

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur**

**Et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane MIRA- Bejaia**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



# ***Mémoire de fin d'études***

**En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie civil**

**Option : Structures**

**Sous le thème :**

***Activation du Laitier granulé broyé de haut  
fourneau dans les bétons***

**Réalisé par :**

***M<sup>lle</sup> : IDIR Melinda***

***M<sup>lle</sup> : ZADRI Hanane***

**Encadré par :**

***M<sup>me</sup> : S. ATTIL.***

**Membres de jury :**

***M<sup>er</sup> N. CHELOUAH***

***M<sup>me</sup> S. AREZKI***

**Promotion : 2021-2022**

# Remerciements

En premier lieu, je remercie le bon **Dieu**, tout puissant de m'avoir donné la force pour survivre ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés. Permis de mener à bien ce travail, pour avoir bien voulu juger ce travail. Au nom du Dieu le clément et le miséricordieux louange à **ALLAH** le tout puissant.

À ce deuxième lieu je remercie les membres de ma famille pour leurs soutiens et patience durant tout mon parcours universitaire.

Je voudrais remercier **M<sup>me</sup> S. ATTIL** ma promotrice pour l'aide qu'elle a fourni et les connaissances qu'elle a su me transmettre.

Merci aux **membres de jury** pour leur acceptation d'examiner ce mémoire et leur bienveillante attention.

J'adresse mes remerciements à monsieur le PDG de **SIKA EL-DJAZAIR**, sans lui ce projet ne pourra pas être réaliser.

Je tenais à saisir cette occasion et adresser mes profonds remerciements à **M<sup>er</sup> MEKKI** et **M<sup>le</sup> YAHIAOUI** qui m'ont guidé dans mon travail et m'ont aidé à trouver des solutions pour avancer.

Merci à toute l'équipe technique du « **LTPEST** » de Bejaia plus spécialement à **M<sup>er</sup> OUADI** et **M<sup>er</sup> AMMEUR**,

*Mille mercis pour M<sup>er</sup> KEBICHE qui m'a soutenu et aidé énormément à la réalisation de mon mémoire sans son aide je n'aurais jamais pu y arriver.*

*Je profite de l'occasion et je remercie la stagiaire ALLOUTI CHAIMA qui m'a vraiment aidé au laboratoire LTPEST.*

*Merci à la famille GUENANE pour leur accueil chaleureux durant mon déplacement.*

*Merci à la famille ZADRI pour leur accompagnement et accueil durant mon déplacement.*

*Je remercie aussi M<sup>me</sup> HABI pour sa patience avec moi durant ma recherche des produits chimiques.*

*En fin, je tiens à témoigner toute ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenue jusqu'au bout.*

*Melinda.*

## *Remerciements*

*Avant tous nous remercions dieu de nous avoir donné la force et le courage de mener ce travail à terme.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à madame S. ATTIL, ma promotrice, qui nous a proposé ce sujet et accepté de nous encadrer, je la remercie vivement pour l'aide qu'il m'a apportée, Son avis, ses remarques, ses critiques et ses qualités humaines ont été très précieuses pour l'élaboration de ce travail.*

*je remercie les membres de jury de s'être donné la peine d'examiner notre modeste travail.*

*Un grand merci à Mer TAHIR, Mer BOUZIDI et Mer OUADI pour leur soutien et surtout leur aide au laboratoire.*

*Je remercie également Mlle YAHIAOUI pour sa disponibilité et ses conseils fraternels, a toute l'équipe technique du laboratoire LTP-EST de Bejaia.*

*Dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin.*

*Enfin, je n'oserais oublier de remercier tout le corps professoral de l'université Abderrahmane Mira Bejaia, pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes chers parents : qui m'ont toujours aidé et soutenu tout au Lang de mon cursus, à cette occasion j'ai voulu partager ma joie avec eux et voir leurs sourire, que dieu les gardes à nous.*

*À mon cher frère AMER qui m'a beaucoup soutenu et a toujours été présent pour moi et son épouse et en particulière mes deux anges FAYAA et DAOUD.*

*À mes chères sœurs WISSAM LIMA et SILIA et leurs époux et familles.*

*À ma petite ange sœur DOUAA que dieu la garde à nous.*

*À mes chères amies : IMEN ; AMINA, DIHYA, LAMIA, LEILA.*

*À tous ce qui m'aime et me connais.*

*À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail à tous ceux que j'ai omis de cité.*

*Hanane.*

## Résumé

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

Dans cette étude nous avons utilisé le laitier granulé broyé de haut fourneau dans la confection des bétons, l'utilisation d'un tel déchet industriel comme matériau de substitution permet de sauvegarder une partie importante des ressources naturelles et protéger l'environnement.

Pour atteindre l'objectif visé nous avons incorporé le laitier dans les formulations des bétons à différentes teneurs (5%, 10%, 15%, 20%), tout en substituant le ciment, ainsi que l'activation de ces derniers avec différents activateurs. La caractérisation de ces bétons a été faite à partir de leurs propriétés mécaniques telle que la résistance à la compression. Les résultats expérimentaux ont montré un effet bénéfique lié au pourcentage de 5% de laitier granulé broyé utilisé dans les bétons et une amélioration des performances mécaniques avec et sans activation du laitier ainsi que l'influence de l'activation sur les propriétés des bétons frais et durcis.

**Mots clés :** laitier, béton, coproduit, résistance, activation.

# Sommaire

**Remerciements**

**Dédicace**

**Résumé**

**Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des notations**

**Introduction générale** \_\_\_\_\_ **1**

**Chapitre I : Généralités sur les bétons et laitier de haut fourneau** \_\_\_\_\_ **3**

I.1 Introduction \_\_\_\_\_ 3

I.2 Béton \_\_\_\_\_ 3

I.2.1 Définition \_\_\_\_\_ 3

I.2.2 Constituants du béton \_\_\_\_\_ 3

I.2.3 Types de béton \_\_\_\_\_ 4

I.3 Types de ciments courants (NF EN 197-1) \_\_\_\_\_ 5

I.4 Adjuvants \_\_\_\_\_ 5

I.5 Les déchets et sous-produits \_\_\_\_\_ 5

I.5.1 Les déchets \_\_\_\_\_ 5

I.5.1.1 Les déchets industriels \_\_\_\_\_ 6

I.5.2 Les Sous-produits \_\_\_\_\_ 6

I.6 Le laitier de haut fourneau \_\_\_\_\_ 7

I.6.1 Définition \_\_\_\_\_ 7

I.6.2 Différents types de laitier \_\_\_\_\_ 8

I.6.2.1 Laitier granulé (vitrifié) \_\_\_\_\_ 8

I.6.2.2 Laitier bouleté _____	9
I.6.2.3 Laitier cristallisé _____	9
I.7 Historique sur la valorisation des laitiers _____	9
I.8 les procédés d'élaboration de laitier de haut fourneau _____	10
I.9 Production de laitier de haut fourneau dans le monde _____	11
I.10 Production de laitier de haut fourneau en Algérie _____	12
I.11 Utilisation des Laitiers de hauts fourneaux dans les bétons _____	13
I.11.1 Le laitier granulé (NF P 18-306) _____	13
I.11.2 Le laitier moulu (NF P 18-506) _____	13
I.12 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le Génie Civil _____	14
I.12.1 Intérêt du point de vue technique _____	14
I.12.2 Intérêt du point de vue économique _____	14
I.12.3 Intérêt du point de vue environnemental _____	14
I.13 laitier granulé de haut fourneau moulu _____	14
I.13.1 Définition _____	14
I.13.2 Réactivité et hydraulicité du Laitier de haut fourneau moulu _____	15
I.14 Rôle d'activation _____	16
I.15 Conclusion _____	17
<b>Chapitre II : Caractérisation des matériaux _____</b>	<b>18</b>
II.1 Introduction _____	18
II.2 Les essais sur les granulats _____	18
II.2.1 Analyse granulométrique (NF EN 933-1) [19] _____	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) _____	24
II.2.2 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3) _____	24
II.2.3 Détermination de la propreté _____	27

II.2.3.1	Equivalent de sable (NF EN 933-8)	27
II.2.3.2	Bleu de méthylène (NF EN 933-9)	31
II.2.4	Détermination des masses volumiques	31
II.2.4.1	Détermination de la masse volumique réelle (absolue $\rho_s$ ) (NF EN 1097-6)	31
II.2.4.2	Détermination de la masse volumique apparente (NF EN 1097-3)	33
II.2.5	Essai Los Angeles (NF EN 1097-2)	35
II.2.6	Essai Micro-Deval (NF EN 1097-1)	36
II.3	Le ciment	36
II.4	Laitier granulé broyé de haut fourneau	37
II.5	L'adjuvant	37
II.6	L'eau	38
II.7	Les activateurs	38
II.7.1	Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$	38
II.7.2	Carbonates de sodium $\text{Na}_2\text{CO}_3$	38
II.7.3	Le gypse $\text{CaSO}_4$	38
II.7.4	La soude $\text{Na OH}$	38
II.7.5	La chaux $\text{CaO}$	38
II.8	Conclusion	39
<b>Chapitre III</b>	<b>Etude de formulation des bétons</b>	<b>42</b>
III.1	Introduction	42
III.2	Formulation des bétons	42
III.3	Méthode de DREUX GORISSE	42
III.3.1	Dosage en ciment	47
III.3.2	Dosage en eau	47
III.3.3	Dosage des granulats	47
III.4	Densité théorique du béton frais ( $\Delta_0$ )	49

III.5 Récapitulation de la compositions du béton	50
III.6 Confection des éprouvettes	51
III.7 Béton à base de laitier sans activation	53
III.7.1 Dosage en fonction de l'ajout laitier de haut fourneau (EL-HADJAR ANNABA)	53
III.7.2 Récapitulation de la composition des différentes gâchées des bétons sans activation	57
III.7.3 Bétons à base de laitier activé	57
III.7.3.1 Activation du laitier	57
III.7.3.2 Composition des différentes gâchées avec activation des laitiers	58
III.8 Conclusion	59
<b>Chapitre IV : Essais sur bétons et résultats</b>	<b>61</b>
IV.1 Introduction	61
IV.2 Béton au laitier de haut fourneau	61
IV.2.1 Essais sur les bétons frais	61
IV.2.1.1 Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451	61
IV.2.1.2 Essai du contrôle du volume d'air entraîné (Aéromètre) NF EN 12350-7	62
IV.2.1.3 Mesure des masses volumiques fraîches $\rho$	64
IV.2.2 Essais sur les bétons durcis	65
IV.2.2.1 Mesure des masses volumiques	66
IV.2.2.2 Essai de compression (NF EN 12390-3)	67
IV.3 Bétons au laitier de haut fourneau activé	69
IV.3.1 Essais sur les bétons frais	69
IV.3.1.1 Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451	69
IV.3.1.2 Essai du contrôle du volume d'air entraîné (Aéromètre) NF EN 12350-7	70
IV.3.1.3 mesure des masses volumiques fraîches $\rho$	71
IV.3.2 Essais sur les bétons durcis	72
IV.3.2.1 Mesure des masses volumiques	72

IV.3.2.2 Essai de compression (NF EN 12390-3)	73
IV.4 Conclusion	75
<b>Conclusion générale</b>	<b>77</b>
<b>Références</b>	
<b>Annexes</b>	

## Liste des figures

<b>Chapitre I : Généralités sur les bétons et laitier de haut fourneau</b>		
<b>Figure I.1</b>	Composition et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	3
<b>Figure I.2</b>	Laitier cristallisé et vitrifié de haut fourneau	7
<b>Figure I.3</b>	Les principales formes du laitier	8
<b>Figure I.4</b>	Fabrication du laitier granulé de haut-fourneau.	11
<b>Figure I.5</b>	Complexe sidérurgique d'El Hadjar, Annaba, Algérie.	12
<b>Figure I.6</b>	Evolution de la résistance à la compression de laitiers granulés de haut fourneau en fonction de l'indice de basicité « CAO/SiO <sub>2</sub> ».	15
<b>Chapitre II : Caractérisation des matériaux</b>		
<b>Figure II.1</b>	Analyse granulométrique des gravillons et sable.	23
<b>Figure II.2</b>	Grille à fente utilisé pour l'essai d'aplatissement.	24
<b>Figure II.3</b>	Mesure de la hauteur du sable mélange.	30
<b>Figure II.4</b>	Conservation des échantillons pendant 24heures.	32
<b>Figure II.5</b>	Exemple de mesure des masses volumiques apparentes du sable 0/4 et du gravier 8/15.	33
<b>Figure II.6</b>	L'état de la classe granulaire 10-14 après 500 rotations.	35
<b>Figure II.7</b>	Laitier granulé broyé de haut fourneau.	37
<b>Figure II.8</b>	Super plastifiant CHRYSO Fluid Optima 208A.	37
<b>Figure II.9</b>	Les différents activateurs utilisés pour l'activation du LHF.	39
<b>Chapitre III : Etude de formulation des bétons</b>		
<b>Figure III.1</b>	Courbe de référence.	43
<b>Figure III.2</b>	Les pourcentages de différentes fractions granulaires.	44
<b>Figure III.3</b>	Courbe de mélange selon DREUX GORISSE.	46
<b>Figure III.4</b>	Les moules cylindriques 16x32 cm <sup>2</sup> .	51

<b>Figure III.5</b>	Les moules cubiques 15x15x15 cm <sup>3</sup> .	51
<b>Figure III.6</b>	Le pourcentage des différentes fractions granulaires de la composition du béton témoin 0%.	54
<b>Figure III.7</b>	Les pourcentages des différentes fractions granulaires de la composition du béton à 5% du LHF.	54
<b>Figure III.8</b>	Le pourcentage des différentes fractions granulaires de la composition du béton à 10% du LHF.	55
<b>Figure III.9</b>	Le pourcentage des différentes fractions granulaire de la composition du béton à 15% du LHF.	56
<b>Figure III.10</b>	Le pourcentage des différentes fractions granulaire de la composition du béton à 20% du LHF.	56
<b>Figure III.11</b>	Le pourcentage des différents composants du béton à base de L.H.F activité.	58
<b>Chapitre IV : Essais sur bétons et résultats</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Affaissement au cône d'Abrams du béton au laitier	61
<b>Figure IV.2</b>	Variation de l'affaissement des différentes séries du béton au laitier.	62
<b>Figure IV.3</b>	Aéromètre à béton utilisé au laboratoire LTPEST.	63
<b>Figure IV.4</b>	Variation d'air occlus dans les différentes séries de béton au laitier.	63
<b>Figure IV.5</b>	La masse volumique fraîche des différentes séries de béton en fonctions du dosage de L.H.F.	64
<b>Figure IV.6</b>	Conservation des éprouvettes du béton au LHF dans l'eau.	65
<b>Figure IV.7</b>	Conservation des éprouvettes du béton avec activation du LHF dans l'eau.	65
<b>Figure IV.8</b>	La masse volumique des différentes séries du béton au LHF en fonction du temps.	66
<b>Figure IV.9</b>	Éprouvettes du béton au LHF après écrasement	67

<b>Figure IV.10</b>	La résistance à la compression à 28jours et à 90jours des différents bétons au LHF.	67
<b>Figure IV.11</b>	Affaissement au cône d'Abrams du béton au laitier activé.	69
<b>Figure IV.12</b>	Affaissement des bétons au LHF activé.	69
<b>Figure IV.13</b>	Variation d'air occlus dans les bétons au LHF activé.	70
<b>Figure IV.14</b>	La masse volumique fraîche des différentes séries de béton au LHF activé.	71
<b>Figure IV.15</b>	Variation de la masse volumique des bétons au LHF activé.	72
<b>Figure IV.16</b>	Eprouvettes du béton au LHF activé après écrasement à 28 jours.	73
<b>Figure IV.17</b>	Eprouvettes du béton au LHF activé après écrasement à 90jours.	73
<b>Figure IV.18</b>	Variation de la résistance à la compression à 28jours et à 90jours des bétons au LHF activé.	74

## Liste des tableaux

<b>Chapitre I : Généralités sur les bétons et laitier de haut fourneau</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Composition-type d'un laitier vitrifié de hauts-fourneaux.	10
<b>Chapitre II : Caractérisation des matériaux</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Analyse granulométrique des gravillons 15/25.	19
<b>Tableau II.2</b>	Analyse granulométrique des gravillons 8/15.	20
<b>Tableau II.3</b>	Analyse granulométrique des gravillons 3/8.	21
<b>Tableau II.4</b>	Analyse granulométrique du sable 0/4.	22
<b>Tableau II.5</b>	Analyse granulométrique du sable 0/1.	22
<b>Tableau II.6</b>	Valeurs du module de finesse des sables.	24
<b>Tableau II.7</b>	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25.	25
<b>Tableau II.8</b>	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 8/15.	26
<b>Tableau II.9</b>	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 3/8.	27
<b>Tableau II.10</b>	Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.	28
<b>Tableau II.11</b>	Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/1.	28
<b>Tableau II.12</b>	Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/4.	29
<b>Tableau II.13</b>	Les valeurs de la teneur en fines f du sable 0/1.	29
<b>Tableau II.14</b>	Résultats d'équivalent de sable du sable mélange.	30
<b>Tableau II.15</b>	Résultat au bleu de méthylène.	31
<b>Tableau II.16</b>	Résultats des masses volumiques absolues des granulats.	33
<b>Tableau II.17</b>	Résultats des masses volumiques apparentes.	34
<b>Tableau II.18</b>	Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 8/15.	35
<b>Tableau II.19</b>	Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15.	36

<b>Chapitre III : Etude de formulation des bétons</b>		
<b>Tableau III.1</b>	Les différents pourcentages des granulats.	44
<b>Tableau III.2</b>	Les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange.	45
<b>Tableau III.3</b>	Volumes absolus des constituants solides.	48
<b>Tableau III.4</b>	Dosage des constituants solides en Kg/m <sup>3</sup> des granulats.	49
<b>Tableau III.5</b>	Les densités des constituants du béton en kg/m <sup>3</sup> .	50
<b>Tableau III.6</b>	Récapitulatif de la composition du béton.	50
<b>Tableau III.7</b>	Les masses des constituants du béton pour une gâchée.	53
<b>Tableau III.8</b>	Récapitulatif de la composition des différentes séries de béton sans activation.	57
<b>Tableau III.9</b>	Dosages des activateurs de laitiers dans les différentes gâchées du béton.	58

## Liste des notations

**E/C** : Rapport eau /ciment.

**CPA** : Ciment portland artificiel.

**NF P** : Norme française.

**EN** : Norme européenne.

**BLHF** : Béton laitier de haut fourneau

**BAP** : Béton autoplaçant

**BHP** : Béton haute performance.

**BFUP** : Béton fibré ultra performance

**G/S** : Rapport graviers/sables.

**MF** : Module de finesse.

**ESP** : Equivalent de sable par piston.

**VB** : Valeur au bleu.

# *Introduction générale*

Le béton est aujourd'hui le matériau manufacturé le plus utilisé au monde, il est formé de ciment auquel sont ajoutés de l'eau et des granulats. Sa résistance à la compression, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût font un matériau de choix pour l'industrie du bâtiment et le génie civil. La question de l'impact environnemental de ce matériau se pose dans une démarche mondiale actuelle de développement durable. En particulier, la production de ce ciment représente environ 5 - 6% des émissions de CO<sub>2</sub> mondiales d'origine humaine. Une des réponses industrielles à ce défi environnemental est l'utilisation de sous-produits des industries en remplaçant une partie de ciment par un rejet industriel qui a un double avantage : valoriser ces sous-produits et limiter l'empreinte carbone du ciment.

Le laitier vitrifié de haut fourneau est l'un de ces sous-produits issus de l'industrie sidérurgique, 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. En l'état actuel des conventions d'allocation de la charge en CO<sub>2</sub> des sous-produits industriels, les ciments au laitier ont une faible empreinte carbone. Ils présentent par ailleurs une grande durabilité et haute résistance aux attaques d'agents agressifs comme les chlorures et les sulfates, ce qui les rend particulièrement performants en milieu marin par exemple. 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. [1]

Le laitier ne possède aucune vertu liante, mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il réagit chimiquement avec la chaux et l'eau pour former les composés possédant des valeurs liantes.

Le processus d'activation est influencé par la composition chimique du laitier et l'activant utilisé ne sont pas de simples catalyseurs permettant le déroulement des réactions, mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates, ils ont comme rôle de : accélérer la solubilité des laitiers, favoriser la formation de quelques hydrates, favoriser la formation de réseau de la structure des hydrates. L'importance de l'activation du laitier dans les bétons se représente dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons, durabilité largement améliorée ainsi que l'économie du coût du combustible pour la production de la même quantité de ciment. [2]

Le but de ce travail est l'étude de l'activation du laitier granulé broyé de haut fourneau dans les bétons (utilisés comme substitut au ciment) dans le cadre de la confection de nouveaux bétons structuraux.

Pour atteindre notre objectif, on a réalisé des essais d'identifications et essais d'études.

Donc a partagé le travail en 04 chapitres comme suit :

- Le premier chapitre est la recherche bibliographique, présente des généralités sur les bétons et laitier de haut fourneau.
- 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.

Le travail sera clôturé par une conclusion générale qui mettra en revanche les nouvelles perspectives de recherche.

*Chapitre I : Généralités sur les  
bétons et laitier de haut  
fourneau*

## I.1 Introduction

Les travaux de génie civil présentent des possibilités intéressantes pour valoriser des sous-produits et des déchets industriels qui doivent être exploités dans l'industrie du ciment et du béton.

Ce chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les bétons, à l'élaboration et à l'utilisation des laitiers de hauts fourneaux dans le domaine de la construction.

## I.2 Béton

### I.2.1 Définition

Le matériau béton est devenu irremplaçable dans plusieurs domaines de la construction, il est le matériau le plus utilisé au monde avec des applications et des méthodes de formulations différentes.

Il est constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la majorité des cas, le ciment était du 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 [28].

### I.2.2 Constituants du béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, graviers et adjuvants (**figure I.1**) qui constituent un ensemble homogène, ces bétons sont très différents : leurs masses volumiques, les dimensions de leurs grains s'échelonnent de  $0.5\mu\text{m}$  (grain le plus fin du ciment) à 25 mm (gravillons). Lorsque des propriétés particulières sont visées, on utilise des fines complémentaires ou additions minérales [3].

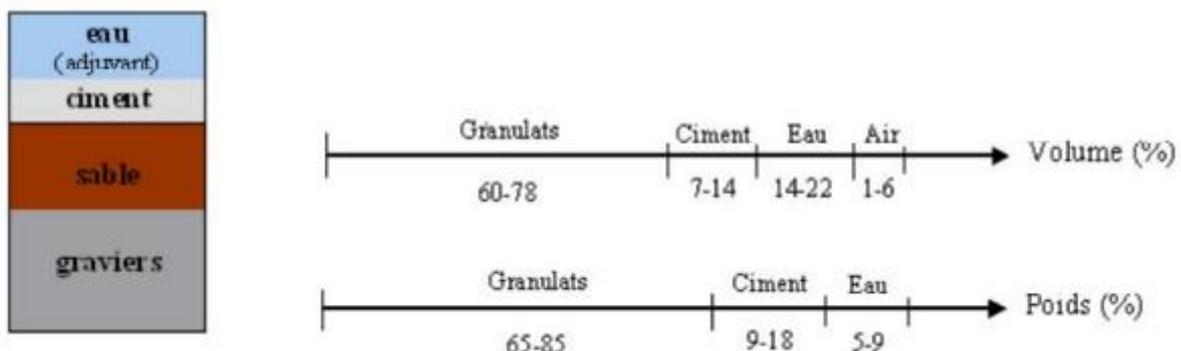


Figure I.1 : Composition et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire

La confection d'un béton consiste à déterminer et à optimiser la composition et le dosage des divers constituants. Le squelette granulaire d'un béton est composé d'un sable et d'un gravier.

Le ciment et l'eau de gâchage dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, qui forment avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui construira le liant du béton.

Le rapport E/C joue un rôle principal durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais, aussi diminue les résistances du béton durci et la durabilité.

Des additions minérales sont rajoutées (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,) afin de modifier certaines propriétés du béton.

### **I.2.3 Types de béton**

Un bon béton se distingue d'un mauvais béton par plusieurs qualités telle que :

- Résistance mécanique élevée ;
- Imperméabilité à l'eau ;
- Bonne mise en œuvre (facile à couler) ;
- Un bon mélange (homogénéité) ;

Les différents types de bétons qu'on pourra distinguer sont :

- Béton ordinaire
- Béton armé
- Béton précontraint
- Béton fibré
- Béton projeté
- Béton autoplaçant (BAP)
- Béton à haut performance (BHP)
- Béton fibré ultra performant (BFUP)
- Béton désactivé
- Béton lourd
- Béton léger
- Béton drainant.

### **I.3 Types de ciments courants (NF EN 197-1)**

On distingue quelques types de ciments courants normalisés :

- CEM I (Cement Portland CPA)
- CEM II /A (Ciment portland composé)
- CEM III / CHF A (Ciment de haut fourneau)
- CEM IV / CPZ A (Ciment pouzzolanique)
- CEM V/ CLC A (Ciment aux laitiers et aux cendres)

### **I.4 Adjuvants**

Ce sont des produits chimiques incorporés aux bétons en faible quantités permettant de contrôler la rhéologie du béton.

On cite quelques adjuvants les plus courants :

- Les accélérateurs ou retardateurs de prise
- Les réducteurs d'eau (plastifiant) et hauts réducteurs (super plastifiant)
- Les hydrofuges
- Les entraîneurs d'air

### **I.5 Les déchets et sous-produits**

#### **I.5.1 Les déchets**

Un déchet est « tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné que son destinataire destine à l'abandon ».

D'un point de vue environnemental un déchet représente une menace à partir du moment où l'on envisage un contact avec l'environnement. Ce dernier peut être direct ou résulter d'un traitement.

D'un côté économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative. Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible [18].

### I.5.1.1 Les déchets industriels

Ce sont les déchets produits par les entreprises industrielles, commerciales et artisanales dont l'élimination incombe légalement à l'exploitant ou à l'entreprise. Ils comprennent des matériaux de nature et de composition diverse : déchets de fabrication, emballages, sous-produits de fabrication, rebuts, résidus de nettoyages...etc. Ces déchets peuvent être de natures très diverses. Ils sont répartis en :

- **Déchets inertes** : Ils sont constitués, pour la presque totalité, par des déblais et gravats de démolition ainsi que par les résidus minéraux provenant des industries d'extraction et des industries de fabrication de matériaux de construction.
- **Déchets banals** : Cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, cartons, plastiques, bois, métaux, verres, matières organiques, végétale ou animales. Ils résultent, soit de l'utilisation d'emballages, soit de rebuts ou chutes de fabrication.
- **Déchets spéciaux** : Les autres déchets des entreprises peuvent générer des nuisances. Ils peuvent contenir des substances qui justifient des précautions particulières, à prendre lors de leur élimination. De ce fait, ils font l'objet d'un contrôle administratif renforcé à tous les niveaux : production, stockage, transport, prétraitement et élimination.

### I.5.2 Les Sous-produits

Un sous-produit est un produit résiduel qui apparaît durant le processus de fabrication, transformation ou distribution d'un produit fini.

Il est non intentionnel, non prévisible, et accidentel. Utilisé directement ou bien constituer un ingrédient d'un autre processus de production en vue de la fabrication d'un autre produit fini.

Un sous-produit ou résidu peut être :

- **En alimentaire** : un sous-produit des récoltes ou de la transformation des aliments.
- **En biologie** : L'un des composants à la base d'une macromolécule : les bases azotées pour les acides nucléiques, les acides-aminés pour les polypeptides, ou encore les sucres simples constituant les polysaccharides.

- **En chimie** : Un matériau obtenu après un chauffage plus ou moins intense d'un échantillon, voir par exemple en chimie analytique : Extrait sec et taux de cendres ; un produit de la distillation.
- **En écologie** : Les restes d'une opération chimique ou physique [4].

## I.6 Le laitier de haut fourneau

### I.6.1 Définition

Le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, il est composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO<sub>2</sub>) et alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). [5].

L'élaboration du laitier peut conduire selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques :

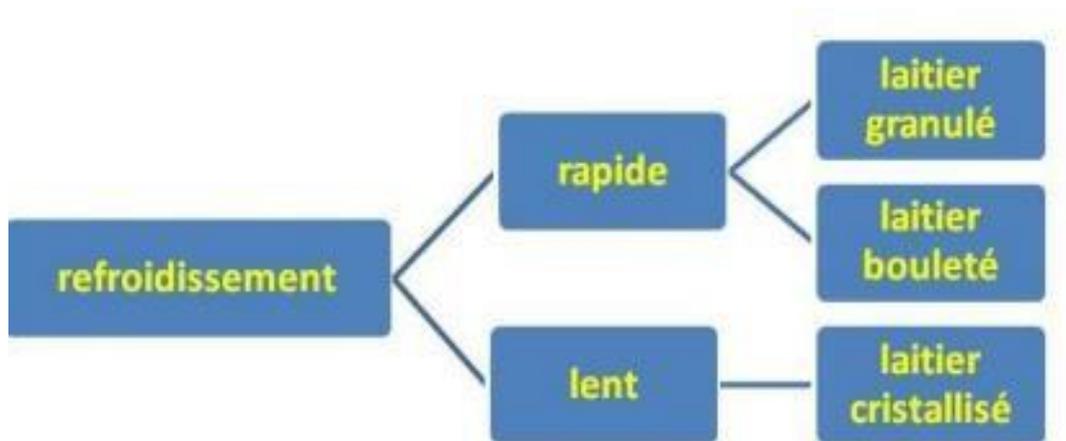
- **Laitier vitrifié (granulé)** : obtenu par refroidissement rapide par trempé.
- **Laitier cristallisé** : obtenu par refroidissement lent à l'air du laitier liquide.

Les deux formes de laitier minéralogique sont différentes du point de vue cristallographique et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié est une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente. Par contre, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste [6].



**Figure I.2** : Laitier cristallisé et vitrifié de haut fourneau.



**Figure I.3 :** Les principales formes du laitier

## I.6.2 Différents types de laitier

### I.6.2.1 Laitier granulé (vitrifié)

La granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation du laitier pour faciliter sa manutention. Elle se faisait très simplement en déversant le jet de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau. On s'avisa ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du laitier granulé ainsi obtenu. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en minimum de temps (il faut atteindre des températures inférieures à 800°C en un minimum de temps), pour obtenir l'état vitreux indispensable pour son utilisation comme substitut du ciment portland [6].

Ensuite, les différents types de granulations furent inventés et expérimentés pour :

- Améliorer la constante des caractéristiques du laitier granulé
- Augmenter sa réactivité
- Diminuer la consommation d'eau qui est importante (8 à 10 m<sup>3</sup> /t de laitier)

### I.6.2.2 Laitier bouleté

La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air. Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses.

### I.6.2.3 Laitier cristallisé

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier.

On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé. Après solidification de la surface, le refroidissement est activé par un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier [6].

## I.7 Historique sur la valorisation des laitiers

Dussar rapport que, Blidor et Svab recommandaient dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, le laitier broyé comme masse d'addition au mortier de chaux. Au XIX<sup>e</sup> siècle, Vicat avait entrevu les propriétés hydrauliques de ce produit.

En France, Vicat cité par Alexandre [7] avait remarqué l'analogie entre les compositions chimiques du ciment portland et du laitier, et présentait l'utilisation de ce dernier dans la fabrication du ciment.

En 1853, l'anglais Cunningham découvrit le principe de la granulation du laitier à l'eau. En 1862 l'Allemand **Emil Langen** fut à l'origine d'une découverte décisive.

Le développement du laitier résulta en une première utilisation commerciale en Allemagne en 1865 avec une production record en 1892 et 1896 aux USA, suit à un usage massif en travaux maritimes. L'utilisation du laitier granulé dans le béton a commencé à la fin de 1950 dans plusieurs pays (Australie, Japon, Canada, ...etc.) [8].

## I.8 les procédés d'élaboration de laitier de haut fourneau

Le laitier de haut-fourneau est un sous-produit de l'industrie sidérurgique. La réaction du minerai de fer avec le coke et le calcaire dans un haut-fourneau conduit à la formation de fonte en fusion et d'un liquide silicaté composé des minéraux de la gangue du minerai et de divers résidus de combustion : le laitier. Ce dernier étant moins dense ( $d=2-2,5$ ) que la fonte ( $d=7-8$ ), il surnage et peut facilement en être séparé. Entre 250 et 300 kg de laitiers sont ainsi générés pour chaque tonne de fonte produite (Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL), 2004) [5] [9].

En sortie de haut-fourneau, le laitier en fusion subit un refroidissement très brutal, par arrosage violent et abondant d'eau sous forte pression et chute dans une piscine à eau, entraînant la formation d'un matériau vitreux sous forme de grains millimétriques, c'est l'étape de granulation (**Figure 1.4**). Ce laitier vitrifié est appelé laitier granulé, en comparaison au laitier cristallisé obtenu ci-dessus : État de l'art 27 par refroidissement plus lent (déversement dans une fosse à l'air libre).

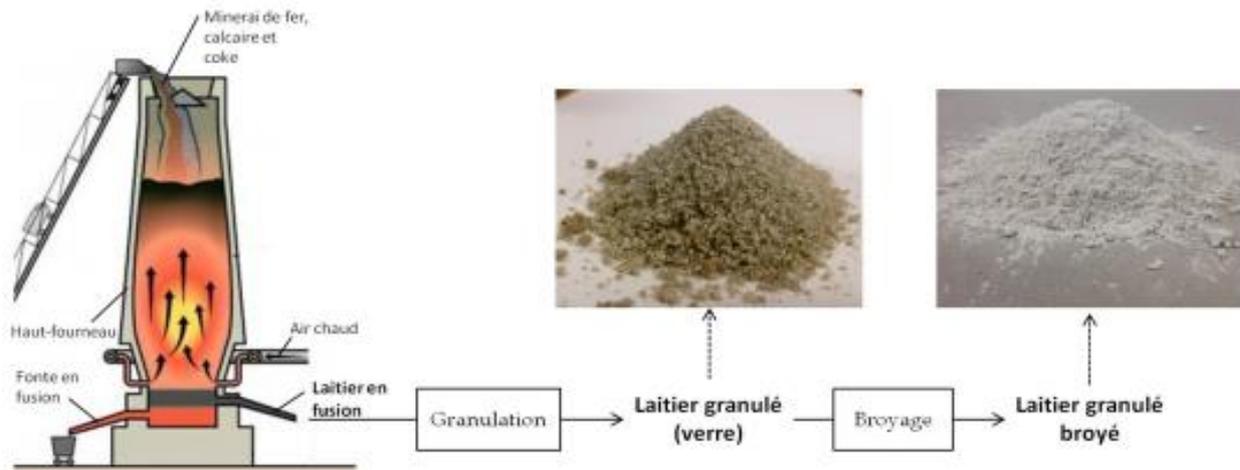
Cette recherche se limitera au cas des laitiers granulés et le terme laitier se référera ici uniquement aux matériaux vitreux. Le laitier vitrifié de haut-fourneau est un verre silicaté riche en calcium, aluminium et magnésium. Il contient une dizaine d'oxydes dont les proportions peuvent varier en fonction de son origine.

Sa composition dépend en effet de celle du minerai et des différents ajouts réalisés dans le haut fourneau. Une composition-type est présentée en **Tableau I.1**.

**Tableau I.1** : Composition-type d'un laitier vitrifié de haut-fourneau.

Oxyde	% massique
SiO <sub>2</sub>	37%
CaO	41%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11%
MgO	7%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O, Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4%

**Emil Langen**, découvre en 1862, que le laitier vitrifié possède des propriétés hydrauliques latentes en présence d'un activateur, il réagit avec l'eau pour former un liant. Du fait de ses propriétés hydrauliques latentes, le laitier vitrifié est utilisé comme addition dans les ciments. Le processus de granulation a été mis en place par les sidérurgistes pour permettre la valorisation de ce sous-produit dans l'industrie cimentière [10].



**Figure I.4 :** Fabrication du laitier granulé de haut-fourneau.

## I.9 Production de laitier de haut fourneau dans le monde

L'association mondiale de l'acier a rapporté que la production mondiale d'acier était de 1,86 milliard de tonnes en 2020, contre 1,88 milliard de tonnes en 2019.

La Chine, leader mondial de cette industrie, assure une production annuelle d'environ 1,05 milliard de tonnes.

La production du laitier est proportionnelle à la production de l'acier, elle varie d'un pays à l'autre, d'un an à l'autre mais surtout selon les processus d'élaboration de la fonte ou de l'acier. L'organisme des enquêtes géologiques des états unis (United State Geological Survey USGS) estime que 15 millions tonnes de laitiers ont été produites en 2017 aux USA, dont 85% est un laitier granulé. La production japonaise a atteint les 36,7 million de tonnes de laitier au cours de l'année de 2018, selon Japan Metal Daily.

Le centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques, estime la production française en laitier à environ 4,93 millions de tonnes en 2010.

## I.10 Production de laitier de haut fourneau en Algérie

En Algérie L'utilisation des produits de laitier sont limités à quelques rares applications malgré sa production progressant (500.000 tonnes/an).

En cimenterie, il entre comme un ajout secondaire ne dépassant pas 20 % (cette substitution est faite seulement dans quelques cimenteries).

En travaux routiers : A titre d'exemple, le laitier granulé a trouvé une utilisation dans la réalisation de la liaison autoroutière Annaba – Berrahal, où la couche de fondation été réalisée par une grave laitier. Des études intéressantes et récentes ont montré la possibilité d'utiliser les laitiers Algériens (d'El-Hadjar) pour [11] :

- La fabrication des briques silico calcaires à base du laitier.
- La fabrication du béton cellulaire autoclave.
- La fabrication d'un ciment de laitier activé sans clinker.

La figure (**Figure I.5**), illustre la production annuelle en termes de laitier granulé et cristallisé qui est de l'ordre de 700 000 tonnes selon bougara et al. [BOU 10]. Dont plus de 70% est un laitier granulé.



**Figure I.5 :** Complexe sidérurgique d'El Hadjar, Annaba, Algérie.

## **I.11 Utilisation des Laitiers de hauts fourneaux dans les bétons**

### **I.11.1 Le laitier granulé (NF P 18-306)**

Le laitier granulé peut être employé dans les bétons classiques de granulats naturels comme sable actif (remplacement de tout ou partie du sable), soit sous sa forme brute, soit sous forme de laitier pré broyé.

Cette incorporation se traduit par une augmentation des résistances mécaniques (À dosage en ciment constant).

Par contre, le béton perd de sa maniabilité, d'autant plus que l'ajout de laitier est important. Cette maniabilité peut alors être améliorée par différents ajouts (cendres volantes, charge inerte [13]

Les laitiers provenant de fontes spéciales (ferromanganèse) et les laitiers extraits de crassiers sont exclus des bétons. De plus, ces derniers ne doivent pas être employés pour les bétons dans lesquels il entre du ciment alumineux [14].

### **I.11.2 Le laitier moulu (NF P 18-506)**

La norme XP P 18-305 « Béton prêt à l'emploi » autorise l'utilisation du laitier vitrifié moulu de classe B (au sens de la norme P 18-506) comme addition en substitution du ciment.

Le coefficient k de prise en compte est de 0,9 c'est à dire que 50 kg de laitier remplacent 45 kg de ciment.

La quantité A d'addition est limitée en fonction du dosage C en ciment par la relation  $A/(A+C) \leq 0.3$  pour les environnements habituels,  $A/(A+C) \leq 0.15$  à partir de la classe 3 d'environnement.

Pour l'environnement le plus courant : humide avec gel modéré (2b1), la quantité minimale de liant équivalent  $C+kA$  est de  $280 \text{ kg/m}^3$ , la quantité de laitier peut ainsi s'élever à  $86 \text{ kg/m}^3$ , celle de ciment étant de  $203 \text{ kg/m}^3$ . Le ciment doit obligatoirement être de type CEM I, les autres (CEM II à CEM V) n'autorisent pas la prise en compte de l'addition du laitier en substitution du ciment.

Le laitier moulu permet de modifier certaines propriétés du béton, principalement le comportement aux milieux agressifs et aux alcalis-réactions, la diminution de la chaleur d'hydratation et de la porosité. Ces modifications dépendront du taux d'addition et de la finesse

de mouture du laitier. Il doit répondre aux spécifications détaillées dans la norme NF P 18-506 [14].

## **I.12 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le Génie Civil**

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et environnementales [14].

### **I.12.1 Intérêt du point de vue technique**

Permet d'améliorer les propriétés rhéologiques du béton frais tel que la maniabilité et la réduction de besoin en eau à une consistance donnée.

Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration.

### **I.12.2 Intérêt du point de vue économique**

Le ciment Portland est le composant le plus coûteux parmi les composants du béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie.

La plupart des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessitent relativement moins d'énergie.

### **I.12.3 Intérêt du point de vue environnemental**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité importante de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). En effet, le remplacement d'une quantité du ciment par des additifs permet une diminution de rejets de ( $CO_2$ ).

## **I.13 laitier granulé de haut fourneau moulu**

### **I.13.1 Définition**

Un laitier moulu est dénommé en anglais Ground Granulated Blast-furnance Slag (GGBS) est un coproduit issu de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau. Après le séchage et le broyage super fin du laitier granulé de haut fourneau, on obtient le laitier moulu.

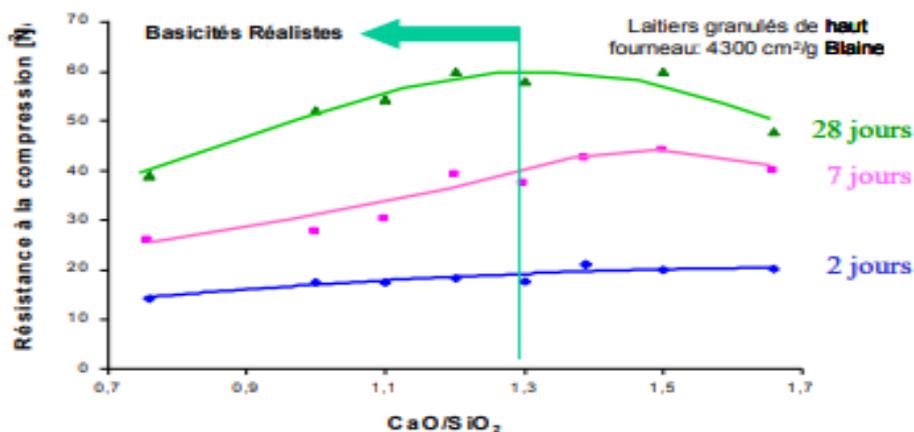
Il est composé essentiellement de silicate, d'aluminate et de chaux et d'autres oxydes métalliques en élément traces : FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO. Il est formé lors de la fabrication des matériaux ferreux sous forme liquide il floute au-dessus du métal en fusion à cause de sa faible densité. Le métal et le laitier peuvent se séparer facilement car ils sont non-miscibles en fusion [15].

### I.13.2 Réactivité et hydraulité du Laitier de haut fourneau moulu

Il faut tenir compte de plusieurs paramètres pour pouvoir évaluer la réactivité du laitier de haut fourneau. La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie (jusqu'à 15%), mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse [Divet et al, 2006].

Les calculs d'indices de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides.

Pour une bonne activité hydraulique, l'indice de basicité CaO/SiO<sub>2</sub> doit être proche de 1,3 comme illustré dans la **Figure I.6** [Divet et al, 2006]) [16].



**Figure I.6 :** Evolution de la résistance à la compression de laitiers granulés de haut fourneau en fonction de l'indice de basicité « CAO/SiO<sub>2</sub> ».

D'un point de vue granulométrique, plus le laitier n'est fin, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées. En effet la surface de contact entre les phases vitreuses du laitier, l'agent activateur et l'eau se trouve augmentée. Un des critères les plus importants reste la connaissance de la minéralogie du laitier. En effet, la détermination du taux de vitrification est très importante car sa structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin.

L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides [6][17].

Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent. L'hydraulicité du laitier dépend donc de sa teneur en verre ainsi que de sa structure. D'autres facteurs influent sur l'activité d'un laitier de haut fourneau et sur son hydratation. On peut citer la concentration en ions alcalins dans le milieu et la température durant les premières phases du processus d'hydratation [11].

### **I.14 Rôle d'activation**

La nécessité d'un catalyseur ou activant pour déclencher la prise du laitier, résulte selon R.Dron [5] du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes où la chaux intervient.

Le premier est le passage en solution dans l'eau interstitielle des éléments aluminium, silicium et calcium. Cette solubilisation intervient par les sites aluminium et l'attaque a lieu par les hydroxydes OH de la solution. Elle devient notable à ( $\text{pH} = 12$ ).

Le second est la cristallisation, à partir de la phase aqueuse, des composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux qu'est le laitier. Un apport de calcium est donc nécessaire, à défaut duquel le milieu liquide s'appauvrirait en chaux et verrait son pH baisser en dessous du seuil d'attaque. Le rôle de l'activant est double. Il doit :

- Répondre à une condition de pH, en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la phase aqueuse en chaux pour atteindre le pH de 12,6 correspondants à cette saturation.
- Contribuer à la formation des hydrates, il participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé.

**I.15 Conclusion**

Le laitier apparaît comme un matériau important, couramment utilisé dans le monde, il a fait ses preuves dans de grands projets, réalisés dans différents pays, donc le doute ne subsiste plus, quant aux performances et avantages qu'il présente.

*Chapitre II : Caractérisation  
des matériaux*

## II.1 Introduction

Pour toute recherche ou bien étude d'investigation, la caractérisation des matériaux est indispensable car cette dernière a une influence importante sur la confection du béton et sur les résultats d'étude selon des normes adéquates. Ce chapitre va porter sur la caractérisation des matériaux utilisés.

## II.2 Les essais sur les granulats

### II.2.1 Analyse granulométrique (NF EN 933-1) [19]

Cet essai nous permet de :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions des grains de même dimension (% pondéral).
- 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 **MEZIANE AL MHIR SETIF** sont représentés dans les tableaux suivants :

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

<b>Masse de l'échantillon à l'essai : <math>M_{éch}=5386</math> g</b>			
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulés Rn (g)</b>	<b>Refus cumulés (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>25</b>	51	0.95	99
<b>20</b>	2290	42.52	57
<b>16</b>	5115	94.97	05
<b>14</b>	5354	99.41	01
<b>10</b>	5356	99.44	01
<b>8</b>	5357	99.46	01
<b>6,3</b>	5357	99.46	01
<b>4</b>	-	-	-
<b>2</b>	-	-	-
<b>1</b>	-	-	-
<b>0,5</b>	-	-	-
<b>0,315</b>	-	-	-
<b>0,25</b>	-	-	-
<b>0,125</b>	-	-	-
<b>0,063</b>	5361	99.54	0.5

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

<b>La masse de l'échantillon soumis à l'essai : <math>M_{\text{éch}}=4097</math> g</b>			
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulés <math>R_n</math> (g)</b>	<b>Refus cumulés (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>16</b>	138	3.37	97
<b>14</b>	633	15.45	85
<b>10</b>	1684	41.10	59
<b>8</b>	2477	60.46	40
<b>6,3</b>	3307	80.72	19
<b>4</b>	3907	95.36	5
<b>2</b>	3957	96.58	3
<b>1</b>	3988	97.34	3
<b>0,5</b>	4017	98.05	2
<b>0,315</b>	4024	98.22	2
<b>0,25</b>	4026	98.27	2
<b>0,125</b>	4034	98.46	2
<b>0,063</b>	4039	98.58	1

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

<b>La masse de l'échantillon soumis à l'essai : <math>M_{éch} = 2196</math> g</b>			
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulés Rn (g)</b>	<b>Refus cumulés (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>8</b>	29	1.32	99
<b>6,3</b>	566	25.77	74
<b>4</b>	1937	88.21	12
<b>2</b>	2113	96.22	4
<b>1</b>	2128	96.90	3
<b>0,5</b>	2135	97.22	3
<b>0,315</b>	2138	97.36	3
<b>0,25</b>	2139	97.40	3
<b>0,125</b>	2140	97.45	3
<b>0,063</b>	2157	98.22	2

### II.2.1.2 Analyse granulométrique des sables

Les résultats d'analyse granulométrique pour les sables : 0/4 de la carrière **MEZIANE AL MHIR SETIF** et 0/1 de la carrière **BOUSSAADA MSILA** sont représentés dans les tableaux suivants :

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

Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
4	100	6,49	94
2	456	29,59	70
1	709	46,01	54
0,5	926	60,09	40
0,315	1016	65,93	34
0,25	1060	68,79	31
0,125	1193	77,42	23
0,063	1298	84,23	16

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

La masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 1472$ g			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
2	8	0.54	99
1	9	0.61	99
0,5	24	1.63	98
0,315	249	16.92	83
0,25	356	24.18	76
0,125	1296	88,04	12
0,063	1430	97,15	03

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

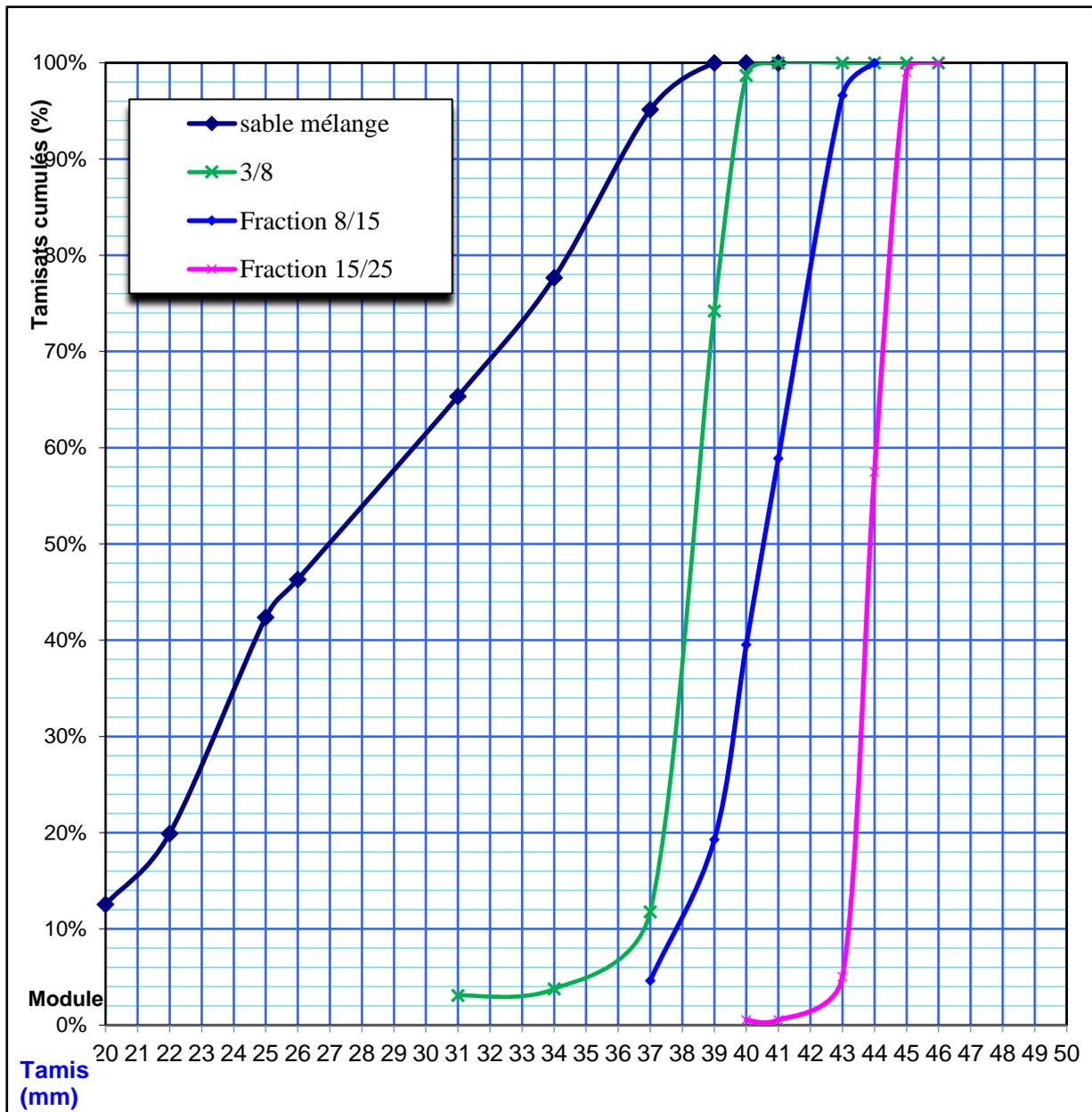


Figure II.1 : Analyse granulométriques des gravillons et sable.

### II.2.1.3 Module de finesse (Mf) :

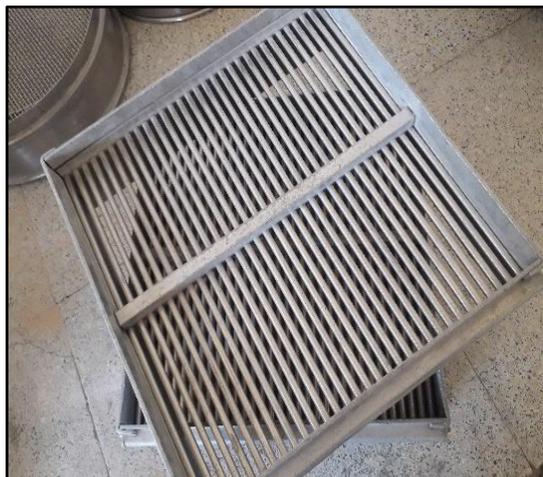
Les résultats du module de finesse sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau II.6 :** Valeurs du module de finesse des sables.

Sables	Mf	Type de sable	Spécification
Sable 0/4	2,88	Légèrement grossier	>2,80
Sable 0/1	1,15	Fin	<2,2

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

Il permet de caractériser la forme la plus ou la moins massive des granulats [19].



**Figure II.2 :** Grille à fente utilisé pour l'essai d'aplatissement.

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

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

Telle que :

**M2** : masse du passant sur les grilles 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.7** : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25.

<b>M0= 5449 g</b>				
<b>Tamissage sur tamis</b>		<b>Tamissage sur grilles</b>		
<b>Classes granulaires di/D (mm)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>Ecartement des grilles (mm)</b>	<b>Passants M2 (g)</b>	<b>A=M2/M1×100</b>
<b>25/32.5</b>	46	16	00	00
<b>20/25</b>	2630	12.5	86	3.27
<b>16/20</b>	2613	10	75	2.87
<b>12.5/16</b>	140	8	8	5.71
<b>10/12.5</b>	3	6.3	00	00
<b>8/10</b>	00	5	00	00
<b>6.3/8</b>	00	4	00	00
<b>5/6.3</b>	00	3.15	00	00
<b>4/5</b>	00	2.5	00	00
<b>∑M1= 5432 g</b>		<b>∑ M2= 169 g</b>		
<b><math>\sum M1 &gt; 0.98M0 = 5432 &gt; 0.98 * 5449 = 5340.02g</math></b>				
<b><math>A = \frac{\sum M2}{\sum M1} \times 100 = 3\%</math></b>				

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

<b>M0=4162 g</b>				
<b>Classes granulaires di/D (mm)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>Ecartement des grilles (mm)</b>	<b>Passants M2 (g)</b>	<b>A=M2/M1×100</b>
<b>16/20</b>	180	10	10	5.55
<b>12.5/16</b>	716	8	94	13.13
<b>10/12.5</b>	825	6.3	114	13.82
<b>8/10</b>	755	5	94	12.45
<b>6.3/8</b>	892	4	128	14.35
<b>5/6.3</b>	422	3.15	51	12.09
<b>4/5</b>	223	2.5	22	9.87
<b><math>\Sigma M1 = 4013</math></b>		<b><math>\Sigma M2 = 513</math></b>		
<b><math>\Sigma M1 &gt; 0.98M0 = 4013g &gt; 0.98 * 4162 = 4078.76g</math></b>				
<b><math>A = \frac{\Sigma M2}{\Sigma M1} \times 100 = 13\%</math></b>				

**Tableau II.9** : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 3/8.

<b>M0 = 1943g</b>				
<b>Classes granulaires di/D (mm)</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>Ecartement des grilles (mm)</b>	<b>Passants M2 (g)</b>	<b>A=M2/M1×100</b>
<b>8/10</b>	31	5	00	00
<b>6.3/8</b>	479	4	60	12.52
<b>5/6.3</b>	362	3.15	39	10.77
<b>4/5</b>	827	2.5	87	10.52
$\Sigma M1 = 1699$		$\Sigma M2 = 187$		
$\Sigma M1 > 0.98M0 = 1699g > 0.98 * 1943 = 4078.76g$				
$A = \frac{\Sigma M2}{\Sigma M1} \times 100 = 11\%$				

D'après la norme (**NA 5043**) et ces valeurs, les graviers (15/25, 8/15, 3/8) peuvent être classés en catégorie LA<sub>A</sub>.

### II.2.3 Détermination de la propreté

#### II.2.3.1 Equivalent de sable (NF EN 933-8)

Il consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers et détermine un coefficient d'équivalent qui quantifie la propreté [20].

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

La formule de calcul est :

$$w = \frac{Mh - Ms}{Ms}$$

Avec :

**Mh** : la masse humide.

**Ms** : la masse sèche.

Les résultats sont représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau II.10** : Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.

N° échantillon	Echantillon 1	Echantillon 2
Masse humide (g)	266.33	275.61
Masse sèche (g)	262.79	271.95
La teneur en eau W (%)	1.35	1.34
La moyenne de W (%)	1,35	

**Tableau II.11** : Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/1.

N° échantillon	Echantillon 1	Echantillon 2
Masse humide (g)	271.58	252.95
Masse sèche (g)	270.05	251.7
La teneur en eau W (%)	0.6	0.5
La moyenne de W (%)	W=0.55%	

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

La formule de calcul est :

$$f = \frac{M2(100+W)}{M1} \times 100$$

Avec :

**M2** : la masse après lavage et séchage

**M1** : la masse de l'échantillon préparé.

**W** : la teneur en eau.

Les résultats sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau II.12** : Les valeurs de la teneur en fines  $f$  du sable 0/4.

<b>Teneur en eau sous échantillon N°1</b>		
<b>W = 1,35%</b>		
<b>N° échantillon</b>	<b>Echantillon 1</b>	<b>Echantillon 2</b>
<b>Masse humide M1 (g)</b>	780,52	53,89
<b>Masse sèche après lavage M2 (g)</b>	596,30	/
<b>Masse du sable correcteur (g)</b>	/	66,83
<b>La teneur en fines <math>f</math> (%)</b>	22,57	/
<b>La masse de chaque éprouvette <math>M_T</math> (g)</b>	120,72	

**Tableau II.13** : Les valeurs de la teneur en fines  $f$  du sable 0/1.

<b>La teneur en eau sous l'échantillon 1</b>	
<b>W = 0,55%</b>	
<b>N° échantillon</b>	<b>Echantillon 1</b>
<b>La teneur en fines (%)</b>	/
<b>Masse de chaque éprouvette (g)</b>	120,66

**Equivalent de sable**



**Figure II.3 :** Mesure de la hauteur du sable mélange.

La formule du calcul est donnée comme suivant :

$$Esp = \frac{h2}{h1} \times 100$$

Avec :

**h2** : la hauteur totale du sable par piston.

**h1** : la hauteur totale du flocculat.

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

**Tableau II.14 :** Résultats d'équivalent de sable du sable mélange.

Eprouvette s	Hauteur totale du flocculat h1 (cm)	Hauteur du sable par piston h2 (cm)	Expression des résultats	Moyenne	Spécification n	Nature de l'échantillon
			ESp (%)	ESp <sub>moy</sub> (%)		
1	14	8.8	62.85	64	>60%	Sable légèrement Argileux
2	14	9.2	65.71			

### II.2.3.2 Bleu de méthylène (NF EN 933-9)

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sable à absorber du bleu de méthylène [23].

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

$$VB = \frac{V}{M}$$

Avec :

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

**M** : masse sèche de la prise de d'essai.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau II.15** : Résultat au bleu de méthylène.

Echantillon	Masse initiale de la prise d'essai (g)	Volume du bleu introduit (cm <sup>3</sup> )	Valeur du bleu VB (cm <sup>3</sup> /g)	Spécification	Nature de l'échantillon
Sable mélange	200	15	0.075	<1	Sable non argileux

## II.2.4 Détermination des masses volumiques

### II.2.4.1 Détermination de la masse volumique réelle (absolue $\rho_s$ ) (NF EN 1097-6)

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre ou bien dans les grains [21].



**Figure II.4 :** Conservation des échantillons pendant 24heures.

La formule de calcul est donnée comme suivant :

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

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

(Dès leur sortie de l'étuve à 105°C).

$\rho_w = 0.9980 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  : la masse volumique d'eau.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau II.16** : Résultats des masses volumiques absolues des granulats.

Echantillon	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	$\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s = \rho_w \times \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Gravier 15/25	1436.19	4223.80	3310.8	1422.62	0.9980	2.786
Gravier 8/15	1342.32	4161.61	3310.80	1325.02	0.9980	2.788
Gravier 3/8	1228.78	4088.82	3310.80	1214.14	0.9980	2.778
Sable 0/1	605.84	1184.29	808.44	605.57	0.9980	2.631
Sable 0/4	808.07	1316.62	808.44	802.84	0.9980	2.831

#### II.2.4.2 Détermination de la masse volumique apparente (NF EN 1097-3)

Cette masse appelée aussi la masse volumique en vrac, est le rapport entre la masse du matériau et le volume apparent des grains (qui comprend la porosité) [21].



**Figure II.5** : Exemple de mesure des masses volumiques apparentes du sable 0/4 et du gravier 8/15.

La masse volumique apparente est définie par :

$$\rho_p = \frac{(M' - M)}{V_r}$$

Avec :

**M** : la masse du récipient vide qui est égale.

**M'** : la masse du récipient plein.

**V<sub>r</sub>** : le volume du récipient.

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.17** : Résultats des masses volumiques apparentes.

Matériau	N° de l'échantillon	Masse pleine (g)	M'-M (g)	Volume du récipient (cm <sup>3</sup> )	$\rho_p = \frac{(M' - M)}{V_r}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ moy (g/cm <sup>3</sup> )
Gravier 15/25	1	21080	15375,1	10498,49	1,465	1,466
	2	21128	15423,1	10498,49	1,469	
	3	21090	15385,1	10498,49	1,465	
Gravier 8/15	1	11594	7957	5277,09	1,508	1,506
	2	11556	7919	5277,09	1,500	
	3	11611	7974	5277,09	1,511	
Gravier 3/8	1	11422	7785	5277,09	1,475	1,497
	2	11602	7965	5277,09	1,509	
	3	11590	7953	5277,09	1,507	
Sable 0/4	1	3113	1838	1036,19	1,774	1,764
	2	3104	1829	1036,19	1,765	
	3	3092	1817	1036,19	1,754	
Sable 0/1	1	2775	1500	1036,19	1,448	1,445
	2	2771	1496	1036,19	1,444	
	3	2771	1496	1036,19	1,444	

### II.2.5 Essai Los Angeles (NF EN 1097-2)

Cet essai permet de déterminer la résistance à la fragmentation par choc des éléments d'un échantillon de granulats [22].



**Figure II.6:** L'état de la classe granulaire 10-14 après 500 rotations.

Le coefficient Los Angeles est défini par le rapport suivant :

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

Avec :

**m=5000-m'** : la masse sèche de la fraction du matériau passant après L'essai au tamis de 1,6mm.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau II.18 :** 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	4013	20

D'après la norme (**NA5043**) et les valeurs obtenues, la classe granulaire 10-14 peut être classée en catégorie  $LA_A$ .

### II.2.6 Essai Micro-Deval (NF EN 1097-1)

Cet essai permet de déterminer la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments inférieur à **1,6mm** d'un granulat [22].

Le coefficient Micro Deval est défini par la relation :

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

Avec :

**m=500-m'**: la masse des éléments passant au tamis 1,6mm produite au cours de l'essai.

Les résultats sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau II.19** : 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 1	10-14	5000	250	433	13,4
Prise2	10-14	5000	250	439	12,2
<b>Moyenne du coefficient MDE</b>					13

D'après la norme (**NA5043**) et les valeurs obtenues, la classe granulaire 10-14 peut être classée en catégorie LA<sub>A</sub>.

### II.3 Le 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 résumés sous forme d'une **fiche technique** dans l'annexe C.

## II.4 Laitier granulé broyé de haut fourneau

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



Figure II.7 : Laitier granulé broyé de haut fourneau.

## II.5 L'adjuvant

On a utilisé durant la formulation **Le superplastifiant haut Réducteur d'eau : CHRYSO Fluid Optima 208 A**, toutes les informations et les précautions d'utilisation de ce produit sont résumés **dans la fiche technique** de l'annexe C.



Figure II.8: Superplastifiant CHRYSO Fluid Optima 208 A.

## II.6 L'eau

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

## 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 cinq (05) activateurs, qui sont :

### II.7.1 Hydroxyde de calcium $\text{Ca(OH)}_2$

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

### II.7.2 Carbonates de sodium $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Il s'agit d'un sel de sodium de l'acide carbonique avec une couleur blanche, il représente un des grands produits polyvalents de la chimie moderne

### II.7.3 Le gypse $\text{CaSO}_4$

Se décompose en une poudre fine blanche de sulfate d'hydraté de calcium.

### II.7.4 La soude $\text{Na OH}$

Soude caustique, est une base forte qui se présente à température ambiante, sous forme solide, est très soluble dans l'eau sa solution aqueuse est transparente.

### II.7.5 La chaux $\text{CaO}$

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.

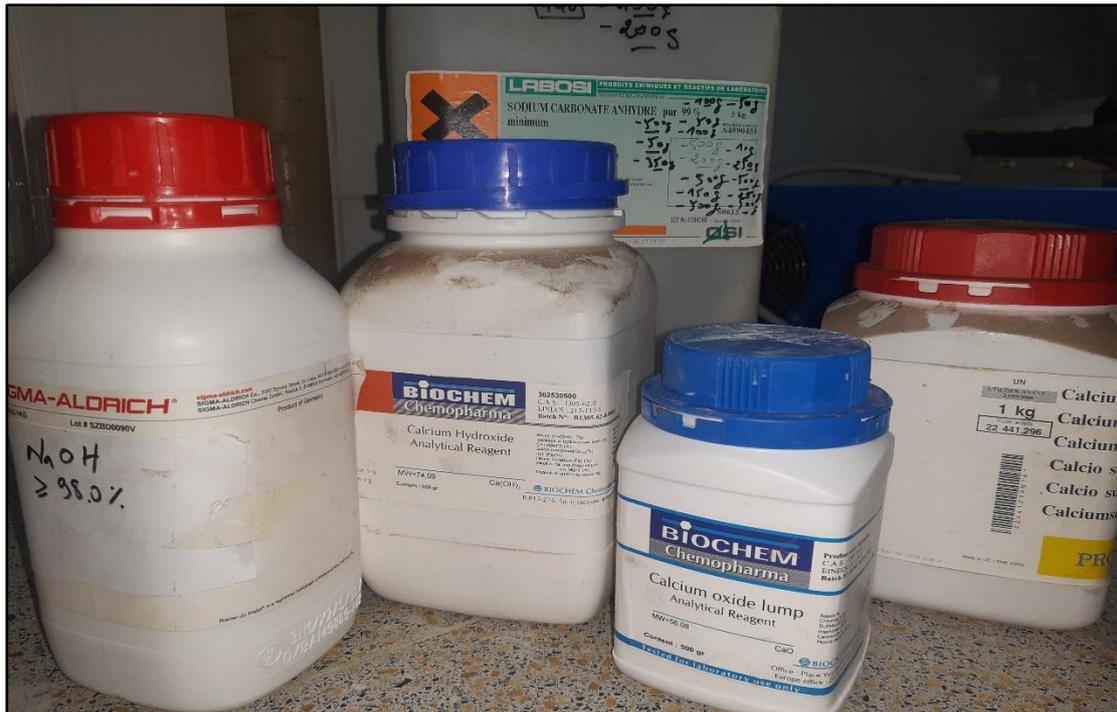


Figure II.9 : les différents activateurs utilisés pour l'activation du LHF.

## II.8 Conclusion

Après avoir caractérisé les différents matériaux nécessaires pour la fabrication de nos bétons, qui est considérée comme première étape assez importante, la détermination des dosages de ces matériaux, la formulation ainsi que la confection des éprouvettes des différentes séries de bétons sans et avec activateurs, seront développées dans le chapitre III suivant.

*Chapitre III : Etude de  
formulation des bétons*

### III.1 Introduction

La formulation d'un béton consiste à optimiser ses ingrédients, il est composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Sa confection est réalisée en fonction de son utilisation et tient compte des caractéristiques des constituants. Ce chapitre est consacré à la détermination des différents dosages de ses constituants.

### III.2 Formulation des bétons

Formuler un béton consiste à déterminer un mélange optimal des granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en fines (ciment, addition et activateurs) et en eau afin de réaliser un béton présentant de bonnes caractéristiques rhéologiques à l'état frais (l'ouvrabilité, la maniabilité, la résistance à la ségrégation) et à l'état durci (la résistance à la compression) [23].

### III.3 Méthode de DREUX GORISSE

C'est une méthode simple d'utilisation, elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés [24].

- **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 un graphe semi logarithmique, on trace les courbes granulométriques des granulats.

- **Coordonnées des points O, A, et B de la courbe de référence :**
  - **Le point d'origine O :**  $X_o = 0\text{mm}$ ,  $Y_o = 0\%$
  - **Le point d'extrémité B :**  $X_B = D = 25\text{mm}$ ,  $Y_B = 100\%$
  - **Le point de brisure :** Dimension maximale des granulats ( $D=25\text{mm}$ )

**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 le  **$D > 20\text{mm}$**  ( $D=25\text{mm}$ ),  $X_A$  est située entre les tamis de mailles 10 mm et 12.5mm

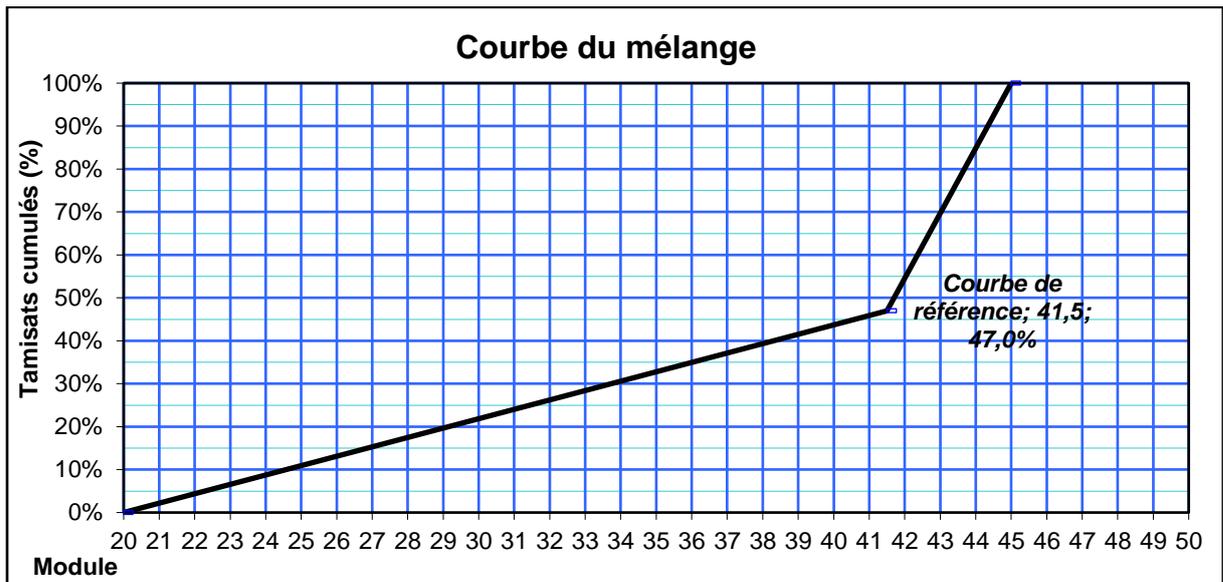
Donc :  $X_A = 41.5\text{mm}$

**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 dans l'annexe D.

**K<sub>s</sub>** : Correction supplémentaire.



**Figure III.1** : Courbe de référence.

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

$$K_s = 6M_f - 15$$

$$K_s = 6 \cdot 2.015 - 15 = -2.91$$

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

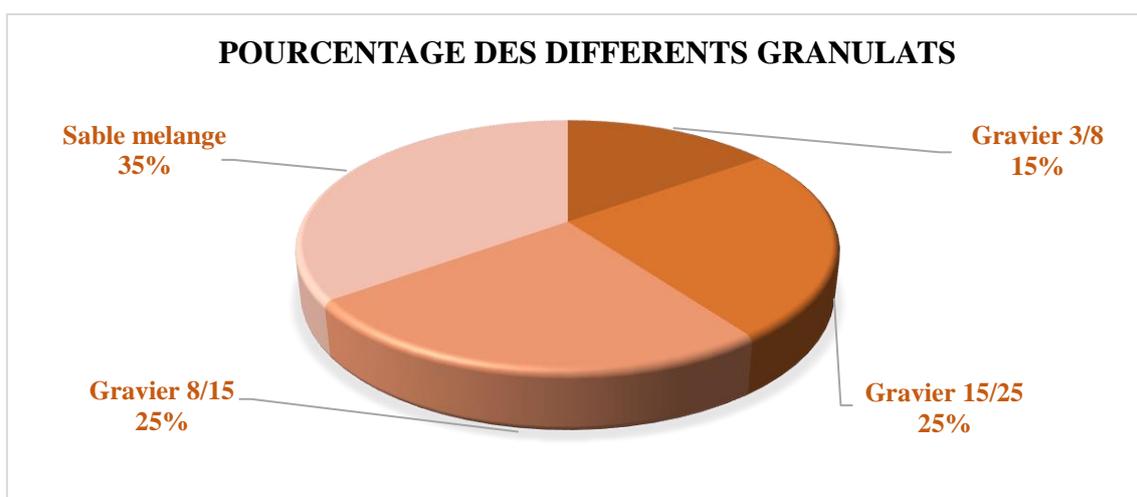
- **Les pourcentages de volume absolu des granulats selon le courbe granulométrique :**

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et gravier [26]. D'après cette courbe nous obtenons :

**Tableau III.1 :** Les différents pourcentages des granulats.

Granulats	Pourcentage
Sable mélange	35%
Gravier 3/8	15%
Gravier 8/15	25%
Gravier 15/25	25%
<b>TOTAL = 100%</b>	

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 analyses granulométriques et des pourcentages.

Les valeurs des tamisats sont représentées dans le tableau suivant :

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

Tamis (mm)	(%) Tamisât S <sub>1</sub> (0/1)	(%) Tamisât S <sub>2</sub> (0/4)	(%) Tamisât G <sub>1</sub> (3/8)	(%) Tamisât G <sub>2</sub> (8/15)	(%) TamisâtG <sub>3</sub> (15/25)	Mélange 0.09S <sub>1</sub> +0.26S <sub>2</sub> +0.15G <sub>1</sub> + 0.25G <sub>2</sub> +0.25G <sub>3</sub>
25	100	100	100	100	99	100
20	100	100	100	100	57	90
16	100	100	100	97	5	76
14	100	100	100	85	1	72
10	100	100	100	59	1	65
8	100	100	99	40	1	60
6,3	100	100	74	19	1	51
4	100	94	12	5	1	37
2	99	70	4	3	1	29
1	99	54	3	3	1	24
0,5	98	40	3	2	1	20
0,315	83	34	3	2	1	18
0,25	76	31	3	2	1	16
0,125	12	23	3	2	1	8
0,063	03	16	2	1	0,5	5

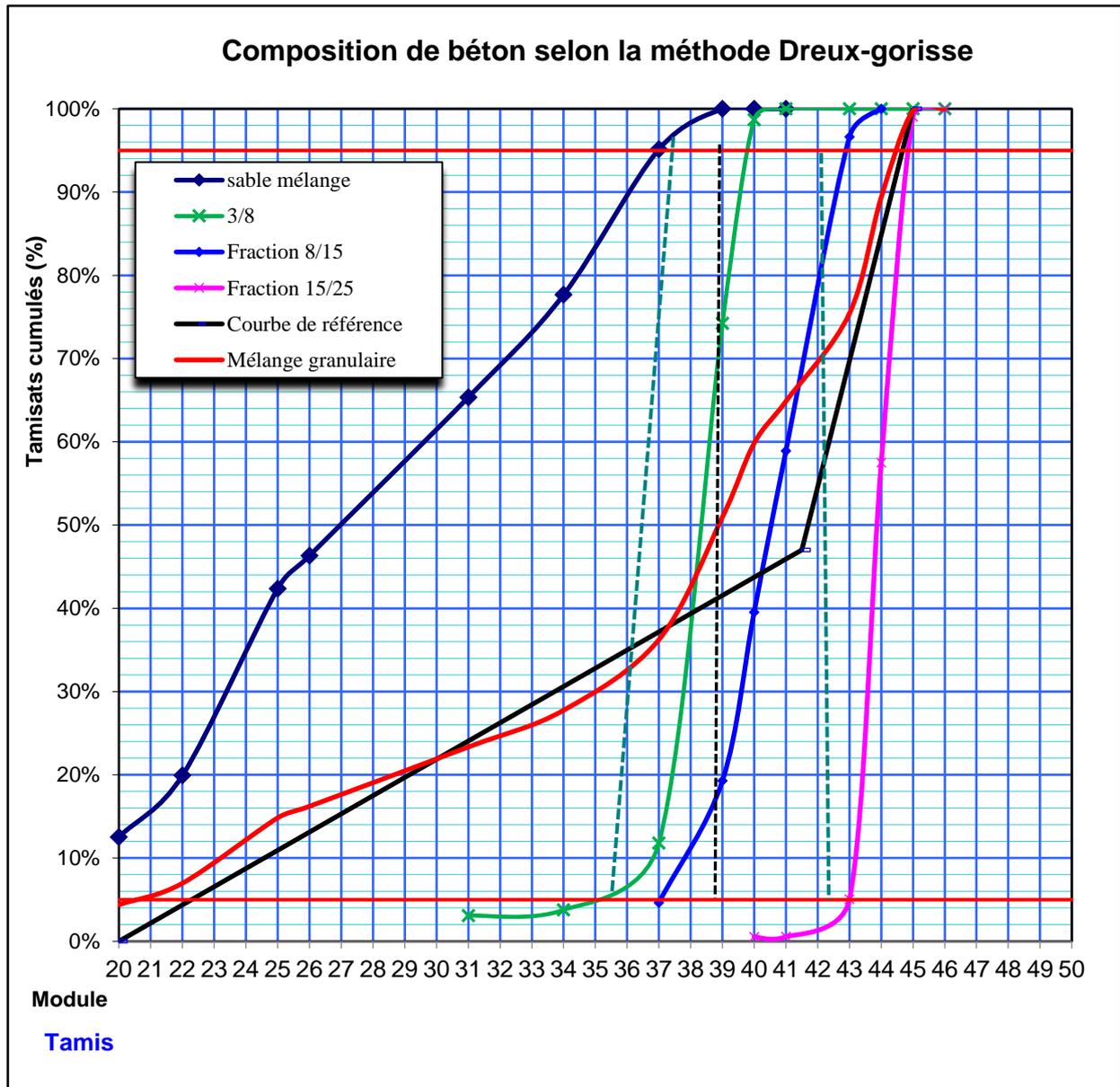


Figure III.3 : Courbe de mélange selon DREUX GORISSE.

**Interprétation :**

D'après cette figure, on remarque que la courbe de mélange s'approche bien de la courbe de référence (les courbes sont presque confondues) donc la granulométrie du mélange est bonne.

**III.3.1 Dosage en ciment**

Pour un béton de qualité et pour que nos résultats couvrent les cas les plus courants de la pratique, le dosage en ciment général est de **350kg /m<sup>3</sup>**.

**III.3.2 Dosage en eau**

Le rapport d'eau sur ciment couramment utilisé est égale à 0.5 (**E/C=0.5**), sachant que le dosage en ciment est connu, donc on peut déterminer la quantité d'eau nécessaire pour 1m<sup>3</sup> de béton.

On a :  $C = 350\text{kg/m}^3$  et  $E/C = 0.5 \Rightarrow E = 175\text{kg/m}^3$ .

**III.3.3 Dosage des granulats**

- **Calcul de coefficient de compacité ( $\gamma$ ) :**

**Définition :**

C'est le rapport d'un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un 1m<sup>3</sup> de béton frais.

Les valeurs du coefficient sont données dans le tableau de l'Annexe D.

$$\gamma = V_m/1000.$$

$$V_m = V_g + V_s + V_c$$

Avec :

- $V_m$  : volume absolu des matières solides.
- $V_g$  : volume absolu des gravillons.
- $V_s$  : volume absolu du sable.
- $V_c$  : volume absolu du ciment.

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

Pour  $D=20\text{mm}$ , on a :  $\gamma = 0.825$

Pour  $D=31.5\text{mm}$ , on a :  $\gamma = 0.830$

**Par interpolation :**

Pour  $D=25\text{mm}$ , on aura :  $\gamma = 0.827$ .

On adopte une correction de : « **-0.03** »  $\Rightarrow$  Pour les sables et les gravillons concassés.

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

• **Volume absolu des constituants solides :**

- $V_m = 1000 * \gamma = 797$  litres.
- $V_c = 350/\rho_s = 113$  litres.
- $V_g = V_m - V_c = 797 - 113 \Rightarrow V_g = 684$  litres.

**$\rho_s$**  : masse volumique absolue des grains du ciment  $3.1 \text{ g/cm}^3$ .

Alors les volumes absolus des constituants solides sont les suivants :

**Tableau III.3 :** Volumes absolus des constituants solides.

Constituants	Volumes absolus (litre)
Sable mélange	$684 * 0.35 = 239.4$
Gravier 3/8	$684 * 0.15 = 102.6$
Gravier 8/15	$684 * 0.25 = 171$
Gravier 15/25	$684 * 0.25 = 171$
Ciment	113
<b>TOTAL= 797</b>	

- **Dosage des constituants en (Kg/m<sup>3</sup>) :**

**Tableau III.4 :** Dosage des constituants solides en Kg/m<sup>3</sup> des granulats.

Constituants	Dosage en (Kg/m <sup>3</sup> )
Sable mélange	$684 * 0.35 * 2.67 = 639.2$
Gravier 3/8	$684 * 0.15 * 2.78 = 285.23$
Gravier 8/15	$684 * 0.25 * 2.78 = 475.38$
Gravier 15/25	$684 * 0.25 * 2.79 = 477.09$
Ciment	$113 * 3.1 = 350$
<b>TOTAL = 2226.9</b>	

- **Influence du rapport G/S :**

Pour avoir une bonne résistance du béton **DREUX GORISSE** nous recommandons un rapport de masse G/S (gravier/sable) voisin de 2.

- **Calcul de G/S :**

$$G/S = (285.23 + 475.38 + 477.09) / 639.2 = 1.94 \approx 2$$

Le rapport G/S est proche de 2 donc les résultats sont vérifiés.

### III.4 Densité théorique du béton frais ( $\Delta_0$ )

La densité théorique du béton frais est égale à la somme des densités de tous les constituants du béton (Eau, ciment, sable mélange, gravier3/8, gravier8/15, gravier15/25).

**Tableau III.5** : les densités des constituants du béton en kg/m<sup>3</sup>.

Constituants	Dosage en (Kg/m <sup>3</sup> )
Sable mélange	$684 \cdot 0.35 \cdot 2.67 = 639.2$
Gravier 3/8	$684 \cdot 0.15 \cdot 2.78 = 285.23$
Gravier 8/15	$684 \cdot 0.25 \cdot 2.78 = 475.38$
Gravier 15/25	$684 \cdot 0.25 \cdot 2.79 = 477.09$
Ciment	350
Eau	175
<b>TOTAL = 2401.9</b>	

### III.5 Récapitulation de la composition du béton

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

Composants	Pourcentage des granulats	Volume absolu des composants (Litres)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Dosage des composants (kg/m <sup>3</sup> )
Eau	-	175.00	1	175.00
Ciment	-	113.00	3.1	350.00
Sable mélange	35	239.40	2.67	639.20
Gravier 3/8	15	102.60	2.78	285.23
Gravier 8/15	25	171.00	2.78	475.38
Gravier 15/25	25	171.00	2.79	477.09
<b>TOTAL</b>	100	972	15.12	2401.90

### III.6 Confection des éprouvettes

- **Dimension des moules :**

On utilisera des moules cubiques de  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  et un moule cylindrique  $16 \times 32 \text{ cm}^2$ .



**Figure III.4 :** les moules cylindriques  $16 \times 32 \text{ cm}^2$ .



**Figure III. 5 :** les moules cubiques  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ .

- **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 + l'additif (selon le type de béton à réaliser) + 2/3 d'eau (temps de malaxage 1 min)

Ajouter 1/3 d'eau mélangée avec les 0.25% du super plastifiant (temps de malaxage 2 minutes).

- **Remarque :**

Notre étude consiste à réaliser des bétons plastiques avec un affaissement compris entre 6 cm et 9 cm.

Pour chaque gâchée d'essai on a besoin de :

- Remplir 3 cubes de 15x15x15 cm<sup>3</sup> et un cylindre de 16x32cm<sup>2</sup>.
- Remplir le cône d'Abrams.
- Remplir le récipient d'Aéromètre.

Donc on aura besoin de remplir un volume avoisinant 3 cubes et un cylindre.

- **Volume total de la gâchée :**

Pour une série de trois éprouvettes cubiques et une éprouvette cylindrique :

$$V_1 = \text{volume du moule cubique, } V_1 = 15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = \text{volume du moule cylindrique, } V_2 = 3.14 \times 8^2 \times 32 = 6430.72 \text{ cm}^3$$

$$V' = 3 \times V_1 + V_2 = 0.01655572 \text{ m}^3 = 0.02 \text{ m}^3$$

- **Calcul le coefficient  $\xi$  :**

$$\xi = \frac{1 \text{ m}^3}{\text{volume total du béton}} = \frac{1 \text{ m}^3}{0.02}$$

$$\xi = 50$$

Donc pour une gâchée la masse nécessaire à verser 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	$477.09/50 = 9.542$
Gravier 8/15	$475.4/50 = 9.508$
Gravier 3/8	$285.23/50 = 5.705$
Sable mélange	$639.2/50 = 12.784$
Ciment	$350/50 = 7$
Eau	$175/50 = 3.5$
<b>Total : 48</b>	

### III.7 Béton à base de laitier sans activation

#### III.7.1 Dosage en fonction de l'ajout laitier de haut fourneau (EL-HADJAR ANNABA)

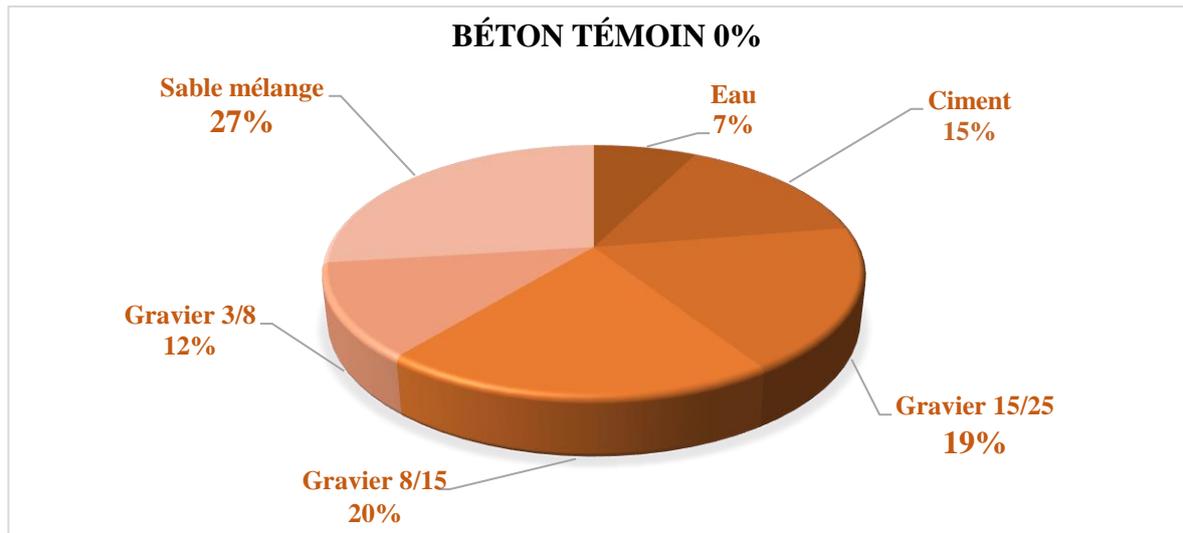
Le dosage des laitiers de haut fourneau est déterminé en fonction de ciment, connaissant le dosage en ciment (7 kg) pour un béton témoin (0%) nécessaire pour une gâchée, on peut déterminer la masse des laitiers ainsi la masse de l'adjuvant à utiliser aux différents pourcentages.

- **Béton à 0% de laitier de haut fourneau :**

Poids de ciment :  $P_c = 7$  kg

Poids de laitier de haut fourneau :  $P_{LHF} = 0$  kg

Poids de l'adjuvant :  $P_{adj} = 17.5$  g



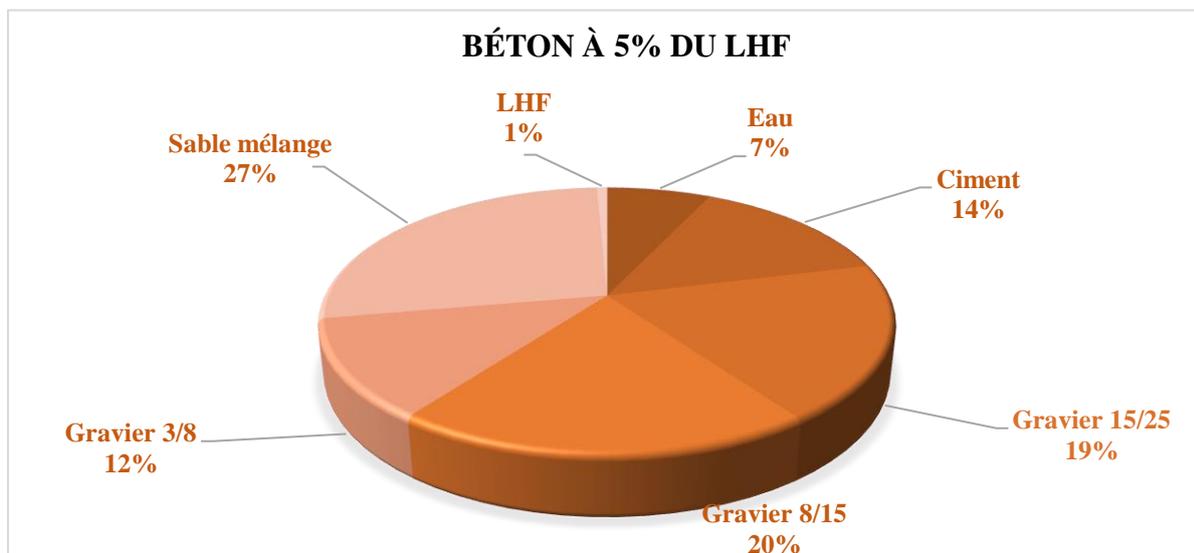
**Figure III.6 :** Le pourcentage des différentes fractions granulaires de la composition du béton témoin 0%.

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

Poids de ciment :  $P_c = 6.650$  kg

Poids de laitier de haut fourneau :  $P_{LHF} = 350$  g

Poids de l'adjuvant :  $P_{adj} = 16.625$  g



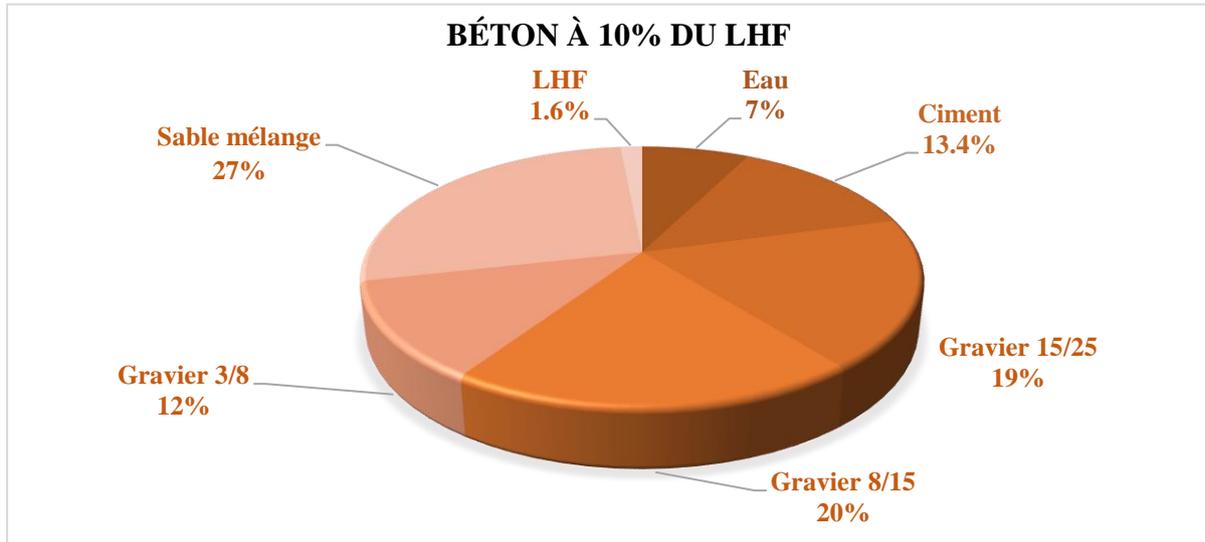
**Figure III.7 :** Les pourcentages des différentes fractions granulaires de la composition du béton à 5% du LHF.

- **Béton à 10% de laitier de haut fourneau :**

Poids de ciment :  $P_c = 6.300 \text{ kg}$

Poids de laitier de haut fourneau :  $P_{LHF} = 700 \text{ g}$

Poids de l'adjuvant :  $P_{adj} = 15.75 \text{ g}$



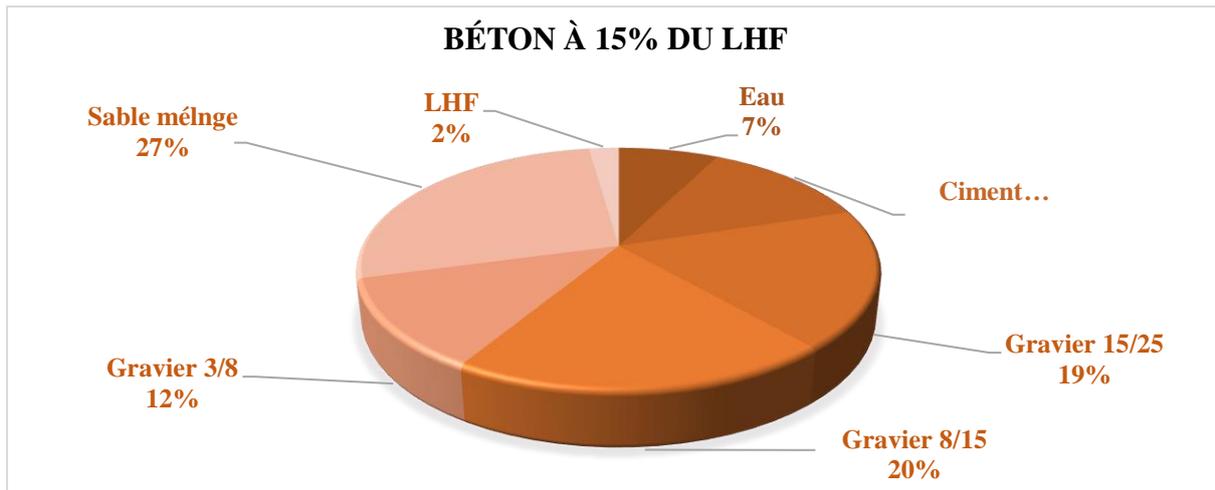
**Figure III.8 :** le pourcentage des différentes fractions granulaires de la composition du béton à 10% du LHF.

- **Béton à 15% de laitier de haut fourneau :**

Poids de ciment :  $P_c = 5.950 \text{ kg}$

Poids de laitier de haut fourneau :  $P_{LHF} = 1.050 \text{ kg}$

Poids de l'adjuvant :  $P_{adj} = 14.875 \text{ g}$



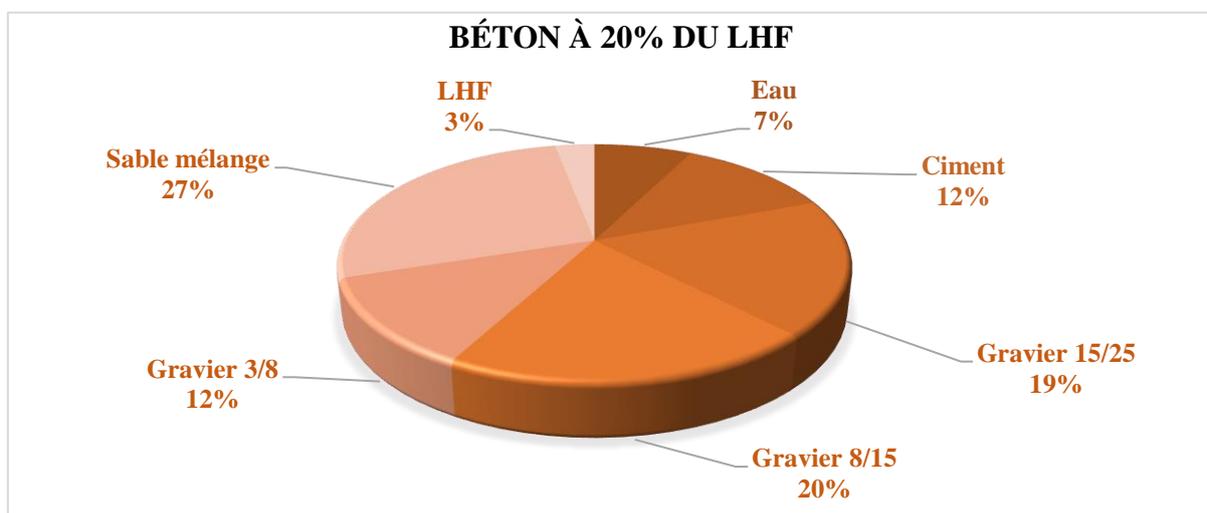
**Figure III.9 :** le pourcentage des différentes fractions granulaire de la composition du béton à 15% du LHF.

- **Béton à 20% de laitier de haut fourneau :**

Poids de ciment :  $P_c = 5.600$  kg

Poids de laitier de haut fourneau :  $P_{LHF} = 1.400$ kg

Poids de l'adjuvant :  $P_{adj} = 14$  g



**Figure III.4 :** le pourcentage des différentes fractions granulaire de la composition du béton à 20% du LHF.

### III.7.2 Récapitulation de la composition des différentes gâchées des bétons sans activation

Le tableau ci-dessous résume les dosages des constituants pour les différentes séries de bétons :

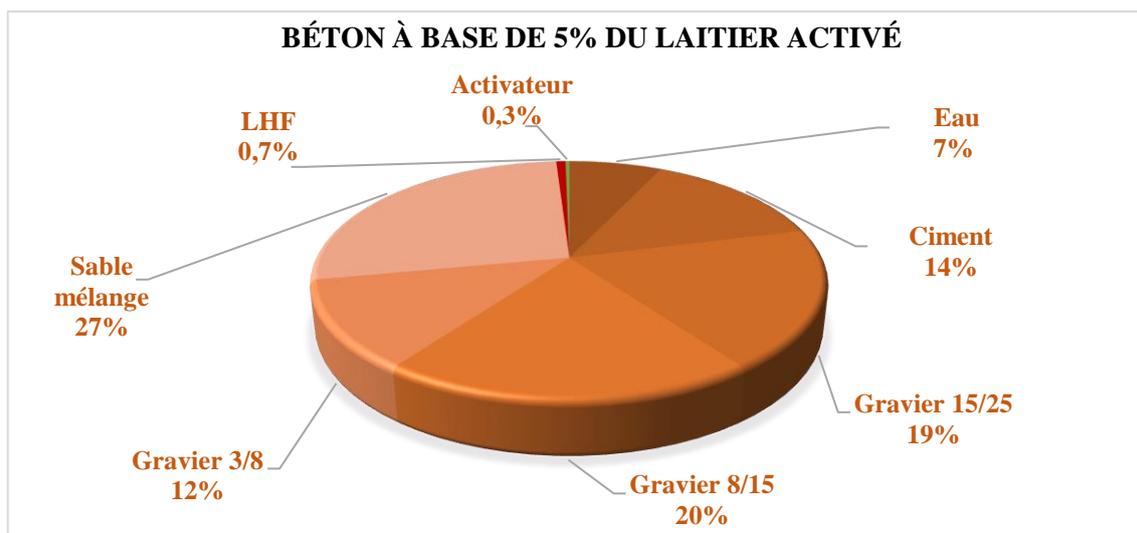
**Tableau III.8** : Récapitulatif de la composition des différentes séries de béton sans activation.

N° Série	Gravier 15/25 (g)	Gravier 8/15 (g)	Gravier 3/8 (g)	Sable mélange (g)	Ciment (g)	Eau (ml)	Adjuvant (g)	Laitier de Haut fourneau (g)
<b>BT 0%</b>	9542	9508	5705	12784	7000	3500	17.5	-
<b>BLHF 5%</b>	9542	9508	5705	12784	6650	3500	16.625	350
<b>BLHF 10%</b>	9542	9508	5705	12784	6300	3500	15.75	700
<b>BLHF 15%</b>	9542	9508	5705	12784	5950	3500	14.875	1050
<b>BLHF 20%</b>	9542	9508	5705	12784	5600	3500	14	1400

### III.7.3 Bétons à base de laitier activé

#### III.7.3.1 Activation du laitier

Les laitiers granulés finement broyé possèdent des propriétés hydrauliques latentes ce qui nécessite de les activer [25]. 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 cinq (05) activateurs différents.



**Figure III.5 :** Le pourcentage des différents composants du béton à base de L.H.F activité.

### III.7.3.2 Composition des différentes gâchées avec activation des laitiers

Une étude expérimentale exploratoire est menée d'évaluer le comportement des bétons par 5 activateurs susceptibles d'attaquer la phase vitreuse du laitier : La soude (NaOH), les carbonates de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), la chaux (CaO), l'oxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ).

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

N° Série	Ciment (g)	L.H.F (g)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g)	$\text{CaSO}_4$ (g)	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ (g)	CaO (g)	Na OH (g)
<b>BLHF 5%</b>	6650	350	-	-	-	-	-
<b>BLHF+CaOH2</b>	6650	332.5	17.5	-	-	-	-
<b>BLHF+CaSO4</b>	6650	332.5	-	17.5	-	-	-
<b>BLHF+Na2CO3</b>	6650	332.5	-	-	17.5	-	-
<b>BLHF+CaO</b>	6650	332.5	-	-	-	17.5	-
<b>BLHF+NaOH</b>	6650	332.5	-	-	-	-	17.5

**III.8 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 présenter dans le prochain chapitre les différents essais effectués sur les bétons avec les résultats obtenus ainsi que leurs discussions.

*Chapitre IV : Essais sur bétons  
et résultats*

## IV.1 Introduction

Pour avoir des ouvrages résistants, durables et économiques. Les bétons préparés doivent subir des essais à l'état frais et durci. Ce chapitre est consacré aux différents essais sur les bétons, aux résultats de ces derniers ainsi que leurs interprétations.

Les bétons confectionnés sont des bétons à base de laitier de haut fourneau à des pourcentages de 0, 5, 10, 15 et 20%.

D'autres séries de bétons sont réalisées tout en activant la série de bétons à base de ce laitier qui donne la meilleure résistance à la compression (meilleur pourcentage au laitier), en utilisant cinq (05) différents activateurs cités dans le chapitre III précédent.

## IV.2 Béton au laitier de haut fourneau

### IV.2.1 Essais sur les bétons frais

Parmi les propriétés du béton à l'état frais avant la prise et le durcissement : la consistance, le pourcentage d'air occlus dans le béton et la masse volumique.

#### IV.2.1.1 Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451

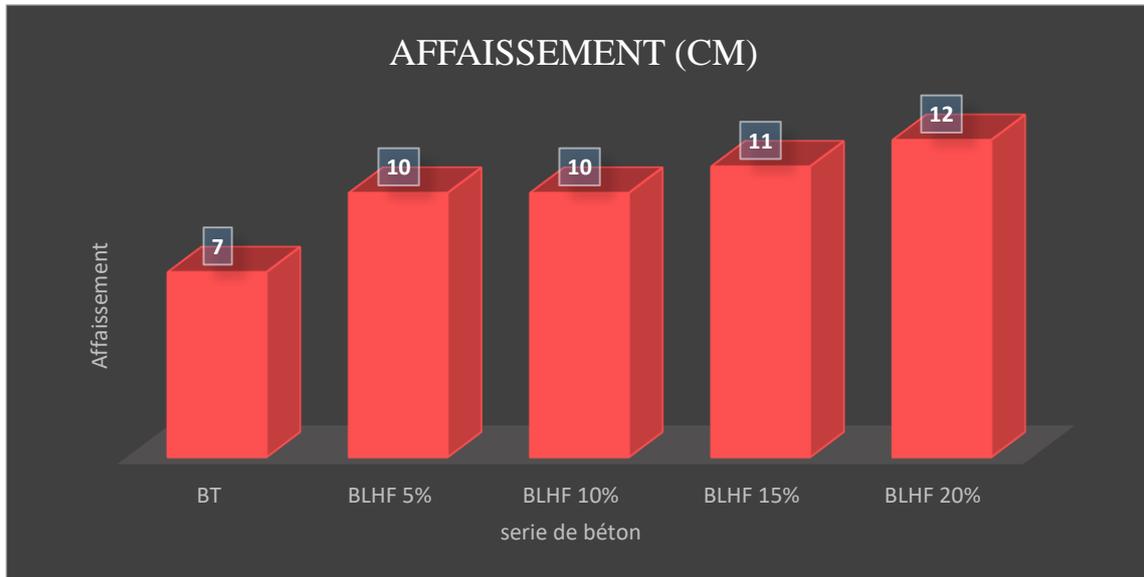
Il consiste à déterminer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. [19]



**Figure IV.1** : Affaissement au cône d'Abrams du béton au laitier

- **Résultats et interprétations d'essai de consistance**

Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux de l'annexe A et schématisés sur les figures suivantes :



**Figure IV.2 :** Variation de l'affaissement des différentes séries du béton au laitier.

### Interprétation

Pour un rapport E/C = 0.5, et une quantité d'adjuvant de 0.25% Le béton obtenu sans addition (0%) est plastique (affaissement > 6). Cette plasticité se développe avec l'ajout de laitier de haut fourneau (5%, 10%, 15% et 20%), les bétons obtenus sont mous (affaissement > 10). Et cela revient à la nature de la finesse de l'addition ajouté (très fines).

Cette amélioration 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 [26].

Donc le laitier donne une certaine consistance plastique au béton.

#### IV.2.1.2 Essai du contrôle du volume d'air entraîné (Aéromètre) NF EN 12350-7

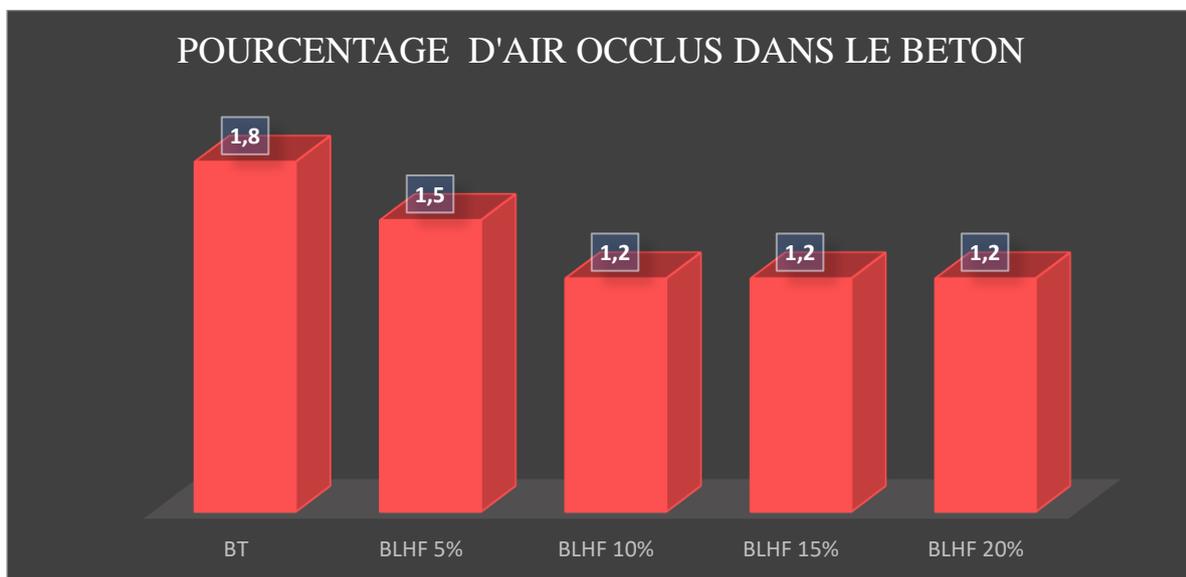
Il permet d'évaluer la quantité d'air occlus de manière à vérifier que le minimum prévu par l'adaptation nationale à l'EN 206-1 en cas de gel est bien atteint [19].



**Figure IV.3 :** Aéromètre à béton utilisé au laboratoire LTPEST.

- **Résultats et interprétations d'essai du contrôle du volume d'air entrainé :**

Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux de l'annexe A, et illustrés par la figure IV.4 ci-dessous :



**Figure IV.4 :** Variation d'air occlus dans les différentes séries de béton au laitier.

## Interprétation

Lors de la mise en place du béton il y a eu création de bulles d'air. Ce volume d'air diminue en fonction du dosage de L.H.F moulu. Ce qui veut dire que les fines de L.H.F obturent les vides entre les grains. (Rentre dans la granularité optimale des bétons).

Certaines études ont permis la corrélation entre la fluidité et l'évolution de la masse volumique, lorsque la fluidité augmente, la masse volumique augmente, la teneur en air occlus diminue [Chandra, 2002][27], ce qui ne s'accorde pas avec nos résultats.

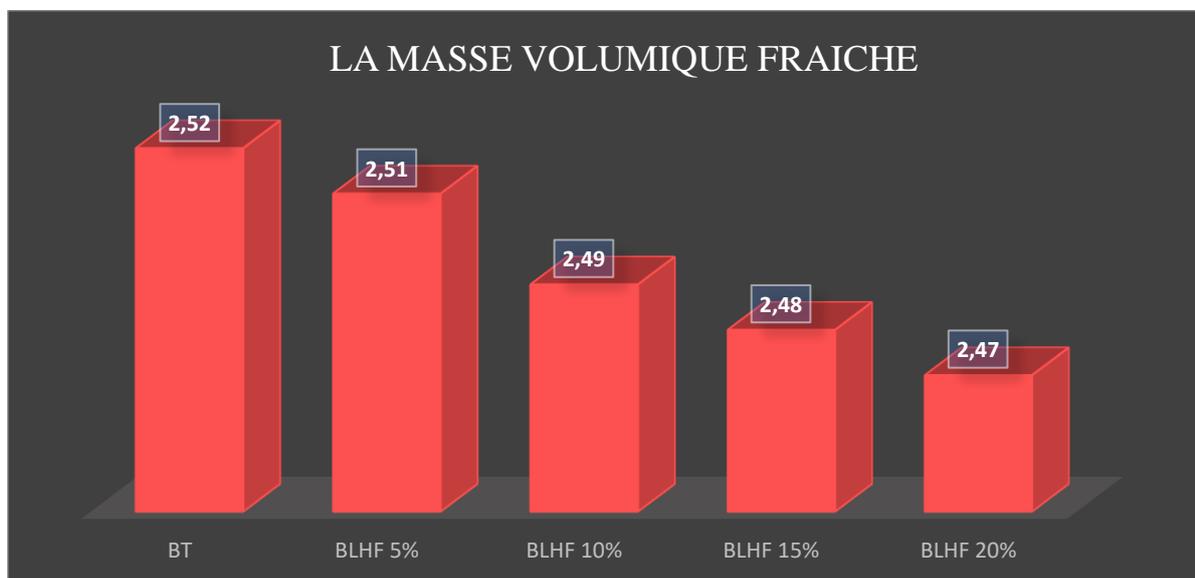
La masse volumique diminue (les particules de laitier plus légères que celles du ciment), la fluidité augmente, volume d'air occlus diminue.

### IV.2.1.3 Mesure des masses volumiques fraîches $\rho$

C'est 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 soit avec ou sans activation du LHF [19].

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

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



**Figure IV.5 :** La masse volumique fraîche des différentes séries de béton en fonctions du dosage de L.H.F.

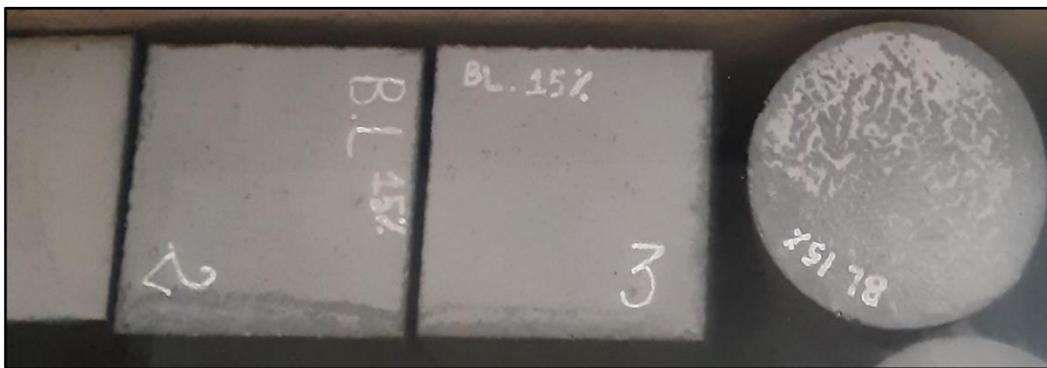
## Interprétation

Les bétons avec l'ajout du laitier de haut fourneau présentent une masse volumique fraîche légèrement inférieure à celle de témoin. Elle varie en fonction de dosage de L.H.F, cela revient aux masses volumiques de L.H.F qui sont inférieures à celles du ciment.

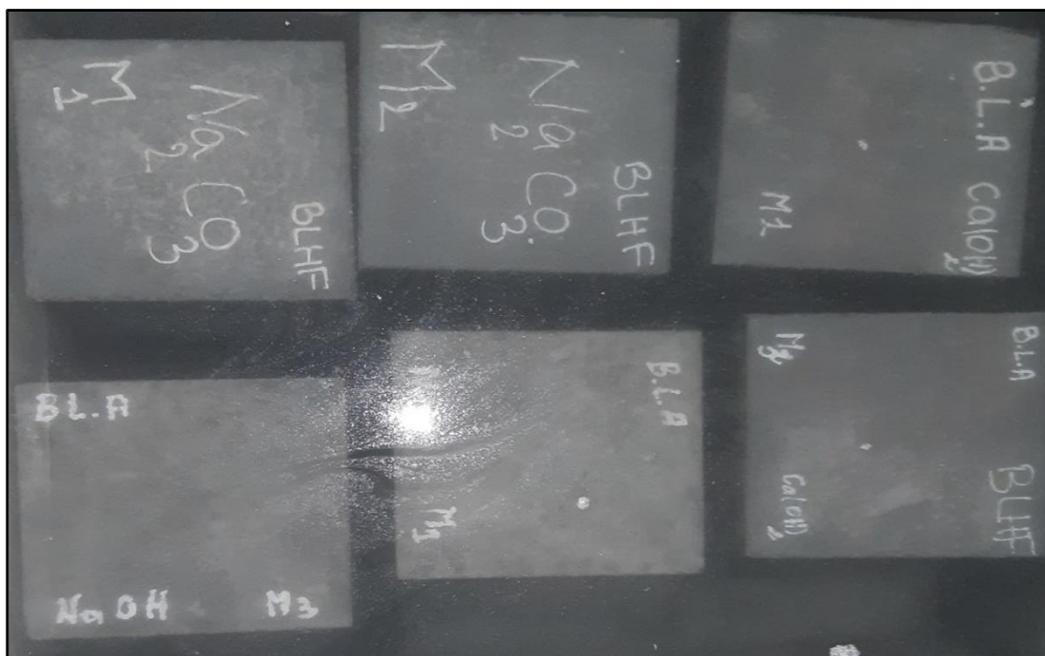
### IV.2.2 Essais sur les bétons durcis

- **Conservation des éprouvettes**

Après le démoulage, on mesure la masse de chaque éprouvette, ensuite elles doivent être conservées dans l'eau à une température ambiante pendant 28 jours.



**Figure IV. 6 :** Conservation des éprouvettes du béton au LHF dans l'eau.



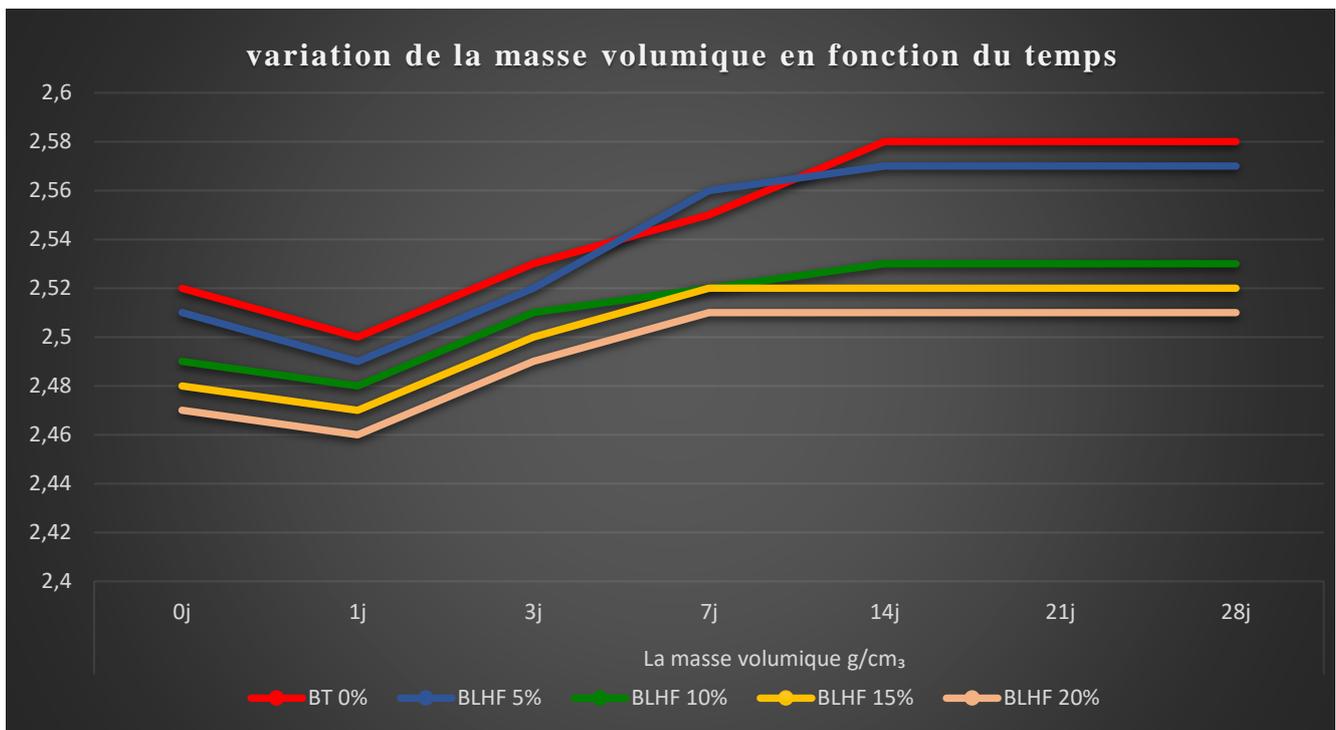
**Figure IV. 7 :** Conservation des éprouvettes du béton avec activation du LHF dans l'eau.

### IV.2.2.1 Mesure des masses volumiques

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

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

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



**Figure IV.8 :** la masse volumique des différentes séries du béton au LHF en fonction du temps.

### Interprétation

A partir des courbes ci-dessus nous remarquons que :

Du jour de confection jusqu'au 1<sup>er</sup> jour : Une diminution de la masse volumique des bétons, qui s'explique par une quantité d'eau qui s'est évaporée pendant l'exposition à l'aire ambiante cela revient à l'hydratation du ciment (dégagement de chaleur) et provoque le séchage du béton.

Du 1<sup>er</sup> jour jusqu'au 14<sup>eme</sup> jours : on observe une forte augmentation des masses volumiques des bétons, ce qui veut dire que le ciment continu à s'hydrater.

Du 14<sup>eme</sup> jours jusqu'au 28<sup>eme</sup> jours : les masses volumiques des bétons restent constantes pour tous les bétons, donc sont saturés (pas d'absorption d'eau).

#### IV.2.2.2 Essai de compression (NF EN 12390-3)

Il consiste à mesurer la résistance des éprouvettes lorsque celles-ci sont soumises à une compression centrée [19].

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



Figure IV.9 : Eprouvettes du béton au LHF après écrasement.

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

Les résultats obtenus sont schématisés sur la figure suivante :

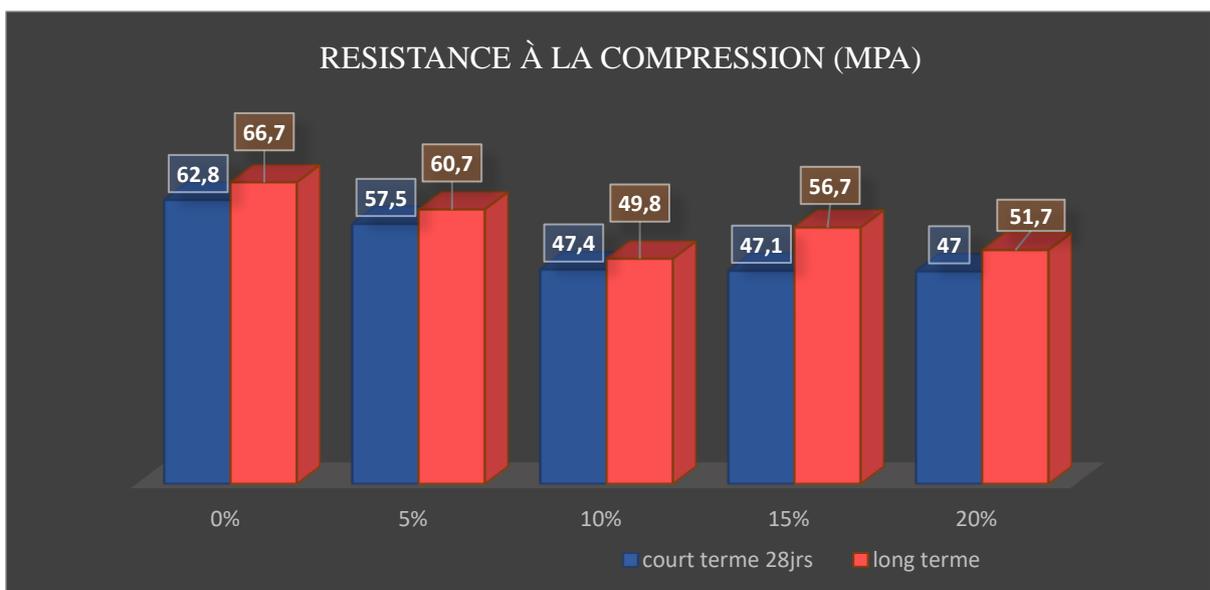


Figure IV.10 : la résistance à la compression à 28 jours et à 90 jours des différents bétons au LHF.

### Interprétation

Nous constatons une même variation de résistances à la compression des bétons à 28 jours et à 90 jours d'âge (même allure des histogrammes). Une légère augmentation de résistances est aussi remarquée dans les bétons de 90 jours, les résistances à cet âge sont plus importantes comparant à celles de 28 jours, ça revient sûrement à l'hydratation continue du ciment.

L'utilisation d'un ciment CPA avec ajout du LHF (existe déjà dans le ciment) rend le laitier un déchet inerte et ne participe pas à l'augmentation de la résistance mécanique, ce qui explique la diminution de la résistance en fonction d'augmentation des pourcentages du LHF.

On remarque que le dosage à 0% de laitier de haut fourneau a donné une meilleure résistance à la compression.

Pour le dosage à 5% de laitier de haut fourneau une légère diminution de résistance par rapport au béton témoin et cela revient à la quantité de ciment qui est remplacé par le laitier de haut fourneau.

Pour les dosages de 10%, 15% et 20% de LHF, on remarque une diminution importante de résistances à la compression par rapport au béton témoin, qui s'explique par la quantité de ciment remplacée par le L.H.F. Comme la cinétique d'hydratation de laitier est lente, la résistance diminue en fonction de dosage en laitier 5%, 10%, 15% et 20%. Selon la recherche faite par MN OUDJIT sur les laitiers de provenance différente, la chaleur dégagée durant l'hydratation est inférieure à celle de témoin.[26]

La meilleure résistance à la compression est à 5% de laitier de haut fourneau.

### IV.3 Bétons au laitier de haut fourneau activé

#### IV.3.1 Essais sur les bétons frais

##### IV.3.1.1 Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe B



**Figure IV.11** : Affaissement au cône d'Abrams du béton au laitier activé.

- **Résultats et interprétations d'essai de consistance :**

Les résultats sont schématisés sur la figure suivante :



**Figure IV.12** : Affaissement des bétons au LHF activé.

## Interprétation

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

L'intervalle de consistance est entre plastique et très plastique.

- Béton avec l'ajout des activateurs  $\text{Ca(OH)}_2$  et  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  : la consistance reste la même (très plastique) équivalente à celle du béton témoin 5% (sans activation), ce qui veut dire que les activateurs ajoutés n'influent pas sur l'ouvrabilité du béton.
- Béton avec l'ajout des activateurs  $\text{CaSO}_4$  et  $\text{CaO}$  : une diminution de la consistance de béton très plastique à un béton plastique. Ce qui veut dire que ces activateurs ont influé sur l'ouvrabilité du béton.
- Béton avec l'ajout de  $\text{NaOH}$  : une légère diminution de la consistance, cela peut s'expliquer par l'activateur utilisé.

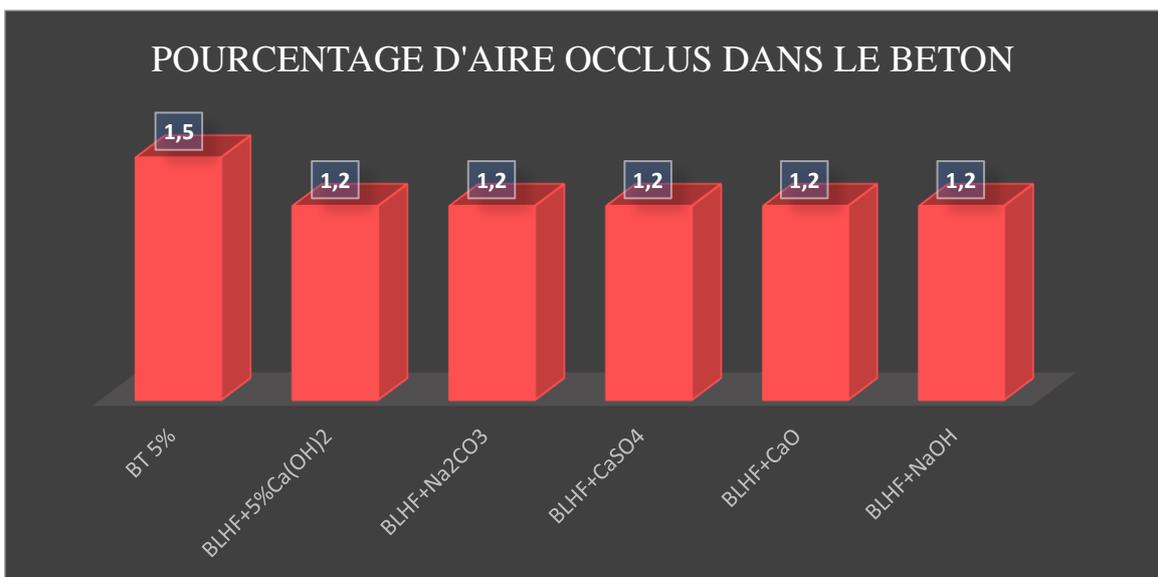
On conclut que la nature et le dosage de l'activateur peut avoir une influence sur l'ouvrabilité et la consistance du béton.

### IV.3.1.2 Essai du contrôle du volume d'air entrainé (Aéromètre) NF EN 12350-7

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

- **Résultats et interprétations d'essai du contrôle du volume d'air entrainé :**

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-après :



**Figure IV.13 :** Variation d'air occlus dans les bétons au LHF activé.

## Interprétation

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

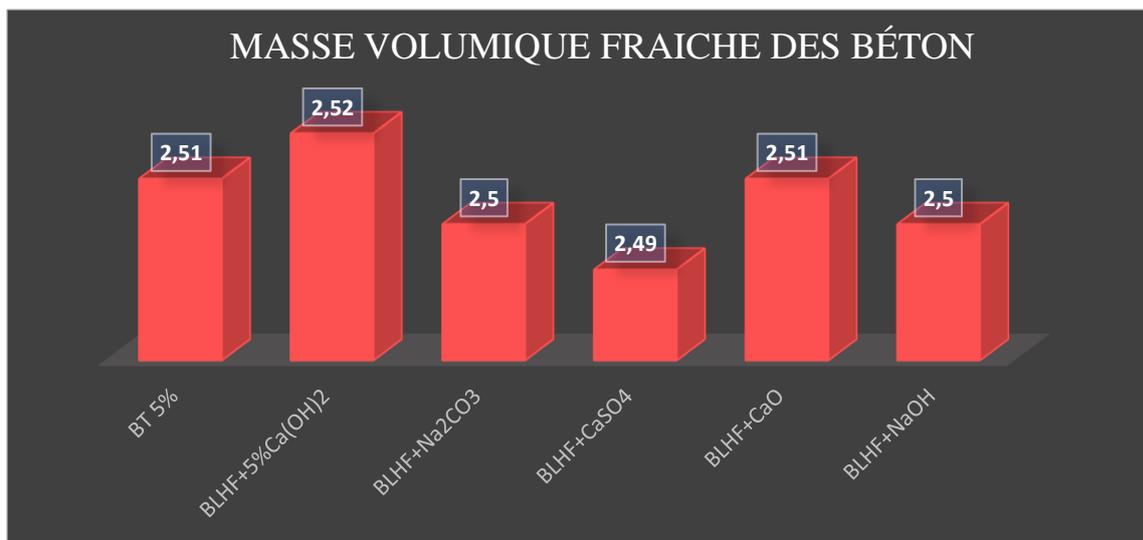
Le volume d'air occlus a diminué en utilisant les différents activateurs. Ceci s'explique par l'augmentation de la compacité des bétons engendrés par ces activateurs utilisés. La quantité d'air occlus est la même dans les bétons activés, donc presque la même compacité (Le mélange du LHF et les activateurs a comblé les vides existants).

### IV.3.1.3 mesure des masses volumiques fraîches $\rho$

Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux de l'annexe B

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

Les résultats sont schématisés par la figure suivante :



**Figure IV.14 :** la masse volumique fraîche des différentes séries de béton au LHF activé.

## Interprétation

D'après cette figure, on remarque 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.

L'activateur CaOH<sub>2</sub> a fait augmenter la densité de ce béton, qui s'explique par ses masses (apparente et absolue), qui sont plus grandes que celles du LHF (à une température de 28°C).

La chaux CaO, qui a la même densité apparente et absolue que celle du LHF a permis d'avoir la même masse volumique des bétons frais.

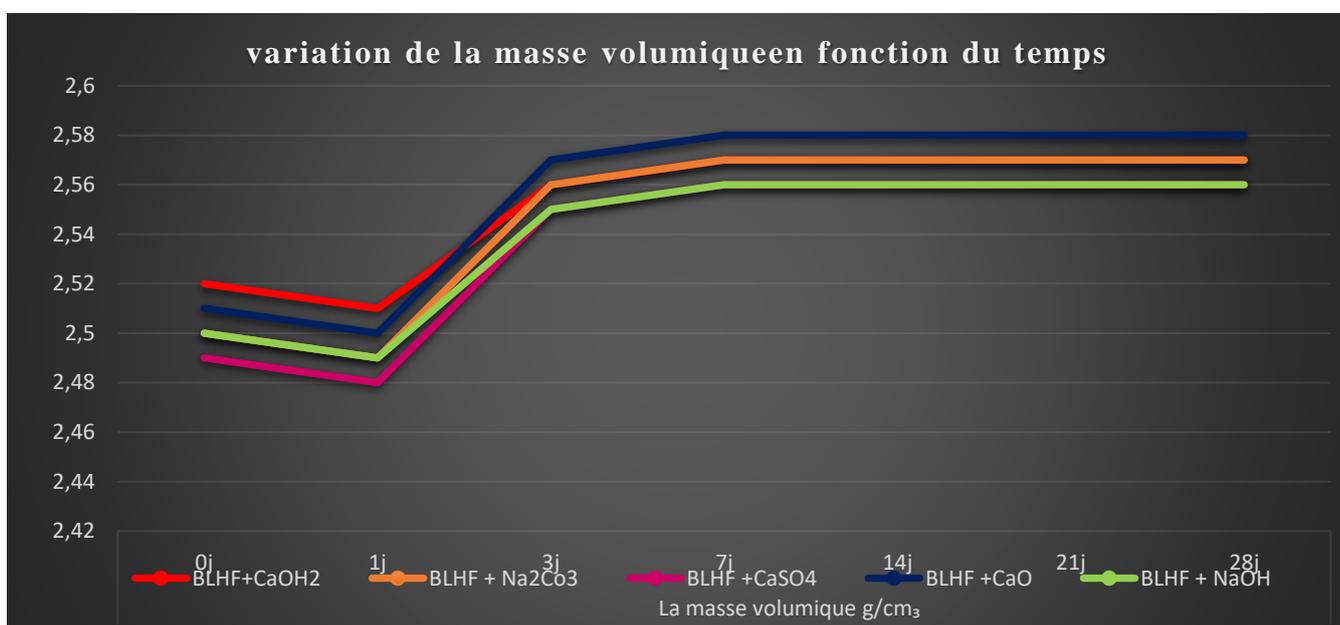
### IV.3.2 Essais sur les bétons durcis

#### IV.3.2.1 Mesure des masses volumiques

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux de l'annexe B

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

Les résultats sont donnés par la figure ci-dessous :



**Figure IV.15 :** Variation de la masse volumique des bétons au LHF activé.

#### Interprétation

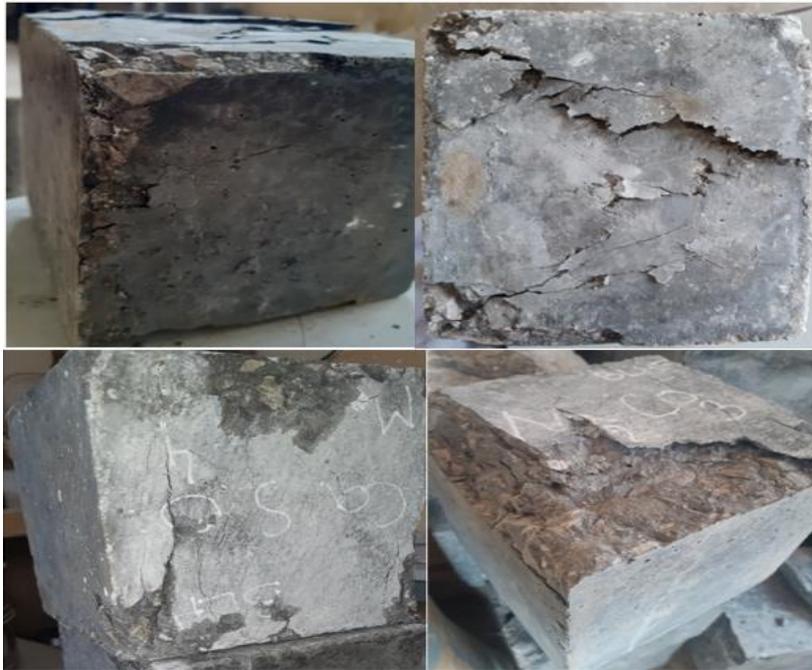
Chaque activateur influe différemment sur les masses volumiques fraîches des bétons (il s'agit des réactions chimiques entre le laitier et les activateurs).

Du jour de confection jusqu'au 1<sup>er</sup> jour, il y a eu une diminution de la masse volumique de tous les bétons, cela revient à l'exposition des éprouvettes à l'air libre, ce qui fait le séchage du béton et l'évaporation d'eau.

Du 3<sup>ème</sup> jusqu'au 7<sup>ème</sup> jour, on observe une forte augmentation des masses volumiques qui s'explique par l'hydratation des grains du ciment, sachant que les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température ambiante (absorption d'eau).

Du 7<sup>ème</sup> jour jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour, les masses volumiques sont constantes pour tous les bétons avec tous les activateurs, du fait de la stabilisation des masses (saturation et pas d'absorption).

#### IV.3.2.2 Essai de compression (NF EN 12390-3)



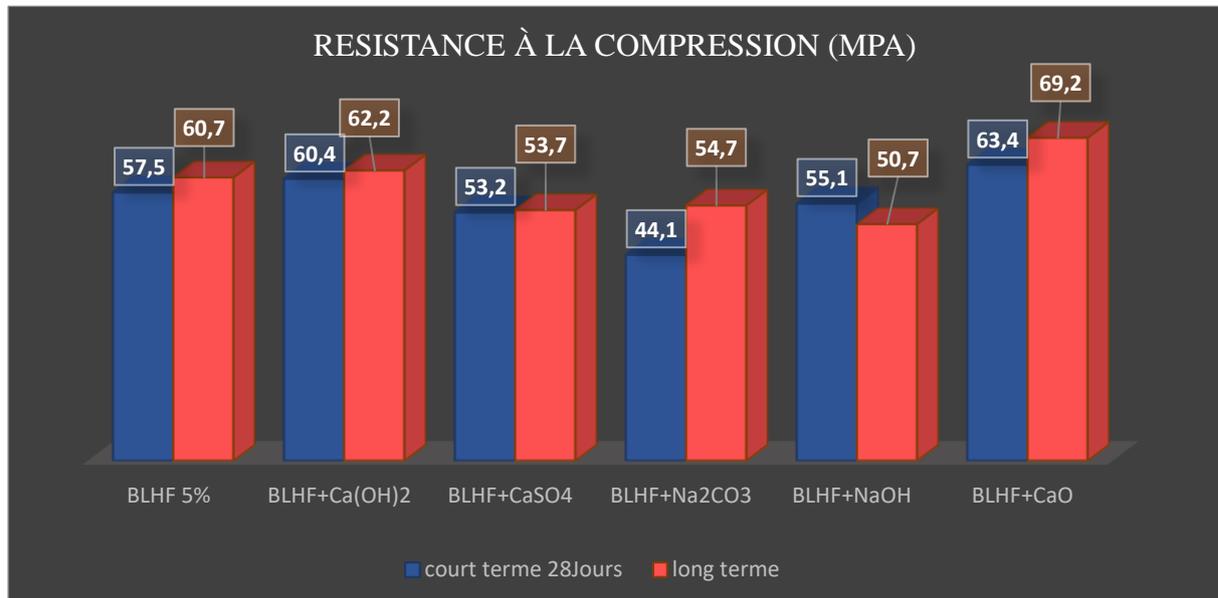
**Figure IV.16** : Eprouvettes du béton au LHF activé après écrasement à 28jours.



**Figure IV.17** : Eprouvettes du béton au LHF activé après écrasement à 90jours

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

Les résultats de résistances obtenus sont dans le tableau de l'annexe B et E et La figure ci-dessous représente les résistances obtenues



**Figure IV.17 :** Variation de la résistance à la compression à 28jours et à 90 jours des bétons au LHF activé.

### Interprétation

D'après l'histogramme ci-dessus :

Les bétons avec les activateurs CaO et Ca (OH)<sub>2</sub> enregistrent la plus grande résistance à la compression. On a constaté que à chaque fois la masse volumique de ces derniers augmente, le béton devient plus dense et la production de silicates de calcium hydratés (C-S-H) en grandes quantités à la haute température (28.9°C), participent au développement de la résistance.

La chaux CaO présente une augmentation de résistance en compression à court terme de (10.8 %) par rapport à celle de référence (5% de LHF), et à long terme de (9%) par rapport à celle de 28jours (avec activation). Ce qui veut dire que CaO agit comme un réactif à court et à long terme.

Le béton avec l'activateur de Carbonates de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) a donné la résistance la plus faible par rapport à celle du témoin (5% de LHF) et à celles d'autres bétons activés à 28jours. Cela revient à une faible production de silicates de calcium hydratés (C-S-H) (réaction d'activation lente), dégagement de chaleur faible, car la réaction d'hydratation plus lente, ce

qui a été confirmé à long terme dont la résistance a nettement augmenté, ce qui veut dire que le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  agit comme un réactif à long terme.

L'Hydroxyde de sodium  $\text{NaOH}$  présente une diminution de résistance en compression à court terme de (- 4.2 %) par rapport à celle du témoin (5% LHF), et à long terme de (- 8 %) par rapport à celle de 28 jours. Cette chute de résistance revient à la nature de cet activateur basique.

D'après les recherches faites sur l'activation alcaline du LHF, les résultats ont donné une résistance de 25MPa, comparant à notre résultat elle est assez améliorée mais toujours elle est inférieure à celle de 5% du LHF.[25]

On conclut que la nature de l'activateur a une influence sur l'hydratation du L.H.F (la quantité du C-S-H produite), La meilleure résistance est donnée par la chaux  $\text{CaO}$  et l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

#### **IV.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les différents résultats obtenus sur les différents essais mécaniques et physiques des bétons à base des LHF, et le Laitier de haut fourneau activé. Nous avons conclu que la meilleure résistance est celle de 5% du LHF. Les meilleures résistances à la compression obtenues en activant le LHF sont celles de la chaux et l'hydroxyde de calcium à court et à long terme.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

Ce travail de recherche montre l'importance d'utilisation des laitiers granulés broyés de hauts fourneaux d'EL-HADJAR dans les bétons, notamment l'activation de ces laitiers. Dans ce contexte il est aisé d'entrevoir l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation de ces laitiers.

A partir de cette étude et d'après les résultats obtenus des essais effectués sur les bétons contenant les laitiers de hauts fourneaux, ainsi que l'activation du sous-produit, on peut conclure ce qui suit :

- Les laitiers de hauts fourneaux réduisent la demande en eau de gâchage (E/C).
- Les laitiers peuvent être utilisés comme remplaçant du ciment à 5%, après avoir présenté une résistance à la compression supérieure à 25MPa et assez proche à celle du béton témoin, c'est un gain économique concernant le ciment, et environnemental vu qu'ils ne dégagent pas le CO<sub>2</sub>.
- La chaux et l'hydroxyde de calcium sont les deux meilleurs activateurs à court et à long terme, après avoir donné une résistance qui est supérieure à celle obtenue à 5% du laitier de haut fourneau.

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

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

- L'étude du comportement des bétons à base de laitier de haut fourneau avec un CPA neutre (sans ajout).
- L'étude de l'activation de laitier de haut fourneau à long terme vis-à-vis de la durabilité.
- La valorisation du laitier de haut fourneau dans les bétons de hautes performances.
- S'intéresser à la conductivité thermique du béton avec activateurs.
- Etude d'autres propriétés des bétons avec substitution de laitier de haut fourneau pour un pourcentage de 5%.
- Effectuer des spectres DRX pour les bétons au laitier activé et non activé.

## *Références bibliographiques*

- [1] **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.
- [2] **Zeghichi Leila**, *l'influence de l'activation du laitier sur les comportements mécaniques des bétons, thèse doctorat, université de Biskra*, janvier 2007.
- [3] **I.MESSAOUDENE**, *cours valorisation des déchets , Algérie : département génie civil, université EL Bachir Ibrahim*.
- [4] **I.MESSAOUDENE, A.NACERI**, *Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier , Université de M'SILA*. 2006.
- [5] **J.ALEXANDRE, J.L.SEBILEAU**, *laitier de haut fourneaux ( élaboration , traitement, propriété et emplois)*. 1998.
- [6] **H.GAYE, J.M.STEILER**, *données thermodynamiques et physiques des laitiers de hauts fourneaux.IRSID.PCMRF337 bis*. Janvier 1987.
- [7] **L.BOUHANNA, C.MEGHAICHI**, *Etude comparative de l'activation des additives dans la matrice cimentaires. Mémoire fin d'étude université de jijel*. 2018.
- [8] **N.SAFWAN**, *l'influence des granulats artificiels sur la résistance mécanique du béton. Université de Mohamed Boudiaf-M'SILA*. 2015/2016.
- [9] **NF EN 12457-2 (2001)**, *caractérisation des déchets -lixiviation-Essai de lixiviation de conformité pour les déchets granulaires et les boues*.
- [10] **M.Cyr, P.LAWRENCE, E.Ringot**, *efficiency of mineral admixtures in mortars. Cement and concrete research 36 264-277*. 2006.
- [11] **Legret (B011)**, *Evaluation environnementale du comportement d'un laitier LD utilisé en Infrastructure Routière. PARIS*.
- [12] **R.Limbach, S.KARLSON, G.SCANNELL, R.MATHEW, M.Edén, L.WONDRACZEK**, *The effect of TiO<sub>2</sub> on the sytructure of Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub> glasses and its implications for thermal and mechanical properties*. 2017.

- [13] **VAN DEN. HOVE**, *les procédés de récupération de la chaleur sensible des laitiers de hauts fourneaux. Commission Européenne des Hauts Fourneaux.Paris. 23 novembre 1983.*
- [14] **A.BELHOCINE, N.NAGOUDI**, *Etude expérimental d'un mortier avec ajouts minéraux .Mémoire de fin d'études. Université Kasdi Merbah,Ouargla. 2014.*
- [15] **S.SAHAR**, *conception d'Eco-liant et /ou Eco matériaux à partir de cendres de volantes papetières et laitier moulu , Thèse Université de Caen Normandie. 2018.*
- [16] **GEORGES Cailletaud and SAMUEL Forest**, *introduction à la plasticité, centre des matériaux Mines ParisTech/CNRS.*
- [17] **M.Adjoudj**, *Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Université de Cegy Pontoise. 2015.*
- [18] **Gisement Des Déchets, Chapitre I**, [hpp://www.edition-ellipses.fr](http://www.edition-ellipses.fr).
- [19] **BOUBKEUR .L , HAMMADOUCHE .N**, *Valorisation des boues de dragages dans les bétons et les mortiers, Mémoire fin d'étude , Université de Bejaia, 2015/2016.*
- [20] **S.ATTIL**, *TP 3eme année licence sur les matériaux de construction , Université de Bejaia, 2010*
- [21] **IBOUZITEN.D**, *Valorisation des déchets industriels (Boues d'usinage) dans les bétons et les mortier, Mémoire fin d'études, Université de Bejaia, 2015.*
- [22] **OUARET. S, BOUNCEUR. N**, *valorisation des fibres métalliques (FIBRES BCR) dans les bétons, Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, 2012/2013.*
- [23] **G. DREUX, J.Festa**. *Nouveau guide de béton et ses constitutions, 8eme Edition, 1998.*
- [24] **S. KHERBACHE et R. GOUDJIL**, *influence des fines contenue dans les sables concassés sur la résistance des bétons, Thèse de l'ingénieur, Université de Bejaia.*
- [25] **L.ZEGHICHI , B.MEZGHICH et A.Merzouqui**, *influence de l'activation du laitier sur le comportement mécanique des bétons, Université de Biskra, 2007.*

- [26] **M.LAAKRI**, *Evolution de la prise et du durcissement des bétons formés à base de laitier de haut fourneau*, Magister, Université U.S.T.H.B, 2010.
- [27] **M.LAAKRI**, *influence des ajouts locaux sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la pâte cimentaire*, Thèse de DOCTORAT. Université U.S.T.H. B, 2020
- [28] **N.CHELOUAH**, *Cours de matériaux Innovants, chapitre2*  
« Valorisation des matériaux » Master 1, Université de Bejaia 2020/2021.

# *Annexes*

## Annexe A

### (Les bétons sans activateurs)

✓ Les valeurs des masses volumiques

Les valeurs des masses volumiques de 0 jour					
Série des Béton	V (Cm <sup>3</sup> )	M moule (g)	M t (g)	Mt – M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm <sup>3</sup> )
<b>BT (0%)</b>	5000	5775	18400	12625	2,52
<b>BLHF (5%)</b>	5000	5775	18355	12580	2,51
<b>BLHF (10%)</b>	5000	5775	18255	12480	2,49
<b>BLHF (15%)</b>	5000	5775	18180	12405	2,48
<b>BLHF (20%)</b>	5000	5775	18150	12375	2,47

Les valeurs des masses volumiques de 1jour			
Série des Béton	V (Cm <sup>3</sup> )	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm <sup>3</sup> )
<b>BT (0%)</b>	3375	8439	2,5
<b>BLHF (5%)</b>	3375	8404	2,49
<b>BLHF (10%)</b>	3375	8370	2,48
<b>BLHF (15%)</b>	3375	8337	2,47
<b>BLHF (20%)</b>	3375	8303	2,46

<b>Les valeurs des masses volumiques de 3jours</b>			
<b>Série des Béton</b>	<b>V (Cm³)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm³)</b>
<b>BT (0%)</b>	3375	8540	2,53
<b>BLHF (5%)</b>	3375	8505	2,52
<b>BLHF (10%)</b>	3375	8473	2,51
<b>BLHF (15%)</b>	3375	8442	2,50
<b>BLHF (20%)</b>	3375	8405	2,49

<b>Les valeurs des masses volumiques de 7jours</b>			
<b>Série des Béton</b>	<b>V (Cm³)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm³)</b>
<b>BT (0%)</b>	3375	8617	2,55
<b>BLHF (5%)</b>	3375	8663	2,56
<b>BLHF (10%)</b>	3375	8526	2,52
<b>BLHF (15%)</b>	3375	8538	2,52
<b>BLHF (20%)</b>	3375	8480	2,51

<b>Les valeurs des masses volumiques de 14jours</b>			
<b>Série des Béton</b>	<b>V (Cm³)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm³)</b>
<b>BT (0%)</b>	3375	8720	2,58
<b>BLHF (5%)</b>	3375	8679	2,57
<b>BLHF (10%)</b>	3375	8546	2,53
<b>BLHF (15%)</b>	3375	8530	2,52
<b>BLHF (20%)</b>	3375	8485	2,51

<b>Les valeurs des masses volumiques de 21jours</b>			
<b>Série des Béton</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BT (0%)</b>	3375	8725	2,58
<b>BLHF (5%)</b>	3375	8681	2,57
<b>BLHF (10%)</b>	3375	8550	2,53
<b>BLHF (15%)</b>	3375	8531	2,52
<b>BLHF (20%)</b>	3375	8489	2,51

<b>Les valeurs des masses volumiques de 28jours</b>			
<b>Série des Béton</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BT (0%)</b>	3375	8725	2,58
<b>BLHF (5%)</b>	3375	8684	2,57
<b>BLHF (10%)</b>	3375	8550	2,53
<b>BLHF (15%)</b>	3375	8531	2,52
<b>BLHF (20%)</b>	3375	8490	2,51

✓ **Affaissement**

<b>Série des bétons</b>	<b>Coefficient d'affaissement (Cm)</b>	<b>Consistance</b>
<b>BT (0%)</b>	7	Plastique
<b>BLHF (5%)</b>	10	Très plastique
<b>BLHF (10%)</b>	10	Très plastique
<b>BLHF (15%)</b>	11	Très plastique
<b>BLHF (20%)</b>	12	Très plastique

✓ **Pourcentage d'air occlus dans le béton**

<b>Série des bétons</b>	<b>Pourcentage d'air occlus dans le béton (%)</b>
<b>BT (0%)</b>	1,8
<b>BLHF (5%)</b>	1,5
<b>BLHF (10%)</b>	1,2
<b>BLHF (15%)</b>	1,2
<b>BLHF (20%)</b>	1,2

✓ **La résistance à la compression**

<b>Série des bétons</b>	<b>Rc à 28jours (Mpa)</b>	<b>Rc moyenne (Mpa)</b>
<b>BT (0%)</b>	66,7	62,8
	63,1	
	58,7	
<b>BLHF (5%)</b>	59,1	57,5
	54,2	
	59,1	
<b>BLHF (10%)</b>	47,6	47,4
	47,6	
	47,1	
<b>BLHF (15%)</b>	48	47,1
	47,6	
	45,8	
<b>BLHF (20%)</b>	44,4	47
	46,7	
	49,8	

## Annexe B

### (Les bétons avec activateurs)

✓ Les valeurs des masses volumiques

Les valeurs des masses volumiques de 0 jour					
Série des bétons	V (Cm <sup>3</sup> )	M moule (g)	M t (g)	Mt -M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm <sup>3</sup> )
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	5000	5775	18396	12621	2,52
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	5000	5775	18320	12545	2,5
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	5000	5775	18250	12475	2,49
<b>BLHF +NaOH</b>	5000	5775	18295	12520	2,5
<b>BLHF +CaO</b>	5000	5775	18370	12595	2,51

Les valeurs des masses volumiques de 1 jour			
Série des bétons	V (Cm <sup>3</sup> )	M (g)	$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm <sup>3</sup> )
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	3375	8475	2,51
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	3375	8435	2,49
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	3375	8370	2,48
<b>BLHF + NaOH</b>	3375	8415	2,49
<b>BLHF +CaO</b>	3375	8440	2,50

<b>Les valeurs des masses volumiques de 3 jours</b>			
<b>Série des bétons</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	3375	8672	2,56
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	3375	8670	2,56
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	3375	8632	2,55
<b>BLHF+NaOH</b>	3375	8627	2,55
<b>BLHF+CaO</b>	3375	8697	2,57

<b>Les valeurs des masses volumiques de 7 jours</b>			
<b>Série des bétons</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	3375	8685	2,57
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	3375	8684	2,57
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	3375	8640	2,56
<b>BLHF+NaOH</b>	3375	8647	2,56
<b>BLHF+CaO</b>	3375	8713	2,58

<b>Les valeurs des masses volumiques de 14 jours</b>			
<b>Série des bétons</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M moule (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	3375	8692	2,57
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	3375	8687	2,57
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	3375	8643	2,56
<b>BLHF+NaOH</b>	3375	8652	2,56
<b>BLHF+CaO</b>	3375	8716	2,58

<b>Les valeurs des masses volumiques de 21 jours</b>			
<b>Série des bétons</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M moule (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	3375	8697	2,57
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	3375	8690	2,57
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	3375	8647	2,56
<b>BLHF + NaOH</b>	3375	8655	2,56
<b>BLHF +CaO</b>	3375	8721	2 ,58

<b>Les valeurs des masses volumiques de 28 jours</b>			
<b>Série des bétons</b>	<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M moule (g)</b>	<b><math>\rho = \frac{M}{V}</math> (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	3375	8700	2,57
<b>BLHF+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	3375	8690	2,57
<b>BLHF+CaSO<sub>4</sub></b>	3375	8648	2,56
<b>BLHF + NaOH</b>	3375	8657	2,56
<b>BLHF +CaO</b>	3375	8724	2,58

✓ **Affaissement**

<b>Série des bétons</b>	<b>Coefficient d'affaissement (Cm)</b>	<b>Consistance</b>
<b>BLHF +Ca(OH)<sub>2</sub></b>	10	Très Plastique
<b>BLHF +Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	10	Très plastique
<b>BLHF +CaSO<sub>4</sub></b>	8	Plastique
<b>BLHF +NaOH</b>	7	Plastique
<b>BLHF +CaO</b>	8	Plastique

✓ Les valeurs de la température et le PH

Activateurs	PH	Température (C°)
<b>BLHF +Ca(OH)<sub>2</sub></b>	12	28
<b>BLHF +Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	12	27,7
<b>BLHF +CaSO<sub>4</sub></b>	12	28,8
<b>BLHF +NaOH</b>	13	27,9
<b>BLHF +CaO</b>	12	29,8

✓ Pourcentage d'air occlus dans le béton

Série des bétons	Pourcentage d'air occlus dans le béton (%)
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	1,2
<b>BLHF + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	1,2
<b>BLHF +CaSO<sub>4</sub></b>	1,2
<b>BLHF + NaOH</b>	1,2
<b>BLHF +CaO</b>	1,2

✓ **La résistance à la compression**

<b>Série des bétons</b>	<b>Rc à 28jours (Mpa)</b>	<b>Rc moyenne (Mpa)</b>
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	54,2	60,43
	60,9	
	66,2	
<b>BLHF+ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	44,44	44,15
	44	
	44	
<b>BLHF+ CaSO<sub>4</sub></b>	53,3	53,17
	53,3	
	52,9	
<b>BLHF+ NaOH</b>	54,2	55,1
	55,1	
	56	
<b>BLHF+ CaO</b>	64,9	63,41
	64	
	61,33	

## Annexe C

(Les fiches techniques)

✓ Fiche technique du ciment



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر  
GROUPE 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 الاجتماعي :  
N° Identification fiscale : 0998 19008236319 / N° Article d'imposition : 1902.20.10.011 / N° Registre de commerce : 98 B 0082363

---

N/ Réf. 008 /SCE.C.Q/DPQE/SCAEEK/22 Ain El Kebira le : 06/01/2022

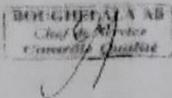
**FICHE TECHNIQUE CIMENT « ligne 1 »** **MOIS : Novembre 2021**

**CEM I 42.5 N-LH/SR5**

Conformément a la norme NA 442 édition 2013

COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 196-2)			Essais physiques Norme (EN 196-3 et 6)		Garantie NA 442	Mesures
ELEMENTS		Mesures	P.S	(g / Cm <sup>3</sup> )		
SiO <sub>2</sub> -T	%	20.67	SSB	cm <sup>2</sup> /g		3.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4.49	Temps De Prise Min	Début	≥ 60	3419
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5.52		Fin		192
CaO-T	%	63.79	Expansion mm	A. Chaud	≤ 10	284
MgO	%	1.31				0.56
SO <sub>3</sub>	≤ 3 %	2.18	Refus %	45 μ		22.67
K <sub>2</sub> O	%	0.33	Consistance Normale	%		23.65
Na <sub>2</sub> O	%	0.14	<b>S.C.A.E.K</b>			
Cl	≤ 0,1%	0.001				
P.A.F.	%	0.77				
CaO Libre (PT207 CERILH 1970)	%	0.56				
R.Insoluble	%	0.90				
COMPOSITION POTENTIELLE DU CIMENT (BOGUE)			CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (196-1)			
C <sub>3</sub> S	%	63.33	R. Flexion MPa	02 JOURS		4.4
C <sub>2</sub> S	%	8.92		28 JOURS		8.0
C <sub>3</sub> A	%	3.01	R. Compression MPa	02 JOURS	≥ 10	19.5
C <sub>4</sub> AF	%	15.96		28 JOURS	≥ 42.5	48.9

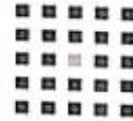
**Chief Service Contrôle Qualité :**



## ✓ Fiche technique de l'adjuvant

Fiche technique

# CHRYSO® Fluid Optima 208 A Superplastifiant haut Réducteur d'eau



CHRYSO

CHRYSO® Fluid Optima 208 A est un Superplastifiant haut réducteur d'eau de dernière génération. Cet adjuvant fait appel à nos avancées les plus récentes dans la synthèse des molécules afin d'apporter :

- une large plage de dosage,
- un fort potentiel de réduction d'eau,
- du maintien d'ouvrabilité,
- une cohésion du béton.

CHRYSO® Fluid Optima 208 A est particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi. Cet adjuvant peut également être utilisé en combinaison avec d'autres produits de la gamme CHRYSO®.

### Informations Indicatives

- \* Nature : liquide
- \* Couleur : Brun
- \* Densité (20° C) :  $1.070 \pm 0.020$
- \* pH :  $5.20 \pm 2.00$
- \* Extrait sec (halogène) :  $25.10 \% \pm 1.50 \%$
- \* Extrait sec (EN 480-8) :  $25.10 \% \pm 1.50 \%$
- \* Durée de vie : 18 mois

### Informations normatives et réglementaires

- \* Ce produit satisfait aux exigences de la norme NF EN 934-2 « ADJUVANTS DU BETON ».

### Domaines d'application

- \* Tous types de ciments
- \* BHP et BTHP
- \* Bétons plastiques, très plastiques, fluides
- \* Bétons pour ouvrages très ferraiillés
- \* Bétons précontraints
- \* Dallages, sols industriels
- \* Coulis d'injection

### Précautions

Stocker à l'abri du gel.

Eviter l'exposition prolongée à de fortes chaleurs. En cas de gel, ce produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation efficace est nécessaire jusqu'à l'obtention d'un produit totalement homogène.

### Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,3 à 3,0 kg pour 100 kg de ciment.

Il est courant de doser ce produit à 1 % du poids du ciment.

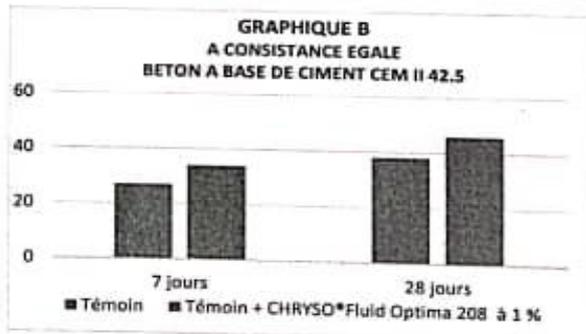
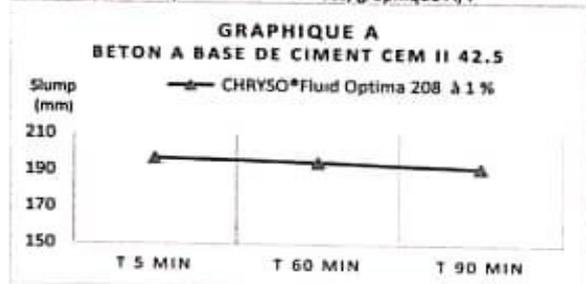
Ce produit doit être incorporé de préférence dans l'eau de gâchage ou en fin de malaxage.

Dans le cas d'un ajout différé sur béton frais, dans un camion toupie, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse puis à vitesse lente (avec un minimum de 3 minutes, pour chaque régime).

L'efficacité maximale de ce produit doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées pour le béton.

### Essais

Ces résultats ont été obtenus selon les modalités définies par la norme EN12358 (essais de consistance, graphique B) et la norme EN 12390-3 (essais de résistances, graphique A) :



### Sécurité

Ce produit est classé « sans danger ». En cas d'exposition, le port d'équipements de protection individuelle est recommandé. Avant toute utilisation, consulter la fiche de données de sécurité [sur le site internet [www.chryso.dz](http://www.chryso.dz)].

Les informations contenues dans la présente fiche technique sont l'expression de nos connaissances et de résultats d'essais effectués dans un état constant d'actualité. Elles ne peuvent cependant, en aucun cas, être considérées comme apportant une garantie ni comme engageant notre responsabilité en cas d'application défectueuse ou d'utilisation de nos produits en dehors des applications du paragraphe « Application » de la fiche technique. Des essais préliminaires à chaque utilisation doivent être effectués par les utilisateurs et permettre ainsi de vérifier que les modes d'emploi et les conditions d'application demeurent satisfaisants. Notre assistance technique se tient à la disposition des utilisateurs. Consulter le version la plus récente de la fiche technique, disponible sur [www.chryso.dz](http://www.chryso.dz).

SPA CHRYSO HYDRICO - Lot N°18 Zone Industrielle Oued Smar - 16270 Alger - ALGERIE  
Tel : +213 (0)23 93 03 00 - Fax : +213 (0)23 93 01 78 - email : [chryso.algeria@chryso.com](mailto:chryso.algeria@chryso.com)

Page 1/1



22/10/2017

## Annexe D

### ✓ 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

**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.

**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.

✓ Valeurs du coefficient de compacité  $\gamma$

Consistance	Serrage	Coefficient $\gamma$ 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 E

### (Résistances à long terme)

✓ **Résistance des bétons sans activation du LHF à long terme**

Série des bétons	Age (jour)	Rc (Mpa)
<b>BT (0%)</b>	90	66,7
<b>BLHF (5%)</b>	90	60,7
<b>BLHF (10%)</b>	90	49,8
<b>BLHF (15%)</b>	90	56,7
<b>BLHF (20%)</b>	90	51,7

✓ **Résistance des bétons avec activation du LHF à long terme**

Série des bétons	Age (jour)	Rc (Mpa)
<b>BLHF+Ca(OH)<sub>2</sub></b>	90	62,2
<b>BLHF+ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	90	53,7
<b>BLHF+ CaSO<sub>4</sub></b>	90	54,7
<b>BLHF+NaOH</b>	90	50,7
<b>BLHF+CaO</b>	90	69,2

## Annexe F

### (Laitier de haut fourneau EL HADJAR ANNABA)

✓ Composition minéralogique du laitier :

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

Caractéristiques du laitier de haut fourneau	
Masse volumique réelle(g/cm <sup>3</sup> )	2.89
Masse volumique En vrac (g/cm <sup>3</sup> )	0.87
Surface spécifique Blaine(cm <sup>2</sup> /g)	5300
Indice de basicité CaO/SiO <sub>2</sub>	1.4

#### Référence

Thèse de DOCTOCAT en sciences, par LAAKRI Meriem, option : construction, sous le thème : Influence des ajouts locaux sur les propriétés physico-chimique et mécanique de la pâte cimentaire. Université Houari Boumediene ALGER. Le 17/02/2020