

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la recherche scientifique

L'université Abderrahmane MIRA- Bejaia



Faculté de Technologie

Département Génie Civil

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en Génie Civil

Option : Structures

Thème

***Durabilité des bétons aux laitiers
de haut fourneau activés.***

Réalisé par :

M^{elle} : YAHY Nawal.

M^{elle} : FENNICHE Lynda.

Encadré par :

M^{me} : S. ATTIL.

Membres de jury :

M^{me} L. BOUKEMOUCHE

M^{er} A. TAHAKOURT

Promotion : 2022-2023

Remerciements

Tout d'abord nous remercions dieu le tout puissant qui nous a donné la patience et le courage afin d'achevé ce modeste travail.

*On tient à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promotrice **M^{me} S.ATTIL**, pour tout le temps qu'elle nous a consacré, et la confiance qu'elle nous a accordée en acceptant de nous encadrer. Son soutien constant, et ces précieux conseils, nous ont permis de mener à bien ce travail.*

*On tient à remercier vivement les membres de **JURY** d'avoir accepté d'analyser et examiner notre travail.*

*On remercie le doctorant **BELAID FAYCEL** qui nous a vraiment aidé au laboratoire.*

*On voudrait également adresser nos sincères remerciements à toute l'équipe technique du « **LTPEST** » de Bejaia.*

*Nos remerciements vont au directeur : **M^{er} S. ROUACHE**, qui nous accepté d'être parmi ses stagiaires pendant ces trois mois d'apprentissage.*

*Un grand merci à **M^{er} MEKKI TAHIR** pour leur soutien et surtout leur aide au laboratoire.*

*Un grand merci au technicien **Mr ZOUBIRI Djamel** du Laboratoire université de Bejaïa pour sa disponibilité et sa compréhension durant la réalisation de notre travail.*

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui nous ont soutenu de près ou de loin.

Et enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui nous ont enrichis avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir.

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste Travail
de fin d'étude à :*

*À mes chers parents **Laid** et **Ghania***

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma
considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et
mon bien être.*

À mes chers grands parents.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie.

*À toi mon fiancé **Idir***

*Une spéciale dédicace à cette personne qui compte énormément pour moi,
une personne à qui je porte beaucoup de tendresse et de respect, et qui a été à
mes côtés et m'a toujours soutenu et encouragé.*

*À mon unique et adorable frère **Bilal***

*Puisse Dieu vous garde, éclaire votre route et vous aide à réaliser à votre tour
vos vœux les plus chers.*

*À ma chère sœur **Chanez***

À tous les membres de ma famille, petits et grands.

*À ma binôme **Lynda** et sa famille.*

À tous ceux qui sont dans mes pensées et que Je n'ai pas cité.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, moyen et secondaire
ou de l'enseignement supérieur.*

Nawal.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mes chers parents **Allaoua et Lwiza***

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

*À Mon unique et cher frère **Safir**, tu es l'épaule sur laquelle m'appuyer, je te souhaite une vie pleine de succès et de réussite.*

*À mes chères amies : **Siham, Louiza***

À toute ma famille.

*À ma binôme **Nawal** et sa famille.*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit réalisé.

Je vous dis merci.

Lynda.

Résumé

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment est très importante, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du CO₂, les ajouts améliorent les propriétés du béton.

Le laitier de haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour sa qualité. La présente étude traite la durabilité (conservation dans différents milieux agressifs) des bétons activés par la chaux (CaO) et l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂).

Pour atteindre l'objectif visé nous avons incorporé le laitier dans différentes séries de béton, tout en substituant le ciment et en les activant avec de la chaux et l'hydroxyde de calcium.

L'étude de la durabilité a été effectuée en plusieurs étapes :

- L'effet des agressions chimiques : acides, sulfates, alcalins et neutre (HCL, Na₂SO₄, NaOH et l'eau distillé) sur les caractéristiques des bétons immergés dans ces différents milieux.
- L'essai ultra-sonique.
- L'analyse par DRX.

Mots clés : laitier, béton, durabilité, activation, ciment.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations

Introduction générale _____ **1**

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction _____ 3

I.2 Béton _____ 3

I.2.1 Définition _____ 3

I.2.2 La composition du béton _____ 3

I.2.2.1 Ciment _____ 4

I.2.2.2 Les granulats _____ 5

I.2.2.3 L'eau _____ 5

I.2.2.4 Les ajouts minéraux _____ 5

I.2.2.5 Les adjuvant _____ 5

I.2.3 Type de béton _____ 5

I. 3 Les déchets _____ 6

I.3.1 Définition des déchets _____ 6

I.3.2 L'origine de la production des déchets _____ 6

I.3.3 Les caractéristiques des déchets _____ 6

I.4 Le laitier de haut fourneau _____ 7

I.4.1 Définition	7
I.4.2 Les types de laitier	8
I.4.2.1 Le laitier cristallisé	8
I.4.2.2 Laitier vitrifié	9
I.4.2.3 Le laitier granulé	9
I.4.3 Historique sur la valorisation du laitier	9
I.4.4 Utilisation des laitiers de haut fourneau	10
I.4.5 Traitement du laitier au complexe sidérurgique d'EL HADJAR	10
I.4.5.1 Composition chimique	11
I.4.5.2 Granulométrie	11
I.4.5.3 Masse volumique	11
I.4.5.4 Hydraulicité de laitier granulé	11
I.4.6 Activation de laitier	11
I.4.7 Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus	12
I.4.7.1 Activation alcaline	12
I.4.7.2 Activation sulfatique	12
I.4.7.3 Activation calcio-sulfatique	13
I.4.7.4 Activation par clinker du ciment portland	13
I.4.8 Le rôle des activants	14
I.5 Durabilité des bétons	14
I.5.1 Définition de la durabilité	14
I.5.2 Paramètres de la durabilité	14
I.5.2.1 Paramètres liés au matériau	14
I.5.2.2 Paramètres liés à l'environnement	14
I.5.2.3 Paramètres liés à la structure	15
I.5.2.4 Paramètres économiques	15

I.5.3 Propriétés de la durabilité	15
I.5.3.1 Attaque des bétons par les Acides et les Sulfates	15
I.5.3.2 Résistance au gel-dégel	15
I.5.3.3 Carbonatation	15
I.5.4 Influence des ajouts minéraux sur la durabilité du béton	16
I.6 Conclusion	16

Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés

II.1 Introduction	17
II.2 Les essais sur les granulats	17
II.2.1 Analyse granulométrique (NF EN 933-1)	18
II.2.1.1 Analyse granulométrique des gravillons	18
II.2.1.2 Analyse granulométrique des sables	21
II.2.1.3 Module de finesse (Mf)	25
II.2.2 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3)	25
II.2.3 Détermination des masses volumiques	28
II.2.3.1 Détermination des masses volumiques réelle (absolue ps) (NF EN 1097-6)	28
II.2.3.2 Détermination des masses volumiques apparente (NF EN 1097-3)	30
II.2.4 Essai Los Angeles (NF EN 1097-2)	32
II.2.5 Essai Micro-Deval (NF EN 1097-1)	34
II.2.6 Détermination de la propreté	35
II.2.6.1 Equivalent de sable (NF EN 933-8)	35
II.2.6.2 Blue méthylène (NF EN 933-9)	38
II.3 L'adjuvant	40
II.4 L'eau	41
II.5 Laitier granulé broyé de haut fourneau	41

II.5.1 Analyse par diffraction des Rayons X du laitier de haut fourneau (DRX)	41
II.5.2 Analyse granulométrique par laser	43
II.6 Ciment	43
II.7 Les activateur	43
II.7.1 La chaux CaO	44
II.7.2 Hydroxyde de calcium	44
II.8 Conclusion	44

Chapitre III : Etude de formulation des bétons

III.1 Introduction	45
III.2 Formulation des bétons	45
III.3 Méthodes de composition de béton	45
III.4 Méthode de DREUX GORISSE	45
III.4.1 Dosage en ciment	50
III.4.2 Dosage en eau	50
III.4.3 Dosage des granulats	51
III.5 Densité théorique du béton frais (Δ_0)	53
III.6 Récapitulation de la compositions du béton	53
III.7 Confection des éprouvettes	54
III.8 Béton à base de laitier sans activation	55
III.8.1 Dosage en fonction de l'ajout de laitier de haut fourneau (EL-HADJAR ANNABA)	55
III.8.1 Récapitulation de la composition des différentes gâchées des bétons sans activation	56
III.9 Bétons à base de laitier activé	57
III.9.1 Activation du laitier	57
III.9.2 Composition des différentes gâchées avec activation des laitiers	58
III.10 Conclusion	58

Chapitre IV : Essais sur bétons et résultats

IV.1 Introduction	59
IV.2 Essais sur les bétons	59
IV.2.1 Essais sur les bétons frais	59
IV.2.1.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF p18-451)	59
IV.2.1.2 Mesure des masses volumiques fraîches ρ	61
IV.2.2 Essais sur les bétons durcis	62
IV.2.2.1 Mesure des masses volumiques	63
IV.2.3 Essai de la durabilité	64
IV.2.3.1 Variation de la masse	66
IV.2.3.2 Variation des dimensions	69
IV.2.4 Essai de compression (NF EN 12390-3)	69
IV.2.5 Essai d'auscultation sonore (ULTRA-SON)	71
IV.2.5.1 Mouillage-Séchage	72
IV.2.6 Analyse par DRX	72
IV.3 Conclusion	75
Conclusion générale	76

Références bibliographique

Annexes

Liste des figures

Chapitre I :Etude bibliographies		
Figure I.1	Schéma de principe d'un haut fourneau.	7
Figure I.2	Laitier cristallisé et vitrifié de haut fourneau.	8
Figure I.3	Processus d'élaboration des différents types laitiers.	8
Figure I.4	Domaine de stabilité du gel d'alumine.	12
Figure I.5	Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)_2 .	16
ChapitreII :Caractérisation des matériaux utilisés		
Figure II.1	Opération de quartage.	18
Figure II.2	Analyse granulométriques des gravillons et sable.	24
Figure II.3	Grille à fente utilisé pour l'essai d'aplatissement.	25
Figure II.4	Conservation des échantillons.	28
Figure II.5	Pycnomètre contenant l'échantillon des granulats saturés.	29
Figure II.6	Mesure des masses volumiques apparentes du sable 0/4 et du gravier 8/15	31
Figure II.7	L'état de la classe granulaire 10-14 après 500 rotations.	33
Figure II.8	Appareil de Micro-DEVAL.	34
Figure II.9	L'état de la classe granulaire 10-14 après 1200 rotations.	34
Figure II.10	Mesure de la hauteur du sable 0/4 et 0/1.	37
Figure II.11	Appareil nécessaire de l'essai.	39
Figure II.12	Résultat de l'essai à la tache de sable 0/4.	39
Figure II.13	Résultat de l'essai à la tache de sable 0/1.	39
Figure II.14	Superplastifiant MasterGlenium SKY 841.	40
Figure II.15	Laitier granulé broyé de haut fourneau.	41

Figure II.16	Appariel de diffraction par des Rayons X.	42
Figure II.17	Spectre DRX de LHF.	42
Figure II.18	Granulométrie laser du LHF.	43
Figure II.19	La chaux utilisées pour l'activation du LHF.	44
Figure II.20	Hydroxyde de calcium utilisé pour l'activation du LHF.	44
Chapitre III :Etude de formulation des bétons		
Figure III.1	Courbe de référence.	47
Figure III.2	Les pourcentages dedifférentes fractions granulaires.	48
Figure III.3	Courbe de mélange selon DREUX GORISSE.	50
Figure III.4	Moules cubiques 10x10x10 cm ³ .	54
Figure III.5	Les pourcentages des différentes fractions granulaires de la composition du béton à 5% du LHF.	56
Figure III.6	Le pourcentage des differents composants du béton à base de L.H.F activé.	57
Chapitre IV : Essais sur bétons et résultats		
Figure IV.1	Consistance du béton au laitier.	59
Figure IV.2	Variation de l'affaissement des différentes séries de béton.	60
Figure IV.3	La masse volumique de béton frais.	61
Figure IV.4	La masse volumique fraiche des différentes séries de béton.	62
Figure IV.5	Conservation des éprouvettes du béton au LHF dans l'eau.	62
Figure IV.6	Masses volumiques des différentes séries de béton en fonction du temps.	63
Figure IV.7	Eau distillée.	64

Figure IV.8	Mesure de la masse et les dimensions des cubes.	65
Figure IV.9	Conservation dans un milieu neutre.	65
Figure IV.10	Acide hydrochlorique HCl.	65
Figure IV.11	Préparation de la solution de 5% de HCl.	65
Figure IV.12	Conservation dans un milieu acide	65
Figure IV.13	Sulfate de sodium Na ₂ SO ₄ .	65
Figure IV.14	Agitation de la solution de sulfate de sodium.	66
Figure IV.15	Conservation dans un milieu sulfatique.	66
Figure IV.16	L'hydroxyde de sodium NaOH.	66
Figure IV.17	Agitation de la solution de l'hydroxyde de sodium.	66
Figure IV.18	Conservation dans un milieu basique.	66
Figure IV.19	Photos des cubes conservé dans différents milieux à 35 jours.	67
Figure IV.20	Variation de la masse dans un milieu acide en fonction du temps.	67
Figure IV.21	Variation de la masse dans un milieu basique en fonction du temps.	68
Figure IV.22	Variation de la masse dans un milieu neutre en fonction du temps.	68
Figure IV.23	Variation de la masse dans un milieu sulfaté en fonction du temps.	69
Figure IV.24	Eprouvettes de béton lors de l'écrasement après 35 jours de conservation dans des milieu agressifs.	70
Figure IV.25	Variation de la résistance à la compression à 35 j des bétons Conservé dans des milieu agressifs.	70
Figure IV.26	Mesure du temp de propagation des ondes.	71

Figure IV.27	Spectre DRX du béton à 5% du LHF conservé dans un milieu neutre.	73
Figure IV.28	Spectre DRX du béton à 5% du LHF activé avec CaO conservé dans un milieu sulfaté.	73
Figure IV.29	Spectre DRX du béton à 5% du LHF activé avec CaO conservé dans un milieu Acide.	74
Figure IV.30	Spectre DRX du béton à 5% du LHF activé avec Ca(OH) ₂ conservé dans un milieu basique.	75

Liste des tableaux

Chapitre I :Etude bibliographies		
Tableau I.1	Types de ciment.	4
Chapitre II:Caractérisation des matériaux utilisés		
Tableau II.1	Analyse granulométrique des gravillons 15/25.	19
Tableau II.2	Analyse granulométrique des gravillons 8/15.	20
Tableau II.3	Analyse granulométrique des gravillons 3/8.	21
Tableau II.4	Analyse granulométrique du sable 0/4.	22
Tableau II.5	Analyse granulométrique du sable 0/1.	22
Tableau II.6	Analyse granulométrique du sable mélange 0/1 et 0/4.	23
Tableau II.7	Valeurs du module de finesse des sables.	25
Tableau II.8	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25.	26
Tableau II.9	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 8/15.	27
Tableau II.10	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 3/8.	28
Tableau II.11	Résultats des masses volumiques absolues des granulats.	30
Tableau II.12	Résultats des masses volumiques apparentes.	32
Tableau II.13	Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 8/15.	33
Tableau II.14	Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15.	35
Tableau II.15	Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.	36
Tableau II.16	Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/1.	36
Tableau II.17	Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/4.	37
Tableau II.18	Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/1.	37
Tableau II.19	Résultats d'équivalent de sable du sable 0/4.	38
Tableau II.20	Résultats d'équivalent de sable du sable 0/1.	38

Tableau II.21	Résultat au bleu de méthylène de sable 0/4.	40
Tableau II.22	Résultat au bleu de méthylène de sable 0/1.	40
Chapitre III :Etude de formulation des bétons		
Tableau III.1	Les différents pourcentages des granulats.	47
Tableau III.2	Les valeurs des tamisâts (%) de la courbe de mélange.	49
Tableau III.3	Volumes absolus des constituants solides.	52
Tableau III.4	Dosage des constituants solides en Kg/m ³ .	52
Tableau III.5	Les densités des constituants du béton en kg/m ³ .	53
Tableau III.6	Récapitulatif de la composition du béton.	53
Tableau III.7	Les Masses des constituants du béton pour une gâchée.	55
Tableau III.8	Composition de béton à 5% du LHF sans activation	56
Tableau III.9	Dosages des activateurs de laitiers dans les différentes gâchées du béton.	58

Liste des notations

EN : Norme européenne.

NF P : Norme française.

BLHF : Béton laitier de haut fourneau.

LHF : Laitier de haut fourneau.

MF : Module de finesse.

E/C : Rapport eau /ciment.

ρ_s : La masse volumique absolue.

ρ_p : La masse volumique apparente.

MDE : Micro Deval.

LA : Los Angeles.

VB : Valeur au Bleu.

W : La teneur en eau.

f : La teneur en fines.

A : Aplatissement.

G/S : Rapport graviers/sables.

C/N : Rapport massique Carbone Sur Azote.

DRX : Diffraction des Rayons X.

CPA : Ciment portland artificiel.

CPJ : Ciment Portland aux ajouts.

CHF : Ciment de haut fourneau.

CLK : Ciment de laitier au clinker.

CPZ : Ciment pouzzolanique.

CLC : Ciment aux laitiers et aux cendres.

BAP : Béton auto plaçant.

BHP : Béton de haute performance.

BFUP : Béton fibré ultra performant.

CSH : Silicate de calcium hydraté.

R_c : Refus cumulé.

Introduction générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, il est présent dans tous les secteurs de la construction, ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière de bâtiments et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité. C'est un matériau minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau et des granulats. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles puis progressivement il devient dur et très résistant.

La tendance d'utilisation des ajouts cimentaires ne cesse d'accroître, car c'est une façon efficace pour l'industrie du ciment de diminuer ses émissions de CO₂, qui représentent 5% du total des émissions anthropiques dans le monde [1]. En outre, elle contribue à la valorisation des sous-produits et ainsi, à augmenter la production du ciment tout en préservant l'environnement.

Le laitier de haut fourneau granulé est un sous-produit issu de l'industrie de la fonte, est parmi les ajouts les plus utilisés dans le monde, il est utilisé comme ajout cimentaire depuis une centaine d'années. Le processus de granulation qui lui confère son caractère vitreux et ses propriétés de liant hydraulique résulte d'une longue démarche d'optimisation de la part des sidérurgistes pour permettre sa valorisation. Les ciments au laitier ont une faible empreinte carbone. Ils présentent par ailleurs une grande durabilité et une haute résistance aux attaques d'agents agressifs comme les chlorures et les sulfates, ce qui les rend particulièrement performants en milieu marin par exemple [2]. La connaissance industrielle du laitier et les recherches effectuées sur ce matériau ont permis de mettre en évidence des paramètres liés à sa réactivité au milieu cimentaire, comme sa composition ou sa finesse de broyage.

La durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, et aussi de l'agressivité de son environnement. Un élément en béton qui subit des cycles de chargement et de déchargement ou de mouillage et de séchage, par exemple, peut se fissurer à cause de ces cycles. Des agents agressifs extérieurs pénétreront facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées. Ces agents agressifs peuvent, par la suite, réagir avec les hydrates pour diminuer davantage la capacité portante de l'élément.

Le présent travail a pour objectif d'étudier la durabilité des bétons aux laitiers de haut fourneau activés (Ces laitiers utilisés comme substitut au ciment), en analysant leur comportement dans des milieux agressifs (mouillage-séchage, sulfates, acides, chlorures et neutre).

Introduction générale

Pour cela nous avons réparti notre travail comme suit :

- Introduction générale
- Le premier chapitre est l'étude bibliographique, qui présente des généralités sur les bétons et laitier de haut fourneau et sa durabilité.
- Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés.
- Le troisième chapitre expose l'étude de formulation des bétons.
- Le quatrième chapitre concerne les essais sur bétons et résultats.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale, qui rappelle les objectifs de notre travail, ainsi que les principales constatations obtenues.

Chapitre I :

Etude bibliographique

1.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons une étude bibliographique sur les caractéristiques du laitier de haut fourneau et de mettre en évidence et analyser les principaux facteurs qui influent sur la durabilité du béton en Algérie, ainsi que la performance du béton à base de laitier à l'état frais et à l'état durci.

Enfin, une synthèse des travaux de recherche réalisés sur le laitier algérien (d'El Hadjar) sera présentée.

1.2 Béton

1.2.1 Définition

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde .En effet, sa mise en place, son coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages.

Il est constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la majorité des cas , le ciment est le ciment portland qui est obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux , de la silice , de l'alumine et de l'oxyde de fer cuit à la température de clinkérisation puis broyé avec le gypse.

1.2.2 La Composition du béton

Le béton est composé de ciment, de granulats (sable et gravillons), d'eau, avec éventuellement, une addition minérale, un ou plusieurs adjuvants, dans tous les cas, une certaine quantité d'air est présente dans le béton. Sa composition varie en fonction des différents composants utilisés ainsi que leur proportion dans le mélange.

Le mélange ciment/eau forme une pâte ou colle qui durcit. Cette pâte est l'élément actif du béton puisqu'elle va enrober chaque granulats, jouant le rôle de lubrifiant et de colle qui assure le durcissement du béton.

Les granulats (le gravier et le sable) constituent le squelette, l'ossature du béton c'est grâce à eux que le béton est un matériau économique car en met un maximum.

L'assemblage des granulats et de la pâte forme le béton : un empilement de grains de différentes dimensions et de granularité étendue, qui passe d'un état frais, pâteux, à un état solide.

I.2.2.1 ciment**Définition**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker.

Les différents Types de ciments

Les ciments sont composés de clinker et des constituants secondaires, ils sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [3].

Ces types de ciment doivent être conformes au tableau I-1

Tableau I.1 : Types de ciment

Types de ciment	Notation	% Clinker(K) (y compris le gypse)	% Autres constituants	% Constituants secondaires
Ciment portland	CPA-CEM I	95-100	-	0-5
Ciment portland composé	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20	-
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35	-
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	0-5
Ciment pouzzolanique	CPZ- CEM IV/A	65-90	10-35	0-5
	CPZ- CEM IV/B	45-64	36-55	0-5
Ciment aux laitiers et aux cendres	CLC- CEM V/A	40-64	18-30	18-30
	CLC- CEM V/B	20-39	31-50	18-30

1.2.2.2 Les granulats

C'est un ensemble de grains minéraux ou de petits morceaux de roches de dimensions comprises entre 0 et 125mm destinés à réaliser des ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment [4].

1.2.2.3 L'eau

C'est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux.

1.2.2.4 Les ajouts minéraux

Les additions minérales sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substitués au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions sont variées : le laitier granulé de haut fourneau, les calcaires, les pouzzolanes naturelles (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les cendres volantes [5].

1.2.2.5 Les adjuvants

Un adjuvant est un produit qui est ajouté en faible proportion, il améliore les propriétés du béton, en général chaque adjuvant a une action principale qui définit et d'après laquelle il est classé, cependant il peut présenter d'autres actions secondaires [6].

On peut citer :

- Retardateur et accélérateur de prise.
- Plastifiants.
- Les entraîneurs d'air.
- Hydrofuges de masse.
- Antigels.
- Produits de cure.

1.2.3 Type de bétons

Ci dessous, les différents types de bétons :

- Béton auto plaçant (BAP)
- Béton de haute performance (BHP)
- Béton fibré ultra performant (BFUP)
- Béton ordinaire
- Béton armé
- Béton précontraint

- Béton fibré
- Béton projeté
- Béton drainant
- Béton lourd
- Béton léger
- Béton désactivé

1.3 Les déchets

1.3.1 Définition des déchets

Un déchet correspond à tout matériau, substance ou produit qui a été jeté ou abandonné car il n'a plus d'utilisation précise.

Selon la loi du 15 juillet 1975, un déchet est considéré comme constituant: « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon »[7].

1.3.2 L'origine de la production des déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- ***Biologiques*** : tout cycle de vie produit par le métabolisme.
- ***Chimiques*** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès qu'on veut obtenir un produit à partir de deux autres ou on produira un quatrième.
- ***Technologiques*** : tout procédé industriel conduit à la production de déchets.
- ***Ecologiques*** : les activités de la dépollution (eau, air,...) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.
- ***Economiques*** : les produits ont une durée de vie limitée.
- ***Accidentelles*** : l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets [8].

1.3.3 Les Caractéristiques des déchets :

On caractérise les déchets par quatre paramètres essentiels suivants :

- **La densité** : la connaissance de la densité est d'une grande importance pour le choix des moyens des collectes et de stockage. C'est pourquoi on peut avoir une densité en poubelle, une densité en décharge.....etc.
- **Le degré d'humidité** : des ordures renferment une suffisante quantité d'eau variant en fonction des saisons et le milieu environnemental. Cette eau a une grande influence sur la rapidité de la décomposition des matières qu'elles renferment et sur le pouvoir calorifique des déchets.
- **Le pouvoir calorifique** : le pouvoir calorifique est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité du poids en ordures brutes.
- **Le rapport des teneurs en carbone et azote** : le rapport C/N a été choisi comme critère de qualité des produits obtenus par le compostage des déchets. Il est d'une grande importance pour le traitement biologique des déchets, car l'évolution des déchets fermentés peut être suivie par la détermination régulière de ce rapport [8].

1.4 Le laitier de haut fourneau

1.4.1 Définition

Le laitier est un sous- produit important de l'industrie sidérurgique, résultant de l'élaboration de la fonte

Le laitier de haut fourneau résulte de la fusion de la gangue de la minerai de fer, des cokes et des additions minérales, un fondant, généralement à base de chaux est introduit pour abaisser le point de fusion de la gangue et obtenir le laitier à une température de 1400 à 1500(C°) dans le haut fourneau.

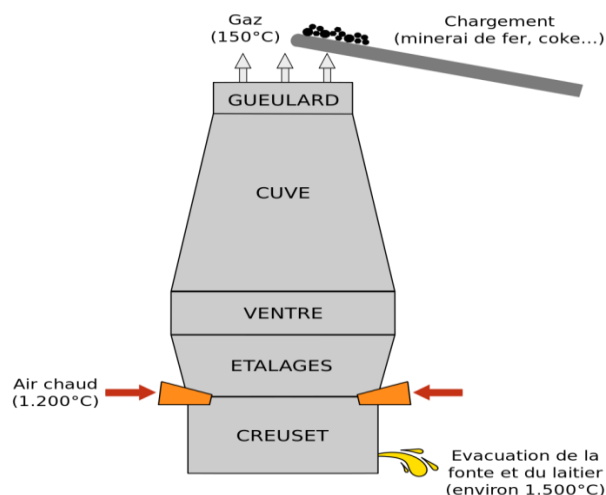


Figure 1.1 : schéma de principe d'un haut fourneau.

Les principaux composants chimique de ce type de laitier sont : la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la magnésie (MgO) qui représentent 95 à 97 % de la composition totale de laitier.

On distingue deux formes minéralogiques différentes de laitier :

Le laitier vitrifié (granulé) : obtenu par refroidissement rapide par trempe : possède une structure vitreuse riche en énergie lui conférant une hydraulicité latente.

Le laitier cristallisé : obtenu par refroidissement lent : il à une structure minéralogique cristalline stable et son hydraulicité si elle existe n'est que modeste [9].



LAITIER CRISTALLISE



LAITIER VITRIFIE

Figure I.2 : laitier cristallisé et vitrifié de haut fourneau.

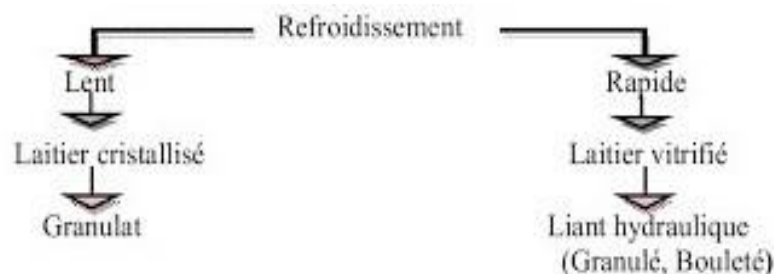


Figure I.3 : Processus d'élaboration des différents types de laitiers.

1.4.2 Les types de laitier

1.4.2.1 Le laitier cristallisé:

Le laitier liquide à 1300C°/1500C° est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulé, après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium [10].

1.4.2.2 Laitier vitrifié :

Brusquement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques.

1.4.2.3 Le laitier granulé :

Pour lequel le refroidissement se fait selon deux formes :

Le laitier liquide est versé dans de grands bassins d'eau où il se transforme en sable grossier de granulométrie 0/5 qui est le laitier granulé, cette méthode de granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation pour faciliter la manutention du laitier.

Il peut être trempé par des jets d'eau alors qu'il s'écoule à la sortie du haut fourneau, c'est le procédé utilisé pour la granulation du laitier d'EL HADJAR [11].

1.4.3 Historique sur la valorisation du laitier

Dès le XVII^{ème} siècle, Belidor et S.Vab recommandaient le laitier broyé comme masse d'addition au mortier de chaux. Au XIX^{ème} siècle, Vicat avait entrevu les propriétés hydrauliques de ce produit. Enfin, en 1862, Hangen a pu confirmer par des essais ces propriétés [12].

Au début du XX^{ème} siècle, une première utilisation du ciment au laitier a été entreprise en Allemagne, puis en France. Puis, suite à la première guerre mondiale et à un usage massif en travaux maritimes, le ciment au laitier a été utilisé en grande quantité. Son utilisation dans le domaine cimentaire est régie par la norme NF P 18-506 [12] [13].

L'utilisation du laitier granulé dans le béton a été mise en œuvre à la fin de l'année 1950 dans plusieurs pays tels que l'Australie, le Japon, le Canada, etc. Tandis que son emploi dans les constructions routières n'a commencé qu'en 1960 en France [14].

Une importante production de laitier a été donc enregistrée annuellement et son stockage sous forme de collines artificielles a posé de sérieux problèmes écologiques. D'où l'importance de valoriser ce sous-produit, notamment dans le domaine du génie civil.

Actuellement l'utilisation des ciments au laitier est estimée à 20% de la production totale en Europe. Par contre, en Algérie, cette utilisation reste toujours timide et ce, malgré une production conséquente [15].

1.4.4 Utilisation des laitiers de haut fourneau

➤ ***En cimenterie :***

L'emploi du laitier granulé en cimenterie est doublement important, car il permet à la fois des économies considérables d'énergie (réduction du combustible de 30 à 40 %), et permet d'obtenir des ciments présentant des propriétés variées.

Le laitier peut produire un liant hydraulique de plusieurs façons. Premièrement, il peut être mélangé à du calcaire et être utilisé comme matière première pour produire du ciment Portland par le procédé à sec. Le clinker obtenu à partir de ces matériaux est souvent utilisé avec le laitier dans la fabrication du ciment portland au laitier.

Cette utilisation du laitier est économique (car la chaux est présentée sous forme de CaO de sorte que l'on n'a plus à fournir l'énergie nécessaire pour la décarbonatation.

Deuxièmement, dans la plupart des pays, le laitier granulé et broyé est utilisé dans le ciment portland comme ajout pour fabriquer des ciments portland au laitier. Troisièmement, le laitier du haut fourneau granulé broyé à une finesse appropriée peut être utilisé seul comme liant mais en présence d'un catalyseur à base d'alcalin [16].

➤ ***Pour la confection des bétons :***

Dans un béton, le squelette granulaire (sable et granulats naturels) peut être ; remplacé par le laitier vitreux et le laitier cristallisé concassé respectivement).le laitier concassé forme d'excellents granulats pour le béton.

De même le laitier granulé entre dans la confection des bétons légers (bétons cellulaires), et les briques de laitiers [16].

➤ ***Pour les travaux routiers :***

Les utilisations concernent la construction des chaussées, des routes, autoroutes et les assises où on peut utiliser soit le laitier granulé où le laitier concassé [16].

1.4.5 Traitement du laitier au complexe sidérurgique d'EL HADJAR

Le complexe sidérurgique d'El HADJAR est équipé de deux hauts fourneaux de grandes quantités de scories (environ 380 kg par tonne de fonte). En fonctionnement typiquement, ces deux hauts fourneaux peuvent produire 500 000 tonnes de mâchefers bruts par année, son taux de granulation varie selon les besoins.

1.4.5.1 Composition chimique

La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la qualité du fondant, la nature du combustible et le procédé employé. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux (CaO) de 30 à 50 %. La silice (SiO₂) de 28 à 38 %, l'alumine (Al₂O₃) de 8 à 24 %, le soufre (S) de 1 à 2.5 %, Magnésium (MgO) environ 8%, l'oxyde de fer (Fe₂O₃) environ 11%.

1.4.5.2 Granulométrie

Le laitier granulé se présente sous forme d'un gros sable de granulométrie 0/5 et de module de finesse voisin de 3, par contre le laitier vitrifié est sous forme de poudre.

1.4.5.3 Masse volumique

La masse volumique apparente du laitier granulé peut varier de 900 à 1000 Kg/m³ et la masse volumique absolue varie de 2800 à 3000 Kg/m³.

1.4.5.4 Hydraulité du laitier granulé

L'hydraulité du laitier vitrifié par trempe est sa faculté d'évoluer, sous l'effet d'une activation basique (attaque des grains vitreux par une solution basique) vers son plus bas niveau d'énergie en formant des produits d'hydratation solides et ceci grâce à sa structure vitreuse, irrégulière et riche en énergie, cette propriété dépend essentiellement de [11]:

- la composition chimique du laitier
- la finesse des particules du laitier
- le degré de désordre des liaisons
- la température d'hydratation du système et sa concentration en alcalin

1.4.6 Activation du laitier

Lors du contact entre le laitier et l'eau, il se produirait une première réaction. Le calcium et l'alumine passent en solution et forme un gel d'alumine Al(OH)₃. Ce gel se forme entre un pH de 4 et jusqu'à un pH compris entre 8,5 et 10 comme indiqué sur la figure I.4. Ce gel bloque la poursuite de la dissolution du laitier et donc de son hydratation. Ce phénomène définit le laitier de haut fourneau comme étant un matériau hydraulique latent. Il est nécessaire qu'un activateur engage la dissolution de ce gel, afin de permettre la poursuite de l'hydratation.

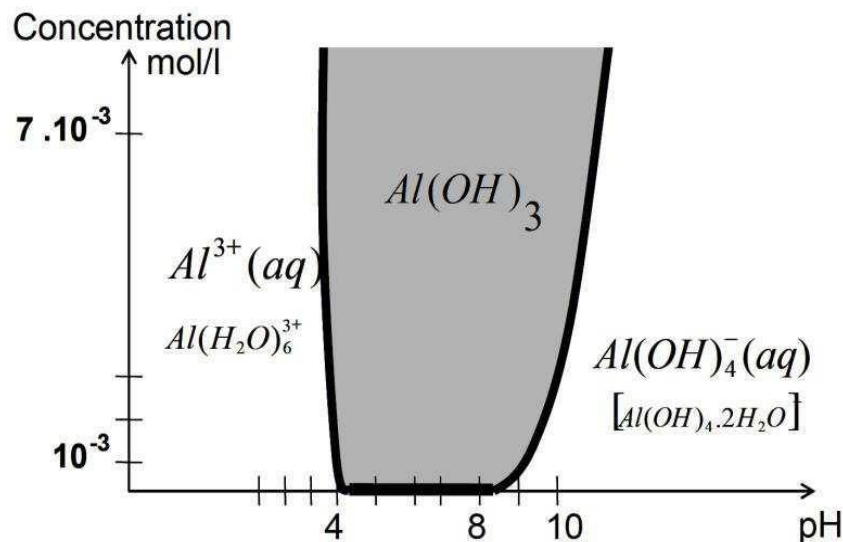


Figure I.4 : Domaine de stabilité du gel d'alumine.

On caractérise l'activation par le mode d'action chimique qu'elle met en jeu, [NF P 98-107, 2009].

L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif :

L'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate.

1.4.7 Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus

1.4.7.1 Activation alcaline

Elle peut être sodique ou calcique. Le laitier est activé à la chaux, c'est l'activation calcique. Il se forme en présence d'eau comme produit d'hydratation du silicate de calcium CSH, de l'aluminate tétra calcique C_4AH_8 [17].

Les adjuvants à base de soude sont très efficaces pour activer les laitiers. On utilise principalement : la soude caustique ; Le carbonate de sodium ; l'aluminate de sodium, le silicate de sodium, le chlorure de sodium et le méta silicate de sodium.

1.4.7.2 Activation sulfatique

Le laitier est activé par les sulfates de calcium. La réaction est assez lente, et il se forme les composés hydratés suivants : CHS, $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ et $Al(OH)_3$. Les sulfates de calcium utilisés principalement sont les suivants : le gypse naturel : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; le semi hydrate : $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$; l'anhydrite : $CaSO_4$ et le phosphogypse.

Lors de l'activation sulfatique par le gypse, l'hydratation est lente. L'action

accélétratrice sur le laitier du sulfate de chaux, aidé de quelques pour cents de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de clinker portland est à la base de la prise et du durcissement des ciments sur sulfatés, c'est à dire des ciments constitués essentiellement de laitier et d'anhydrite (CaSO_4) [16].

1.4.7.3 Activation calcio - sulfatique

Elle est obtenue par un mélange de gypse et de la chaux et conduit aussi à la formation de CSH mais de l'aluminate tétra calcique C_4AH_8 et alumine sont remplacés par de l'étringite, dont la texture en aiguille disposées en touffes est plus favorable à la réticulation en réseau [18].

1.4.7.4 Activation par le Clinker du ciment portland

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux développe un PH égale à 12 (basicité de la solution sursaturée de la chaux) ce qui favorise la dissolution du verre du laitier. L'absence du réseau de SiO explique la facilité de l'activation du laitier.

Selon (Guetteche et Houari, 2002), quand on mélange le laitier finement broyé avec l'eau, les ions dissous sont presque inexistant, on remarque une faible conductivité qui ne dépasse pas 0,6 ms/cm pour une surface spécifique du laitier de $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Par contre avec l'ajout de 19 % du CPA et 5 % du gypse, la conductivité augmente considérablement. Selon les étapes suivantes:

- La dissolution des constituants du clinker et ceux du gypse.
- Les réactions continuent probablement pour former l'étringite et le CSH, ainsi la solution deviendra riche en Ca^{++} , la conductivité atteint 12 ms/cm.
- Le point de saturation en chaux est atteint, la portlandite se précipite, la conductivité se baisse après un pic de 12.5 ms/cm.
- La période finale est caractérisée par accélération des réactions et la Précipitation de la portlandite, les ions sont consommés, la conductivité diminue lentement.

La plupart des ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté (CSH) du même type que celui formé durant l'hydratation du ciment portland. Cette réaction est généralement lente, et peut se développer sur plusieurs semaines [19].

1.4.8 Le rôle des activants

A partir des différents types d'activations, on peut déduire le rôle des activants :

- Ils accélèrent la solubilité des constituants du laitier (ils répondent à la condition du PH).
- Favorables à la formation de quelques hydrates stables.
- Favorables à la formation du réseau de la structure de la pâte du liant au laitier.

1.5 Durabilité des bétons

1.5.1 Définition de la durabilité

La durabilité de béton réside dans sa capacité à maintenir et à continuer sa résistance au cours de sa durée de vie, il ne remplit pas sa fonction indéfiniment, ce qui conduit au fait que: Doit résister aux mécanismes de dégradation auxquels le béton peut être soumis.

1.5.2 Paramètres de la durabilité

Par conséquent, l'étude des questions de durabilité nécessite une réflexion qui détermine le comportement de plus précisément contre divers attaquants. Ces paramètres sont décrits ci-dessous.

1.5.2.1 Paramètres liés au matériau

- Nature minéralogique des granulats.
- Teneurs en additions minérales.
- Teneurs en aluminat tricalcique C3A et en silicate tricalcique C3S.
- Teneur potentielle en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

1.5.2.2 Paramètres liés à l'environnement

Les principaux paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- La nature physique de l'agent agressif.
- La nature chimique de l'agent agressif.
- Les conditions climatiques naturelles ou artificielles, générales et locales.
- L'humidité relative du milieu.
- La température qui est généralement un facteur d'accélération des réactions.
- Les cycles climatiques.
- La mobilité du milieu agressif.

1.5.2.3 Paramètres liés à la structure

L'approche « holistique » des problèmes de durabilité nécessite que soient pris en compte les effets des contraintes mécaniques liées au fonctionnement de l'ouvrage : chargements, fatigue, dilatations et retraits différentiels... Ces contraintes peuvent engendrer des fissurations qu'il convient de bien différencier de celles qui sont produites sous l'effet d'un agent agressif. Ces fissurations sont susceptibles d'accélérer et d'aggraver d'éventuelles attaques chimiques qui sont susceptibles elles-mêmes d'affaiblir la structure.

1.5.2.4 Paramètres économiques

Les contraintes économiques locales imposent parfois le choix de matériaux (granulats, ciment) non optimisés vis-à-vis de la durabilité. Si l'importance de l'ouvrage le justifie, il peut être envisagé de mettre en œuvre une approche performant qui est basée sur l'équivalence de performance d'une formule donnée de béton par rapport à un béton de référence conforme aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour l'environnement considéré, la démonstration de l'équivalence devant être faite [20].

1.5.3 Propriétés de la Durabilité

1.5.3.1 Attaque des bétons par les Acides et les Sulfates

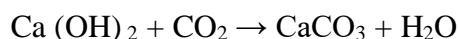
L'attaque sulfurique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimio-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé [21].

1.5.3.2 Résistance au gel-dégel

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 [22].

1.5.3.3 Carbonatation :

La carbonatation du béton est due à l'action du dioxyde de carbone (CO₂) qui se trouve dans l'atmosphère (et parfois soluble dans l'eau (acide carbonique H₂CO₃)) sur la chaux libérée lors de l'hydratation des silicates bi calciques (C₂S) et tricalciques (C₃S) pour former le carbonate du calcium (CaCO₃) appelé aussi calcite [23].



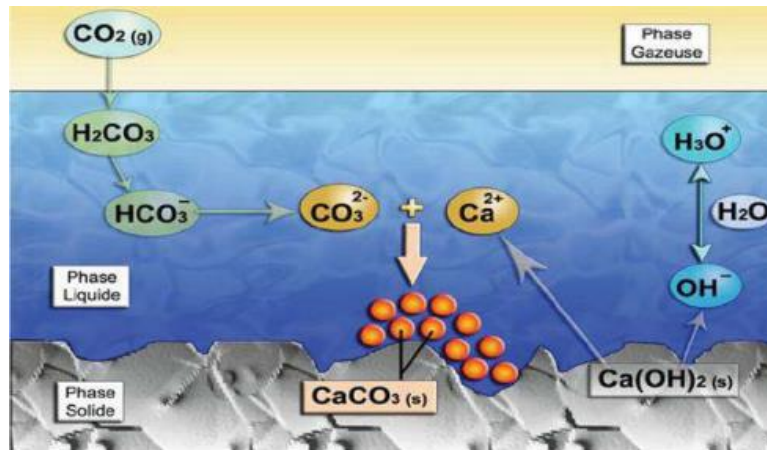


Figure I.5: Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Cette carbonatation qui progresse dans le béton à partir des faces en contact avec l'atmosphère fait baisser le pH initial compris entre 12 et 13 vers la neutralité (pH de l'ordre de 9), neutralisant ainsi progressivement l'alcalinité du béton et son rôle passivant sur les armatures qui, n'étant pas plus protégées, se corrodent.

1.5.4 Influence des ajouts minéraux sur la durabilité du béton

L'étude de l'effet des additions minérales sur la durabilité des bétons et toutes autres structures cimentaires devient un sujet de l'actualité pour les chercheurs. Toutes les études confirment que ces ajouts n'ont pas seulement un impact économique et écologique, mais ils ont aussi, un effet remarquable sur la durabilité du béton.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a été spécifié à une brève recherche bibliographique relative aux caractéristiques de laitier et la durabilité du béton. Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, nous devons accorder beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. Les sous-produits peuvent être utilisés comme constituant principal du clinker ou comme granulats pour le béton.

*Chapitre II : Caractérisation
des matériaux utilisés*

II.1 Introduction

Pour confectionner un béton selon les normes adéquates, il faut connaître les caractéristiques des différents constituants. La caractérisation des matériaux est indispensable pour toute recherche ou étude d'investigation, parce que chacune de ces caractéristiques a une influence importante sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant du béton par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire.

Ce chapitre, sera consacré à la détermination des caractéristiques des différents matériaux entrants dans la composition du béton et leur classification selon les normes.

II.2 Les essais sur les granulats

➤ But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur les quantités réduites de matériaux qui doivent cependant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble des matériaux dans lequel on a fait un prélèvement. Pour cela, il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Ce problème est complexe à résoudre mais il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenus au cours des essais de laboratoire. [24]

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit. Cette étape de l'échantillonnage fait l'objet de la norme EN 932-1.
- Au laboratoire, prélèvement sur l'échantillon de quantité nécessaire à l'essai que l'on appelle prise d'essai. Cette étape fait l'objet de la norme EN 932-2.

➤ Prélèvement sur le tas (sable et gravier)

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire, ont porté sur des échantillons obtenus par des prélèvements sur les tas effectués comme suit :

- Gravillons **3/8**, **8/15** et **15/25** carrière **ALITI SETIF**.
- Sable concassé **0/4** carrière **ALITI SETIF**.
- Sable dunes **0/1** de la sablière de **BOUSSAADA**.

Il s'agit de granulats qui sont mis en stock sous forme de tas. Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres.

On prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

➤ **Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)**

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire [24].

➤ **Quartage**

Comme le nom l'indique, on divise l'échantillon en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés.

Si cette quantité (1/2) est encore importante, Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial (figure II.1).

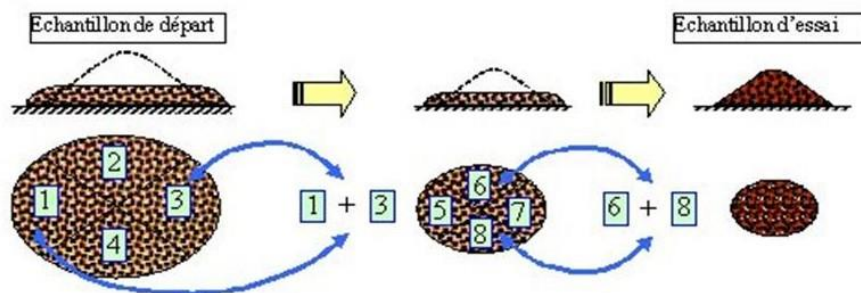


Figure II.1: Opération de quartage

II.2.1 Analyse granulométrique (NF EN 933-1)

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (MF).

II.2.1.1 Analyse granulométrique des gravillons

Les résultats d'analyse granulométrique pour les gravillons 15/25, 8/15, 3/8 de la carrière ALITI SETIF sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau II.1 : Analyse granulométrique des gravillons 15/25.

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}}=5429$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
25	0	0	100
20	576	10,53	89
16	3756	68,65	31
14	5076	92,78	7
10	5338	97,57	2
8	5390	98,52	1
6,3	5410	98,89	1
4	-	-	-
2	-	-	-
1	-	-	-
0,5	-	-	-
0,315	-	-	-
0,25	-	-	-
0,125	-	-	-
0,063	5428	99,21	0,8

Tableau II.2 : Analyse granulométrique des gravillons 8/15.

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}}=3396$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
16	46	1,35	99
14	566	16,57	83
10	924	27,05	73
8	2681	78,48	22
6,3	3123	91,42	9
4	3325	97,33	3
2	-	-	-
1	-	-	-
0,5	-	-	-
0,315	-	-	-
0,25	-	-	-
0,125	-	-	-
0,063	3393	99,33	0,7

Tableau II.3 : Analyse granulométrique des gravillons 3/8.

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch}=2032$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
8	13	0,62	99
6,3	437	20,91	79
4	1654	79,14	21
2	1956	93,59	6
1	-	-	-
0,5	-	-	-
0,315	-	-	-
0,25	-	-	-
0,125	-	-	-
0,063	2028	97,03	3

II.2.1.2 Analyse granulométrique des sables

Les résultats d'analyse granulométrique pour les sables : 0/4 de la carrière ALITI SETIF et 0/1 de la sablière de BOUSSAADA sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau II.4 : Analyse granulométrique du sable 0/4.

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch}=1635$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
4	147	8,28	92
2	801	45,10	55
1	1158	65,20	35
0,5	1404	79,05	21
0,315	1284	83,56	16
0,25	1518	85,47	15
0,125	1590	89,53	10
0,063	1632	91,89	8

Tableau II.5 : Analyse granulométrique du sable 0/1.

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch}=677$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
1	0	0	100
0,5	0	0	100
0,315	3	0,44	100
0,25	25	3,68	96
0,125	641	94,40	6
0,063	675	99,41	0,6

Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable mélange 0/1 et 0/4.

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch}=937$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
4	36	3,6	96
2	231	23,1	77
1	377	37,7	62
0,5	494	49,4	51
0,315	538	53,8	46
0,25	561	56,1	44
0,125	883	88,3	12
0,063	927	92,7	7

La représentation graphique des analyses granulométrique des gravillons et des sables est donnée par la figure ci-après :

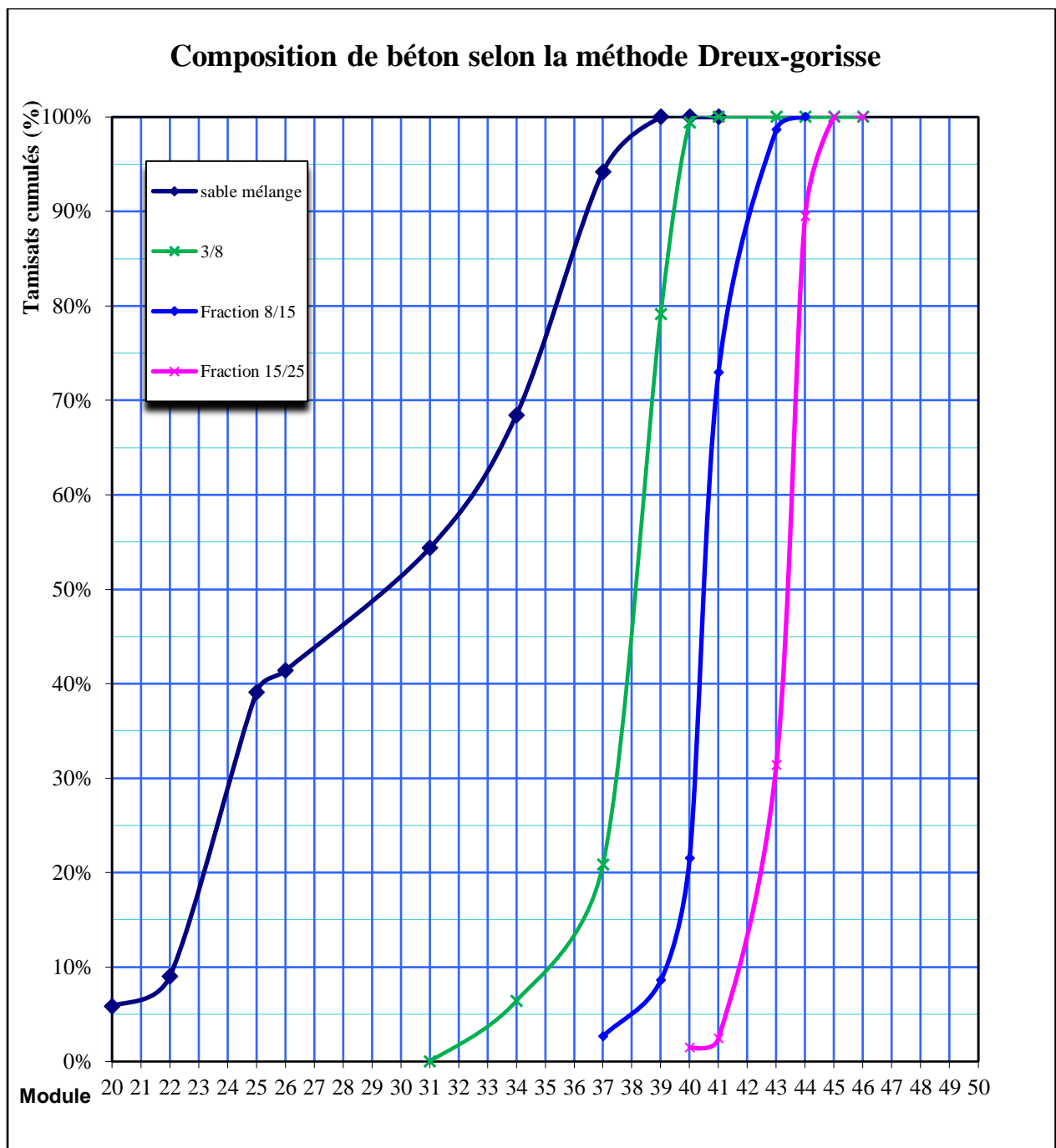


Figure II.2 : Analyse granulométriques des gravillons et sable.

II.2.1.3 Module de finesse (MF)

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : [0,125-0,25-0.5-1-2et 4 (mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante:

Ou: R_c : Refus cumulé

$$Mf = \frac{\sum RC}{100}$$

Les résultats du module de finesse sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.7 : Valeurs du module de finesse des sables.

Sable	Mf	Type de sable	Spécification
0/4	3,73	Sable grossier	Mf > 2,8
0/1	0,98	Sable Fin	Mf < 2,2
Mélange	2,58	Sable moyen	2,2 < Mf < 2,8

II.2.2 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3)

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats [24].



Figure II.3 : Grille à fente utilisé pour l'essai d'aplatissement.

Coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par la formule suivante :

$$A = \frac{\sum M2}{\sum M1} \times 100$$

Avec :

M2 : masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

M1 : masse de la classe granulaire d/D.

Les résultats de cet essai sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau II.8 : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25.

M₀ = 5507 g				
Tamissage sur tamis		Tamissage sur grilles		
Classes granulaires di/D (mm)	M1 (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants M2 (g)	A=M2/M1×100
20/25	865	12,5	85	9,83
16/20	2980	10	366	12,28
12,5/16	1486	8	207	13,93
10/12,5	75	6,3	22	29,33
8/10	43	5	11	25,58
6,3/8	18	4	3	16,67
5/6,3	5	3,15	0	0
4/5	2	2,5	0	0
∑M1=5474 g		∑ M2=694 g		
A = $\frac{\sum M2}{\sum M1} \times 100 = 13 \%$				

Tableau II.9 : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 8/15.

M₀= 3428 g				
Tamissage sur tamis		Tamissage sur grilles		
Classes granulaires di/D (mm)	M1 (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants M2 (g)	A=M2/M1×100
16/20	116	10	24	20,69
12,5/16	697	8	83	11,91
10/12,5	927	6,3	96	10,36
8/10	754	5	105	13,93
6,3/8	544	4	78	14,34
5/6,3	117	3,15	12	10,26
4/5	161	2,5	20	12,42
$\Sigma M1=3316$ g		$\Sigma M2=418$ g		
$A = \frac{\Sigma M2}{\Sigma M1} \times 100 = 13\%$				

Tableau II.10 : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 3/8.

$M_0 = 2120 \text{ g}$				
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaires d_i/D (mm)	M1 (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants M2 (g)	$A = M2/M1 \times 100$
8/10	19	5	4	21,05
6,3/8	448	4	68	15,18
5/6,3	461	3,15	51	11,06
4/5	741	2,5	84	11,34
$\Sigma M1 = 1669 \text{ g}$		$\Sigma M2 = 207 \text{ g}$		
$A = \frac{\Sigma M2}{\Sigma M1} \times 100 = 12\%$				

D'après la norme (NA 5043) et ces valeurs, les graviers (15/25, 8/15, 3/8) sont classés en catégorie A (L_{AA}).

II.2.3 Détermination des masses volumiques

II.2.3.1 Détermination des masses volumiques réelle (absolue ρ_s) (NF EN 1097-6)

La masse volumique absolue est la masse d'un matériau par unité de volume sans les vides entre les grains. Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de matériau dans l'eau.



Figure II.4 : Conservation des échantillons.

La masse volumique absolue est définie par la relation suivante :

$$\rho_s = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Avec :

M2 : la masse du pycnomètre rempli d'eau et de l'échantillon.

M3 : la masse du pycnomètre rempli d'eau.

M4 : la masse sèche des granulats après refroidissement.

ρ_w : la masse volumique d'eau = 0.9980 (g/cm³).



Figure II.5 : pycnomètre contenant l'échantillon des granulats saturés.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau II.11 : Résultats des masses volumiques absolues des granulats.

Echantillon	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	ρ_w (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
Gravier 15/25	1311,90	4139,94	3311,53	1304,76	0,9980	2,735
Gravier 8/15	1135,91	4028,46	3311,53	1127,56	0,9980	2,742
Gravier 3/8	1024,58	3957,31	3311,53	1013,12	0,9980	2,754
Sable 0/4	690,63	1245,24	808,44	685,10	0,9980	2,753
Sable 0/1	605,84	1184,29	808,44	605,57	0,9980	2,631
Sable mélange	663,94	1226,01	808,44	662,48	0,9980	2,70

II.2.3.2 Détermination des masses volumiques apparente (NF EN 1097-3)

La masse volumique apparente (en vrac) c'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau.



Figure II.6 : Mesure des masses volumiques apparentes
du sable 0/4 et du gravier 8/15

La masse volumique apparente est définie par la relation suivant :

$$\rho_p = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Avec :

M₁ : la masse du récipient vide.

M₂ : la masse du récipient plein.

V : le volume du récipient.

ρ_p : la masse volumique en vrac

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau II.12 : Résultats des masses volumiques apparentes.

Matériau	N° de l'essai	Masse vide (g)	Masse pleine (g)	$M_2 - M_1$ (g)	Volume du récipient (cm ³)	ρ_p (g/cm ³)	ρ_p moy (g/cm ³)
Gravier 15/25	1	5704	20760	15056	10498,49	1,43	1,433
	2	5704	20780	15076	10498,49	1,44	
	3	5704	20740	15036	10498,49	1,43	
Gravier 8/15	1	3637	11344	7707	5277,09	1,46	1,453
	2	3637	11309	7672	5277,09	1,45	
	3	3637	11311	7674	5277,09	1,45	
Gravier 3/8	1	3637	11392	7755	5277,09	1,47	1,47
	2	3637	11417	7780	5277,09	1,47	
	3	3637	11394	7757	5277,09	1,47	
Sable 0/4	1	1275	2965	1690	1036,19	1,63	1,636
	2	1275	2976	1701	1036,19	1,64	
	3	1275	2975	1700	1036,19	1,64	
Sable 0/1	1	1275	2757	1482	1036,19	1,43	1,43
	2	1275	2761	1486	1036,19	1,43	
	3	1275	2760	1485	1036,19	1,43	

II.2.4 Essai Los Angeles (NF EN 1097-2)

La résistance à la fragmentation (au choc) est déterminée par l'essai Los-Angeles, qui consiste à mesurer la masse (m) d'éléments supérieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau de classe granulaire 10/14mm testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los-Angeles en 500 rotations à une vitesse régulière.



Figure II.7: L'état de la classe granulaire 10-14 après 500 rotations.

Le coefficient Los Angeles est défini par la relation suivant :

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \times 100$$

Avec :

m : la masse du refus au tamis 1,6 mm.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau II.13 : Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 8/15.

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse (g)		Coefficient Los Angeles « LA » (%)
		Initial	Refus au tamis 1,6mm	
10-14	11	5000	4036	19,28

D'après la norme (NA5043) et les valeurs obtenues, la classe granulaire 10-14 est classée en catégorie A L(A_A).

II.2.5 Essai Micro-DEVAL (NF EN 1097-1)

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau.



Figure II.8: Appareil de Micro-DEVAL



Figure II.9 :L'état de la classe granulaire 10-14 après 1200 rotations.

Le coefficient Micro-DEVAL est défini par la relation :

$$\text{MDE} = \frac{m}{5000} \times 100$$

Avec :

m : la masse du refus au tamis 1,6 mm.

Les résultats sont donnés par le tableau suivant :

Tableau II.14 : Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15.

N° de prise	Classe granulaire (mm)	Charge abrasive	Masse (g)		MDE (%)
			Initial	Refus au tamis 1,6mm	
Prise 01	10-14	5000	500	445	11
Prise 02	10-14	5000	500	443	11,4
Moyenne du coefficient MDE					11

D'après la norme (NA5043) et les valeurs obtenues, la classe granulaire 10-14 est classée en catégorie A (MDE_A).

II.2.6 Détermination de la propreté

II.2.6.1 Equivalent de sable (NF EN 933-8)

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans l'échantillon des éléments sableux plus grossiers [24].

1. Détermination de la teneur en eau W (NF P 94-050)

La formule de calcul est :

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

Avec :

M_w : la masse humide.

M_s : la masse sèche.

Les résultats sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau II.15 : Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.

N° échantillon	Prise 1	Prise 2
M_h Masse humide (g)	224,22	232,62
M_s Masse sèche (g)	218,66	227,25
M_w Masse d'eau (g)	5,56	5,37
La teneur en eau W (%)	2,54	2,36
La moyenne de W (%)	2,45	

Tableau II.16 : Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/1.

N° échantillon	Prise 1	Prise 2
M_h Masse humide (g)	208,24	199,57
M_s Masse sèche (g)	198,57	190,31
M_w Masse d'eau (g)		
La teneur en eau W (%)	4,87	4,87
La moyenne de W (%)	4,87	

2. Détermination de la teneur en fines f (NF EN 933-8)

Les résultats sont représentés dans les tableaux suivant :

Tableau II.17 : Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/4.

Teneur en eau sous échantillon N°1	
W = 2,45%	
Masse humide de la 2^{ème} prise d'essai M1 (g)	580,56
Masse sèche de la 2^{ème} prise d'essai après lavage à 0.063mm (g)	494,61
Teneur en fines ($f=100 \frac{M_2(100+W)}{M_1}$) %	12,72
Si $f > 10\%$ Masse de chaque éprouvette	$M_T = M_3 + M_4 = 122,31$
M3 : Masse granulat humide 2^{ème} sous échantillon	$M_3 = \frac{1200}{f} \left(1 + \frac{W}{100}\right) = 96,65$
M4 : Masse du sable correcteur sec	$M_4 = 120 - \frac{1200}{f} = 25,66$

Tableau II.18 : Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/1.

Teneur en eau sous échantillon N°1	
W = 4,87%	
La teneur en fines (%)	/
Si $f \leq 10\%$ Masse de chaque éprouvette	$M_T = \frac{120(100+W)}{100} = 125,84$



Figure II.10 : Mesure de la hauteur du sable 0/4 et 0/1

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.19 : Résultats d'équivalent de sable du sable 0/4.

	Première éprouvette	Deuxième éprouvette
La masse de l'éprouvette M_T (g)	122,31	122,31
La hauteur du floculat h_1 (mm)	12	12
La hauteur du sédiment h_2 (mm)	8,4	8,4
Rapport $(h_2/h_1)*100$	70	70
Moyenne	70	

Tableau II.20 : Résultats d'équivalent de sable du sable 0/1.

	Première éprouvette	Deuxième éprouvette
La masse de l'éprouvette M_T (g)	125,84	125,84
La hauteur du floculat h_1 (mm)	13,7	14
La hauteur du sédiment h_2 (mm)	7,4	7,6
Rapport $(h_2/h_1)*100$	54,01	54,29
Moyenne	54	

D'après la norme (XP P18-540) [25] les sable sont classé comme suit :

Sable 0/4 → $ES=70 > 65$ non argileux.

Sable 0/1 → $ES=54 < 65$ légèrement argileux.

Donc l'essai VB est nécessaire.

II.2.6.2 Bleu de méthylène (NF EN 933-9)

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables d'origines naturelle ou artificielle.

La valeur de bleu de méthylène est donnée par la formule suivante :

$$VB = \frac{V1}{M1} \times 10$$

Avec :

V : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif.

M : masse sèche de la prise d'essai.



Figure II.11 : Appareil nécessaire de l'essai.

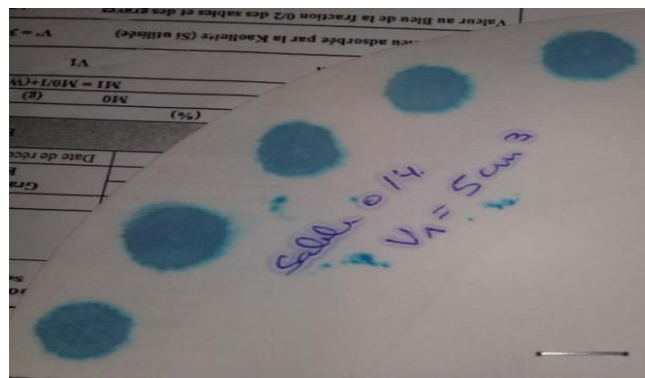


Figure II.12 : résultat de l'essai à la tâche de sable 0/4.



Figure II.13 : résultat de l'essai à la tâche de sable 0/1.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.21 : Résultat au bleu de méthylène du sable 0/4.

Echantillon	Sable 0/4
Teneur en eau W(%)	2,45
Masse sèche de la prise d'essai M1 (g)	200
Volume du bleu introduit V1 (cm ³)	5
Valeur du bleu V _B (cm ³ /g)	0,25

Tableau II.22 : Résultat au bleu de méthylène de sable 0/1.

Echantillon	Sable 0/1
Teneur en eau W(%)	4,87
Masse sèche de la prise d'essai M1 (g)	200
Volume du bleu introduit V1 (cm ³)	50
Volume du bleu adsorbée par la kaolinite V' (cm ³)	35
Valeur du bleu V _B (cm ³ /g)	0,75

D'après la norme (NF P 18-591) et les valeurs obtenues, $V_B < 1 \Rightarrow$ fines non argileuses.

II.3 L'adjuvant

On a utilisé dans les formulations **Le superplastifiant haut Réducteur d'eau : MasterGlenium SKY 841**, toutes les informations et les précautions d'utilisation de ce produit sont résumés dans la fiche technique de l'annexe A.



Figure II.14: Superplastifiant MasterGlenium SKY 841.

II.4 L'eau

L'eau utilisée pour la confection de nos bétons est l'eau potable du robinet de la ville de Bejaia.

II.5 Laitier granulé broyé de haut fourneau

Ce laitier provient du combinat métallurgique **EL -HADJAR ANNABA** récupéré de l'usine **SIKA ALDJAZAIR**. Ses caractéristiques et composants minéralogiques sont représentés dans l'annexe **B**.



Figure II.15 : Laitier granulé broyé de haut fourneau.

II.5.1 Analyse par Diffraction des Rayons X du laitier du haut fourneau (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse minéralogique des matériaux cristallisés. Elle s'applique sur des poudres ou des échantillons massifs pour déterminer la nature des phases minérales et de les quantifier. Actuellement la diffraction des rayons x intervient dans la quasi-totalité des thématiques et constitue un complément indispensable aux observations optiques, microscopiques ou spectroscopiques. Les rayons x sont indissociables de quelques grands noms de la physique tels Rongten le découvreur de ce rayonnement électromagnétique en 1895, Bragg, Laue, Debye, Scherrer, Miller et tant d'autres noms qui évoquent, une loi physique découverte ou une méthode expérimentale[26].



Figure II.16 : Appareil de Diffraction par des Rayons X.

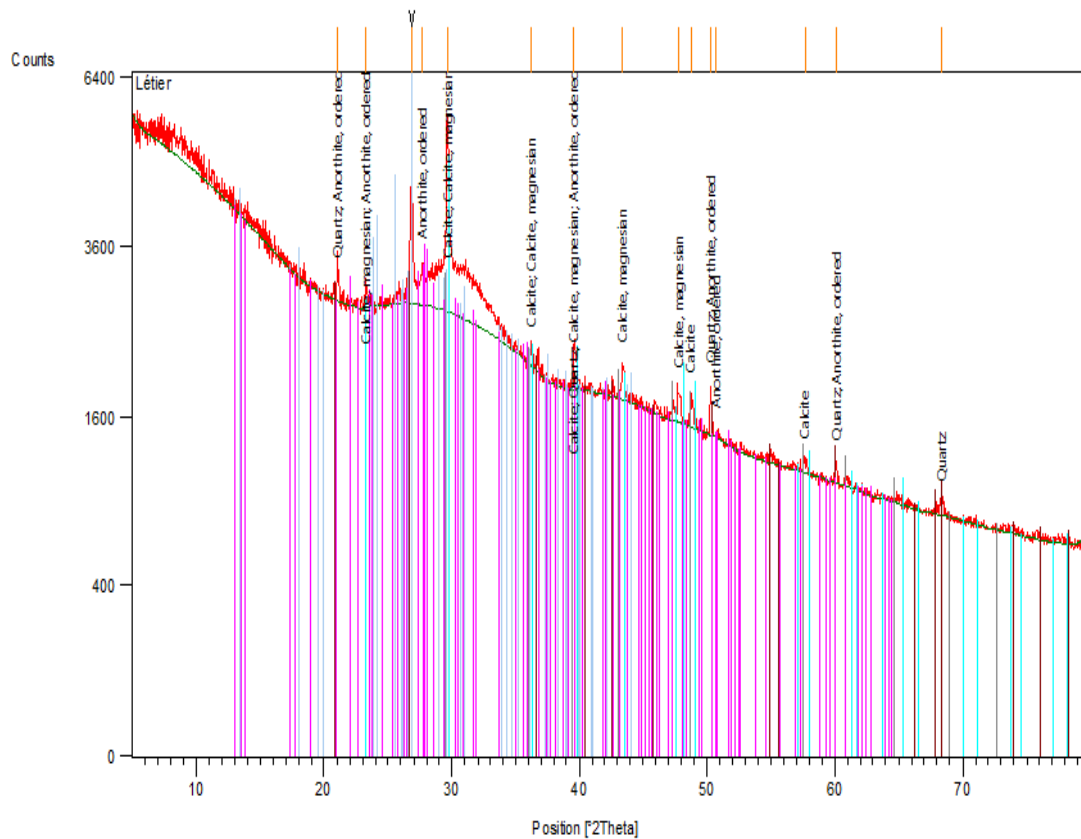


Figure II.17 : Spectre DRX du LHF.

Le diffractogramme obtenu sur la poudre du laitier de haut fourneau marque la présence de zone diffuse qui caractérise la phase vitreuse et quelques raies de faible intensité représentant les composés cristallisés. Le diffractogramme du laitier granulé est typique à un laitier amorphe qui présente cependant des pics caractéristiques correspondant à la calcite, au quartz et au magnésium.

II.5.2 Analyse granulométrique par laser

Cette analyse est une technique qui permet d'obtenir une analyse qualitative et quantitative de la composition chimique élémentaire d'un échantillon. Cette dernière repose sur l'interaction d'un laser pulsé avec le matériau à analyser, ce qui induit la vaporisation de la matière et la formation d'un plasma. L'analyse du spectre d'émission du rayonnement plasma permet d'accéder à la composition atomique élémentaire de l'échantillon.

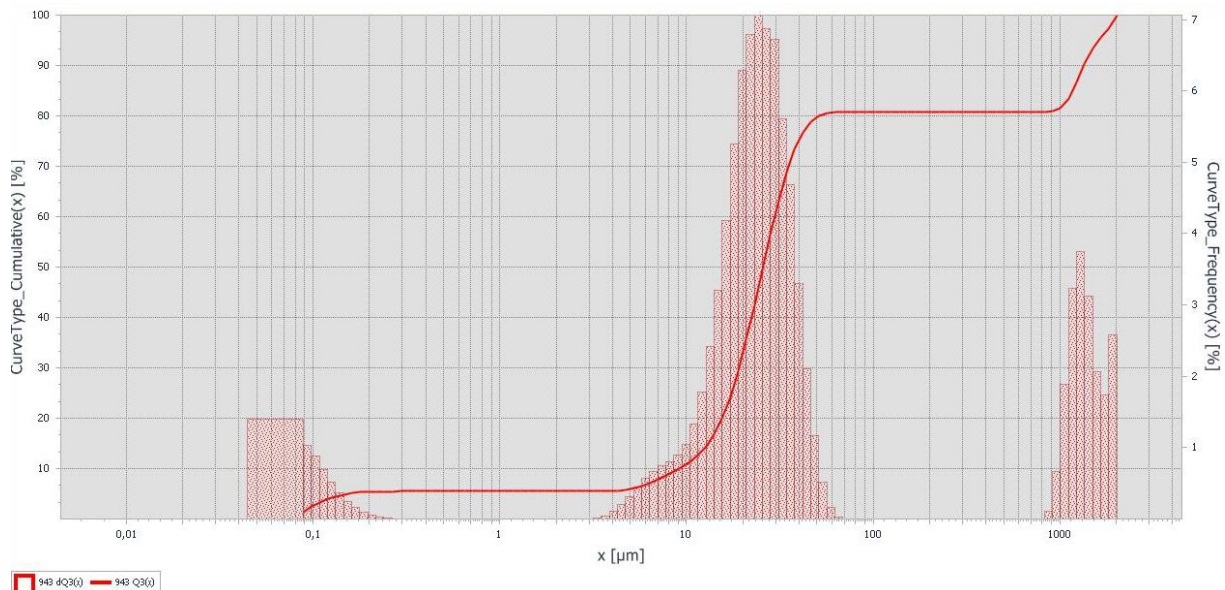


Figure II.18 : Granulométrie laser du LHF

La Figure II.18 présente la distribution de tailles de particules mesurée par granulométrie laser. Les laitiers de haut fourneau présentent des distributions de diamètres de particules très proches avec des valeurs de 10µm et 40µm.

L'analyse a révélé l'existence d'une forte teneur en fines inférieures à 50µm.

II.6 Ciment :

Le ciment utilisé est un **CPA : CEM I 42.5 N-LH/SR5** de provenance : **AIN EL KEBIRA SETIF**. Toutes ses caractéristiques et ses compositions sont résumées sous forme d'une fiche technique dans l'annexe A.

II.7 Les activateurs

Dans l'objectif de faire une étude comparative du comportement des bétons à base de laitier et le laitier activé par quelques produits, on a utilisé deux (02) activateurs, qui sont :

II.7.1 La chaux CaO

Il s'agit d'une espèce minérale naturelle rare, de maille cubique qu'il est possible d'observer en petite masses blanches, elle est très réactive notamment avec de l'eau.



Figure II.19 : La chaux utilisées pour l'activation du LHF.

II.7.2 Hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$

Il s'agit d'une poudre blanche résultant de l'extinction de la chaux vive (oxyde de calcium) avec de l'eau.



Figure II.20 : Hydroxyde de calcium utilisé pour l'activation du LHF.

II.8 Conclusion

Après la présentation de différentes caractéristiques de nos constituants et les essais qui sont effectués sur l'ensemble des matériaux, nous présenterons dans le chapitre suivant l'étude de formulation des bétons et la confection des éprouvettes des différentes séries de bétons aux laitiers de haut fourneau sans et avec activateurs.

*Chapitre III : Etude de
formulation des bétons*

III.1 Introduction

La formulation d'un béton consiste à déterminer le meilleur mélange des différents composants, il est composé de ciment, de granulats, d'eau, d'adjuvants et des ajouts afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction d'ouvrages résistant avec une durabilité accrue.

Ce chapitre est consacré à la détermination des différents dosages de ses constituants.

III.2 Formulation des bétons

L'étude de la formulation d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment, et en eau afin de réaliser un béton présentant de bonnes caractéristiques rhéologiques telles que (ouvrabilité, maniabilité, et résistance à la ségrégation) à l'état frais, et les meilleures caractéristiques à l'état durci (résistance à la compression) [27].

III.3 Méthodes de composition de béton

Pour déterminer la composition des bétons à mettre en œuvre, il existe plusieurs méthodes, telles que :

- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode de VALLETTE.
- Méthode de FAURY.
- Méthode de DREUX-GORISSE.
- Méthode de JOISEL.
- Méthode de BARON-LESAGE.
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.

Dans cette étude, on a adopté la méthode de DREUX-GORISSE, pour la détermination des dosages des constituants de béton.

III.4 Méthode de DREUX GORISSE

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier, et ayant données satisfaction.

Elle est d'autre part plus rapide et très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

- **Détermination de la composition du béton pour les granulats (15/25, 8/15, 3/8 et mélange de sables (0/1 et 0/4)) :**

Sur le graphique semi-logarithmique, on trace les courbes granulométriques des granulats 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25.

- **Coordonnées des points O, A, et B de la courbe de référence :**

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB, cette courbe nous permet de déterminer les différents pourcentages (%) des granulats entrants dans la composition du béton.

- **Coordonnées des points O, A et B :**

➤ Le point d'origine **O** :

- Abscisse : $X_O = 0$ mm

- Ordonnée : $Y_O = 0\%$

➤ Le point d'extrémité **B** :

A l'ordonnée 100% correspond à la dimension **D** du plus gros granulat.

- Abscisse : $X_B = D = 25$ mm

- Ordonnée : $Y_B = 100\%$

➤ Le point **A**:(point de brisure), à des coordonnées ainsi définies :

- En abscisse :

Si $D < 20\text{mm}$, l'abscisse $X_A = D / 2$.

Si $D > 20\text{mm}$, l'abscisse X_A est situé au milieu du segment délimité par D et par le tamis de maille 5mm.

Dans notre cas : $D > 20\text{mm}$ ($D = 25\text{mm}$)

Alors l'abscisse du point A est située au milieu du segment délimité par 25mm et par le tamis 5mm; donc entre les tamis de mailles 10mm et 12.5mm.

Donc : $X_A = 41.5\text{mm}$

- Ordonnée : $Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_S$

K : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage et de la forme des granulats roulés ou concassés. Voir le tableau de l'annexe C.

K_S : Correction supplémentaire.

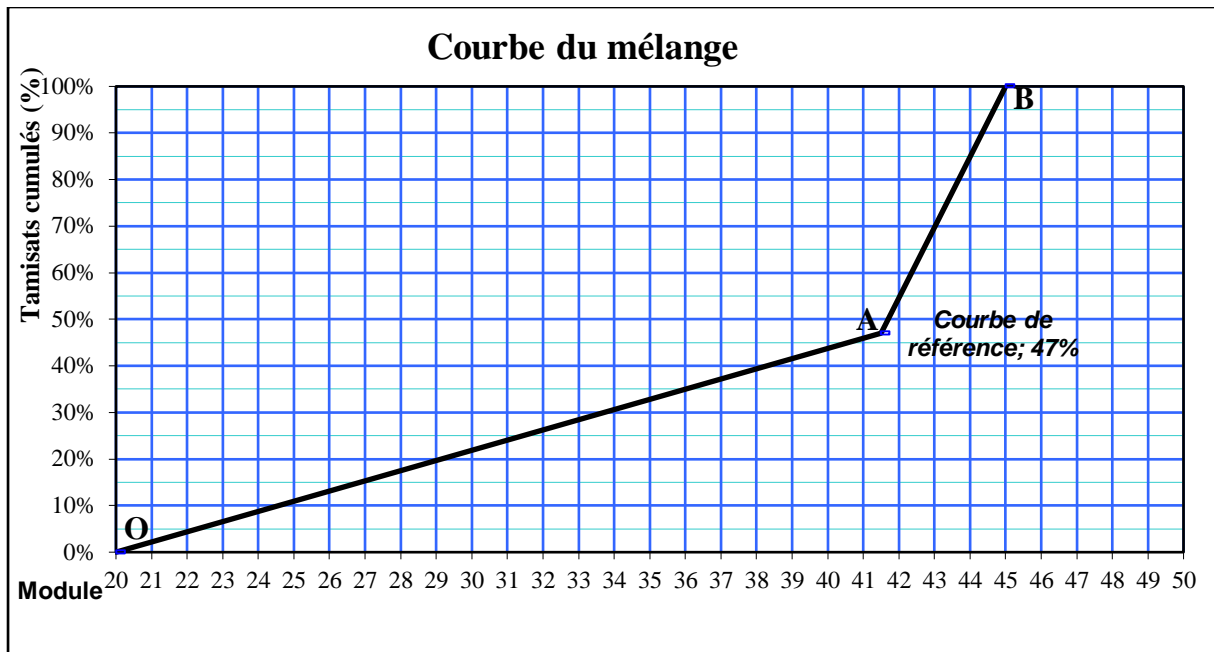


Figure III.1 : Courbe de référence.

Sachant que le dosage du ciment est de 350kg/m^3 et que notre sable est concassé, vibration normale, donc d'après le tableau de l'annexe C : $K = +2$.

$$Y_A = 50 - \sqrt{25 + 2 + 0} \Rightarrow Y_A = 47\%$$

• **Les pourcentages de volume absolu des granulats selon la courbe granulométrique :**

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la première courbe granulométrique au point d'ordonnée 5% de la deuxième courbe granulométrique. Le point d'intersection entre ces lignes et la courbe de référence indique les proportions en pourcentage de sable et des graviers [28]. D'après cette courbe nous obtenons :

Tableau III.1 : Les différents pourcentages des granulats.

Granulats	Pourcentage (%)
Sable mélange	38
Gravier 3/8	12
Gravier 8/15	22
Gravier 15/25	28
TOTAL = 100%	

Les pourcentages sont représentés sur la figure suivante :

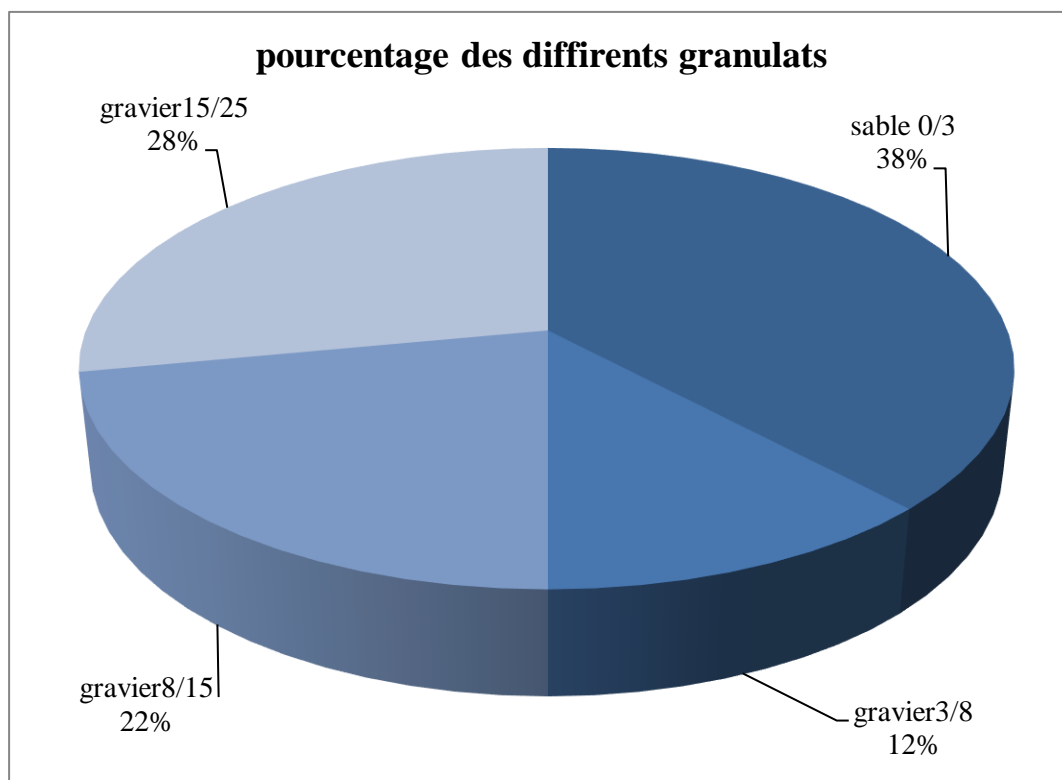


Figure III.2 : les pourcentages de différentes fractions granulaires.

- Tracé de la courbe de mélange des granulats :

Les valeurs des tamisats en pourcentage (%) de la courbe de mélange sont calculées à partir des résultats des analyses granulométriques des différents granulats.

Ces valeurs des tamisats sont représentées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.2 : les valeurs des tamisâts (%) de la courbe de mélange.

Tamis (mm)	(%) Tamisât S1 (0/1)	(%) Tamisât S2 (0/4)	(%) Tamisât G1 (3/8)	(%) Tamisât G2 (8/15)	(%) Tamisât G3 (15/25)	Mélange 0.11S1+0.27S2+0.12G1+ 0.22G2+0.28G3
25	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	89	97
16	100	100	100	99	31	81
14	100	100	100	83	7	70
10	100	100	100	73	2	67
8	100	100	99	22	1	55
6,3	100	100	79	9	1	50
4	100	92	21	3	0	39
2	100	55	6	0	0	27
1	100	35	0	0	0	21
0,5	100	21	0	0	0	17
0,315	100	16	0	0	0	16
0,25	96	15	0	0	0	15
0,125	6	10	0	0	0	3
0,063	0,6	8	3	0,7	0,8	3

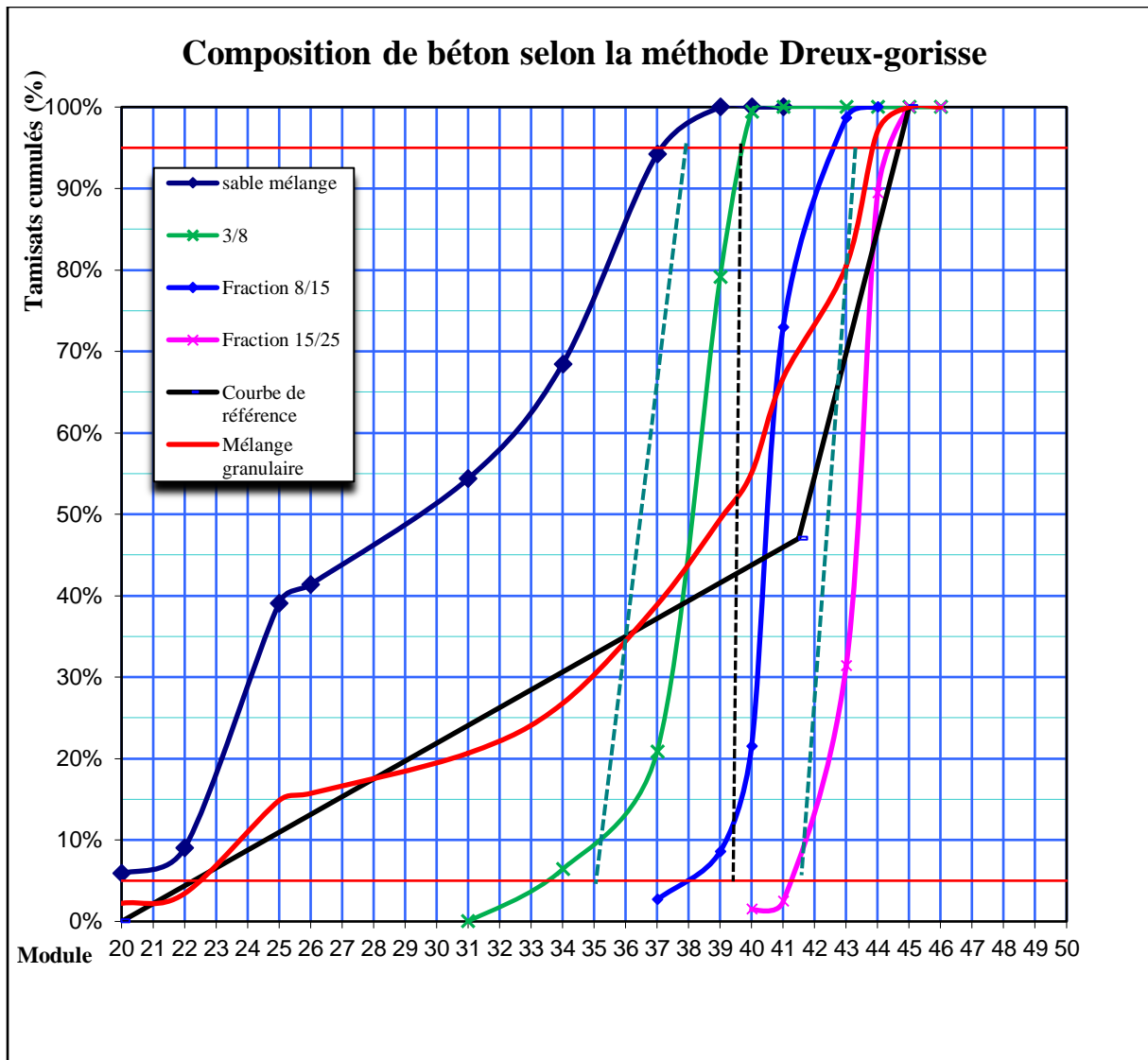


Figure III.3 : Courbe de mélange selon DREUX GORISSE.

III.4.1 Dosage en ciment

Le dosage de ciment le plus courant pour un béton ordinaire est généralement de **350 kg/m³**. Nous allons donc, adopter cette valeur afin que nos résultats couvrent les cas les plus courants de la pratique.

III.4.2 Dosage en eau

On a un dosage en ciment de l'ordre **350 Kg/m³** et le rapport (E/C) est fixé à **0,5** donc on peut déterminer directement la quantité d'eau à utiliser dans **1m³** de béton.

Alors, on a :

$$C=350 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E/C=0,5 \Rightarrow E=175\text{kg/m}^3$$

III.4.3 Dosage des granulats

- **Calcul de coefficient de compacité (γ)**

Ce coefficient γ est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais.

Les valeurs du coefficient sont données dans le tableau de l'annexe C.

$$\gamma = \frac{V_m}{1000} \quad ; \quad V_m = V_g + V_c$$

Avec :

V_m : Volume absolu des matières solides.

V_g : Volume absolu des granulats.

V_c : volume absolu du ciment.

D'après le tableau, pour une consistance plastique et un serrage de vibration normale, on détermine γ comme suit :

Pour $D=20\text{mm} \Rightarrow \gamma = 0.825$

Pour $D=25\text{mm} \Rightarrow \gamma = ?$

Pour $D=31.5\text{mm} \Rightarrow \gamma = 0.830$

Par interpolation :

On aura $\gamma = 0.827$ Pour $D=25 \text{ mm}$.

Pour le sable et les gravillons concassés, il faut apporter la correction de «-0.03 »

$$\gamma = 0,827 - 0,03 = 0,797.$$

- **Volumes absolus des constituants solides**

$$V_m = 1000 * \gamma = 797 \text{ litres.}$$

$$V_c = 350 / \rho_s = 113 \text{ litres}$$

$$V_g = V_m - V_c = 797 - 113 \Rightarrow V_g = 684 \text{ litres.}$$

ρ_s : masse volumique absolue des grains du ciment 3.1 g/cm^3 .

Alors les volumes absolus des constituants solides sont les suivants :

Tableau III.3 : Volumes absolus des constituants solides.

Constituants	Volumes absolus (litre)
Sable mélange	$684 \times 0,38 = 259,92$
Gravier 3/8	$684 \times 0,12 = 82,08$
Gravier 8/15	$684 \times 0,22 = 150,48$
Gravier 15/25	$684 \times 0,28 = 191,52$
Ciment	113
TOTAL = 797 litres	

- Dosage des constituants en (Kg/m^3)

Tableau III.4 : Dosage des constituants solides en Kg/m^3 .

Constituants	Dosage en (Kg/m^3)
Sable mélange 0/3	$684 \times 0,38 \times 2,70 = 701,78$
Gravier 3/8	$684 \times 0,12 \times 2,75 = 225,72$
Gravier 8/15	$684 \times 0,22 \times 2,74 = 412,32$
Gravier 15/25	$684 \times 0,28 \times 2,74 = 524,76$
Ciment	$113 \times 3,1 = 350$
TOTAL = 2214,58 kg/m^3	

- Influence du rapport G/S

Pour garantir une bonne résistance du béton, Dreux- GORISSE recommande d'avoir un rapport en masse G/S (Gravier/Sable) voisin de 2.

- Calcul de G/S:

$$G/S = (225,72 + 412,32 + 524,76 / 701,78) = 1,66 \approx 2$$

III.5 Densité théorique du béton frais (Δ_0)

La densité théorique du béton frais est égale à la somme des densités de tous les constituants du béton (gravier 15/25, gravier 8/15, gravier 3/8, sable, ciment, eau).

Tableau III.5 : les densités des constituants du béton en kg/m³.

Constituants	Dosage en (Kg/m ³)
Sable mélange 0/3	$684 \times 0,38 \times 2,70 = 701,78$
Gravier 3/8	$684 \times 0,12 \times 2,75 = 225,72$
Gravier 8/15	$684 \times 0,22 \times 2,74 = 412,32$
Gravier 15/25	$684 \times 0,28 \times 2,74 = 524,76$
Ciment	$113 \times 3,1 = 350$
Eau	175
TOTAL = 2389,58	

III.6 Récapitulation de la composition du béton

Tableau III.6 : Récapitulatif de la composition du béton.

Composants Dosage des	Pourcentage des granulats	Volume absolu des composants (Litres)	ρ_s (g/cm ³)	composants (kg/m ³)
Eau	/	175	1	175
Ciment	/	113	3,1	350
Sable mélange	38	259,92	2,7	701,78
Gravier 3/8	12	82,08	2,75	225,72
Gravier 8/15	22	150,48	2,74	412,32
Gravier 15/25	28	191,52	2,74	524,76
TOTAL	100	972	15,03	2389,58

III.7 Confection des éprouvettes

- **Dimension des moules**

Pour notre étude, on utilisera des moules cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (Figure III.4).



Figure III. 4 : Moules cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$.

- **Gâchée d'essai**

On introduit les constituants dans la bétonnière dans l'ordre suivant :

Les gravillons **15/25** ; **8/15** ; **3/8** ; sable **0/4** ; sable **0/1** ; ciment ; (temps de malaxage 1 min).

Ajouter **2/3** d'eau (temps de malaxage 1 min).

Puis, rajouter **1/3** d'eau mélangée avec les **0.5%** du super plastifiant (temps de malaxage 2 minutes).

- **Remarque**

Pour chaque gâchée d'essai on a besoin de remplir :

- 12 cubes de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$.
- Le cône d'Abrams.

- **Volume total de la gâchée**

Pour une série de **douze (12)** éprouvettes cubiques.

V_1 = volume du moule cubique, $V_1 = 10 \times 10 \times 10 = 1000 \text{ cm}^3$.

V_2 = volume du moule cubique, $V_2 = 15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ cm}^3$.

$V' = (12 \times V_1) + (2 \times V_2) = 0,018750 \text{ m}^3$.

- Calcul le coefficient ξ

$$\xi = \frac{1\text{m}^3}{\text{volume total du béton}} = \frac{1\text{m}^3}{0,018750}$$

$$\xi = 53,33$$

Donc pour une gâchée la masse nécessaire à introduire dans la bétonnière pour chaque composant est :

Tableau III.7 : Les Masses des constituants du béton pour une gâchée.

Composants	Quantités (Kg)
Gravier 15/25	$524,76/53,33 = 9,84$
Gravier 8/15	$412,32/53,33 = 7,73$
Gravier 3/8	$225,72/53,33 = 4,23$
Sable mélange	$701,78/53,33 = 13,16$
Ciment	$350/53,33 = 6,56$
Eau	$175/53,33 = 3,28$
TOTAL = 44,8	

III.8 Béton à base de laitier sans activation

III.8.1 Dosage en fonction de l'ajout de laitier de haut fourneau (EL-HADJAR ANNABA)

Le dosage des laitiers de haut fourneau est déterminé en fonction de ciment, connaissant le dosage en ciment (6,56 kg) nécessaire pour une gâchée, on peut déterminer la masse de laitier ainsi la masse de l'adjuvant à utiliser aux différents pourcentages.

D'après les recherches faites sur l'activation du Laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons, les résultats ont donné une meilleure résistance à 5% LHF [29].

- Béton à 5% de laitier de haut fourneau

Poids de ciment : $P_C = 6.232 \text{ kg}$.

Poids de laitier de haut fourneau : $P_{LHF} = 328 \text{ g}$.

Poids de l'adjuvant : $P_{Adj} = 32,8 \text{ g}$.

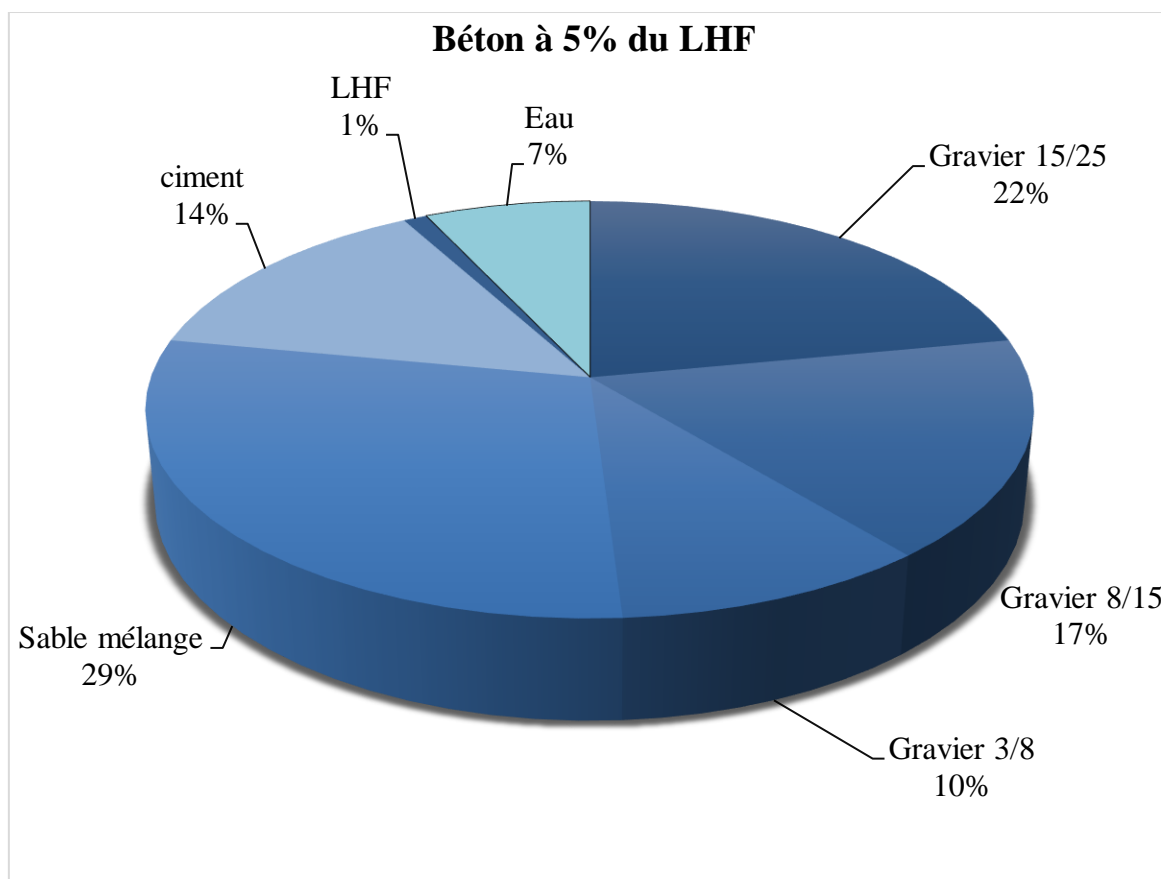


Figure III.5 : Les pourcentages des différentes fractions granulaires de la composition du béton à 5% du LHF.

III.8.2 Récapitulation de la composition des différentes gâchées des bétons sans activation

Le tableau ci-dessous résume les dosages des constituants pour la série de bétons à 5% du LHF :

Tableau III.8 : composition de béton à 5% du LHF sans activation.

Série	Gravier 15/25 (g)	Gravier 8/15 (g)	Gravier 3/8 (g)	Sable mélange (g)	Ciment (g)	Eau (g)	Adjuvant (g)	Laitier de Haut fourneau (g)
BLHF 5%	9840	7730	4230	1316	6232	3280	32,8	328

III.9 Bétons à base de laitier activé

III.9.1 Activation du laitier

Les laitiers granulés finement broyés possèdent des propriétés hydrauliques latentes ce qui nécessite de les activer [30]. Ils peuvent donc évoluer sous l'effet d'une activation. Dans notre étude, nous avons activé la série de béton à 5% de laitier de haut fourneau, pour cela, on a utilisé deux (02) activateurs différents.

D'après les recherches faites sur l'activation du Laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons, les résultats ont donné une meilleure résistance à 5% LHF activé avec la chaux (CaO) et l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) [29].

- **Béton à 5% de laitier de haut fourneau activé**

Poids de ciment : $P_C = 6.232 \text{ kg}$.

Poids de laitier de haut fourneau : $P_{LHF} = 311,6 \text{ g}$.

Poids de l'activateur : $P_{\text{activateur}} = 16,4 \text{ g}$.

Poids de l'adjuvant : $P_{Adj} = 32,8 \text{ g}$.

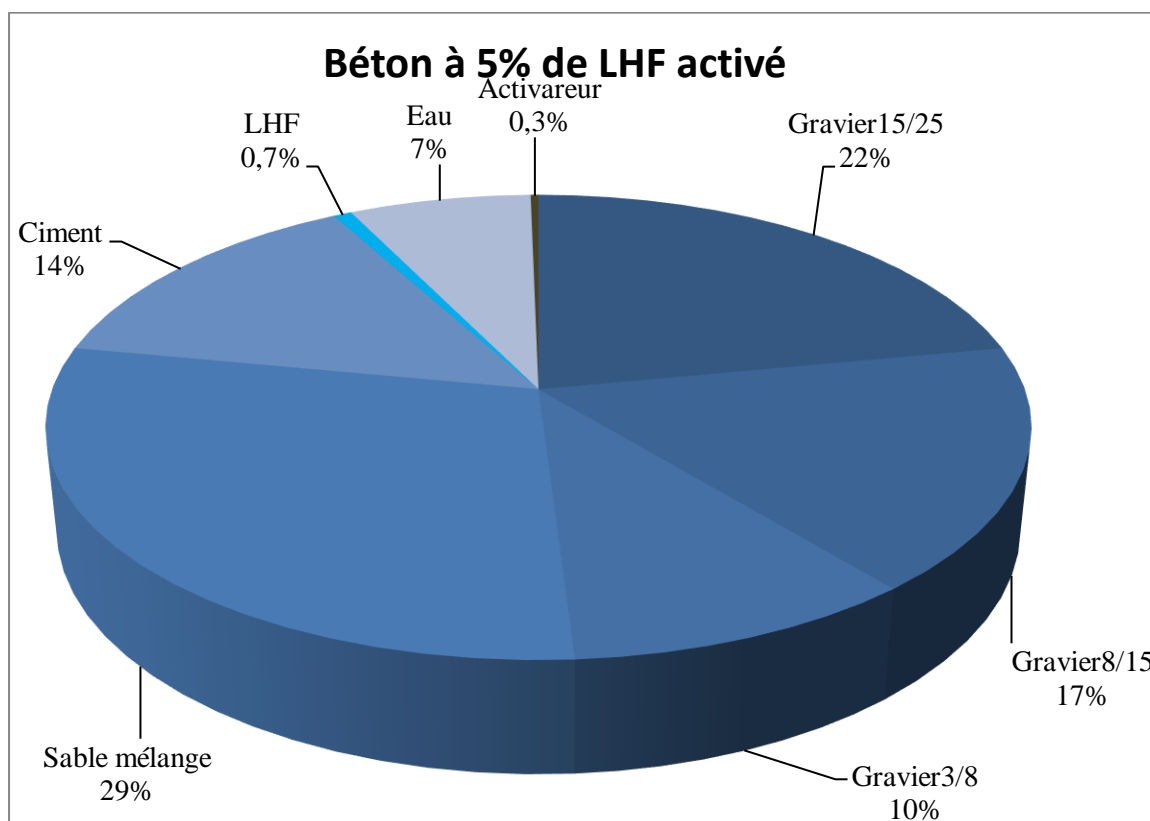


Figure III.6 : Le pourcentage des différents composants du béton à base de L.H.F activé.

III.9.2 Composition des différentes gâchées avec activation des laitiers

Le tableau ci-dessous résume les dosages des activateurs de laitiers dans les différentes gâchées du béton.

Tableau III.9 : Dosages des activateurs de laitiers dans les différentes gâchées du béton.

N° Série	Ciment (g)	L.H.F (g)	CaO (g)	Ca(OH) ₂ (g)
B5%LHF	6232	328	-	-
B5%LHF+CaO	6232	311,6	16,4	-
B5%LHF+Ca(OH)₂	6232	311,6	-	16,4

III.10 Conclusion

Après avoir présenté dans ce chapitre, la méthode de formulation ainsi que les dosages des bétons à base de laitiers de hauts fourneaux non activés et activés, nous allons consacrer le prochain chapitre aux différents essais effectués sur les bétons (frais et durci), ainsi que les essais de durabilité.

*Chapitre IV : Essai sur bétons
et résultats*

IV.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous présentons les différents essais effectués au laboratoire sur les trois séries de bétons (5% du LHF ; 5% du LHF activé avec CaO et 5% du LHF activé avec Ca(OH)_2) à l'état frais et durci ainsi que les résultats de ces essais.

Ces résultats portent sur l'essai d'affaissement, l'évolution de la masse volumique fraîche au moment de la confection ainsi que les tests de durabilité.

IV.2 Essais sur les bétons

IV.2.1 Essais sur les bétons frais

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont: La consistance et la masse volumique.

IV.2.1.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il peut être effectué directement sur chantier. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm [31].

Il consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassées avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche.

- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.



Figure IV.1 : Consistance du béton au laitier.

● Résultats et interprétations d'essai de consistance :

Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux de l'annexe **D** et schématisés sur la figure suivante :

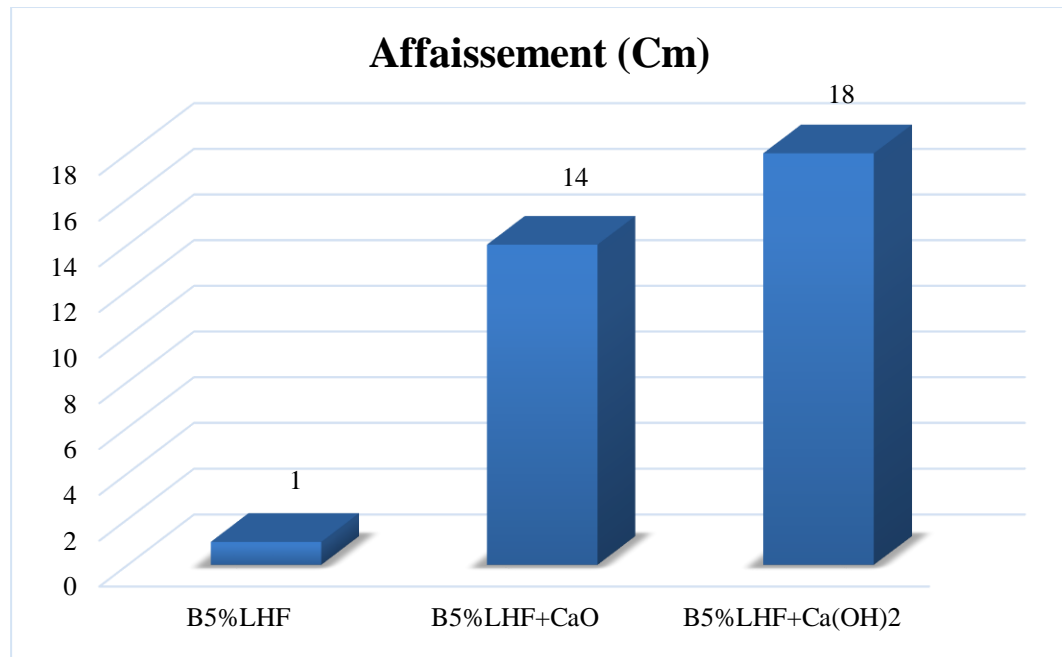


Figure IV.2 : Variation de l'affaissement des différentes séries de béton.

Interprétation

D'après l'histogramme ci-dessus on remarque que :

Pour un rapport E/C = 0.5, et une quantité d'adjuvant de 0.5%, le béton obtenu avec addition (5% LHF) [29] est ferme (affaissement ≤ 4). Et Cela revient à nature de la finesse de l'addition ajouté (très fines).

- Béton avec activateur CaO : une augmentation de la consistance de béton ferme à un béton très plastique. Ce qui veut dire que cet activateur a influé sur l'ouvrabilité du béton.
- Béton avec activateur Ca(OH)₂ : une augmentation de la consistance de béton ferme à un béton fluide. Ce qui veut dire que cet activateur a une influence considérable sur la consistance et l'ouvrabilité du béton.

Cette amélioration de l'ouvrabilité nous offre la possibilité de réduire le rapport E/C. en vue d'améliorer les résistances des bétons au laitier. Et d'après Lange et al pour un écoulement spécifique, l'ajout d'une quantité optimale de L.H.F finement broyé réduit la demande en eau [29].

On conclut que la nature et le dosage de l'activateur peut avoir une influence sur l'ouvrabilité et la consistance du béton.

IV.2.1.2 Mesure des masses volumiques fraîches ρ

Il s'agit de prendre le poids des éprouvettes de béton à l'état frais, et en le divisant par le volume de cette dernière, et cela pour chaque série de béton.

Cet essai consiste à :

- Peser le récipient (volume V) à vide, soit M sa masse en Kg.
- Peser le récipient rempli, soit M_t sa masse en Kg.

La masse volumique des bétons frais sont alors

$$\rho_{BF} = \frac{M_t - M}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Avec :

M_t : masse de récipient plein.

M : masse de récipient.



Figure IV.3 : La masse volumique de béton frais.

- **Résultats et interprétations de la mesure de la masse volumique fraîche :**

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe **D** et par la figure ci-dessous :

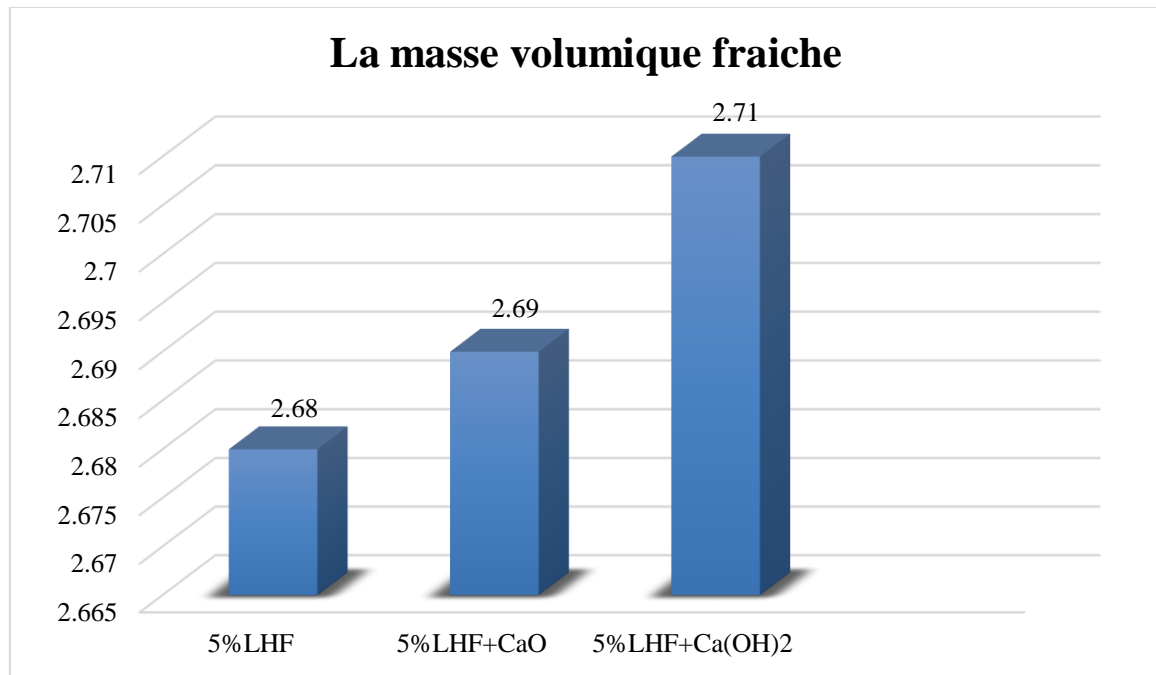


Figure IV.4 : La masse volumique fraîche des différentes séries de béton.

Interprétation

D'après la figure ci-dessus, on constate que :

Chaque activateur influe sur la masse volumique fraîche du béton. Cela ne peut s'expliquer que par la masse initiale et propre de chaque activateur utilisé.

IV.2.2 Essais sur les bétons durcis

- **Conservation du béton**

Après démoulage, on mesure la masse de chaque éprouvette, après elles doivent être conservé dans l'eau pendant 28 jours.



Figure IV.5 : Conservation des éprouvettes du béton au LHF dans l'eau.

IV.2.2.1 Mesure des masses volumiques

On mesure la masse de chaque éprouvette à 0 jour, 1 jour, 3 jours, 7 jours, 14 jours, 21 jours et 28 jours.

- **Résultats et interprétations de la mesure de la masse volumique :**

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe **D** et illustrés par la figure suivante :

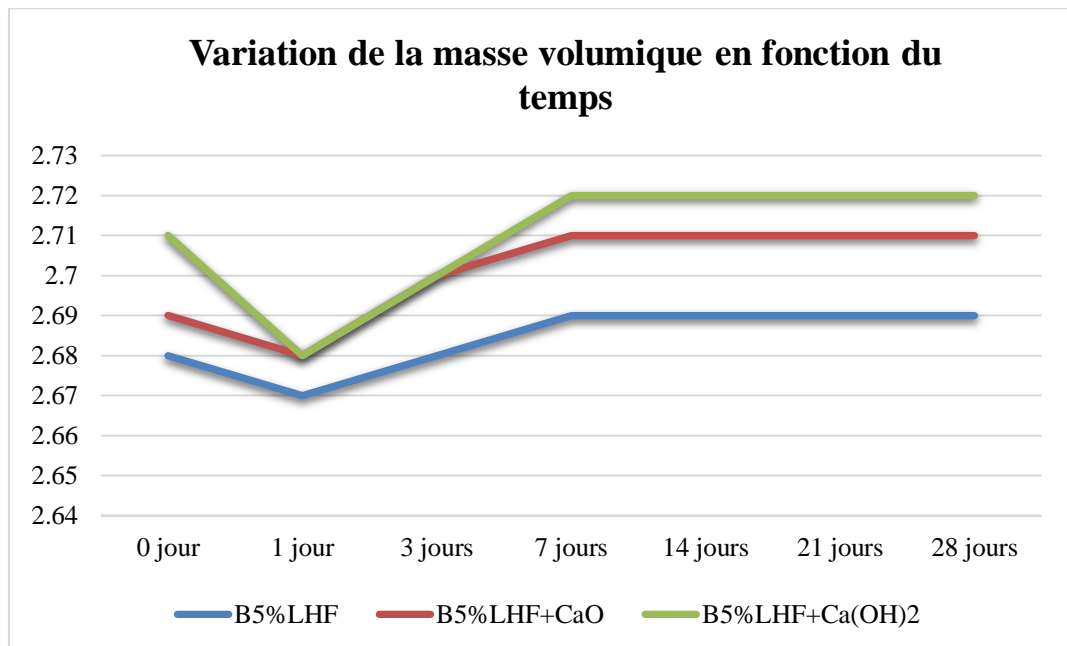


Figure IV.6 : Masses volumiques des différentes séries de béton en fonction du temps.

Interprétation

Chaque activateur influence différemment sur les masses volumiques fraîches des bétons (il s'agit des réactions chimiques entre le laitier et les activateurs).

Entre le jour de confection 0 jour et 1 jour, on remarque une forte diminution de la masse volumique de toutes les séries du béton et cela revient à l'exposition des éprouvettes à l'air ambiant, ce qui dit le séchage du béton et l'évaporation de l'eau.

A partir de 1 jour jusqu'à 7 jours, on remarque une augmentation des masses volumiques des bétons, qui s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment, sachant que les éprouvettes de bétons ont été conservées dans l'eau à une température ambiante (absorption de l'eau).

Du 7 jour jusqu'à 28 jours, les masses volumiques sont peu variables (presque constantes pour toutes les séries du béton), du fait de la stabilisation des masses (saturation et peu d'absorption).

IV.2.3 Essai de la durabilité

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement [32].

Le béton est un matériau durable qui offre une résistance remarquable aux différentes agressions lorsqu'il est correctement mis en œuvre.

L'essai de durabilité a pour objectif de déterminer la résistance à 28 jours des bétons conservés dans des milieux agressifs, ainsi que l'observation de l'état de dégradation des différents échantillons.

- **Conservations des échantillons de béton dans des milieux agressifs**

L'objectif de cette partie d'étude est d'observer la résistance et le comportement des bétons à base de laitier de haut fourneau conservés dans des solutions neutre, basique, sulfaté et acide.

Pour la caractérisation de la résistance chimique vis-à-vis des attaques par des solutions agressives, des éprouvettes de béton de forme cubique de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ont été conservées 35 jours dans l'eau à une température ambiante. Après la durée de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées afin de déterminer la masse des échantillons de béton avant leur mise dans la solution d'attaque. Les échantillons qui ont donné la meilleure résistance à l'essai d'écrasement (5% du LHF, 5% du LHF activé avec CaO et activé avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$) sont ensuite mis dans une solution agressive de 5% de concentration. Un suivi de l'évolution de la durabilité par la dégradation des différents échantillons de béton est considéré.

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée à court terme.

➤ **Milieu neutre**

- Conserver 02 cubes de chaque série dans un bac contenant de l'eau distillée et mettre le couvercle afin d'éviter l'évaporation de l'eau.



Figure IV.7 : Eau distillée.

Mesurer la masse et les dimensions de ces cubes à l'aide d'un pied à coulisse à 0j, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j.



Figure IV.8 : Mesure de la masse et les dimensions des cubes.



Figure IV.9 : Conservation dans un milieu neutre.

➤ *Attaque des chlorures*



Figure IV.10: Acide hydrochlorique HCl.



Figure IV.11 : Préparation de la solution de 5% de HCl.



Figure IV.12 : Conservation dans un milieu acide.

➤ *Attaque sulfatique*

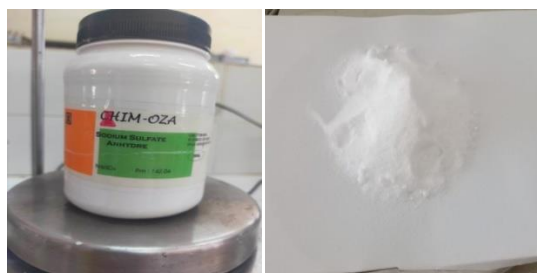


Figure IV.13: Sulfate de sodium Na_2SO_4 .

Agiter le mélange jusqu'à ce que les sulfates de sodium soit complètement dissoute.



Figure IV.14: Agitation de la solution de sulfate de sodium.



Figure IV.15 : Conservation dans un milieu Sulfatique.

➤ *L'attaque basique*



Figure IV.16: l'hydroxyde de sodium NaOH.



Figure IV.17: Agitation de la solution de l'hydroxyde de sodium.



Figure IV.18 : Conservation dans un milieu basique.

IV.2.3.1 Variation de la masse

On mesure la masse de chaque éprouvette à 0jour, 3jours, 7jours, 14jours, 21jours, 28 jours et 35 jours.



Figure IV.19: Photos des cubes conservés dans différents milieux à 35 jours.

● **Résultats et interprétations de la variation de la masse :**

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe E et présentés par les figures suivantes :

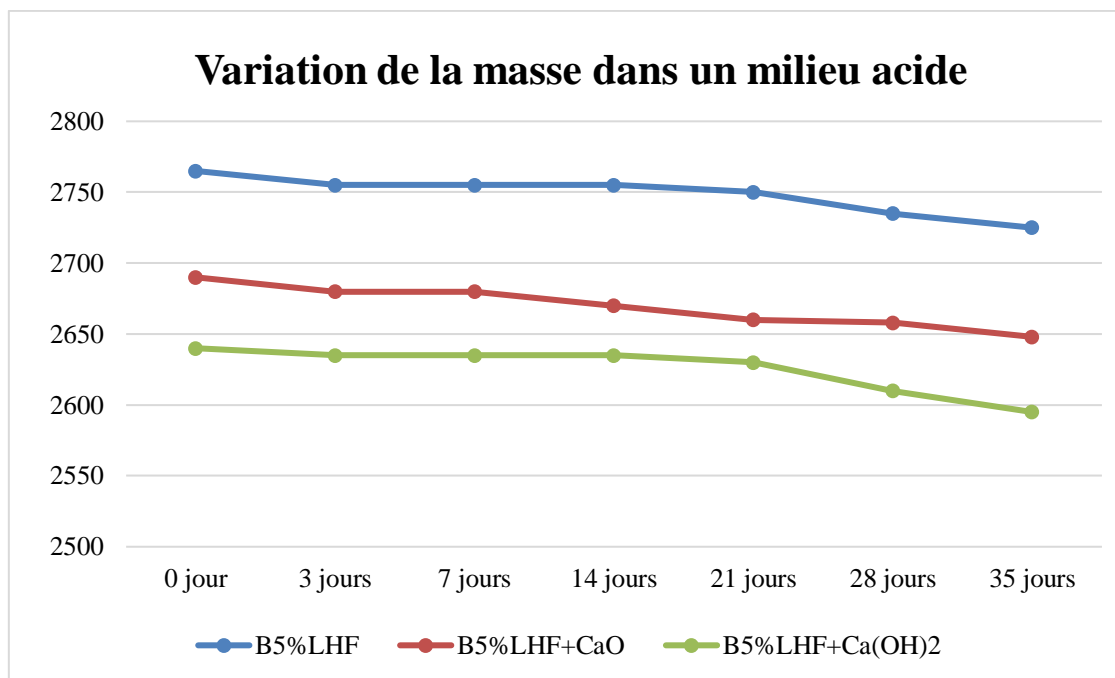


Figure IV.20 : Variation de la masse dans un milieu acide en fonction du temps.

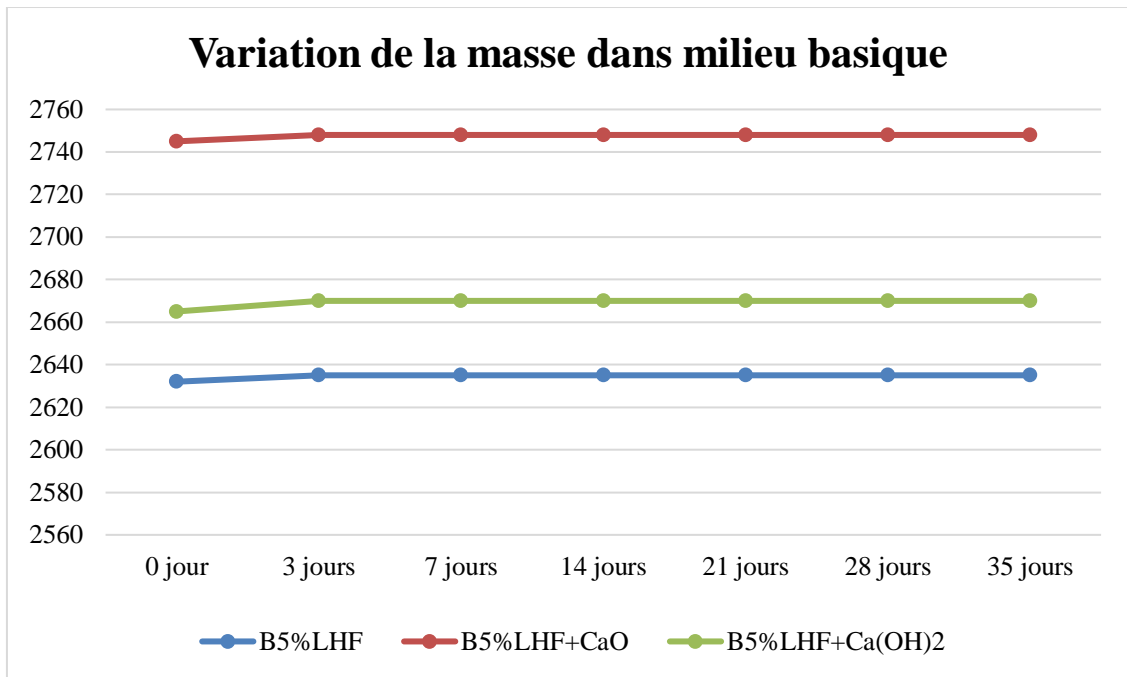


Figure IV.21 : Variation de la masse dans un milieu basique en fonction du temps.

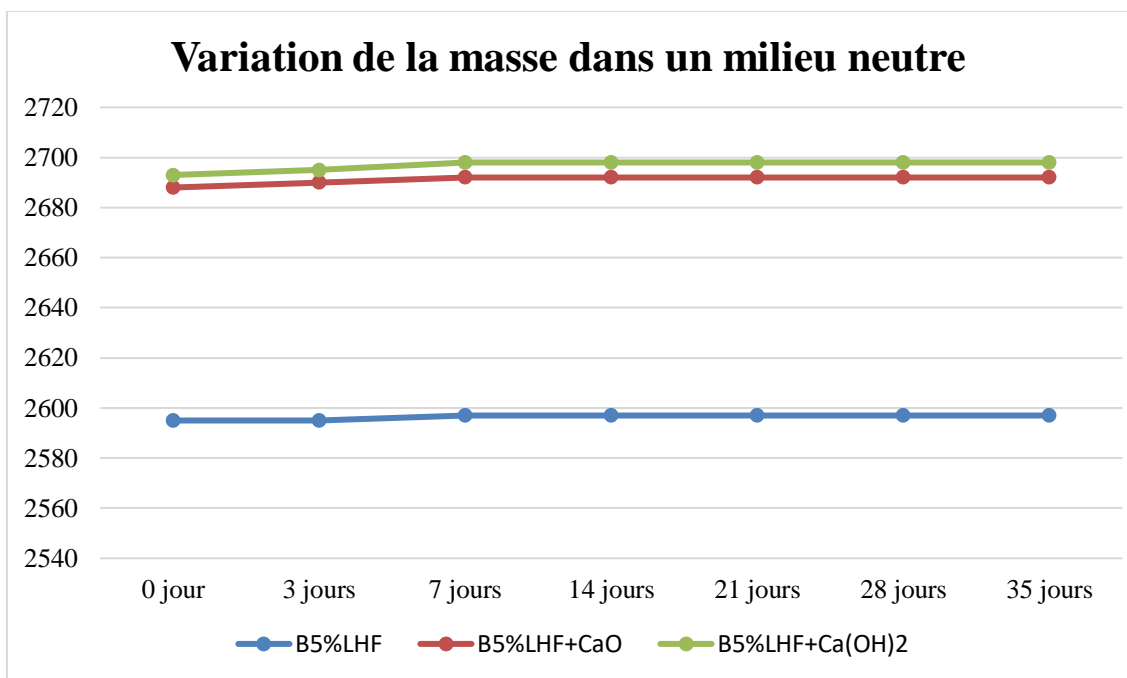


Figure IV.22 : Variation de la masse dans un milieu neutre en fonction du temps.

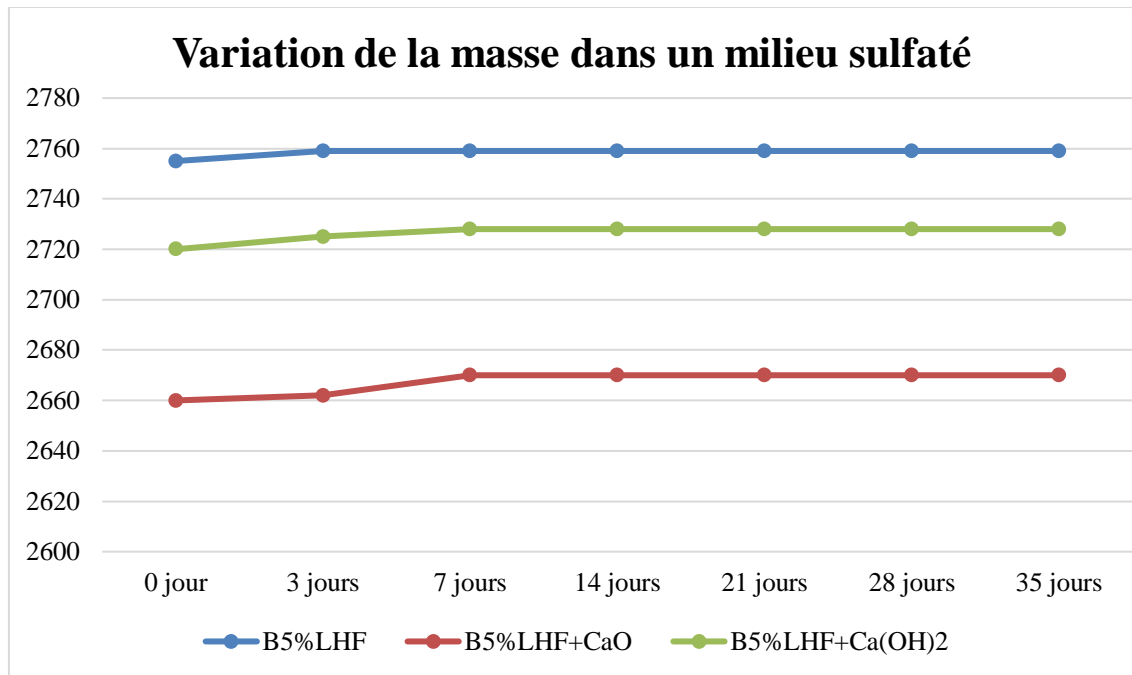


Figure IV.23 : Variation de la masse dans un milieu sulfaté en fonction du temps.

Interprétation

Après l'immersion des échantillons dans les différents milieux pendant une période de 35 jours, les échantillons sont pesés et pris en photo.

On constate que les changements sont insignifiants pour tous les milieux sauf celui du milieu acide qui est affecté par l'attaque.

Donc, les attaques chimiques n'ont pas dégradé les propriétés physiques des bétons ainsi que leur durabilité, et cela revient au temps d'immersion qui est très court (35 jours), alors que le phénomène de durabilité est étudié à long terme.

IV.2.3.2 Variation des dimensions

Les résultats en fonction de l'âge sont donnés par la **figure IV.19** :

Interprétation

On constate que le changement des variations des dimensions sont insignifiants pour tous les milieux, aucun changement dans leurs dimensions.

IV.2.4 Essai de compression (NF EN 12390-3)

Il consiste à déterminer la résistance des éprouvettes lorsque celles-ci sont soumises à un effort de compression centré [33].



Figure IV.24 : Eprouvettes de béton lors de l'écrasement après 35 jours de conservation dans des milieux agressifs.

- **Résultats et interprétations d'essai de compression à la résistance :**

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe E et illustrés par la figure suivante :

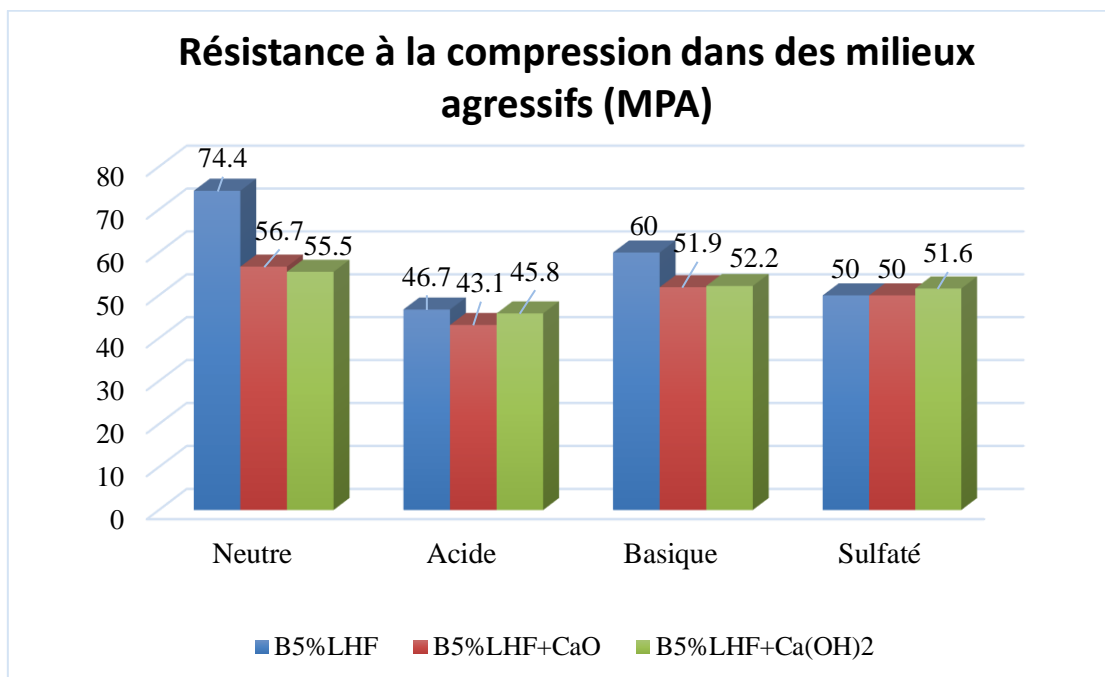


Figure IV.25: Variation de la résistance à la compression à 35 j des bétons conservés dans des milieux agressifs.

Interprétation

D'après l'histogramme ci-dessus:

Les bétons avec 5% LHF enregistrent la plus grande résistance à la compression dans tous les milieux.

On note une diminution de résistance de ceux conservés dans le milieu basique et sulfaté par rapport à celle de milieu neutre, les bétons à 5%LHF activé avec CaO enregistré une faible résistance.

On constate une forte diminution de la résistance pour les bétons conservé dans le milieu acide due principalement à l'attaque des chlorures.

Donc on peut conclure que les bétons à base de 5%LHF activé avec CaO a donné la résistance la plus faible par rapport à celle du témoin (5% de LHF) et à celles d'autres bétons à 35 jours dans des milieux agressifs.

C'est la même constatation de plusieurs travaux de recherche effectués sur la résistance chimiques des mortiers avec et sans ajouts à l'attaque de l'acide (HCl), (Ghrici et al. 2006 [34] ; Ghrici et al. 2007) [35].

IV.2.5 Essais d'auscultation Sonore (ULTRA-SON)

L'auscultation par ultrason est une méthode non destructive destinée entre autres à tester l'homogénéité du béton, elle consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variantes telles que l'âge du béton, les conditions d'humidités, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et des fissures. Le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité d'une structure, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées.



Figure IV.26 : Mesure du temps de propagation des ondes.

IV.2.5.1 Mouillage-Séchage

Les vitesses du son à travers les différentes séries de béton se déterminent après chaque cycle, c'est-à-dire : la conservation des spécimens dans l'eau pendant 48 heures puis les séchés dans une étuve aussi pendant 48 H à une température de 40°C. Cette opération est répétée pendant 28 jours.

- **Résultats et interprétations d'essai d'auscultation Sonore (ULTRA-SON) :**

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau de l'annexe F.

Interprétation

D'après les résultats présentés dans le tableau de l'annexe F, les vitesses calculées sont ≥ 4200 m/s, donc les bétons sont qualifiés de très haute résistance. On ne peut pas déterminer leurs résistances à partir de l'abaque du RILEM.

IV.2.6 Analyse par DRX

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique d'analyse qui permet d'étudier et d'identifier les différentes phases cristallines présentes dans un échantillon. Pour les différents types de béton, on a prélevé des échantillons de bétons des éprouvettes immergées 35 jours dans les solutions agressifs (Na_2SO_4 , NaOH, HCl, et l'eau distillé), après une conservation normale de 28 jours dans l'eau potable.

Ces échantillons sont broyés puis tamisés (sous forme de poudre).

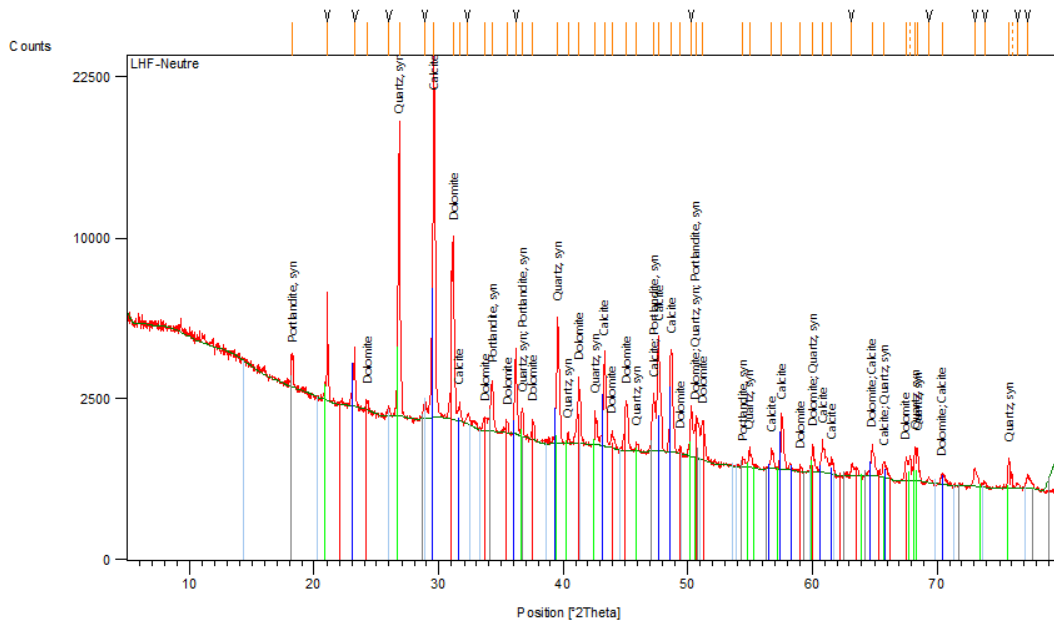


Figure IV.27: Spectre DRX du béton à 5% du LHF conservé dans un milieu neutre.

Interprétation

Le spectre DRX obtenu pour le béton à 5% du LHF conservé dans un milieu neutre indique l'existence de deux phases majoritaires : la Calcite ($CaCO_3$) détecté en quantité importante et du Quartz (SiO_2).

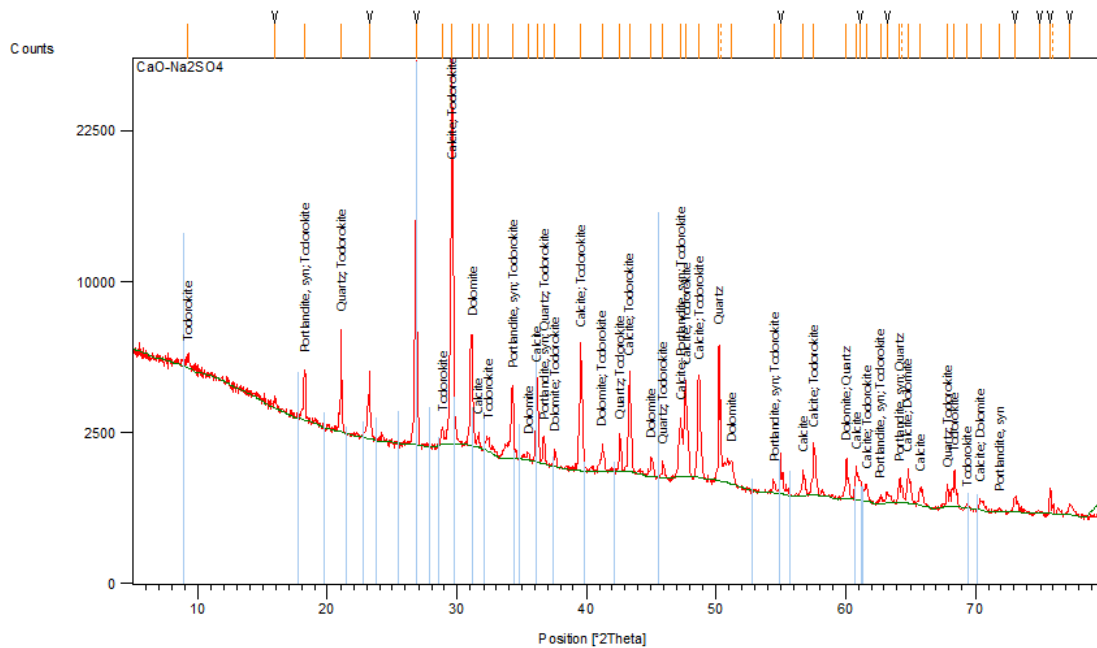


Figure IV.28: Spectre DRX du béton à 5% du LHF activé avec CaO conservé dans un milieu sulfaté.

Interprétation

Le spectre DRX obtenu pour le béton à 5% du LHF activé avec CaO conservé dans un milieu sulfaté indique l'existence d'une phase majoritaire : la Calcite (CaCO_3) détecté en quantité importante.

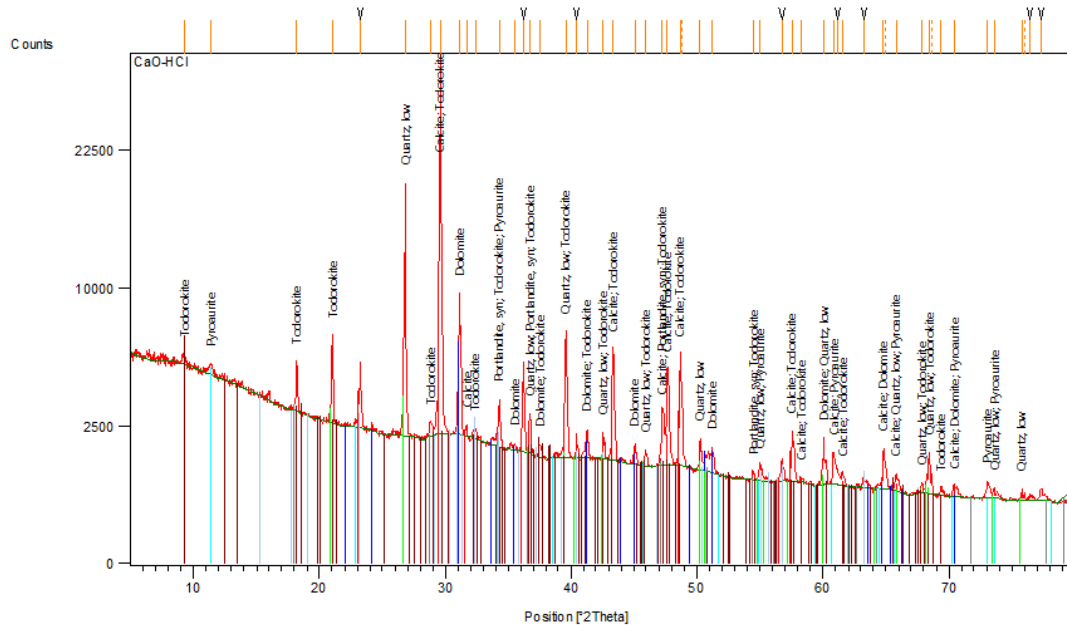


Figure IV.29: Spectre DRX du béton à 5% du LHF activé avec CaO conservé dans un milieu Acide.

Interprétation

Le spectre DRX obtenu pour le béton à 5% du LHF activé avec CaO conservé dans un milieu acide indique l'existence deux phases majoritaires : qui sont la Calcite (CaCO_3) et le Quartz (SiO_2) détectés en quantité importante.

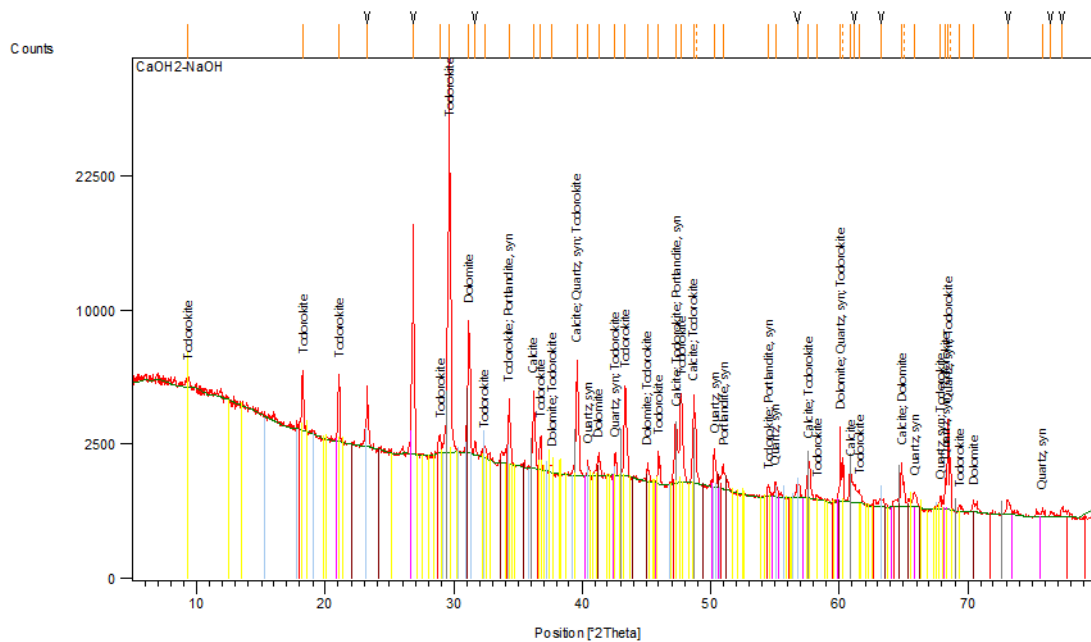


Figure IV.30: Spectre DRX du béton à 5% du LHF activé avec Ca(OH)_2 conservé dans un milieu basique.

Interprétation

Le spectre DRX obtenu pour le béton à 5% du LHF activé avec Ca(OH)_2 conservé dans un milieu basique indique l'existence d'une phase majoritaire : l'intensité des pics de la todorokite (Mn) est relativement plus importante, la Todorokite détecté en quantité.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les différents résultats obtenus sur les essais mécaniques et physiques réalisés sur les bétons à base de laitier de haut fourneau latent et activé. Nous avons conclu que la meilleure résistance est celle de 5% du LHF dans un milieu neutre.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'utilisation d'un sous produit industriel, qui est le laitier granulé broyé de hauts fourneaux d'EL-HADJAR dans les bétons.

L'objectif de cette recherche est l'étude de la durabilité des bétons à 5%LHF activé avec la chaux Cao et l'hydroxyde de calcium Ca (OH)₂.

A partir de cette étude et d'après les résultats obtenus des essais effectués sur les bétons contenant les laitiers de hauts fourneaux avec et sans activateurs, on peut conclure ce qui suit :

- ❖ Les laitiers de haut fourneau réduisent la demande en eau de gâchage (E/C).
- ❖ Les bétons à base de la chaux et l'hydroxyde de calcium ne résistent pas dans les milieux agressifs, après avoir donné une résistance qui est inférieure à celle obtenue à 5% du laitier de haut fourneau dans un milieu neutre.
- ❖ Il y a eu une dégradation visible (importante) des bétons dans le milieu contenant les chlorures.
- ❖ Les essais de durabilité ont donné des résultats insignifiants, cependant une durée complémentaire de conservation des échantillons dans les milieux agressifs est nécessaire pour voir la dégradation des matériaux à long terme.

Les laitiers de hauts fourneaux peuvent être utilisés sans activateurs dans les bétons structuraux.

En fin nous proposons comme perspectives de recherche ce qui suit :

- ❖ Etude de la durabilité des bétons à base de laitier de haut fourneau à long terme.
- ❖ La valorisation du laitier de haut fourneau dans les bétons de hautes performances.
- ❖ Etude d'autres propriétés des bétons aux laitiers de haut fourneau.

Références bibliographiques

- [1] **Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M.**, "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", *Cement & Concrete Composites* 29 pp.542–549, (2007).
- [2] **Domitille le CORNEC**, "Etude de la structure des laitiers vitrifiés de hauts fourneaux et de leur réactivité à l'eau en milieu basique". Sorbonne université 2019.
- [3] **V- PHOUMMAVONG** "cours en ligne matériaux de construction". Université national LOAOS 2006.
- [4] [[http://www.unpp.fr/accueil/nos-activites/les granulats-en-bref/](http://www.unpp.fr/accueil/nos-activites/les-granulats-en-bref/)].
- [5] **MHAMED Adjoudj.** " Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique de béton mécaniques des matériaux" [physics.class-ph]- Université de cergy.pontoise, 2015.
- [6] **Benaissa Rahel asma, Bouhania Imen**, "Durabilité d'un mortier léger (granulat pozzolonique) ", mémoire de master, centre université d'ain témouchent Belhaj Bouchaib années 2015.
- [7] Article L.541-1 du code de l'environnement Isabelle Deportes, Ademe-service prévention et Gestion des déchets, Angers Mis à jour. Le 16 août 2022.
- [8] **SAADANI Sabrina** "Comportement des bétons à base de granulats recyclés" mémoire de magister Université Mentouri Constantine. année 2010.
- [9] **N.CHELOUAH**, Cours de matériaux Innovants, chapitre2 "Valorisation des matériaux "Master 1, Université de Bejaia 2020/2021.
- [10] **Alexandre L. et sefileau J.L.**, "Le laitier de haut fourneau", édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988,340P.
- [11] Document technique de la direction de la recherche appliquée (DRA) du complexe. Sidérurgique d'el Hajar, 1989.
- [12] **Dussart .J.** "Le laitier de hauts fourneaux et laitier d'aciérie (L.D) ". Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil, vol II –PP.279-295, Paris, (1978).
- [13] **Amouri C.** "Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (caractérisation, performances, Durabilité) ", thèse de doctorat, université Constantine 2009.
- [14] **Kriker.A.**, "Durabilité du béton à base de laitier", mémoire de magister, ENP, Alger, (1992).
- [15] **Bougara A., Lynsdale C-, EZZ aine K.** "Activation of Algerian slag in mortars", *construction and building. materials* 23-542-547, (2009).

- [16] [[http://decplay.fr/3517289-valorisation des déchets industriels.html](http://decplay.fr/3517289-valorisation-des-dechets-industriels.html)].
- [17] **J. J. Chang, W. Yeih, C. C. Hung.** " Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicatebased slag pastes". Cement and Concrete Composites 27 (1) pp. 85-91(2005).
- [18] **M. Daimon,** Mécanisme et cinétique de l'hydratation du ciment au laitier Proceedings of the 7^{ème} International Conference on the Chemistry of Cement, Paris, 1980
- [19] **BARRON J SAUTEREY .R** " le béton hydraulique bullerai des laboratoires des ponts et chaussées paris p 559 ".
- [20] **JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT,** "La durabilité des bétons". «Chapitre 12»/ATILH/ 2008.France.
- [21] **Khelifa, M. R.** (2010). "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants". Thèse de doctorat, Université d'Orléans et Université de Constantine.
- [22] **Leir Fatima Zohra, Benabderrahmane Amira Aya,** "Étude de la perméabilité à l'eau comme indicateur de la durabilité du béton", Mémoire Master Académique, 2019/2020.
- [23] **Dreux G. et Festa. J,** "Nouveau guide du béton et de ses constituants" Edition, Eyrolles- Paris- 8^{ème} édition, 8^{ème} tirage, 2007.
- [24] **R. DUPAIN, R. LANCHON, et J.C. SAINT-ARROMAN :** "Granulats, sols, ciment et béton (caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire) ", Edition CASTEILA, 2004.
- [25] Article 10.1.3; Normalisation française des classifications; Granulat, définitions conformité, octobre 1997.
- [26] **BOURBIER T., COUSSY O., ZINSZNER B.,** (1986)." Acoustique des milieux poreux". Publications de l'IFP, Coll. Science et Technique du pétrole, N°27, Éditions TECHNIP, p340.
- [27] **George. Dreux, Jean Festa,** "nouveau guide de béton et de ses constituants, édition Eyrolles", 3^{ème} édition, 416p, 1998.
- [28] **M.LAAKRI,** "Evolution de la prise et du durcissement des bétons formules à base de laitier de haut fourneau", Magister, Université U.S.T.H.B, 2010.
- [29] **ZADRI.H, IDIR .M,** "Activation du Laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons", Mémoire master II Université de Bejaia, 2021/2022.
- [30] **L.ZEGHICHI, B.MEZGHICH et A.Merzouqui,** "influence de l'activation du laitier sur le comportement mécanique des bétons", Lebanese Science Journal, Vol. 8, No. 2, 2007.
- [31] **S.ATTIL :** "TP 3^{ème} année licence sur les matériaux de construction" Université de Bejaia 2010.

- [32] **A.Hocine**, "Etude des bétons à base des sables de dune", Mémoire de magister, Université Mohamed Kheider de Biskra, 2009.
- [33] **BOUBKEUR .L, HAMMADOUCHE .N**, "Valorisation des boues de dragages dans les bétons et les mortiers", Mémoire fin d'étude, Université de Bejaia, 2015/2016.
- [34] **Ghrici M., Kenai S et Meziane. E.** "Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian Natural pouzzolane". J Mater Sci 41:pp 6965–6972. (2006).
- [35] **Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M.**, "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", Cement & Concrete Composites 29 pp.542–549, (2007).

Annexes

Annexe A

- Fiche technique du ciment



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GRUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE

SOCIETE DES CIMENTS D'AIN EL KEBIRA
« S.C.A.E.K »

S.P.A au Capital Social de : 2 200 000 000,00 DA: ش.ذ.أ. رأسمالها الإجمالي:

N° Identification fiscale : 0998 19008236318 / N° Article d'imposition : 1902.20.10.011 / N° Registre de commerce : 98 B 0082363

Réf 005 / D PQE/DDDS/SCAEK/2023

Ain El Kebira le : 05/01/2023

FICHE TECHNIQUE CIMENT « ligne 1 »

MOIS : Octobre 2022

CEM I 42.5 N-LH/SR5

Conformément à la norme NA 442 édition 2013 « NF EN 197-1 : 2012 »

COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 196-2)			Essais physiques Norme (NF EN « 196-3 : 2017 et 196-6 : 2018 »)		Garantie 197-1 (2012)	Mesures
ELEMENTS	%	Mesures	P.S	(g / Cm ³)	/	3.22
SiO ₂ -T	%	20.88	SSB	cm ³ /g	/	3412
Al ₂ O ₃	%	4.47	Début De Prise	minute	≥ 60	217
Fe ₂ O ₃	%	5.11	Fin De Prise		/	328
CaO-T	%	63.52	Expansion A. Chaud	millimètres	≤ 10	0.00
MgO	%	1.40	Refus 45 µ	%	/	12.50
SO ₃	≤ 3%	2.36	Consistance Normale	%		26.58
K ₂ O	%	0.32	Chaleur d'hydratation(LH)	J/g	≤ 270	231.8
Na ₂ O	%	0.15	S.C.A.E.K			
Cl	≤ 0,1%	0.001				
P.A.F.	≤ 5%	0.75				
CaO Libre (PT207 CERILH 1970)	%	0.66				
R.Insoluble	≤ 5%	0.71				
COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER (BOGUE)			CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (NF EN 196-1 : 2016)			
C ₃ S	%	58.55	R. Flexion (MPa)	02 JOURS	/	4.6
C ₂ S	%	13.68		28 JOURS	/	8.1
C ₃ A	≤ 5%	3.20	R. Compression (MPa)	02 JOURS	LI ≥ 10.0	21.7
C ₄ AF	%	15.55		28 JOURS	LI ≥ 42.5	57.2

Le chef de service contrôle de qualité P/I

Moustapha L.E.KHIM
 Directeur Développement
 Durable et Sécurité

BOUGHEDOUS Maweddine
 Cadre en Charge



SIÈGE SOCIAL : Ouled Adouane, BP 01 Ain El Kebira (W.848) Algérie
 Direction Générale : Tel : (036) 82.83.39 / (036) 82.83.41 – Fax : (036) 82.83.46
 Unité : Tel : (036) 60.80.80 / (036) 60.82.82 / (036) 60.83.83 – Fax : (036) 60.81.81
 Site Web : www.scaek.dz

- **Fiche technique de l'adjuvant**



The Chemical Company

MasterGlenium SKY 841

(Anciennement GLENIUM® SKY 841)



EN 934.2

Marque NF
cf. Rp NF 085

Superplastifiant haut réducteur d'eau.

Description

Le MasterGlenium SKY 841 est un superplastifiant haut réducteur d'eau issu du long savoir de BASF Construction Chemicals en termes de formulation et d'innovation.

Le MasterGlenium SKY 841 a été développé pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises.

Particularités du MasterGlenium SKY 841

Le MasterGlenium SKY 841 se différencie des superplastifiants traditionnels par sa facilité d'utilisation notamment pour les bétons fluides et autoplaçants. Cette faible viscosité alliée à une grande robustesse de béton permettent au MasterGlenium SKY 841 d'améliorer considérablement le comportement dynamique et ainsi la mise en oeuvre des bétons tout en optimisant le dosage en liant du béton.

Domaines d'application

Le MasterGlenium SKY 841 est recommandé pour la fabrication de béton plastique à autoplaçant nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le MasterGlenium SKY 841 est donc adapté à l'industrie du béton prêt à l'emploi ainsi qu'aux chantiers de Génie Civil. Le MasterGlenium SKY 841 peut être utilisé pour la réalisation des bétons suivants :

- Béton prêt à l'emploi selon la norme NF EN 206-1/ CN
- Béton pompé
- Béton autoplaçant
- Béton hautes performances et ultra hautes performances
- Béton architectonique

Propriétés

L'excellent effet de dispersion de la chimie des MasterGlenium permet de conserver une consistance S4 ou S5 sur des bétons à faibles rapport E/C pendant plus de 90 minutes sans retard de prise.

Le MasterGlenium SKY 841 offre les avantages suivants :

- Béton de faible viscosité même à rapport E/C très faible
- Long maintien de l'ouvrabilité sans retard de prise préjudiciable
- Bonne réactivité avec les ciments recomposés
- Bonne robustesse vis-à-vis du ressuage et de la ségrégation
- Optimisation des dosages en liant
- Grande plage de dosage possible
- Bonne réactivité avec les granulats concassés
- Amélioration de la durabilité des bétons liés au faible E/C
- Amélioration des parements

Mode d'emploi

L'effet optimal est généralement obtenu par incorporation du MasterGlenium SKY 841 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le MasterGlenium SKY 841 dans l'eau de gâchage.

Eviter d'ajouter le MasterGlenium SKY 841 directement sur les granulats.

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,2 à 3,0% du poids du ciment soit 0,19 à 2,83 l pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF C.C.

Compatibilité

Pour une utilisation en synergie avec un autre adjuvant de la gamme BASF, consultez votre Agent local BASF France - Division Construction Chemicals.

Précautions d'emploi

Le MasterGlenium SKY 841 n'est pas soumis à étiquetage.



The Chemical Company

MasterGlenium SKY 841

(Anciennement GLENIUM® SKY 841)



EN 934.2

Marque NF
cf. Rp NF 085

Superplastifiant haut réducteur d'eau.

Caractéristiques

Aspect	liquide
Couleur	brun
Masse volumique à + 20° C	1,06 ± 0,03 g/cm ³
pH	5,5 ± 1,8
Teneur en chlore	< 0,1 %
Extrait sec	26,0 % ± 1,3%
Na ₂ O eq	≤ 2 %
Transport	non classé
Etiquetage	pas de symbole exigé

Stockage

Durée de vie	Le MasterGlenium SKY 841 a une durée de vie de 12 mois.
Stockage	Il est recommandé de stocker le MasterGlenium SKY 841 dans des conditions de températures supérieures à +5° C.
Conditionnement	Le MasterGlenium SKY 841 est disponible en Bidon de 10 L, fût de 210 L, container de 1000 L et vrac.

FT_MasterGlenium_SKY_841_V1 - Edition 10/2013 - Page 2/2

BASF France SAS - Division Construction Chemicals a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie HDI Gerling France. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société d'assurances HDI Gerling Allemagne.

BASF France SAS - Division Construction Chemicals
Z.I. Petite Montagne Sud - 10, Rue des Cévennes - Lisses - 91017 Evry Cedex
Tél. : 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 86 06 32 www.master-builders-solutions.basf.com

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences BASF France SAS - Division Construction France.

Conformément à la réglementation en vigueur, nos Fiches de Données de Sécurité (FDS) sont transmises automatiquement (par courrier postal ou électronique) aux clients livrés. En dehors de cette situation, contacter votre chargé de Clientèle pour tout autre besoin de FDS.

MASTER®
BUILDERS
SOLUTIONS

Annexe B

(Laitier de haut fourneau EL HADJAR ANNABA)

- Composition minéralogique du laitier :

Composant	Pourcentage %
Si O ₂	39.25
Al ₂ O ₃	11.40
Fe ₂ O ₃	2.23
CaO	41.12
MgO	3.22
SO ₃	0.18
K ₂ O	0.94
Na ₂ O	0.16
P ₂ O ₅	0.02
TiO ₂	0.36
P. F	1.02

Caractéristiques du laitier de haut fourneau	
Masse volumique réelle(g/cm ³)	2.73
Masse volumique En vrac (g/cm ³)	0.89
Surface spécifique Blaine(cm ² /g)	5300
Indice de basicité CaO/SiO ₂	1.4

Annexe C

- Valeurs de K

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (Du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+ Superplastifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6
<p>Nota1 : correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa .la correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6Mf - 5$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut être varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle.</p> <p>Nota 2 : correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à 10 environ. Selon le degré de plasticité désiré.</p>							

- Valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassé : -0,01
- Sable et gravier concassé : -0,03

Annexe D

- Les valeurs des masses volumiques obtenues sur le béton frais

Les valeurs des masses volumiques de 0 jour					
Série des bétons	V (Cm ³)	M moule (g)	M t (g)	Mt -M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/cm ³)
B5%LHF	5000	5160	18585	13425	2,68
B5%LHF+CaO	5000	5160	18605	13445	2,69
B5%LHF+Ca(OH)₂	5000	5160	18690	13530	2,71

Les valeurs des masses volumiques de 1 jour			
Série des bétons	V (Cm ³)	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm ³)
B5%LHF	1000	2672	2,67
B5%LHF+CaO	1000	2682	2,68
B5%LHF+Ca(OH)₂	1000	2680	2,68

Les valeurs des masses volumiques de 3 jours			
Série des bétons	V (Cm ³)	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm ³)
B5%LHF	1000	2680	2,68
B5%LHF+CaO	1000	2700	2,70
B5%LHF+Ca(OH)₂	1000	2700	2,70

Les valeurs des masses volumiques de 7 jours			
Série des bétons	V (Cm ³)	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm ³)
B5%LHF	1000	2692	2,69
B5%LHF+CaO	1000	2710	2,71
B5%LHF+Ca(OH)₂	1000	2720	2,72

Les valeurs des masses volumiques de 14 jours			
Série des bétons	V (Cm ³)	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm ³)
B5%LHF	1000	2692	2,69
B5%LHF+CaO	1000	2710	2,71
B5%LHF+Ca(OH)₂	1000	2720	2,72

Les valeurs des masses volumiques de 21 jours			
Série des bétons	V (Cm ³)	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm ³)
B5%LHF	1000	2692	2,69
B5%LHF+CaO	1000	2710	2,71
B5%LHF+Ca(OH)₂	1000	2720	2,72

Les valeurs des masses volumiques de 28 jours			
Série des bétons	V (Cm³)	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm³)
B5%LHF	1000	2692	2,69
B5%LHF+CaO	1000	2710	2,71
B5%LHF+Ca(OH)₂	1000	2720	2,72

- **Affaissement**

Série des bétons	Coefficient d'affaissement (Cm)	Consistance
Béton à 5% LHF	1	Ferme
Béton à 5% LHF+CaO	14	Très plastique
Béton à 5% LHF+Ca(OH)₂	18	Fluide

Annexe E
(La durabilité)

- La variation des masses

		La masse des cubes en fonctions du temps (g)						
milieux	Série	0 jour	3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	35 jours
Neutre (eau distillé)	B5%LHF	2595	2595	2597	2597	2597	2597	2597
	B5%LHF +CaO	2688	2690	2692	2692	2692	2692	2692
	B5%LHF +Ca(OH)₂	2693	2695	2698	2698	2698	2698	2698
Sulfaté (NaSo4)	B5%LHF	2755	2757	2759	2759	2759	2759	2759
	B5%LHF +CaO	2660	2662	2670	2670	2670	2670	2670
	B5%LHF +Ca(OH)₂	2720	2725	2728	2728	2728	2728	2728
Basique (NaOH)	B5%LHF	2632	2635	2635	2635	2635	2635	2635
	B5%LHF +CaO	2745	2748	2748	2748	2748	2748	2748
	B5%LHF +Ca(OH)₂	2665	2670	2670	2670	2670	2670	2670
Acide (Hcl)	B5%LHF	2765	2755	2755	2755	2750	2735	2725
	B5%LHF +CaO	2690	2680	2680	2670	2660	2658	2648
	B5%LHF +Ca(OH)₂	2640	2635	2635	2635	2630	2610	2595

- **Résistance à la compression**

milieux	Série	Résistances (Mpa)
Neutre (eau distillé)	B5%LHF	74,4
	B5%LHF+CaO	56,7
	B5%LHF+Ca(OH)₂	55,5
Sulfaté (NaSo4)	B5%LHF	50
	B5%LHF+CaO	50
	B5%LHF+Ca(OH)₂	51,6
Basique (NaOH)	B5%LHF	60
	B5%LHF+CaO	51,9
	B5%LHF+Ca(OH)₂	52,2
Acide (Hcl)	B5%LHF	46,7
	B5%LHF+CaO	43,1
	B5%LHF+Ca(OH)₂	45,8

Annexe F
(D'auscultation Sonore)

- La vitesse de propagation d'ondes à l'état mouillé

	Vitesses de propagation d'ondes (m/s)							
	0 jour	4 jours	8 jours	12 jours	16 jours	20 jours	24 jours	28 jours
B5%LHF	5090	4852	4939	4963	5194	5025	5102	5120
B5%LHF +CaO	4750	4676	4732	4869	5053	4927	5001	5025
B5%LHF +Ca(OH)₂	4881	4847	4892	4892	5038	4938	5063	5122

- La vitesse de propagation d'ondes à l'état séché

	Vitesses de propagation d'ondes (m/s)						
	2 jour	6 jours	10 jours	14 jours	18 jours	22 jours	26 jours
B5%LHF	4866	5000	4938	4987	5141	5063	5141
B5%LHF +CaO	4646	4713	4824	4881	5003	4963	5038
B5%LHF +Ca(OH)₂	4832	4857	4868	4904	4987	5000	5102

