<i>Résistance à la compression (en MPa)</i>				
<i>Désignation de la classe de résistance</i>	<i>Résistance à court terme</i>		<i>Résistance courante</i>	
	<i>à 2 jours</i>	<i>à 7 jours</i>	<i>à 28 jours</i>	
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30	-		

Tableau I.6: Classe de résistance du ciment

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R).

I.7. Méthodes de fabrication des ciments portland [11]

a) Extraction et concassage:

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert.



Figure I.18: Etape de l'extraction des matières premières aux niveaux de la carrière.

Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de Concassage et réduits dans en éléments d'une Dimension maximale de 50 mm. Ces concasseurs Sont situés parfois sur les lieux même de, L'extraction

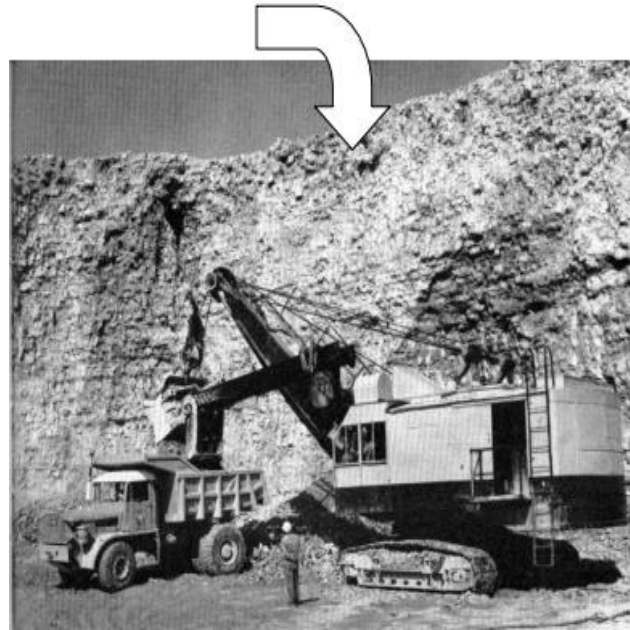


Figure I.19: Etape de concassage.

b) Préparation de la matière première:

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage et délayage, dans les proportions définies, en un mélange très fin le "cru". A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion: oxyde de fer,...) Le cru est préparé automatiquement sous forme de poudre (voie sèche) ou de pâte (voie semi-humide ou humide), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

1) Voie sèche:

La voie sèche est de très loin, la technique la plus utilisée aujourd'hui.

La matière première est préparée sous forme de poudre. Le pré homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches.



Figure I.20: Hall de Préhomogénéisation

A la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise.

Cette poudre "le cru", est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation, corrigée si nécessaire puis stockée en silo avant l'introduction au four.

L'homogénéisation et le stockage sont réalisés dans la même tour qui comporte à sa partie supérieure un silo d'homogénéisation dans lequel le cru est brassé par air comprimé, il est ensuite stocké dans le silo à la partie inférieure de la tour.

2) Voie humide :

Les blocs sont déversés dans un bassin de délayage (alimenté d'eau), à l'intérieur duquel tourne une herse qui effrite et divise la matière. La pâte ainsi obtenue qui est encore grossière est ensuite broyée et envoyée dans des bassins de stockage pour y être homogénéisée mécaniquement.



Figure I.21: bassin de délayage (alimenté d'eau).

c) Cuisson ou calcination :

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

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

Quelque soit la technique élaborée pour la préparation du cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties :

Un échangeur de chaleur comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie.

Une décarbonation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination). La poudre est ainsi portée d'environ 80 à 1000 °C en un temps très court.

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

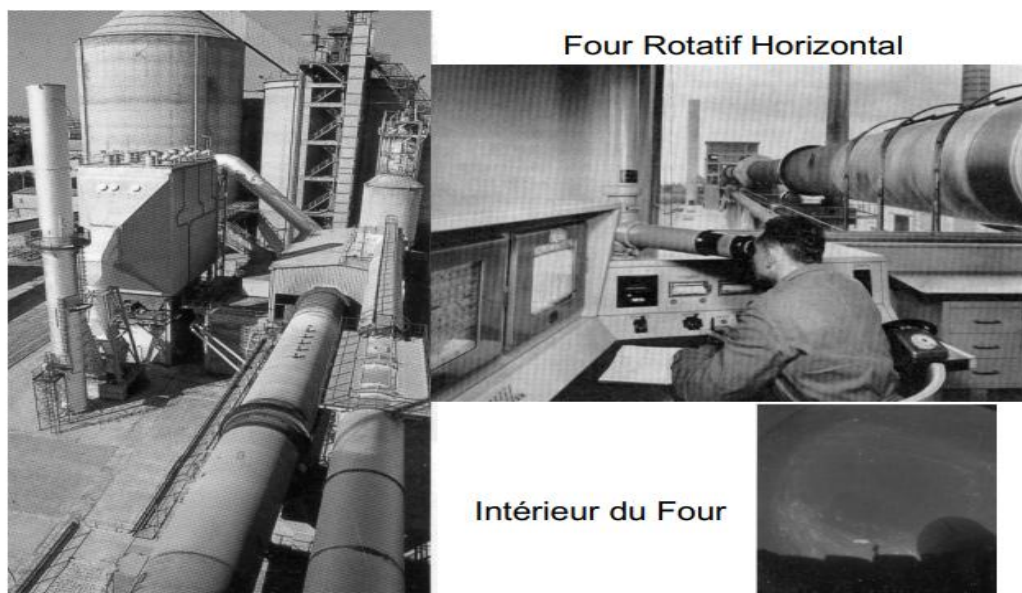


Figure I.22:Four Rotatif

d) Broyage

Il est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise.

Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tel que le laitier de Haut fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention des diverses catégories de ciment.

Industriellement, il existe deux modes de broyage :

Le broyage en circuit ouvert où le clinker traverse trois compartiments contenant des agents broyant de tailles différentes.

Le broyage à circuit fermé où le clinker traverse deux compartiments et à la sortie, le produit est envoyé dans un séparateur qui élimine les grains trop gros. Ces derniers sont recyclés.

Chacun des broyeurs, est alimenté par deux ou plusieurs doseurs qui permettent de régler les proportions de clinker, gypse et ajouts.

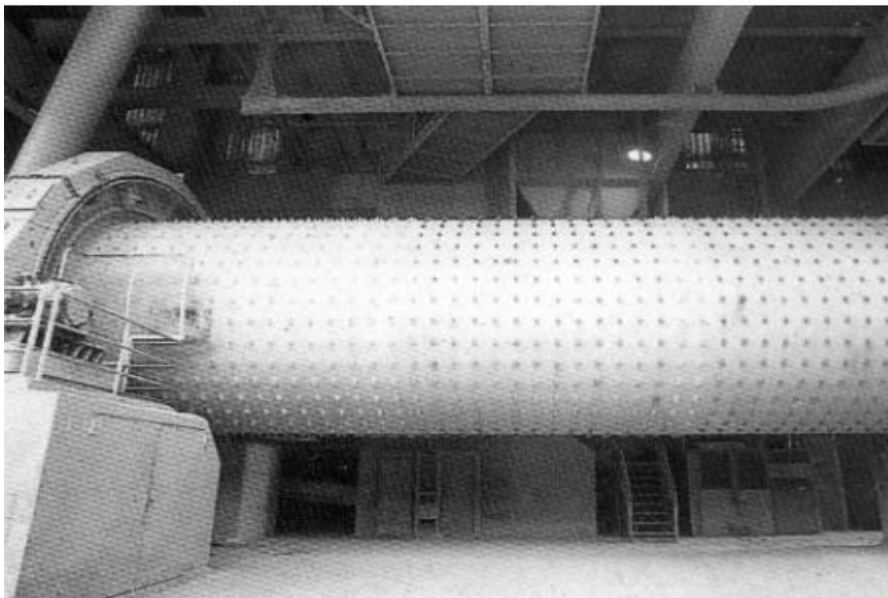


Figure I.23: Le broyeur de la matière première

Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes.

Le ciment qui est produit à un prix unitaire relativement bas, supporte mal, en coût, de longs transports. L'expédition s'effectue selon deux modes :

Le premier se fait en vrac, par bateaux, trains ou camions où l'extraction se fait sous le silo sur pont bascule par manches télescopiques.

Le second se fait en sacs palettisés par camions ; l'ensachage est effectué par des ensacheuses à plusieurs becs (jusqu'à 12 becs), qui assurent un débit de 100 tonnes par heure.

Les sacs ainsi remplis sont envoyés vers un atelier de palettisation qui met sur palettes les sacs de ciment.



Figure I.24: remplis les sacs de ciment.

I.8.Conservation et stockage du ciment

Le ciment, liant hydraulique, réagi avec l'eau, doit être protégés contre l'humidité et les intempéries.

Recommandations :

- Stockage du ciment dans des silos (Grand chantier).
- Les sacs de ciment doivent être protégés contre l'humidité :
- Utiliser des palettes pour isoler du sol
- Stocker le ciment de préférence à l'intérieur de locaux secs.
- Couvrir de polyane.

conditions de stockage	Durée de stockage
Silo hermétiquement fermé	Durée illimitée
Local sec + protection en polyane	10-12 mois
À ciel ouvert	2-4 mois en hiver 1-2 en été

Tableau I.7 : Durée de stockage en fonction des conditions de stockage.

I.9.L'hydratation du ciment portland:

Introduction :

Comme le ciment portland est un mélange hétérogène de plusieurs composés, son processus d'hydratation est un ensemble de réactions simultanées des substances anhydres avec l'eau [12,13]. Tous les composés ne réagissent pas de la même manière: les aluminates sont réputés pour réagir plus rapidement que les silicates, c'est pourquoi la rigidité (perte de consistance) et la prise caractéristiques à la pâte de ciment portland sont généralement attribuées aux

réactions des aluminates, alors que les silicates, constituant près de 75% du ciment ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le durcissement initial (Taux de développement de résistance) du matériau (Figure I.25).

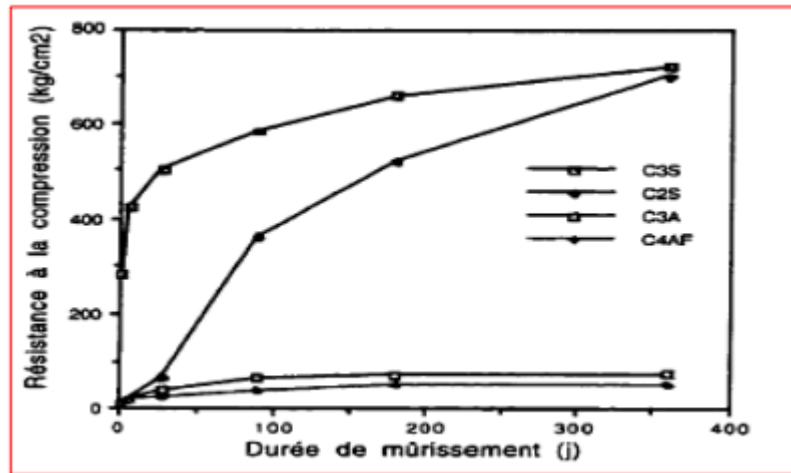


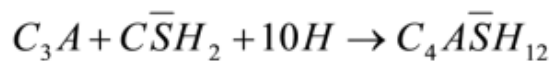
Figure I.25: Comparaison de la résistance à la compression des phases du ciment en cours d'hydratation [14]

I.9.1. Hydratation des composants du ciment portland :

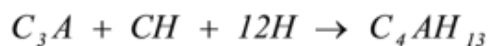
a) Hydratation des aluminates C3A et C4AF [10]

C₃A + Eau → Réaction prompte ; induit une prise rapide limitant le temps de mise en œuvre.

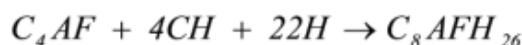
Mais, en présence de **gypse** (CaSO₄.2H₂O), la réaction suivante ce produit :



Après consommation de gypse (2 à 3 heures) ;



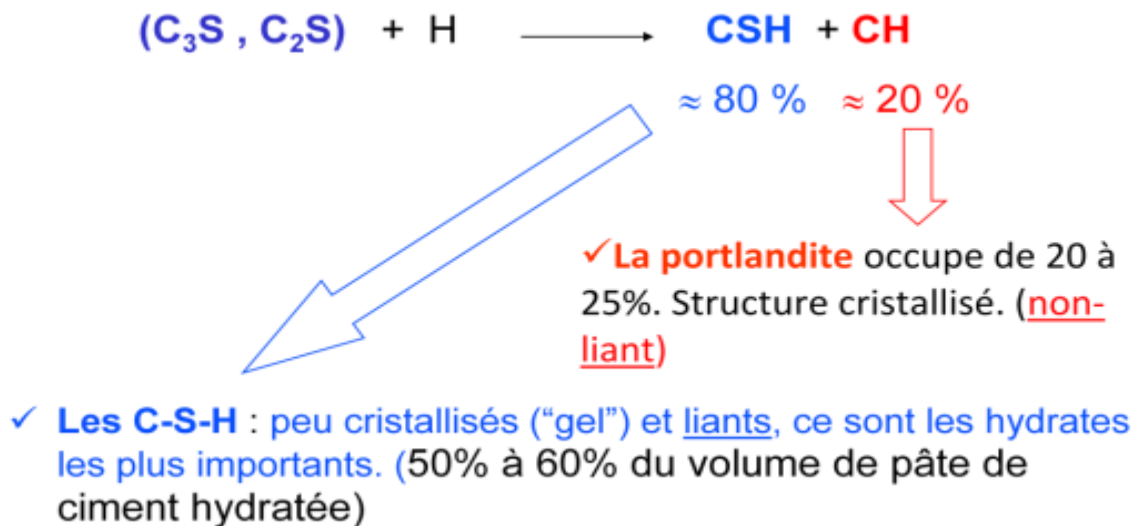
aluminates de calcium hydraté (CAH).



b) Hydratation des silicates : C3S et C2S [10]

Les deux silicates s'hydratent immédiatement en présence de l'eau

L'hydratation des silicates à 2 types d'hydrates :



Le mécanisme d'hydratation du C₃S se subdivise en 4 principales étapes [15, 16,17]

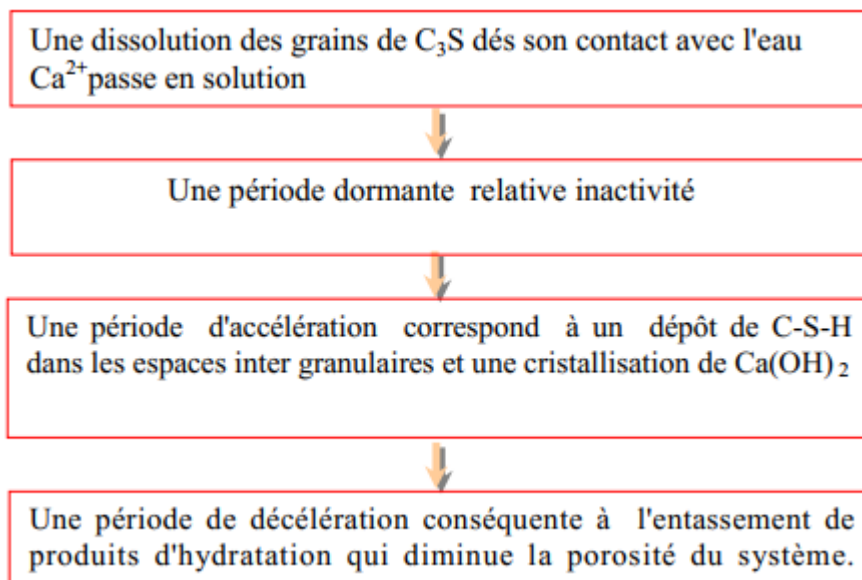


Figure I.26: Organigramme de mécanisme d'hydratation du C₃S

I.9.2. Effet des sulfates sur l'hydratation du ciment :

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

Les sulfates réagissent avec les aluminates pour donner de l'ettringite si la quantité d'ions SO₄²⁻ en solution n'est pas suffisante, le C₃A va alors s'hydrater et donner lieu à une prise rapide, tandis que si la concentration en ions sulfates est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise [18].

a) Effet des sulfates sur l'hydratation des C₃S

Des études sur l'hydratation des alites en présence de gypse ont montré que le sulfate de

calcium accélère l'hydratation du C3S [19, 20,21]. Copeland et Kantro [22] reportent que l'hydratation à 1 jour est indépendante du degré de "gypsage", mais, à long terme 1 à 1,5% de SO₃ donne le degré d'hydratation maximum Bennir [23] lui aussi a reporté que la résistance à la compression et le degré d'hydratation des C3S jusqu'à 48 heures sont indépendants du pourcentage de gypse introduit.

Jawad et Skalny ont fait des études sur l'hydratation initiale des C3S en présence de gypse, ils ont fini par conclure que la présence de SO₃ favorise la dissolution des C3S durant la première étape hydratation, le C-S-H peut inclure des ions sulfates [24].

b) Effet des sulfates sur l'hydratation des aluminates:

Skalny et Young [25] ont montré qu'une faible teneur en sulfate retarde l'hydratation des aluminates sans précipiter l'ettringite. Bien que la formation d'ettringite soit la première étape de l'hydratation du C3A, ils suggèrent que l'adsorption des sulfates sur la surface du C3A est un facteur important.

Jawad et coll. [26] ont reporté que l'hydratation du C3A et du C4AF dans une solution saturée en gypse est retardée. Le ferroaluminate est très fortement affecté, l'émingite se forme initialement sur la surface du C4AF, une chute de concentration des sulfates dans la solution engendre la formation de monosulfoaluminate et l'hydratation accélérée du ferret.

I.9.3. Évolution de l'hydratation :

L'évolution de la réaction d'hydratation dans le temps se divise en quatre principales périodes la (Figure I.27) illustre ces différentes périodes de la cinétique d'hydratation

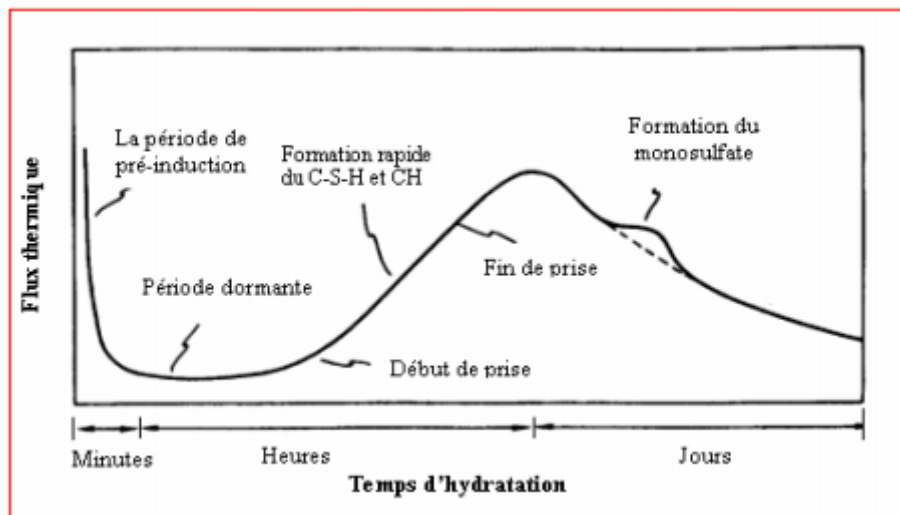


Figure I.27: Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment d'après Bensted [27]

La période de pré-induction

Correspond à la première période, lorsque le ciment est en contact avec l'eau, il y a un grand dégagement de chaleur à cause de la dissolution rapide des sulfates et des aluminates, cette

période est aussi caractérisée par la formation d'une couche d'ettringite à la surface du C3A qui permet d'en contrôler l'hydratation.

La seconde période,

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

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

Finalement la période de durcissement ou la période d'après prise correspond à la période d'évolution des propriétés mécaniques du matériau. Cette évolution est rapide dans les heures qui suivent la prise et elle se poursuit plus lentement pendant encore plusieurs mois en présence d'eau [28].

II.1. INTRODUCTION

Les ajouts minéraux proviennent principalement de l'industrie, en tant que sous produits. Les cendres de combustion du charbon dans les centrales thermiques (cendres volantes), la silice émanant de certain procédés métallurgiques (fumée de silice) et le laitier de haut fourneau sont les principaux sous produits de l'industrie qui peuvent être utilisés comme ajouts au béton.

Ces poudres minérales où fines complémentaires sont de granulométrie voisine de celle de ciment, voire plus fines, elles peuvent avoir un caractère hydraulique latent, soit avoir un caractère pouzzolanique, soit être inertes chimiquement. Dans tous les cas, du fait de leur finesse, ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis à la compacité du squelette, c'est le rôle de remplissage, ainsi ces ajouts modifient la micro structure du béton en terme caractéristiques physiques et chimiques, conduisent à la segmentation de larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui permettent de réduire les dimensions de cristaux de chaux.

Le laitier du haut fourneau est le matériau hydraulique latent, le plus utilisé dans la fabrication des ciments avec ajouts, partout dans le monde, vu ses propriétés stables, comparées à celles des autres sous produits industriels.

Aussi, en tant qu'ajout cimentaire, il présente des caractéristiques intéressantes, notamment du point de vue de la constance de sa composition chimique parce que celle-ci doit se situer dans une zone bien définie du diagramme de phases $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. (Neville, 2000) [29].

II.2. Les ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelquefois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique (voir la Figure II.1). [30]



Figure II.1: Ajouts cimentaire.

II.3. Les différents types d'ajouts au ciment

Les ajouts au ciment les plus utilisés sont : la pouzzolane naturelle, les laitiers, la fumée de silice, les cendres volantes et le calcaire. Le Tableau II.1 donne une estimation de l'utilisation des différents ajouts en Europe. En Algérie, l'emploi des ajouts est dans une phase primaire, caractérisée par une faible utilisation de ces matériaux, employés principalement pour la fabrication de ciment composé (35% d'ajouts maximum). Les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes sont illustrés dans le Tableau II.2.

Pays	Pouzzolane naturelle	Fumée de silice	Laitier	Calcaire	Cendres volantes
Belgique	-	Occasionnelle	limité	-	80000
Danemark	-	25000	-	-	100000
Finlande	-	50000	5000	-	100000
France	-	17000	-	450000	200000
Allemagne	50000	-	-	-	340000
Italie	-	-	-	-	1800000
Pays bas	-	Occasionnelle	-	-	100000
Norvège	limité	17000	-	-	35000
Portugal	-	-	-	-	-
Espagne	-	-	-	-	95000
Suède	-	25000	1000	-	900000
Angleterre	-	1000	900000	-	10000

Tableau II.1 : Utilisation annuelle (tonnes) des différentes au béton en Europe [31]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebir	Pouzzolane
	Hamma Bouziane	Pouzzolane
	Hadjar Essaoud	Laitier
	Tébessa	-
ERCC	Meftah	Tuf / calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL-Ghozlane	Tuf / calcaire
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni-saf	Pouzzolane
	Zahana	Pouzzolane
	Saida	Pouzzolane
ACC	M'sila	Calcaire – pouzzolane
	Sig	

Tableau II.2 : Ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

II.4. LE LAITIER

II.4.1. Définition :

Les laitiers de haut fourneau sont des coproduits formés au cours de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer.

II.4.2. Caractéristiques du laitier :

Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (> 90 %) de quatre oxydes ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$).

Ils contiennent également des petites quantités des oxydes ($\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$) et des quantités insignifiantes des sulfures ($\text{CaS} - \text{MnS} - \text{FeS}$) [2].

Cette composition dépend de plusieurs facteurs; elle varie suivant la nature du minerai, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement [32].

Le Tableau II. 3 présente la variation des principaux éléments constituant le laitier du haut fourneau :

Element chimique	Pourcentage [%]
CaO	30 à 50
SiO ₂	28 à 38
Al ₂ O ₃	8 à 24
MgO	1 à 18
SO ₃	1 à 2,5
Fe ₂ O ₃	1 à 3
MnO	1 à 3

Tableau II. 3 : Variation de la composition chimique du laitier [33].

La Figure II.2 compare la position des laitiers et celle de divers matériaux dans le diagramme triangulaire chaux-silice-alumine:

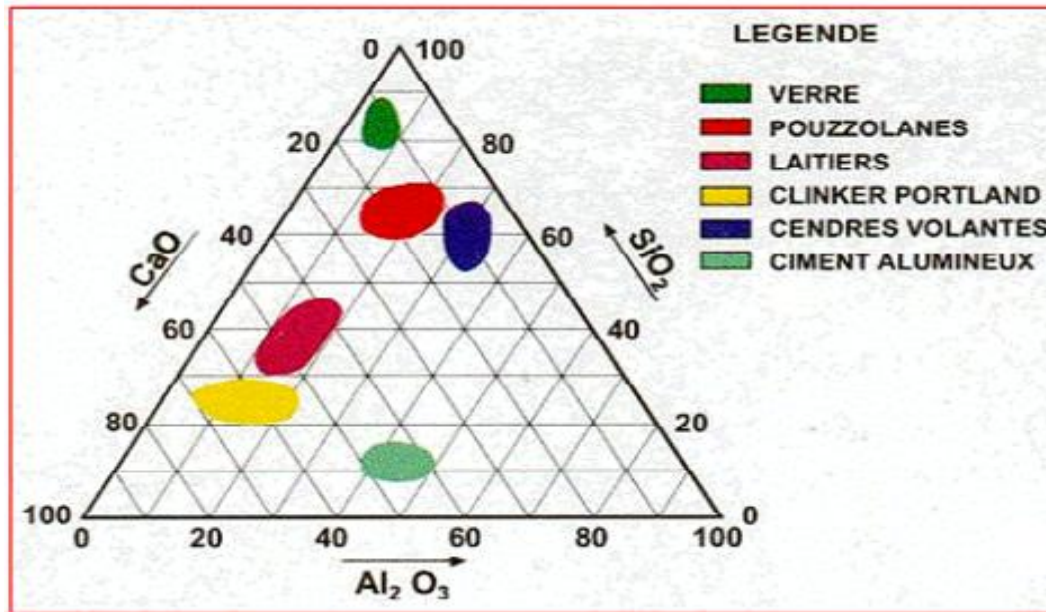


Figure II.2 : Situation du laitier de haut fourneau dans le système (CaO-SiO₂-Al₂O₃)

II.4.3. Traitement du laitier

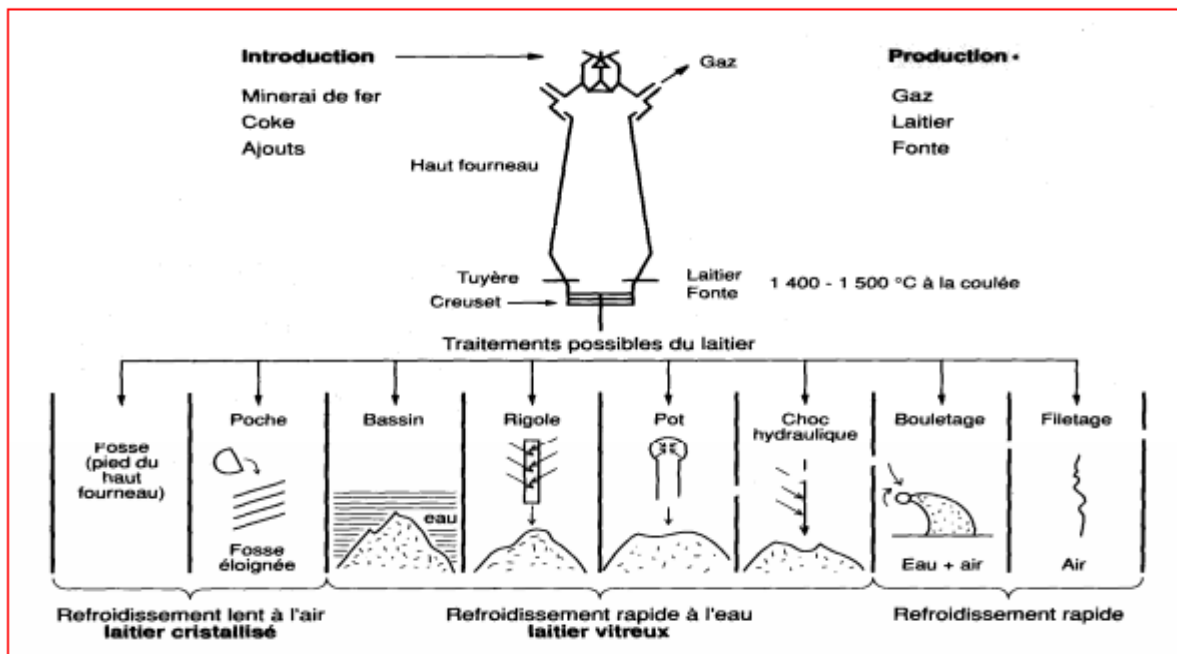


Figure II.3: Principaux traitement de Laitier

II.5. Les différentes formes de laitiers :

Les laitiers peuvent se présenter sous différentes formes et avec une granulométrie s'étend de 0 à 300 mm, selon les méthodes de refroidissement de ces derniers :

1) Laitier rocheux (ou cristallisé) :

Le laitier rocheux s'obtient en déversant le laitier liquide dans une fosse et en l'y laissant

refroidir le plus lentement possible. Dans d'autres cas, le laitier est d'abord versé dans des cuves en acier coulé placées sur des chariots circulant sur voie ferrée. Les fosses sont alors installées à distance du haut-fourneau, et le laitier y est déversé par basculement des cuves.

Après refroidissement, souvent avec arrosage, le laitier est extrait de la fosse par des moyens classiques en travaux publics : pelles sur chenilles et camions de chantier [32].



Figure II.4 : Laitier cristallisé poreux (Alexandre et Sebileau,) [34]

2) Laitier bouleté :

Le bouletage consiste à refroidir le laitier dans des conditions telles qu'il se forme des boulettes quasi sphériques, dont l'intérieur est creux. Ce traitement se pratique dans une installation qui comprend [32]:

- un **déversoir**, qui forme une lame de laitier liquide d'épaisseur constante ;
- un **couloir d'alimentation** incliné, sur lequel coule un film d'eau, et qui est soumis à des vibrations pour éviter le collage du laitier ; à ce moment, le laitier commence à se refroidir, devient donc plus visqueux (ce qui lui permet de retenir les gaz inclus) et subit un commencement d'expansion ;
- un **tambour**, muni d'ailettes, refroidi par un courant d'eau intérieur et tournant à environ 300 tours par minute, qui disperse le laitier ; la plupart des morceaux projetés par le tambour, pas encore solidifiés, sont expansés et prennent une forme sphérique sous l'effet de la tension superficielle ; les autres morceaux éclatent pour donner du laitier granulé ; le tambour projette le laitier sur l'aire de réception où il se refroidit et s'égoutte ;
- des **injections d'eau** (environ 1 m³/t de laitier).



Figure II.5 : laitier bouleté (Alexandre et Sebileau,). [34]

3) **Laitier expansé :**

C'est un laitier cristallisé dans lequel, pendant le refroidissement, on a provoqué la formation d'alvéoles. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour favoriser l'expansion, elles comprennent toujours une injection d'eau (environ 1 m³/t de laitier), complétée éventuellement par une injection d'air et de vapeur d'eau [32].

4) **Laitier granulé**

Le laitier granulé est un granulat vitrifié de laitier de haut fourneau .Il est utilisé dans l'industrie routière selon les NF P 98-106 comme liant hydraulique et selon la norme EN 197-1 comme constituant majeur dans la fabrication des ciments.

II.6. Méthode de granulation du laitier

Les laitiers granulés de hauts fourneaux sont obtenus dans des installations de granulation soit humides, demi sèches ou sèches [35, 36]:

1) **Voie humide**

Si la granulation est faite par voie humide, la phase vitreuse est dominante, elle atteint de 40 à 95 %. Mais les laitiers contiennent alors une quantité d'eau jusqu'à 40 % (ce qui explique l'utilisation des laitiers granulés par voie humide pour la production des ciments) rend ces derniers plus onéreux à cause de la dépense sensible en combustible nécessaire à la dissociation des laitiers (jusqu'à 80 Kg de combustible théorique pour 1 tonne de granulat sec). A l'heure actuelle, la qualité des laitiers granulés obtenus par voie humide est supérieure à celle des laitiers granulés obtenus par d'autres méthodes.

2) **Voie demi – sèche**

Les meilleurs indices techniques et économiques sont obtenus pour les laitiers par voie demi – sèche. Cette méthode consiste à refroidir le laitier liquide d'abord par l'eau puis à l'air. Le contenu de l'eau dans les laitiers granulés par voie demi – sèche est de 5 à 10 %. Pour réaliser cette méthode on se sert de granulateurs à tambours, des percuteurs hydrauliques et des broyeurs de granulation.

3) **Voie sèche**

Lorsque la granulation est faite par voie sèche, le fellet du laitier fondu se trouve brisé

par un fort courant d'air ou de vapeur en gouttes menues qui sont ensuite refroidies à l'air. Un laitier granulé par cette méthode contient de 0 à 5 % d'eau.

II.7. ACTIVITE DU LAITIER

Le rapport entre la composition chimique, la structure et l'activité hydraulique du laitier ont été étudié par plusieurs chercheurs, les résultats ont montré que l'activité hydraulique du laitier dépend principalement de la structure qui dépend de la composition chimique du laitier est son traitement thermique [37]. Une grande attention a été donnée à la relation entre la composition chimique du laitier et la réactivité.

1) Le rapport de basicité

Plusieurs formules sont développées, tel que le rapport de basicité (module de basicité) donné par :

$$Mo1 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} \quad Mo2 = \frac{CaO}{SiO_2} \quad Mo3 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Le module de basicité du laitier présente le rapport entre la somme des oxydes basiques qu'il contient sur la somme des oxydes acides, la valeur idéale de l'indice, celle qui permettra d'obtenir le meilleur laitier s'établit (1,32 à 1,34). Lorsque Mo_3 inférieur à 1,3 a une température de fusion plus élevée ce qui entraîne évidemment une dépense plus élevée de combustible [38].

Suivant le module de basicité les laitiers peuvent être classés en 3 catégories :

- laitier basique dont $Mo > 1$.
- laitier acide dont $Mo < 1$.
- laitier neutre dont $Mo = 1$

2) Le rapport d'activité

Le module d'activité exprime le rapport entre la quantité d'alumine et celle de la silice dans le laitier.

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$$

Selon : Roque Joffre – seul l'indice :

$$\frac{CaO + MgO + 1/3 Al_2O_3}{SiO_2 + 2/3 Al_2O_3}$$

Serait valable pour tous les âges de résistances les formules les plus utilisées sont :

En Allemagne (la formule de Keil) [39].

$$F = \frac{CaO + CaS + 1/2(MgO) + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO}$$

$F < 1.5$: laitier médiocre

$1.5 < F < 1.9$: laitier acceptable

$F > 1.9$: laitier excellent

En France (la formule de C Langavant) [39].

$$i = 20 + CaO + Al_2O_3 + 1/2(MgO) - 2SiO_2$$

Pour : $12 < i < 15$: laitier médiocre

$15 < i < 20$: laitier acceptable

$i < 20$: laitier excellent

D'après [Gost 3476-74] L'hydraulicité des laitiers granulés du haut fourneau doit être estimée par le coefficient de qualité qui est défini comme étant le rapport entre les oxydes de calcium, d'aluminium et de magnésium et de bioxyde de silicium et de titane.

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + TiO_2} \quad : \quad \text{Cette formule est valable quand la teneur en MgO} < 10\%.$$

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO - 10)} \quad : \quad \text{Si MgO} > 10\%.$$

L'hydraulicité est élevée quand K est élevé [40].

II.8. Facteur influent sur l'activité de laitier :

a) Influence de la vitesse de refroidissement sur l'activité du laitier

Le refroidissement long du laitier conduit à une baisse de l'activité de celui-ci vu la formation de

la phase cristalline, tandis que le refroidissement rapide du laitier fondu donne une structure vitreuse métastable [41]. Seul le laitier suffisamment vitrifié est réactif.

b) Influence du temps de stockage sur l'activité du laitier

Si le laitier granulé est abandonné à l'air libre, et s'il subit l'effet des intempéries atmosphériques, il peut se conserver très longtemps sans altération d'où la possibilité de le stocker en tas sans précaution particulière [38], l'activité du laitier broyé, et le délai de prise du liant confectionné à sa base dépend généralement du temps de stockage.

Il a été établi que, après 1 à 2 mois de stockage du laitier finement broyé, il y a une augmentation de délai de prise du liant au laitier, son activité se baisse si la surface spécifique est plus grande [44]. Le stockage de 6 mois de laitier finement broyé n'entraîne pas de modification sur le liant à obtenir [42].

c) Influence de la finesse de mouture sur l'activité du laitier

L'activité du liant remonte avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 2000 cm²/g à 4800 cm²/g [40]. Il a été établi que le laitier trop broyé, ne se prête pas à un stockage de long durée. Il demande des quantités accrues d'eau lors de la fabrication du liant, d'où l'utilité d'utiliser des laitiers broyés ayant une surface spécifique de (2200 cm²/g à 3000cm²/g) qui est rentable du point de vue économique [43].

d) Influence de la vitesse de refroidissement sur l'activité du laitier

Le refroidissement long du laitier conduit à une baisse de l'activité de celui-ci vu la formation de la phase cristalline, tandis que le refroidissement rapide du laitier fondu donne une structure vitreuse métastable [41] seul le laitier suffisamment vitrifié est réactif.

II.9. Utilisations des laitiers

Les laitiers granulés sont utilisés pour :

- Utilisation en tant qu'ajout (0 à 85 %) dans les ciments classiques (CPJ) et ciments au laitier (CHF, CLK),
- Fabrication des bétons à haut rendement [45],
- Composants siliceux du béton et de la brique silico-calcaire [46],
- Bétons légers,
- Liants pour fabrication des graves hydrauliques,
- Remblais légers,
- Agriculture, crépis et mortiers, laine de roche [47].

III.1. Définition de la durabilité

La durabilité est définie par la norme **NF X 50-501** comme « l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint » [48]

III.2. Durabilité Des Matériaux Cimentaire

III.2.1. Durabilité des bétons

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation était appréciée par sa résistance à la compression. En effet, la résistance est une propriété étroitement liée à la structure poreuse donc à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons.

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. Le premier est relatif au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion. La seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

III.3. Causes de dégradation des ouvrages

La structure d'un bâtiment peut subir divers désagréments et déformations. Des facteurs externes ou internes peuvent provoquer ces dégâts. La réglementation désigne plusieurs types de causes. La norme française en vigueur est la NF EN 1504. Elle détermine des principes et des méthodes de réparation selon la nature de la dégradation. Elle établie 11 principes qui identifient les causes de détérioration des structures d'ouvrages. Il est important de les déterminer avant de choisir le mortier de réparation qui convient.

Il existe plusieurs causes de cette dégradation.

- **des causes mécaniques** : surcharge, tremblement de terre, vibration.
- **des causes chimiques** : bactéries, exposition et réaction chimique.
- **des causes physiques** : usure, gel, érosion, abrasion, dilation.

III.3.1. Dégradations mécaniques

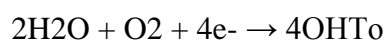
Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux. Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle. [49]

III.3.2. Dégradations Chimiques [50]

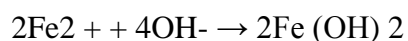
III.3.2.1. Corrosion des armatures

La corrosion de l'acier d'armature et d'autres métaux incorporés est la principale cause de détérioration du béton. Lorsque l'acier se corrode, la rouille résultante occupe un plus grand volume que l'acier. Cette dilatation crée des contraintes de traction dans le béton, qui peuvent éventuellement causer des fissures, des délaminages et des écaillages (Figure III.1). Ce processus est appelé une réaction d'oxydation, ou la réaction anodique, et est représenté par:

Les électrons se combinent avec l'eau et l'oxygène dans le béton :



Les ions ferreux migrent à travers l'eau interstitielle du béton où ils se combinent pour former des hydroxydes de fer, ou de la rouille:



Cet hydroxyde a tendance à réagir davantage avec l'oxygène pour former des oxydes supérieurs. Les augmentations de volume au fur et à mesure que les produits de réaction réagissent davantage avec l'oxygène ce qui entraîne une contrainte interne dans le béton qui peut être suffisante pour provoquer la fissuration et l'effritement de la couverture de béton : le

mortier d'enduit. La Figure III.1 montre la fissuration d'une paroi causée par la corrosion des armatures.

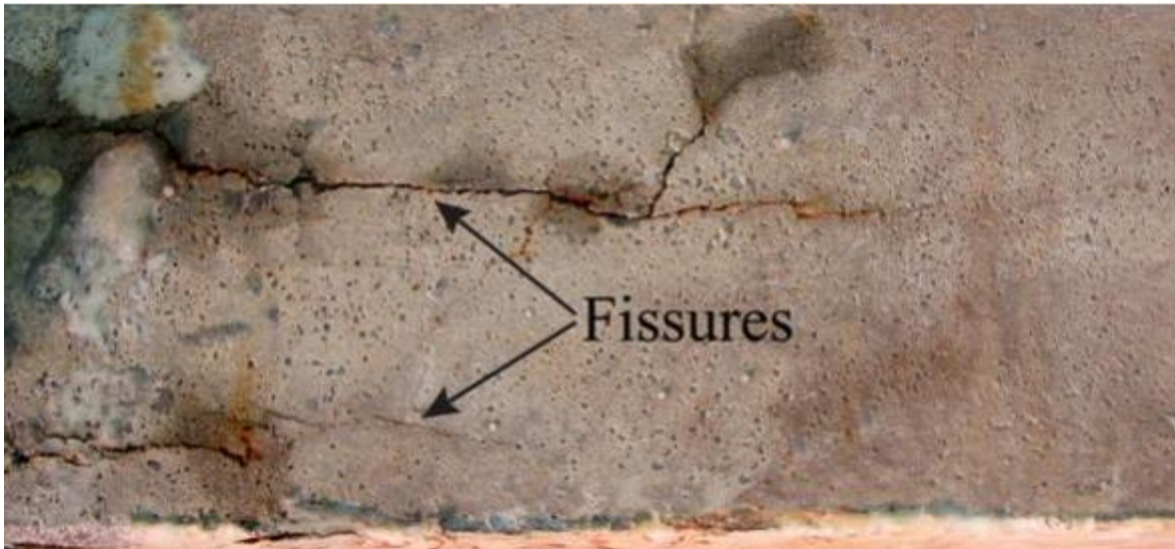


Figure III.1: Fissuration causée par la corrosion des armatures

III.3.2.2. Détérioration par le gel-dégel

Lorsque l'eau gèle, elle augmente d'environ 9%. Comme l'eau dans le béton humide gèle, elle produit une pression dans les capillaires et les pores du béton. Si la pression dépasse la résistance à la traction du béton, la cavité se dilatera et se rompra. L'effet cumulatif des cycles successifs de gel-dégel et de rupture de la pâte et des granulats peut éventuellement entraîner une dilatation et une fissuration importante, une desquamation et un effritement du béton (Figure III.2).



Figure III.2: Détérioration de la surface du béton par Les cycles de gel dégel

III.3.2.3. Attaques chimiques [51]

Le béton fonctionne bien lorsqu'il est exposé à diverses conditions atmosphériques, à l'eau, au sol et à de nombreuses autres expositions chimiques. Cependant, certains environnements chimiques peuvent détériorer même le béton de haute qualité.

Le béton est rarement, sinon jamais, attaqué par des produits chimiques solides et secs. Pour produire une attaque importante sur le béton, les produits chimiques agressifs doivent être en solution et au-dessus d'une concentration minimale. La Figure III.3 montre les dégradations causées par les attaques chimiques.



Figure III.3: Dégradations causées par les attaques chimiques

III.3.2.4. Les acides

En général, le béton de ciment Portland n'a pas une bonne résistance aux acides. En effet, aucun béton de ciment hydraulique, quelle que soit sa composition, ne résiste longtemps s'il est exposé à une solution ayant un pH de 3 ou moins. Cependant, certains acides faibles peuvent être tolérés, en particulier si l'exposition est occasionnelle. Les acides réagissent avec l'hydroxyde de calcium du ciment Portland hydraté. Dans la plupart des cas, la réaction chimique forme des composés de calcium hydrosolubles, qui sont ensuite lessivés par des solutions aqueuses.

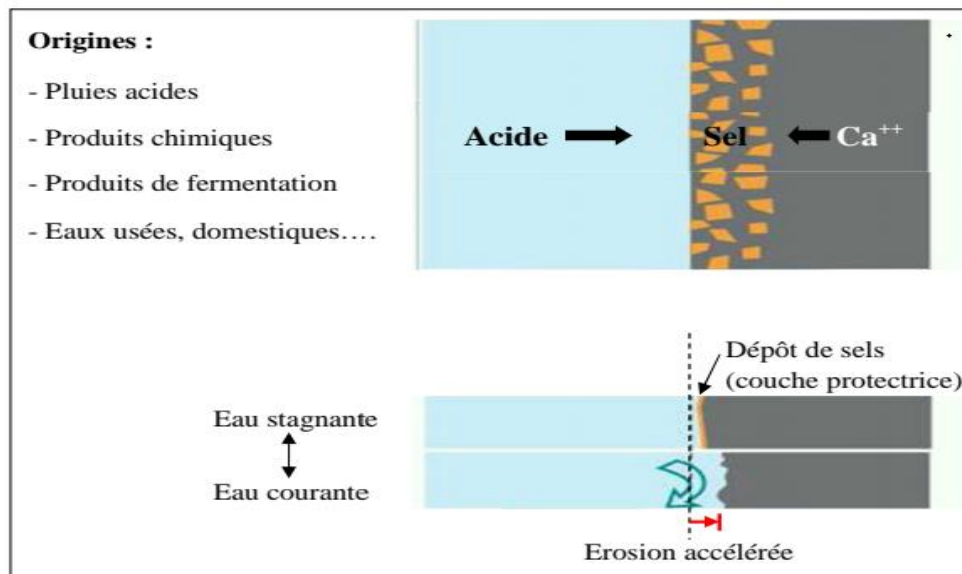


Figure III.4: Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton

III.3.2.5. Sels et alcalis

Les chlorures et nitrates d'ammonium, de magnésium, d'aluminium et de fer provoquent tous une détérioration du béton, ceux d'ammonium étant les plus dommageables. La plupart des sels d'ammonium sont destructeurs car, dans l'environnement alcalin du béton, ils libèrent du gaz ammoniac et des ions hydrogène. Ceux-ci sont remplacés par la dissolution de l'hydroxyde de calcium du béton. Le résultat est une action de lixiviation, un peu comme une attaque acide. Des alcalis forts (plus de 20%) peuvent également provoquer la désintégration du béton.

III.3.2.6. Attaques sulfatiques

Des sulfates naturels de sodium, de potassium, de calcium ou de magnésium se retrouvent parfois dans le sol ou dissous dans les eaux souterraines. Les sulfates peuvent attaquer le béton en réagissant avec des composés hydratés dans le ciment durci. Ces réactions peuvent induire une pression suffisante pour perturber la pâte de ciment, entraînant une perte de cohésion et de résistance, ce qui provoque la détérioration des enduits. La Figure III.4 montre les dégradations causées par les attaques sulfatiques.



Figure III.5: Dégradations causées par les attaques Sulfatiques.

III.3.2.7. Réactivité alcali-agrégat

Dans la plupart des cas, les agrégats sont plus ou moins inertes chimiquement. Cependant, certains agrégats réagissent avec les hydroxydes alcalins du béton, provoquant l'expansion et la fissuration dans une période de plusieurs années.

III.3.2.8. Abrasion / Érosion

Les dommages causés par l'abrasion se produisent lorsque la surface du béton est incapable de résister à l'usure causée par le frottement et la friction. Au fur et à mesure que la pâte extérieure du béton s'use, les agrégats fins et grossiers sont exposés et l'abrasion et l'impact entraîneront une dégradation supplémentaire liée à la force d'adhérence agrégé-à-coller et à la dureté de l'agrégat

III.3.3. Dégradations Physiques

Ce sont les Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage. Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations. Ce phénomène est aggravé, en

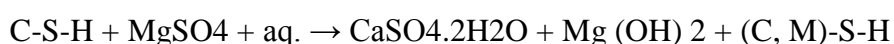
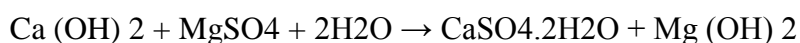
surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées. Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- Une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne
- Un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage. Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages [49]

III.4. L'agressivité des sulfates est plus ou moins forte en fonction du cation associé à l'anion SO_4^{2-} : [52]

- 1) **les sulfates de calcium**, présents dans les sols sous forme de gypse et d'anhydrite ou dans les eaux souterraines, sont agressifs vis-à-vis du béton malgré leur faible solubilité, suivant un processus plus lent que celui qui est observé avec les sulfates de magnésium et d'ammonium ;
- 2) **les sulfates de sodium ou de potassium** beaucoup plus solubles entraînent des dégradations plus rapides par formation de gypse et d'ettringite ainsi que par lixiviation de la chaux de la portlandite et des C-S-H ;
- 3) **le sulfate de magnésium** très soluble et extrêmement agressif, conduit à des réactions plus complexes faisant intervenir des échanges $Ca^{2+} \rightarrow Mg^{2+}$ avec formation de brucite $Mg(OH)_2$:



III.5. Critères généraux de durabilité de composite cimentaire

1) La résistance

En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevé que le milieu est plus agressif.

Cela signifie que l'exigence de durabilité qui peut parfois déterminer la résistance à prendre.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit cependant être complété par d'autres conditions, en effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables.

Une forte décroissance de la résistance mécanique est observée avec l'augmentation de la porosité. En génie civil, ceci est traduit par « l'obtention d'un béton très compact passe la réalisation d'un béton mécaniquement très résistant ». Ces deux grandeurs sont intimement liées,

2) Le rapport E/C

Le rapport E/C (Eau/Ciment) est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité : résistance mécanique à la compression, durabilité.

Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation)

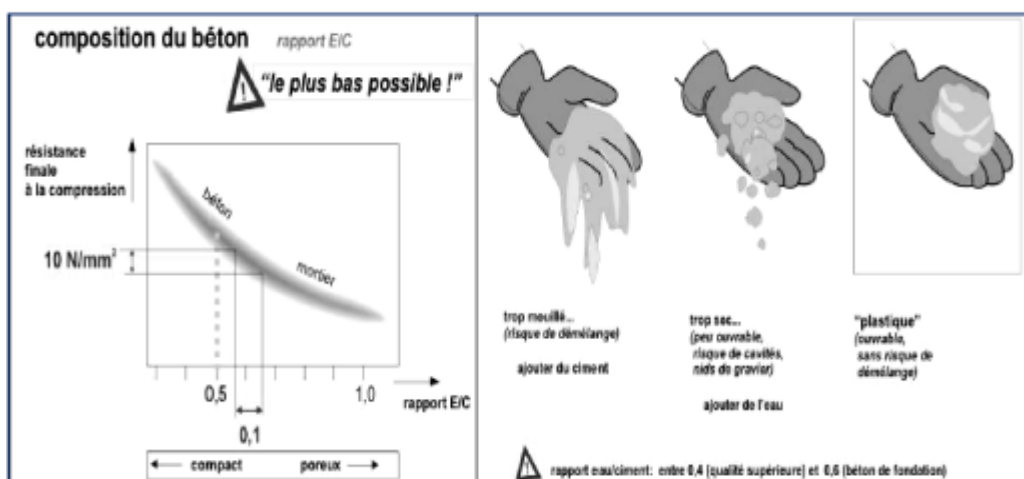


Figure III.6: Influence du rapport E/C sur la résistance finale à la compression. [53]

3) La porosité

- porosité interne du béton

La porosité du béton gouverne de nombreuses propriétés du béton :

- Presque toutes les caractéristiques mécaniques ;
- Toutes les perméabilités (eau, ions, gaz)
- Durabilité.

La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide (Figure III.6).

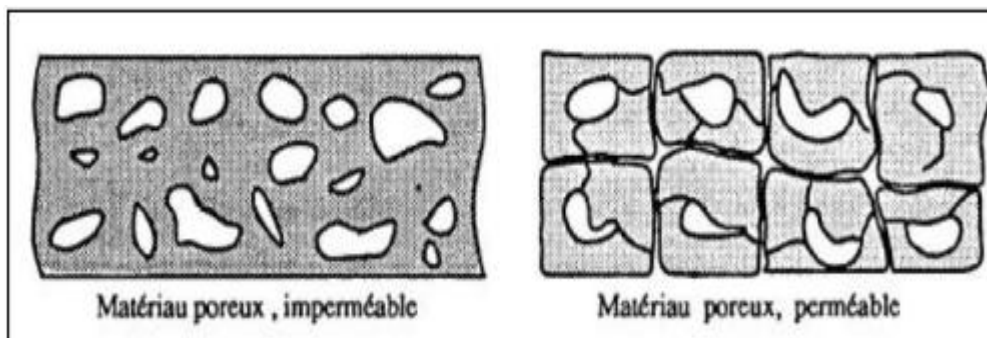


Figure III.7: représentation du matériau poreux imperméable et perméable

Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue (Figure III.7).

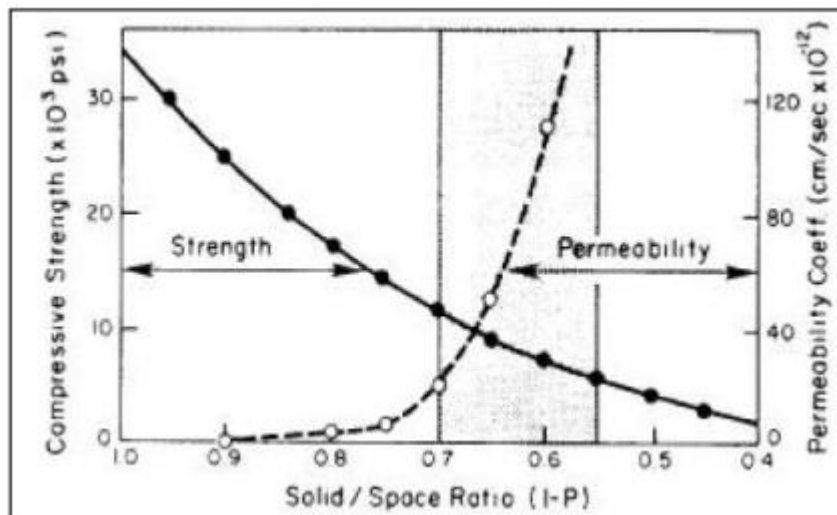


Figure III.8: Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. [54]

La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vides dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d’angstrom (Å). Les plus petits vides du béton sont donc 1 million de fois plus petits que les plus gros.

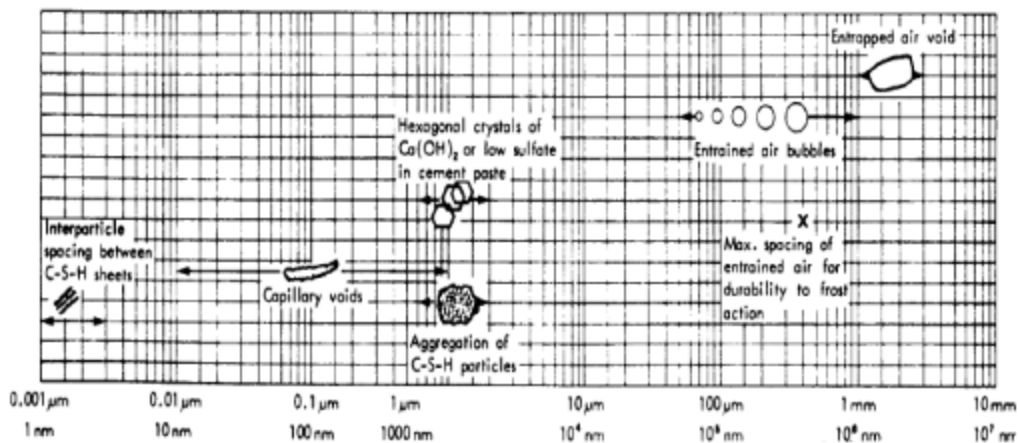


Figure III.9: échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté. [54]

- **Interface pâte – granulat**

Pour un même rapport E/C, la perméabilité à l’eau du mortier ou du béton est généralement supérieure à celle de la pâte en raison de la zone d’interface pâte granulats (Figure III.9).

La zone d’interface pâte-granulat est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de

la matrice formée par la pâte de ciment hydraté.

Elle présente souvent une plus grande densité de microfissure cette zone offre donc un chemin préférentiel par le passage de l'eau, de gaz ou des ions.

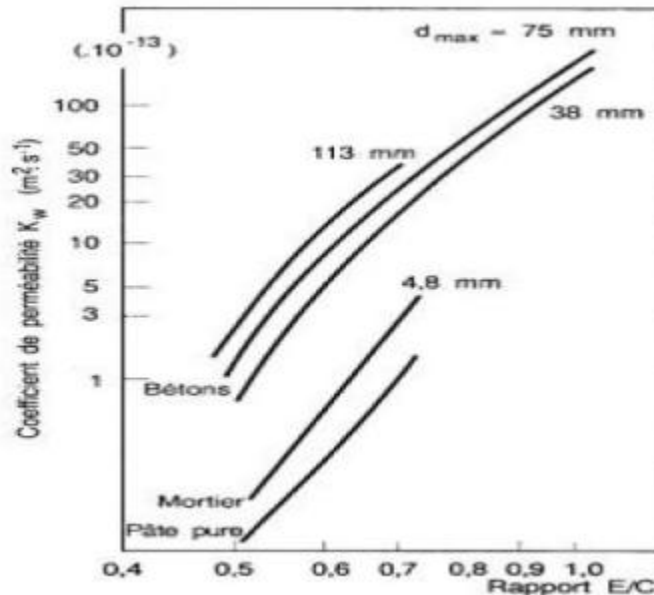


Figure III.10: Influence du E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons [54]

4) La nature de ciment et le dosage

L'influence du dosage en ciment est inversement proportionnelle à celle du dosage en eau. La résistance en béton augmente avec le dosage en ciment. C'est surtout la classe de ciment qui importe plutôt que sa nature minéralogique

IV.1. Introduction

Nous avons utilisé pour la confection du mortier des matériaux locaux dont les caractéristiques sont déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil de l’université de m’silla.

Les matériaux utilisés sont :

- Le sable de rivière fin d’origine silicique de la région de Boussaâda (oued maitre) ;
- Le ciment de CEMI CPJ 42.5
- Le laitier
- L’eau potable du laboratoire

IV.2. Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers :

Le mortier est composé de deux matériaux le liant (ciment) et le sable de dune mélangés à l’eau. Dans certaines compositions une partie du ciment est remplacée par le laitier le pourcentage de (15%.30%).

IV.2.1. La composition chimique de ciment :

La composition chimique de CPJ a été établie dans la cimenterie de M’sila. Elle est présentée au Tableau IV.1 [55]

Composition chimique	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	LOI	Chau libre
Teneur (%) CPJ 42.5	62.37	20.81	4.23	5.52	2.40	0.52	0.03	2.34	0.021	3,09	1.09

Tableau IV.1 : Composition chimique du ciment (%)

La composition minéralogique calculée à l’aide des équations de Bogue :

Les équations ou formules de Bogue :

$$\% C_3S = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times \% Al_2O_3) - (1,43 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3)$$

$$\% C_2S = (2,876 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times \% C_3S)$$

$$\% C_3A = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3)$$

$$\% C_4AF = (3,043 \times \% Fe_2O_3)$$

Tableau IV.2 montre la composition minéralogique déterminée d’après la formule de Bogue.

Composition minéralogique	CPJ 42.5 (%)
C ₃ S	60
C ₂ S	15
C ₃ A	2
C ₄ AF	17

Tableau IV.2 : Composition minéralogique du ciment (Bogue)

IV .2.2. Le laitier

Le laitier utilisé dans cette étude provient de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar de Annaba.

C'est un laitier granulé, obtenu à partir d'un refroidissement rapide du laitier fondu dans les bassins d'eau, ce qui conduit à la formation d'une grande quantité de la phase vitreuse.

Tableau IV.3 présente l'analyse chimique du laitier granulé : [56]

Teneur %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
40.8	5.2	0.53	43.01	6.4	0.80	3.02	0.01	0.007

Tableau IV.3 : Analyse chimique du laitier granulé.

IV .2.2.1. Module de basicité

A partir de la composition chimique du laitier granulé, on peut calculer le module « M₀ » module de basicité, on appliquant les formules utilisées dans les références :

$$M_{01} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} = 1,05 \quad M_{01} > 1$$

$$M_{02} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} = 1,21 \quad M_{02} < 1,5$$

$$M_{03} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} = 1,074 \quad M_{03} > 1$$

A partir des résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique.

IV .2.2.2. Module d'activité

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} = 0,127$$

IV .2.2.3. Diffractogramme du laitier

Le laitier granulé se présente sous forme de sable de couleur claire, de granulométrie 0 à 5 mm. Le diffractogramme du laitier granulé du haut fourneau d'Annaba présenté à la Figure IV.1 est typique de laitier amorphe qui présente cependant deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer.

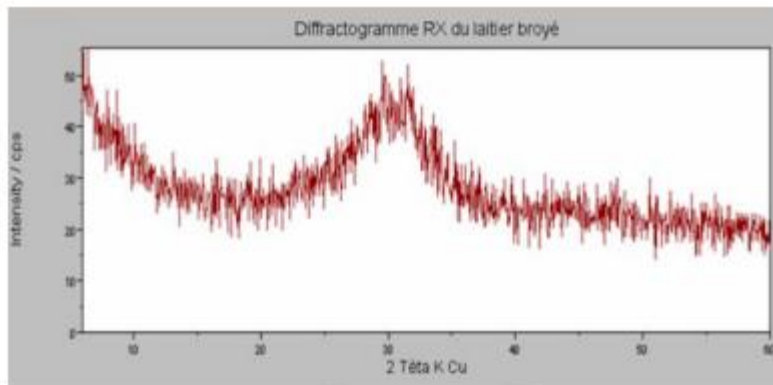


Figure IV.1: Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé.

IV .2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier doit être pure autant que possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, Seles, matières sucrées, etc.

L'eau utilisée dans notre étude est une eau potable « eau du robinet » fournie au laboratoire de Génie civil à l'université de M'sila. [57]

IV .2.3. 1. composition chimique de l'eau utilisée

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie à laboratoire de département de chimie (M'sila). Elle est donnée par le Tableau IV.4

La mesure	Teneur en (mg / l)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl^-	234.3
Sulfate SO_4^-	351.60
Magnésium Mg^{2+}	110.8
Sodium Na^+	/
Calcium Ca^{2+}	267.2
Sédiment sec	1412
rééligibilité d'oxydation en eau	1024

Tableau IV.4: Caractéristiques chimiques d'eau.

IV. 2.4. Le Sable :

Le sable utilisé dans cette étude provient des abords de l'oued Maiter. Cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, entre lesquelles souffle un vent provenant du sud chargé de grains fins.

Le sable de dune de Boussaâda, siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surfaces lisses, et caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal (grosseur maximale) qui n'excède pas 3 mm. [57]

IV. 2.4.1. Composition chimique du sable

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	C.L	P.F
Sable de dune	94,000	0,880	0,370	2,960	0,110	-	-	-	-	1,500

Tableau IV.5 : composition chimique du sable naturel utilisé (Fluorescence aux rayons X).

Le Tableau IV.6 présente la composition chimique du sable naturel utilisé (sable de dune).

IV. 2.4.2. Caractéristique physique du sable utilisé

Les principales caractéristiques physiques de granulats fins utilisés (sable de dune) sont regroupées dans le Tableau IV.6.

Matériaux utilisés	Masse spécifique [γ] en (kg/l)	Masse volumique [ρ] en (kg/l)	Module de finesse Mf	Equivalent De sable (ESP/ESV)	Porosité [P] en (%)
Sable de dune	2,58	1,50	1,73	74/76	42

Tableau IV.6 : caractéristique physique du sable utilisé.

V.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats sous forme des graphes où toutes les propriétés des mortiers étudiés seront analysées et interprétés.

Les propriétés étudiées :

- ❖ Les propriétés physiques (la porosité, la masse volumique)
- ❖ La résistance à la compression.

Notre travail consiste à substituer une partie du ciment témoin CT (CRS) par le laitier Selon des proportions variantes allant de 15%, 30% pour connaître l'effet de chaque pourcentage des ajouts incorporés dans la matrice cimentaire.

V.2. Les mélange des ciments étudiés:

Les mélanges de ciment étudiés sont représentés sur le tableau (V.1) :

Type de ciment	Pourcentage d'ajout(%)
CT	0%
CL15%	15%
CL30%	30%

Tableau V.1: mélange des ciments.

V.3. Essai sur la pâte de ciment :

V.3.1. La consistance normalisée :

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui Soit la même pour toutes les pâtes étudiées. La consistance dite "consistance normalisée" peut être déterminée par l'essai en utilisant un appareil qui s'appelle "Vicât"

V.3.2. L'essai de prise :

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

Ciments	Consistance		Début et fin de prise		Surface spécifique cm ² /g
	C (%)	P (mm)	Début h : min	Fin h : min	
CT	24	7	2 :48	3 :36	3669
CL 15%	23.5	5.4	3 :19	4 :00	3263
CL30%	22.5	5.0	3 :35	4 :15	3225

Tableau V.2: La consistance et début de prise et fin de prise

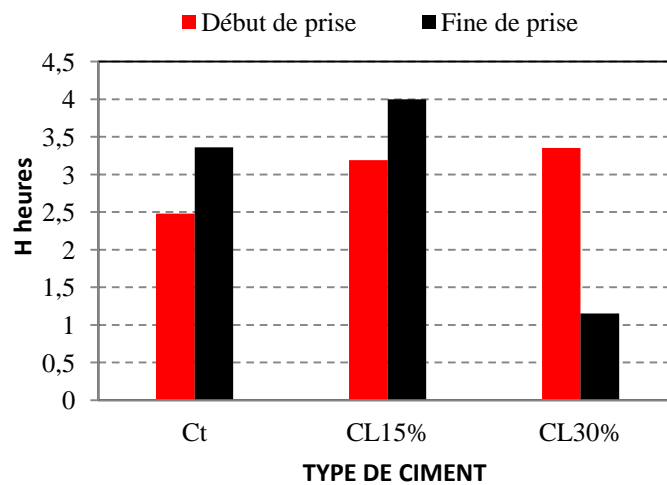


Figure V.1: Détermination de début et fin de prise

V.3.3 La finesse de mouture:

La finesse est représentée sur le tableau (V.2)

Ciment	SSB (Cm ² /g)
CRS T	4200
Laitier	4350

Tableau V.3: La finesse de mouture des matières premières

V.4. Etude de mortier :

Le but de ce travail expérimental est d'étudier l'influence de la teneur du laitier sur le comportement physique et mécanique du mortier à base de sable de dune. Le mortier étudié est à base d'un sable de dune de composition pondérale (C/S= 1/3).il se compose de:

3 parties de sable + 1 partie de ciment, avec des rapports de E/C différente ,0.5, E/C=0.64,E/C=0.7.

V.4.1. La résistance

V.4.2. Influence de milieu de conservation

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure. Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_C est exprimée en newton, cette résistance exprimée en MPa vaut :

$$R_C (MPa) = \frac{F_C (N)}{1600}$$

V.4.3. Essais de porosité :

L'essai de la porosité est réalisé sur des éprouvettes de dimension $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, en appliquant

Les étapes suivantes :

-Pesé de la masse humide M_{humid} a l'age j jours.

-Séchage a l'étuve à 105°C de l'échantillon M_{sec} , pendant au moins 24 heures, jusqu'à

Obtention d'une masse constante, afin de faire évaporer toute la quantité d'eau évaporable.

Cette masse en Immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures.

$$P \% = (M_h - M_{\text{sec}} / M_h) * 100$$

Les résultats obtenus pour chaque essai de masse volumique des différents rapports E/C sont

Représentés sur les figures.

V.5. Influence du rapport E/C= 0.64 et le milieu de conservation

V.5.1. La masse volumique

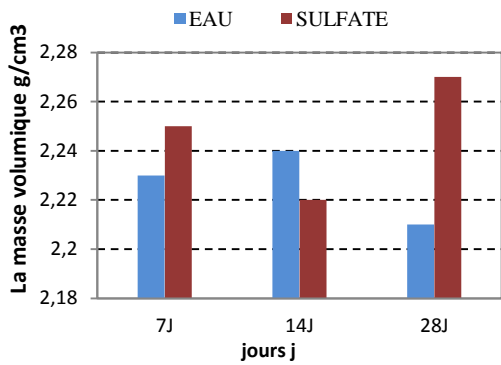


Figure V.2 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CT

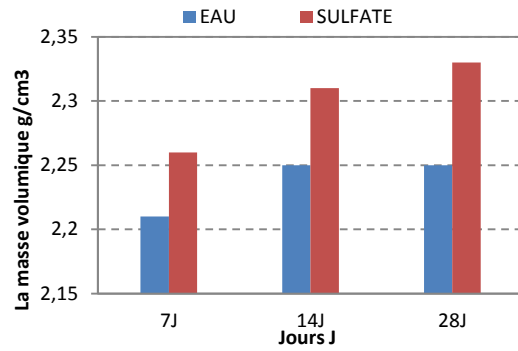


Figure V.3 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL15%

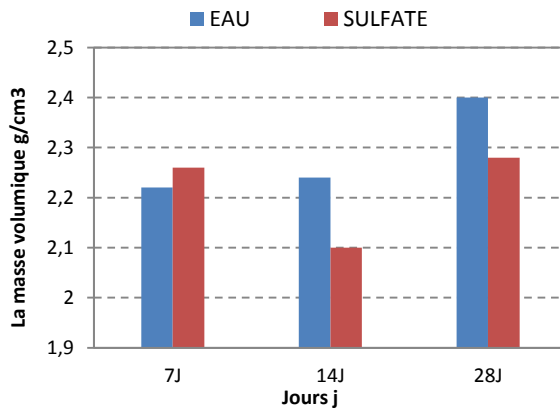


Figure V.4 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL30%

V.5.2. La résistance à la compression

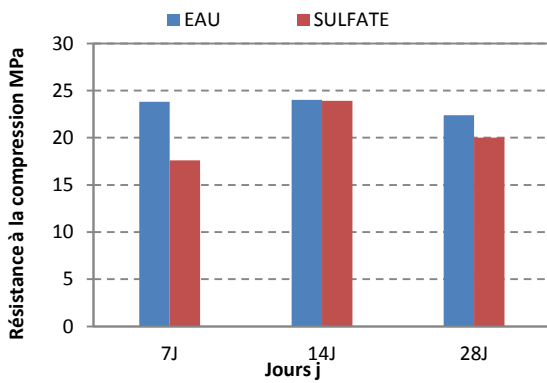


Figure V.5 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CT

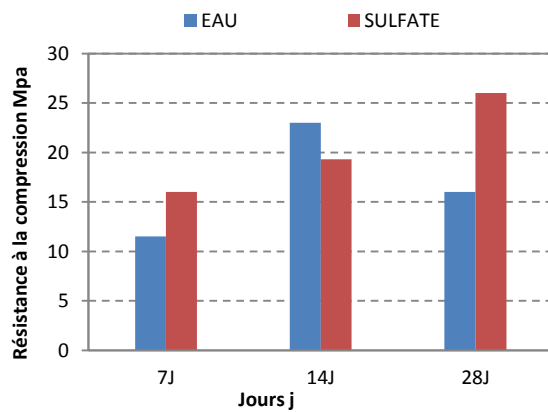


Figure V.6 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL15%

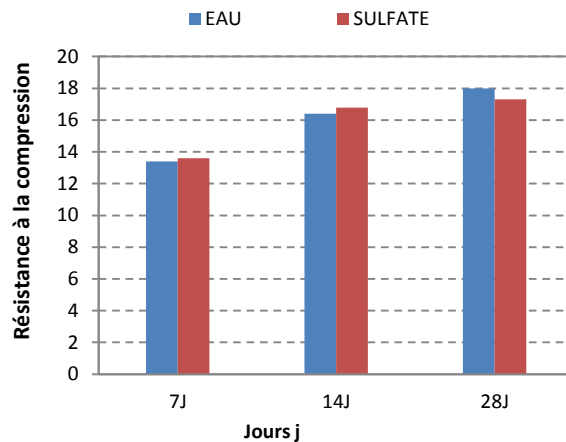


Figure V.7 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL30%

-Commentaires :

-La conservation à l'eau influe positivement sur la résistance à la compression et la masse volumique aux différents âges de durcissement par rapport au sulfate.

-L'augmentation du pourcentage de laitier diminue la résistance et la masse volumique en particulier avec 30% de substitution.

-L'influence de laitier est moins marquée au jeune âge, mais elle évolue en fonction du temps.

V.5.3. Influence du rapport E/C = 0.64 sur la porosité

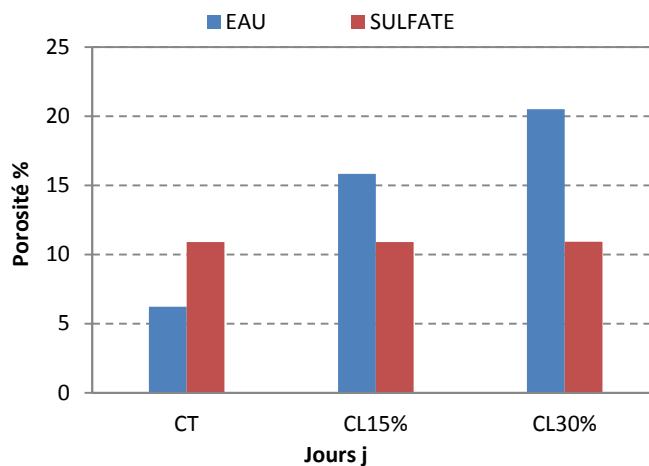


Figure V.8 : Porosité à l'âge de 28 jours

-le ciment témoin présente une faible porosité dans l'eau par rapport au sulfate dus au processus d'hydratation dans les ciments.

-les ciments avec ajout présente la faible porosité dans les sulfates par rapport à l'eau, cela est dus au processus d'hydratation et la précipitation du portlandite et sulfate à la face extérieure qui bloque les réactions d'échanges à l'extérieure.

V.6. Influence du rapport E/C= 0.70

V.6.1. La masse volumique

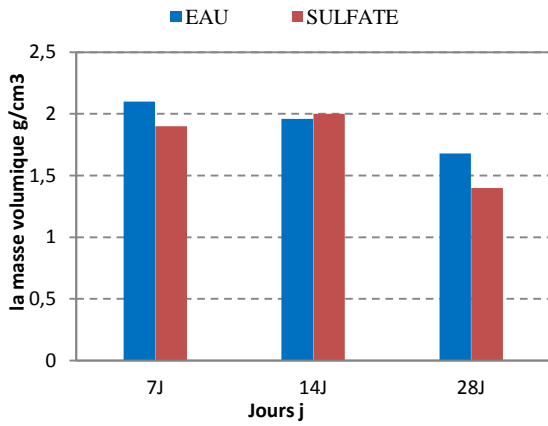


Figure V.9 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CT

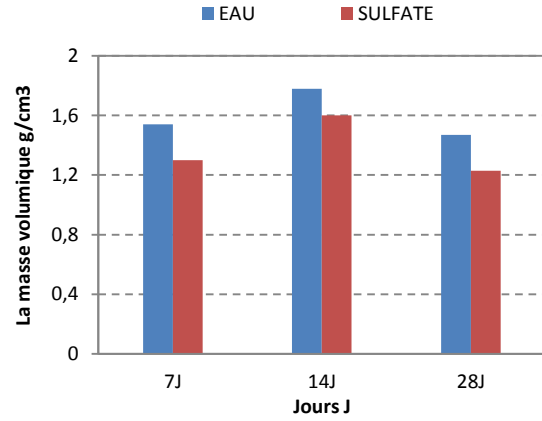


Figure V.10 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL15%

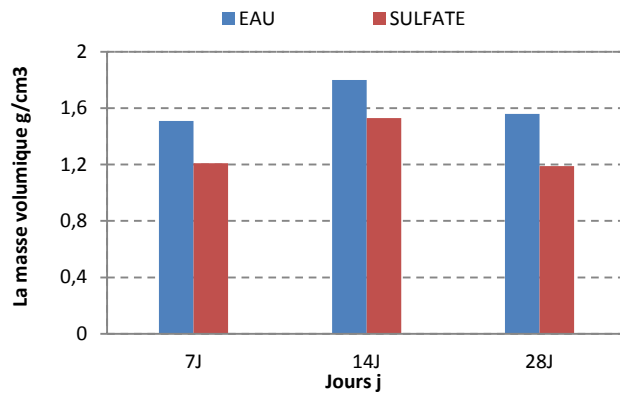


Figure V.11 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL30%

V.6.2. La résistance à la compression

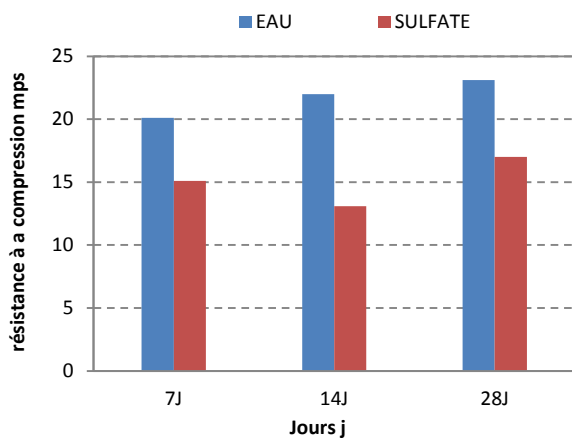


Figure V.12 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CT

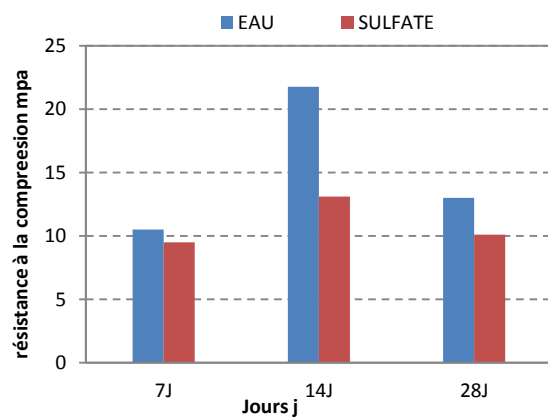


Figure V.13 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL15%

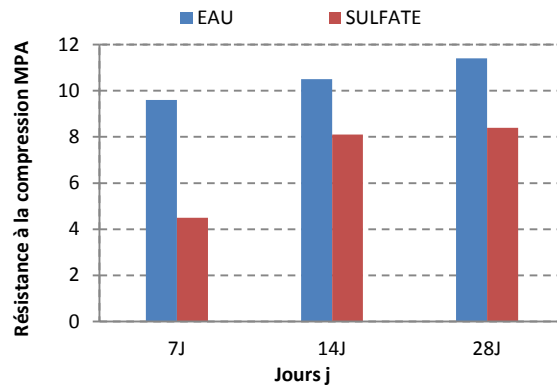


Figure V.14 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL30%

-Le mortier témoin présente une résistance à la compression et masse volumique importante comparable à celle du mortier ordinaire.

-Les résultats présentés montrent que le développement de la résistance à la compression et la masse en fonction de l'âge et le milieu de conservation dépend du rapport E/C. Cependant, il est aussi apparent que ceci est influencé par le taux de remplacement du ciment. Le ciment au laitier a une faible résistance à la compression initiale par rapport au ciment témoin, et ceci dépend parmi d'autres facteurs, du taux de remplacement ; plus le taux de remplacement est important, plus l'écart de différence de résistance n'est important. Mais après une période initiale de trois jours, la résistance du ciment au laitier commence à augmenter.

V.7. Influence du rapport E/C= 0.50

V.7.1. La masse volumique

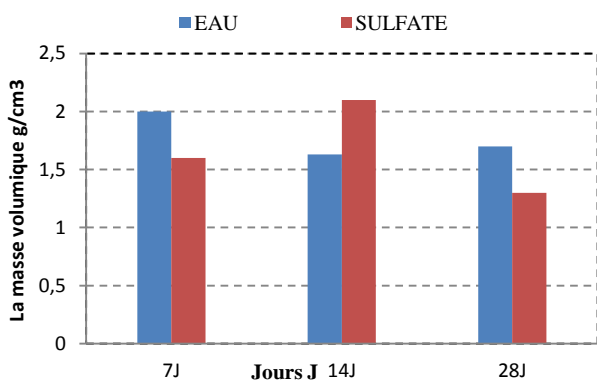


Figure V.15 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CT

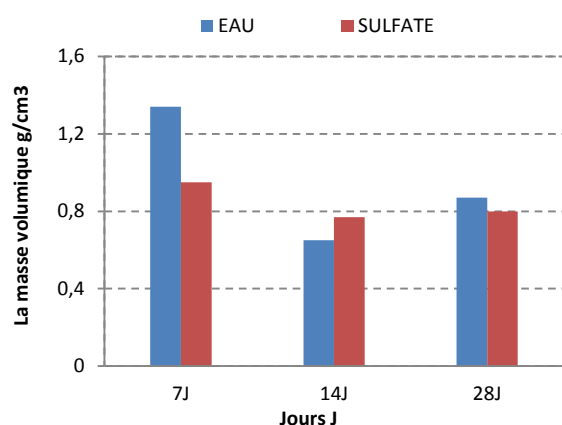


Figure V.16 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL15%

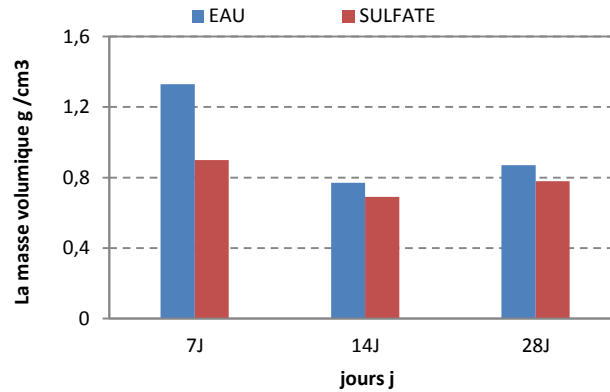


Figure V.17 : Masse volumique en fonction d'âge du ciment CL30%

V.7.2. La résistance à la compression

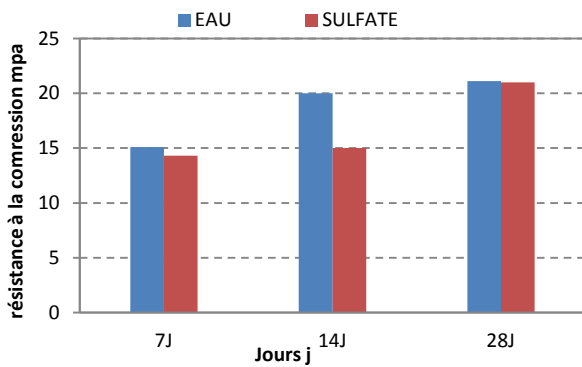


Figure V.18 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CT

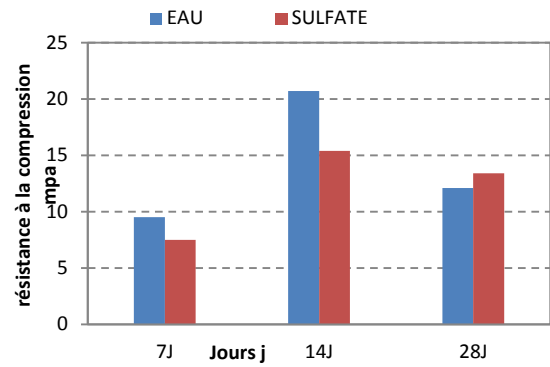


Figure V.19 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL15%

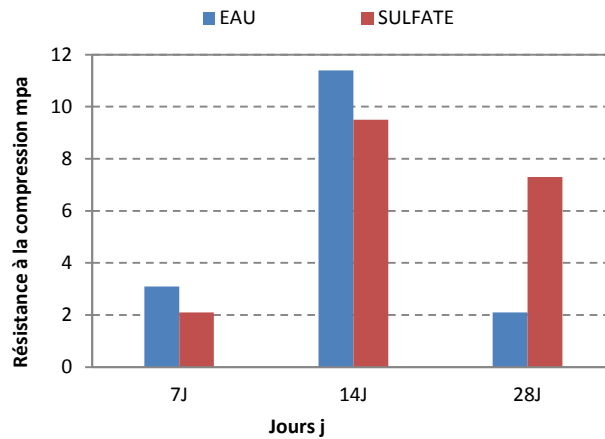


Figure v.20 : Résistance à la compression en fonction d'âge du ciment CL30%

-En ce qui concerne la masse volumique on remarque pour les différents âges augmentation progressive. L'ajout de laitier joue le rôle de remplissage par conséquent une bonne compacité est augmentation de la masse.

-L'évolution de la résistance à la compressions en fonction du taux de substitution du laitier il ya une diminution systématique de la résistance à la compression à l'égard du taux de remplacement du laitier particulièrement aux jeunes âges ce comportement est exprimé par des courbes décroissantes en fonction du taux de remplacement l'influence positive de laitier n'est pas remarquée devant les premiers jours car l'hydratation de laitier est lente

- On remarque pour l'âge de 28 jours la résistance du mortier dans le milieu de sulfate donne les meilleures résultats pour tous les types de mortiers cela est dus au phénomène de gonflement qui procure au ciment une bonne résistance dans les milieux de sulfates.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a traité l'effet de plusieurs paramètres influant l'hydratation du ciment au laitier. L'étude s'est étendue sur le mortier. l'examen des propriétés mécaniques et physique.

D'après les résultats obtenus, il apparait clairement la conservation à l'eau des mortiers avec et sans ajout à ces propriétés par rapport au sulfate, :

-Le remplacement partiel du ciment par le laitier engendre une réduction de la résistance à la compression et la porosité.

-L'incorporation du laitier dans le mortier conservé dans les sulfates améliore la résistance au jeune âge est confirmé que le laitier a une bonne tenue que le ciment ordinaire.

-Le taux optimal utilisé dans ce cas est de 30%. Le type de ciment utilisé avec le laitier a une influence considérable sur le taux de substitution

-Le rapport E/C joue aussi un rôle important dans le développement de la résistance et la porosité.

-un rapport E/C =0.64, présente une bonne fluidité par conséquence une bonne résistance et porosité faible.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[01] : FICHES TECHNIQUES TOME 1 « Les constituants des bétons et des mortiers ».

<http://www.infociments.fr/ciments/les-constituants-des-betons-et-des-mortiers>

[02] : Melle. SABRI Safia « Elaboration et détermination des propriétés d'un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles » Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed BOUDIAF » Année 2010-2011.

http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=737

[03]: 5385986b5ed8d.pdf.

<https://www.scribd.com/document/380212075/5385986b5ed8d-pdf>

[04] : Dreux. G.. « *Nouveau guide du béton* ». Eyrolles, Paris 1979.

[05] : « *Clauses techniques – ciments – CT 2/1994 (composition et spécifications)* ».

[06] : AFNOR. « *Bétons et constituants du béton : ciments et chaux* ». Tome 2. 3eme édition, AFNOR 1990

Administration des Ponts et Chaussées. Service du laboratoire d'essais des matériaux.

Site Web: <http://www.etat.lu/PCH/public/structureorg/labomater/publications/clauses/ct2.html>

[07] : chapitre III La composition chimique des clinkers.

https://www.academia.edu/23941697/Chapitre_I_I_I_La_composition_chimique_des_clinkers

[08] : BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris. P559.

[09] : DREUX. G et FESTA. J.. « *Nouveau guide du béton et ses constituants* ». 8^{eme} édition. France, Eyrolles 1998.

[10] : **Chapitre II** ; Le ciment Portland - ENSH

<https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Mat%C3%A9riaux%20de%20construction/Chapitre%20II%20-%20Le%20Ciment.pdf>

[11] : GHOMARI Fouad « SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION »

ANNEE UNIVERSITAIRE 2005 – 2006.

[12]: G. C. Bye, Portland Cernent: Composition, Production and Properties, Pergamon Press Ltd. , Oxford, 1983

[13]: S. N. Gosh, Advances in cement technology, Pergaman Press Ltd (1983)

[14]: R. H. Bogue, La chimie du ciment portland, Ed. Eyrolles, Paris, (1952)

[15]: G. C. Bye, Portland Cernent: Composition, Production and Properties, Pergamon Press Ltd. , Oxford, 1983

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[16]: J. Skalny et J. F. Young, "Mechanism of Portland Cement Hydration" 7th. Int. Congr.chem. ciment., Paris, 1980

[17]: M. Regourd, "L'hydratation du ciment portland", dans "Le béton hydraulique", Paris

Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1982

[18] : Cours université Sherbrooke « hydratation du ciment portland » chapitre 6, P58- 59-62. 2006

[19]: W. Lerch, "The influence of gypsum on the hydration and properties of Portland cement pastes", Roc ASTM, 46 1252 (1946)

[20] : G. Yamaguchi , K Takemoto, H. Uchikawa et Takagi S., "Researches on the influence of gypsum upon the rate of hydration of portland cement", J. Res. Onoda Cement Co., 12(46) 257 (1960)

[21]: A. Raccanelli , "Effet of additions of alcali sulfate and calcium sulfate on the initial reaction of hydration of portland cement", Int. Ital. Cem., 34(1) 3 (1964)

[22]: L. E. Copeland et Kantro D. L., "Hydration of portland cement" 5th. Int. Symp. Chem. Ceme., Tokyo. 1968, VII p.387

[23]: A. Bentur, " Effect of gypsum on the hydration and strength of C3S pastes", J. Am.Ceram. Soc., 59(5), 210 (1976)

[24]: 1. Jawed et J. Skalny, "Effect of gypsum on C3S hydration", Cem. Conc. Resc. , V 10p. 697-701, 1980

[25]: J. Skalny et J. F. Young, "Mechanism of Portland Cement Hydration" 7th. Int. Congr.chem., ciment., Paris, 1980

[26]: 1. Jawed, S. Goto et R. Kondo, "Hydration of C4AF in presence of Lime and sulfates", Cem. Concr. res., 6(4), 441 (1976)

[27] : VERNET, C. (1992) introduction à la physico-chimie du ciment portland; Deuxième partie : Chimie de 'hydratation, Techno des S.A. Grou w ciments Français. Département de recherche / Produits nouveaux.

[28] : LAP L ANTE, P. (1993) Propriétés mécaniques des bétons durcissant : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances. Paris, (s.éd.), 299 p.

[29] : CHAPITRE 2 « LE CIMENT DE LAITIER ACTIVE : LIANT PROMETTEUR ».

[30] : Matériaux-de-Construction-L2-GC-BOUBEKEUR-Toufik .pdf

<https://www.univ-chlef.dz/FGCA/wp-content/uploads/2020/11/Matériaux-de-Construction-L2-GC-BOUBEKE>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [31] : Bijen J., Sellevoid E.J., European Standardization, Use of addition, ACI International Conference of Fly ash, silicate fume and Natural pozzolanes in concrete supplementary papers, Istanbul, Turkey, pp.21-31, 1992 .
- [32] : M. Burteaux. Laitiers de haut fourneau. Technique de l'ingénieur, M 7 425. 1995. pp. 1-9.
- [33]: F.M. Léa. The chemistry of cement and concrete. «La chimie du ciment et du béton». Chemical publishing co. Inc. New York, N.Y. 1971.
- [34]: ALEXANDRE, J. SEBILEAU, J.L, CTPL 1988. Le laitier de haut-fourneau: élaboration, traitements, propriétés, emplois. C.T.P.L. (Ed), Paris, France, 340.
- [35] : KOMMAR. A.. « *Matériaux et éléments de constructions* ». Moscou, édition Mir, 1975
- [36]: OLIVIER. E.. « *Technologie des matériaux de constructions* ». Tome 2. Edition EM, 1978.
- [37]: Mehta P. K., “Supplementary cementing materials for concrete”, Ed. By V.Malhotra, Canada, 1, 1987
- [38]: Chang Z., Ai Qin W., Mingshu T., “The filling role of pozzolanic material”, Cement and Concrete Research, Vol. 26, N°. 6, pp. 943-947, 1996.
- [39]: Bijen J. Prof. Dr, “ Blast furnance slag ciment ”, 1996.
- [40]: Kobayashi K., Uno Y., “Influence of alkali on carbonation of concrete. 2. Influence of alkali in cement on rate of carbonatio of concrete”, Cem. Concr. Res., 20, 4, PP. 619-622, 1990.
- [41]: Loukhovski G., Pakhanov V.D., Clakocht V.A., “Chelotchimie tsmenty I Betony”, Kiev. Budivelnik, 1978, p. 184.
- [42]: Mehta P.K, “Pouzzolanes naturelles, matériaux complémentaires en cimentation pour le béton”, centre canadien de la technologie, rédacteur V. Malhotra, Canmet 1987.
- [43]: Iliencko V.M., Gontcharov V.I., Gontchar V.I., “Issledovanie, Fizikomekhanitsheskikh svoistv. Chlacosilikatnogo betona na mestykh materialakh krivbassa”, in trubobetonnie jelezo, betonnie konstruiis ispolzovaniem otkhodov gornorudnoy imetallurgitsheskoy promychlennosti, Krivoi rog.1978, p. 166-173.
- [44]: ILienko V. M., “Effektivnost ispolzovania chlakohtchelotchykh betonov chakhnom stroitelstv chakhtnoestritelstvo”, N°. 10, pp. 15-18, 1969.
- [45]: NKINAMUBANZI. P. C, BAALBAKI. M, BICKLEY. J et AITCIN.P.C..
«*L'utilisation de laitier d'Ecotrade pour la fabrication de bétons à haut rendement* ».
Université de Sherbrooke. Italie.
Site Web : <http://www.ecotrade.net>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [46]: ARABI. N.. « *Etude des briques silico – calcaires à base de laitier granulé* ». Thèse de magister. Université Badji Mokhtar Annaba, 1988.
- [47] : « *Revue de l'entreprise de Genie civil pour la sidérurgie* ».Genisider, El Hadjar Annaba.
- [48]: ABBAS (A.), CARCASSES (M.) et OLLIVIER (J.P.).-Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials and structures*, vol. 32, pp 3-8 (1999).
- [49] : Benaddi, EL hachemi. *Formulation et Caractérisation des Bétons Autonivelants pour les Travaux de Réparation*. Thèse de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2008.
- [50] : Cimbéton Collection technique Cimbéton .Tom 2. G11. Réédition janvier 2013
- [51] : BENCHIHEUB Djihen « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA COMPREHENSION DES PHENOMENES ET MECANISMES D'ACTION DES EFFETS DES ADDITIONS SUR LE COMPORTEMENT DES MATRICES CIMENTAIRES. » 2018/2019
- [52] : CHAPITRE III. « DURABILITE DU BETON VIS-A-VIS DES AGENTS AGRESSIFS » PDF.
- [53]: Groupement Belge du béton ; *Technologie du béton*, Edition 1998
- [54]: R.MIRAGLIOTTA ; « Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriquées-Pris en compte des effets de parois » ; thèse de doctorat ; 2000 ; Université de la Rochelle
- [55] : diplôme de Doctorat en Génie Civil « Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis » Présentée par : Drissi Mounisif Université de Biskra 2018.
- [56] : CHAPITRE 4 « CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX »
<http://thesis.univ-biskra.dz/1000/6/chapitre%2004.pdf>
- [57] : A.Nacéri et M.Benla « Effet de l'activation mécanique des ciment aux ajouts minéraux sur les caractéristiques mécaniques du mortier » laboratoire de Géomatériau, département de Génie civil, Université de M'sila,Algérie.Dcembre 2007.
<http://www.entp.edu.dz/revue/files/article/43/article%206.pdf>