

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –

Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريش »

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم علوم المادة



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Chimie
Option : Chimie des matériaux

Etude des caractéristiques d'un béton cellulaire à base de sable mixte

Préparé par :

MIDOUCHE YASMINA

BOUAISSI MERIEM

Soutenu le : 03/07/2017 Devant le jury composé de :

Président : HALATI .Abdelhak

Université BBA

Encadreur : BOUZID A .Razak

Université BBA

Co- encadreur : NOUI Ammar

Université BBA

Examineur : Belagraa Larbi

Université BBA

Examineur : Logzit Nacer

Université BBA

Année Universitaire : 2016 /2017

Résumé

Le béton cellulaire est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans les nations développées, il fait partie de leur traditions de construire. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Ce matériau permet d'envelopper des ouvrages de toute nature, notamment, des bâtiments, des immeubles administratifs, industrielles...etc. C'est pour cette raison que nous avons choisis de s'investir dans cet axes de recherche pour une tentative d'amélioration des caractéristiques thermiques et mécaniques par l'introduction des ajouts minéraux (le laitier des hauts fourneaux) par substitution du sable pour améliorer le degré d'hydratation des liants utilisée et par la suite une amélioration des caractéristiques mécaniques (Rc), le deuxième paramètre variable c'est le type de sable ou nous avons opté d'utilisée un sable mixte de deux natures et granulométries différents, sable d'origine Oued Souf et l'autre concassé provenant d'une carrier de la région de Bordj Bou Arreridj cette technique vise l'amélioration des deux aspects thermique (une bonne distribution cellulaires) et mécanique (bonne réponse mécanique), servants pour la confection d'une série de béton cellulaire à étudier.

Au cours de notre travaille expérimentale nous avons préparé un ensemble de mélanges de sables mixte avec et sans ajouts (laitier de haut fourneaux) par substitution du sable avec un taux fixe de 15% en présence de la chaux commerciale, et avec un taux de laitier variable 50,75 et 100% en présence de chaux issu de la fabrication d'acétylène.

Cette étude a permis de mettre en œuvre des éco-matériaux tel que les deux types de sables utilisée, le laitier des hauts fourneaux, la chaux issu de la production de l'acétylène ainsi le déchet de la poudre d'aluminium produisons un béton cellulaire environnementale qui a une conductivité thermique comparable à celle du béton cellulaire produit par voie industriel et a base des matériaux plus chère. Elles apporteront alors des performances thermique et mécanique acceptable avec prix de revient minimale.

Mots-clés: ajouts, chaux, sable, substitution, béton cellulaire environnementale, comportement mécanique, conductivité thermique.

Abstract

Cellular concrete is one of the most widely used building materials in developed nations; it is part of their building traditions. It has earned its place by these performances, its flexibility of use as well as by the diversity it allows in shapes, colors and aspects. This material can be used to enclose structures of any kind, including buildings, administrative buildings, industrial buildings, etc. It is for this reason that we have chosen to invest in this research axis for an attempt to improve the thermal and mechanical characteristics by introducing mineral additions (blast furnace slag) by substituting sand for improving The degree of hydration of the binders used and then an improvement in the mechanical characteristics (R_c), the second variable parameter is the type of sand or we opted to use a mixed sand of two different natures and grain sizes, sand Of Oued Souf origin and the other crushed from a quarryman in the region of Bordj Bou Arreridj this technique aims at the improvement of the two thermal aspects (a good cellular distribution) and mechanical (good mechanical response), servants for the manufacture Of a series of cellular concrete to be studied.

In the course of our experimental work, we prepared a set of mixed sand mixtures with and without additives (blast furnace slag) by substituting sand with a fixed rate of 15% in the presence of commercial lime and with a slag rate Variable 50.75 and 100% in the presence of lime from the manufacture of acetylene.

This study made it possible to use eco-materials such as the two types of sands used, blast furnace slag, lime from acetylene production and aluminum powder waste produce cellular concrete which has a thermal conductivity comparable to that of industrial-produced cellular concrete and based on more expensive materials. They will then provide acceptable thermal and mechanical performance with minimal cost price.

Keywords: additions, lime, sand, substitution, environmental cellular concrete, mechanical behavior, thermal conductivity.

Table des matieres

PAGE	
RESUME	
REMERCIEMENT	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES PHOTOS	
NOMENCLATURE	
INTRODUCTION GENERALE	

PARTIE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON CELLULAIRE

I. Introduction	1
I.1. Le béton	1
I.1.1. Constituants du béton.....	1
I.1.1.a. Granulats.....	1
I.1.2. Les différents types du béton.....	2
I.1.2. A. Les Bétons Prêts à l'Emploi.....	2
I.1.2.B. Le béton armé.....	3
I.1.2.C. Le béton de ciment alumineux (ou béton fondu).....	3
I.1.2.D. Les bétons caverneux, drainant et poreux.....	3
I.1.3. Propriétés des bétons.....	3
I.1.3.1.Ouvrabilité	3
I.1.3.2 Retrait.....	4
I.1.3.3. Résistance mécanique.....	4
I.1.3.4. Fluage.....	4
I.2. Les bétons légers	4
I.2.1. Définition.....	4
I.2.2. Classification des bétons légers.....	5

I.2.3. Propriétés des bétons légers.....	7
I.2.3.1.Légèreté.....	7
I.2.3.2.Comportement et performances mécaniques	8
I.2.3.3. L'absorption.....	10
I.2.3.4. La sorption/ désorption.....	11
I.2.3.5.Durabilité.....	11
I.2.3.6. Propriétés thermiques.....	12
I.3. Le béton cellulaire.....	13
I.3.1. Introduction.....	13
I.3.2. Historique	14
I.3.3. Définition.....	14
I.3.4. Matière premier.....	15
I.3.4.1. Le sable.....	16
I.3.4.1.1. Introduction.....	16
I.3.4.1.2.Les sable de dunes.....	16
I.3.4.1.2.a. Identification des sables de dunes du Sahara.....	17
I.3.4.1.2.b. Utilisation du sable de dunes.....	17
a) Utilisation du sable de dunes dans le béton.....	17
I.3.4.2. Ciment.....	18
I.3.4.2.1.préhistorique	18
I.3.4.2.2. Définition.....	18
I.3.4.2.3. Composition et caractéristiques du ciment.....	18
I.3.4.2.3.a. Le clinker.....	18
I.3.4.2.3.b. Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	19
I.3.4.2.3.c. Ajouts cimentaires	19
I.3.4.2.5. Les classifications de ciment.....	20
I.3.4.2.6. Domaine d'utilisation des différents ciments.....	21
I.3.4.3. L'eau.....	21
I.3.5. Fabrication du béton cellulaire.....	21
I.3.6.Classification du béton cellulaire.....	23
I.3.7.Propriétés du béton cellulaire.....	24
I.3.7.1.La structure.....	24
I.3.7.2.La densité.....	25
I.3.7.3. Légèreté.....	26

I.3.7.4. Résistance à la compression	26
I.3.7.5. La résistance à la traction	27
I.3.7.6. Résistance aux agents chimiques.....	27
I.3.7.7. Résistance au gel et dégel.....	27
I.3.7.8. Le retrait au durcissement.....	28
I.3.7.9. Absorption d'eau et capillarité du béton cellulaire.....	28
I.3.7.10. Propriété thermique.....	29
I.3.7.11. Résistance au feu.....	30
I.3.7.12. Affaiblissement acoustique	31
I.3.8. Gamme de produits.....	31
I.3.8.1. les produits non arme	31
I.3.8.1.a. Les blocs.....	31
I.3.8.1.b. Les carreaux.....	31
I.3.8.1.c. Les linteaux	31
I.3.8.2. Elément arme.....	32
I.3.8.2.a. Dalles de bardage	32
I.3.8.2.b. Dalles de toiture.....	32
I.3.8.2.c. Dalles de plancher.....	32
I.3.9. Les avantages de béton cellulaire.....	32

CHAPITRE II : GENERALITE SUR LES MATIERS PREMIERS UTILISENTS

II. Les matières premières utilisées.....	33
II.1. Les ajouts minéraux	33
II.1.1. Introduction	33
II.1.1.2. Classification des ajouts minéraux.....	33
II.1.1.2.1. Les principaux ajouts minéraux actifs.....	34
II.1.1.2.1. A. Le laitier de haut fourneau.....	34
II.1.1.2.1. A.1. Obtention du laitier granulé.....	34
II.2.1.A.2. Les caractéristique de laitier de haut fourneau.....	35
II.1.1.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes.....	36
II.1.1.2.2.1 Fillers de calcaires.....	37
II.1.1.2.2.1.1. L'effet filler.....	38
II.1.1.2.2.1.2. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....	38
II.1.1.2.2.1.3. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....	39

II.2. La chaux	39
II.2.1.historique	39
II.2.2. Définitions.....	40
II.2.3. Structures cristallines.....	41
II.2.4. les différents types de chaux.....	41
II.2.4.1. La chaux vive.....	42
II.2.4.2. Les chaux aérienne	42
II.2.4.3. Les chaux hydraulique naturelle	42
II.2.4.4. Les chaux avec liants recomposé	43
II.2.4.5. Chaux grise ou chaux artificielle.....	43
II.2.5.Fabrication de la chaux.....	43
II.2.5.1. La préparation du calcaire.....	43
II.2.5.2. La cuisson	44
II.2.6. Les propriétés de la chaux aériennes.....	44
II.2.6.1. Propriétés physico-chimiques.....	44
II.2.6.2. Réactivité à l'eau et extinction de la chaux vive.....	44
II.2.6.3. Solubilité et pH.....	45
II.2.6.4. Floculation, réactions pouzzolaniques	45
II.2.7. Les applications de la chaux dans la protection de l'environnement.....	45
II.2.7.1. Origine et description de la chaux éteinte (le déchet industriel).....	46
II.2.7.1.1. Récupération de l'eau du lait de chaux.....	47
II.2.7.2. Analyse environnementale de la chaux.....	48
II.2.7.3. Utilisation de la chaux éteinte pour l'environnement.....	49
II.2.7.3.1. Un liant pour bâtir et pour restaurer	50
II.2.7.3.2. En agriculture.....	50
II.2.7.3.3. Dans la sidérurgie et le traitement des métaux non ferreux.....	51
II.2.7.3.4 En chimie et dans le traitement des eaux.....	51
II.2.7.3.5. Traitement des fumées.....	52
II.2.7.3.6. Traitement des déchets ménagers et industriels	52
II.3. Conclusion	52

CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS

III.1 Introduction.....	53
III.1.2. Caractérisation des matières premières	53
III.1.2. 1. Le sable mixte	53
III.1.2.1.A. le sable de dune (d'oued souf).....	53
III.1.2.1.A.1 L'analyse granulométrie par tamisage [NA EN933-1].....	53
III.1.2.1.A.2. Le module de finesse	54
III.1.2.1.A.3. Analyse granulométrie laser de sable.....	56
III.1.2.1.A.4. L'équivalent de sable	57
III.1.2.1.A.5. La masse volumique	58
III.1.2.1.A.5.a. La masse volumique apparente (γ)	58
III.1.2.1.A.5 .b. La masse volumique absolue (ρ).....	59
III.1.2.1.B. Sable concassé.....	60
III.1.2.1.B.1. Analyse granulométrie de sable concassé.....	60
III.1.2.1.B.2. La Masse volumique.....	61
III.1.2.1.B.2.a. Masse volumique apparente	61
III.1.2.1.B.2.b. Masse volumique absolue	61
III.1.2.1.C. Le sable mixte (sable d'oued souf + sable concassé).....	62
III.1.2.1.C.1. Analyse granulométrique de sable mixte.....	62
III.1.2.1.C.2. Equivalente de sable mixte.....	63
III.1.2.2. Ciment	63
III.1.2.2.1 Les caractéristiques techniques.....	63
III.1.2.2.2.La masse volumique de ciment SARIE	64
III.1.2.2.2.a. La masse volumique apparente.....	64
III.1.2.2.2.b. Masse volumique absolue.....	64
III.1.2.2.3.Analyse granulométrie laser de ciment utilisé.....	64
III.1.2.3. La poudre d'aluminium.....	66
III.1.2.3.1. Fiche technique.....	66
III.1.2.3.2. Analyse granulométrie laser de poudre d'alumine utilisé.....	66
III.1.2.3.3. La masse volumique.....	67
III.1.2.3.3.a. Masse volumique apparente.....	67
III.1.2.3.3.b. Masse volumique absolue.....	68
III.1.2.4. La chaux.....	68
III.1.2.4.1. Fiche technique de la chaux éteinte commerciale	68

III.1.2.4.2. Masse volumique de la chaux déchet.....	69
III.1.2.4.2.a. Masse volumique apparente.....	69
III.1.2.4.2.b. Masse volumique absolue.....	69
III.1.2.4.3. Analyse granulométrie laser de la chaux déchet.....	69
III.1.2.4.4. Analyse granulométrie laser de la chaux commerciale.....	70
III.1.2.5. Le laitier de haut fourneau	71
III.1.2.5.1. Analyse granulométrie laser de laitier de haut fourneau.....	71
III.1.2.5.2. Masse volumique de laitier utilisé.....	72
III.1.2.5.2.a. La masse volumique apparente	72
III.1.2.5.2.b. Masse volumique absolue	73
III.1.2.5.3. La composition chimique de laitier de haut fourneau.....	73
III.1.2.6. Eau de gâchage.....	73
III.1.3. Elaboration de béton cellulaire	74
III.1.3.1 Les Différents types de bétons seront élaborés	74
III.1.3.1 Malaxage du béton.....	77
III.1.3.2. Conservation des éprouvettes.....	78
III.1.4. Les essais sur les prouvettes élaboré.....	78
III.1.4.1. Résistance à la compression	78
III.1.4.2. Mesure de la conductivité thermique	79
III.1.4.2.1. But et méthode de mesure	79

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. La Masse volumique.....	81
IV.1.1. Groupe I (chaux commerciale).....	81
IV.1.2. Groupe II (chaux déchet).....	82
IV.1.3. Group III (chaux déchet).....	83
IV.1.4. Group IV (chaux déchet).....	84
IV.1.5 .Group V (chaux déchet).....	85
IV. 2. La résistance à la compression.....	86
IV.2.1. Groupe I (chaux commerciale).....	86
IV.2.2. Groupe II (chaux déchet).....	87
IV.2.3. Groupe III (chaux déchet).....	88
IV.2.4. Groupe IV (chaux déchet).....	89

IV.2.5. Groupe V (chaux déchet).....	90
IV.2.6. Groupe VI (chaux déchet).....	91
IV.2.7. Comparaisant de la résistance à la compression de béton de sable mixte et Le béton de sable fin.....	92
IV.3. La conductivité thermique.....	94
IV.3.1. Groupe I (chaux commerciale).....	94
IV.3.2. Groupe II (chaux déchet).....	95
IV.3.3. Groupe III (chaux déchet).....	96
IV.3.4. Groupe IV (chaux déchet).....	97
IV.3.5. Groupe V (chaux déchet).....	98
IV.3.6. Groupe VI (chaux déchet).....	99
IV.3.7. comparaisant de La conductivité thermique λ de béton de sable mixte et Le béton de sable fin.....	100
IV. 4. La chaleur spécifique	103
IV.4.1. Groupe I (la chaux commerciale).....	103
IV.4.2. Groupe II (chaux déchet).....	104
IV.4.3. Groupe III (chaux déchet)	105
IV.4.4. Groupe IV (chaux déchet).....	106
IV.4.5. Groupe V (chaux déchet).....	107
IV.4.6. Groupe VI (chaux déchet).....	108
IV.4.7. comparaisant de La chaleur spécifique de béton de sable mixte et le béton de sable fin.....	109

CONCLUSITON GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des tableaux

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON CELLULAIRE

Tableau I.1 : Dimensions et caractéristiques des familles de granulats Plus de 70 % en poids béton est constitué de granulats.....	2
Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon la masse volumique	7
Tableau I.3 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction.....	8
Tableau I.4 : les caractéristiques des bétons légers.....	11
Tableau I.5. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux.....	14
Tableau I.6: Composants du clinker.....	20
Tableau I.7 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.....	22
Tableaux I.8 : l'utilisation des différents types de ciment.....	22
Tableau I.9 : Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression.....	25
Tableau I.10 : la Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité.....	28

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MATIERS PREMIERS UTILISES

Tableau II.1 : Classification des ajouts selon leur réactivité.....	34
Tableau II.2 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.....	37
Tableau II.3 : Analyse environnementale de la chaux éteinte.....	50

CHAPITRE. III : ELABORATION DES CARACTERISATION DES BETONS

Tableau III .1 : Modules de finesse du sable	54
Tableau III.2 : analyse granulométries de sable d'oued souf.....	55
Tableau III.3 : Résultats d'essai d'équivalent de sable d'oued souf testé.....	58

Tableau III.4 : Masse volumique apparente du sable d'oued souf.....	59
Tableau III.5 : Masse volumique absolue du sable d'oued souf.....	59
Tableau III.6 : Analyse granulométrique du sable concassé.....	60
Tableau III.7 : la masse volumique apparente de sable concassé.....	61
Tableau III.8 : la masse volumique absolue de sable concassé.....	61
Tableau III.9 : analyse granulométrie de sable mixte	62
Tableau III.10 : les résultats de l'équivalente de sable mixte.....	63
Tableau III .11 : Masse volumique apparente du ciment CPJ SARIE.....	64
Tableau III .12 : L'analyse chimique de la poudre fine aluminium.....	66
Tableau III.13 : Masse volumique apparente de la poudre d'alumine.....	67
Tableau III.14 : les résultats de la masse volumique apparente de la chaux déchet.....	69
Tableau III.15 : Les resultate de la masse volumique apparente de laitier.....	72
Tableau III.16 : les compositions chimiques de laitier.....	72
Tableau III.17 : Analyse physico-chimique de l'eau utilisé.....	73
Tableau III .18 : Le pourcentage massique des constitues des bétons cellulaires formués...73	
Tableau III.19 : les constitutions et les type de béton élaboré dans le premier groupe.....	74
Tableau III.20 : les types des bétons élaborés suivant les pourcentages de sable et de laitier.75	

CHAPITRE IV : RESULTAT ET DISCUSSION

Tableau IV.1 : Les groupes des bétons élaborés.....	80
Tableau IV.2 : la Masse volumique pour le groupe I (chaux commerciale).....	81
Tableau IV.3 : La masse volumique pour le groupe II (chaux déchet).....	82
Tableau IV.4 : la masse volumique pour le groupe III.....	83
Tableau IV.5 . Masse volumique pour le groupe IV (chaux déchet).....	84
Tableau IV.6 . La masse volumique pour le groupe béton V (chaux déchet).....	85
Tableau IV.7 . La résistance à la compression pour le groupe I (chaux commerciale).....	86
Tableau IV.8 . La résistance à la compression pour le groupe II (chaux déchet).....	87
Tableau IV.9 . La résistance à la compression pour le groupe III (chaux déchet).....	88
Tableau IV.10 . La résistance à la compression pour le groupe IV (chaux déchet).....	89
Tableau IV.11 . La résistance à la compression pour le groupe V (chaux déchet).....	90
Tableau IV.12 : La résistance à la compression pour le groupe VI (chaux déchet).....	91
Tableau IV.13 : Les valeurs de la résistance à la compression de béton de sable mixte et le béton de sable fin.....	92

Tableau IV.14. La conductivité thermique pour le groupe I (chaux commerciale).....	94
Tableau IV.15. La conductivité thermique pour le groupe II (chaux déchet).....	95
Tableau IV.16. La conductivité thermique pour le groupe III (chaux déchet).....	96
Tableau IV.17. La conductivité thermique de groupe IV (chaux déchet).....	97
Tableau IV.18. La conductivité thermique pour le groupe V (chaux déchet).....	98
Tableau IV.19. La conductivité thermique pour le groupe VI (par la chaux déchet).....	99
Tableau IV.20. Les valeurs de la conductivité thermique de béton de sable mixte et le béton de sable fin.....	100
Tableau IV.21. La chaleur spécifique pour le groupe I (la chaux commerciale).....	103
Tableau IV.22. La conductivité thermique pour le groupe II (par la chaux déchet).....	104
Tableau IV.23. La Chaleur spécifique pour le groupe III (chaux déchet).....	105
Tableau IV.24. La Chaleur spécifique pour le groupe IV (chaux déchet).....	106
Tableau IV.25. La Chaleur spécifique pour le groupe V (chaux déchet).....	107
Tableau IV.26. La Chaleur spécifique pour le groupe VI (chaux déchet).....	108
Tableau IV.27. Les valeurs de la chaleur spécifique de béton de sable mixte et le béton de sable fin.....	109
Tableau IV. 29 : Les valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.....	111
Tableau IV. 30 : les valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.....	112
Tableau IV. 31: les valeurs de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique.....	113

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON CELLULAIRE

Figure I.1 : Camion toupie alimentant une pompe à béton.....	2
Figure I.2 : classification du béton léger.....	5
Figure I. 3 : Classification des bétons légers.....	6
Figure I.4 : Structure des bétons légers.....	6
Figure I.5. : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours.....	8
Figure I.6 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique	9
Figure I.7 : Courbes de sorption et désorption du béton cellulaire de $\rho = 500\text{kg/m}^3$ à $T= 20^\circ\text{C}$	11
Figure I.8 : béton cellulaire	15
Figure 1. 9 : les compositions de fabrication du ciment.....	20
Figure I.10 : Structures des bétons cellulaires.....	25
Figure I.11 : Répartition des cellules en fonction de leur diamètre.....	25
Figure I.12 : Légèreté d'un béton cellulaire.....	26
Figure I.20 : Comparaison de retrait dû au séchage pour différents matériaux.....	28
Figure I.21 : Absorption capillaire pour différents matériaux.....	29
Figure I.22 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire.....	29
Figure I.16 : System d'isolation répartie.....	30
Figure I.24 : Température en équilibre quasi-constant.....	30
Figure I.25 : La résistance au feu.....	31
Figure I.19 : les blocs de béton cellulaire.....	31

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MATIERS PREMIERES UTILISENTS

Figure. II .1. : Haute fourneau de laitier 2000c°.....	35
Figure II.2 : Filler calcaire.....	37

Figure II. 3 -Mailles élémentaires des principaux carbonates, oxydes et hydroxydes de Ca et de Mg41

Figure II.4 : Schéma de principe de récupération de l'eau de chaux.....48

CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS

Figure III.1 : courbe granulométrie de sable **d'oued souf**.....56

Figure. III. 2 : Courbe granulométrie laser d'un Sable (**Distribution multi modale ou hétérogène**).....57

Figure III .3 : Essai d'équivalent de sable visuel et par piston.....58

Figure III.4 : Courbe granulométrie de sable **concassé**.....62

Figure III.5: Courbe granulométrie de sable de dune.....63

Figure III.6: Courbe granulométrie d'un Ciment (**Distribution multi modale ou hétérogène**).....66

Figure.III.7 : Courbe granulométrie laser d'Alumine (**Distribution mono modale ou homogène**).....68

Figure.III.8 : Courbe granulométrie laser du la Chaux déchet (**Distribution multi modale ou hétérogène**).....71

Figure.III.9 : Courbe granulométrie du la Chaux commerciale (**Distribution multi modale ou hétérogène**).....71

Figure.III.10 : Courbe granulométrie d'un Laitier (**Distribution multi modale ou hétérogène**).....72

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Figure IV .1 : la variation de la masse volumique en fonction de taux de laitier (chaux commerciale) à 100°C.....81

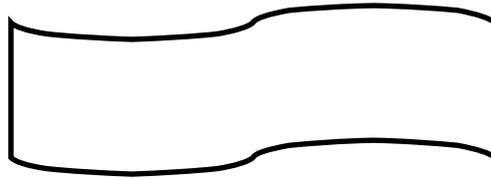
Figure IV.2 : la variation de la masse volumique en fonction de taux de laitier (la chaux déchet).....82

Figure IV.3 : la variation de la masse volumique en fonction du taux de laitier à 100°C...83

Figure IV.4 : la variation de la masse volumique en fonction de taux de laitier avec (chaux déchet).....84

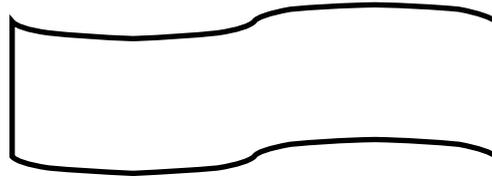
Figure IV.5 : la variation de la masse volumique en fonction de pourcentage de laitier avec la chaux déchet.....	85
Figure IV.6 : La variation de la résistance à la compression en fonction de taux de laitier (chaux commerciale).....	86
Figure IV.7 : La variation de la résistance à la compression en fonction de taux de laitier (chaux déchet).....	87
Figure IV 8 : La variation de la résistance à la compression en fonction de taux de laitier (chaux déchet).....	88
Figure IV 9 : La variation de la résistance à la compression en fonction de type de sable (chaux déchet).....	89
Figure IV.10 : La variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de laitier (chaux déchet).....	90
Figure IV.11 : La variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de laitier (chaux déchet).....	91
Figure IV.12 : La variation de la résistance à la compression en fonction de type de Sable.....	92
Figure IV.13: La variation de la conductivité thermique en fonction du taux de laitier (Chaux commerciale).....	96
Figure IV.14 : La variation de conductivité en fonction de taux de laitier (Chaux déchet).....	96
Figure IV.15 : La variation de conductivité en fonction de taux de laitier et type de sable (chaux Déchet).....	97
Figure IV.16 : La variation de la conductivité thermique en fonction de type de sable (chaux déchet).....	98
Figure IV.17: La variation de la conductivité thermique en fonction de taux de laitier (Chaux déchet).....	99
Figure IV.18 : La variation de la conductivité thermique en fonction de pourcentage de laitier (chaux déchet).....	100
Figure IV.19 : La variation de conductivité thermique en fonction de type de sable et du taux de laitier (chaux déchet).....	101
Figure IV.20 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier (chaux commerciale).....	103

Figure IV.21 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier (chaux déchet).....	104
Figure IV.22 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier (Chaux déchet).....	105
Figure IV.23 : La variation de la chaleur spécifique en fonction de type de sable (15% Laitier) (Chaux déchet).....	106
Figure IV.24 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier (chaux déchet).....	107
Figure IV.25 : La variation de la chaleur spécifique en fonction de taux de laitier (chaux déchet).....	108
Figure IV.26 : La variation de la chaleur spécifique en fonction de type de sable (Chaux déchet).....	109
Figure IV.27 : Corrélation entre la conductivité thermique et la masse Volumique.....	111
Figure IV.28 : Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la compression.....	112
Figure IV. 29 : Corrélation entre la masse volumique et la résistance à la Compression.....	113



CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS

Photos. III.1 : série des tamis.....	55
Photos. III.2 : l'appareil de l'analyse granulométrie laser CILAS (1190).....	57
Photos : III.3 : les deux types de la chaux utilisée	69
Photos : III.4 : élaboration de béton cellulaire	77
Photos III.5 : l'etuve de conservation des éprouvettes	78
photos : III.6 : Machine d'essais de compression automatique de 15 à 250 KN	79
photos : III.7 : les prouvette avant la coupeur.....	80
photos : III.8 : mesure la conductivité thermique des prouvettes par CT METRE.....	80



BT : Béton témoin

BTL : Béton témoin avec 15 % laitier

BSBL : Béton à base de sable fin avec 15% laitier

BTLD : Béton à base de sable mixte avec 50 % laitier

BTLD : Béton à base de sable mixte avec 75% laitier

BL : Béton laitier 100%

BC : Béton à base de sable concassé 0% laitier

BSCL : Béton à base de sable concassé 15% laitier

BCA : Basons sur le mode de cure le béton cellulaire peut être ou -autoclave

BCNA : Basons sur le mode de cure le béton cellulaire peut être non-autoclave

RC : résistance à la compression (MPa)

E/C : (rapport du dosage en eau au dosage en ciment

CaO: oxide de calcium

λ : Conductivité thermique.

ε : la porosité totale

P : Masse spécifique du ciment (g/cm^3).

C : Compacité.

P : Porosité.

G : gravier.

S: sable.

Sd : Sable de dune

MF : module de finesse.

(LGHF) : Laitier granulé de haut fourneau

ρ : La masse volumique absolue

Ca(OH)₂ : hydroxyde de calcium

γ : La masse volumique apparente

Ab : Coefficient d'absorption d'eau du gravillon

LA : Coefficient de Los Angeles

G : Sensibilité au gel

BPE : Bétons Prêts à l'Emploi

C : chaleur spécifique en J/ (kg.K).

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de bien mener ce travail, qu'il soit béni et glorifié

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude, toute notre reconnaissance et tout notre remerciement a :

*Mes encadreurs **Pr :Bouzid** et **Mr : Noui Ammar** pour leur patience, leur disponibilité, pour leur écoute, leur conseils, ainsi que pour leur rigueur scientifique, qu'ils ont su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.*

En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles travailler.

Nous associe à ces remerciements tous Mes enseignants (es) du département de science de la matière et Tous les gens qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail tout spécialement aux être les plus chers à mon cœur, aux deux personnes qui n'ont bien éduqués et mon toujours entouré d'amour et de soutien, mon très cher père (NADIR) et ma mère adorable (Sakhria) la plus cher dans ma vie.

A ma chère marée «djamel»

A mes très chers sœur «Nadjet, Nabila ,Saliha »

A mes très chers frères « Ben Aissa ,Abdallah, Rachid »

et aussi à toute la famille de marée «Abade»

*A mes amis « Yasmine, Saliha , Nadia, Halima, KHadoudje
Imane , »*

*A tous mes collègues de spécialité chimie des matériaux et à tous
mes enseignants.*

MERJEM



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail tout spécialement aux être les plus chers à mon cœur, aux deux personnes qui n'ont bien éduqués et mon toujours entouré d'amour et de soutien, mon très cher père (Guemraoui) et ma mère adorable (Tabib aicha)

A ma chère frère« Lamia. Amale. Afafe »

A mes chères sœurs :

« Oualaid. Adil . Lotfi »et ses filles :

« yousef »Et ses filles

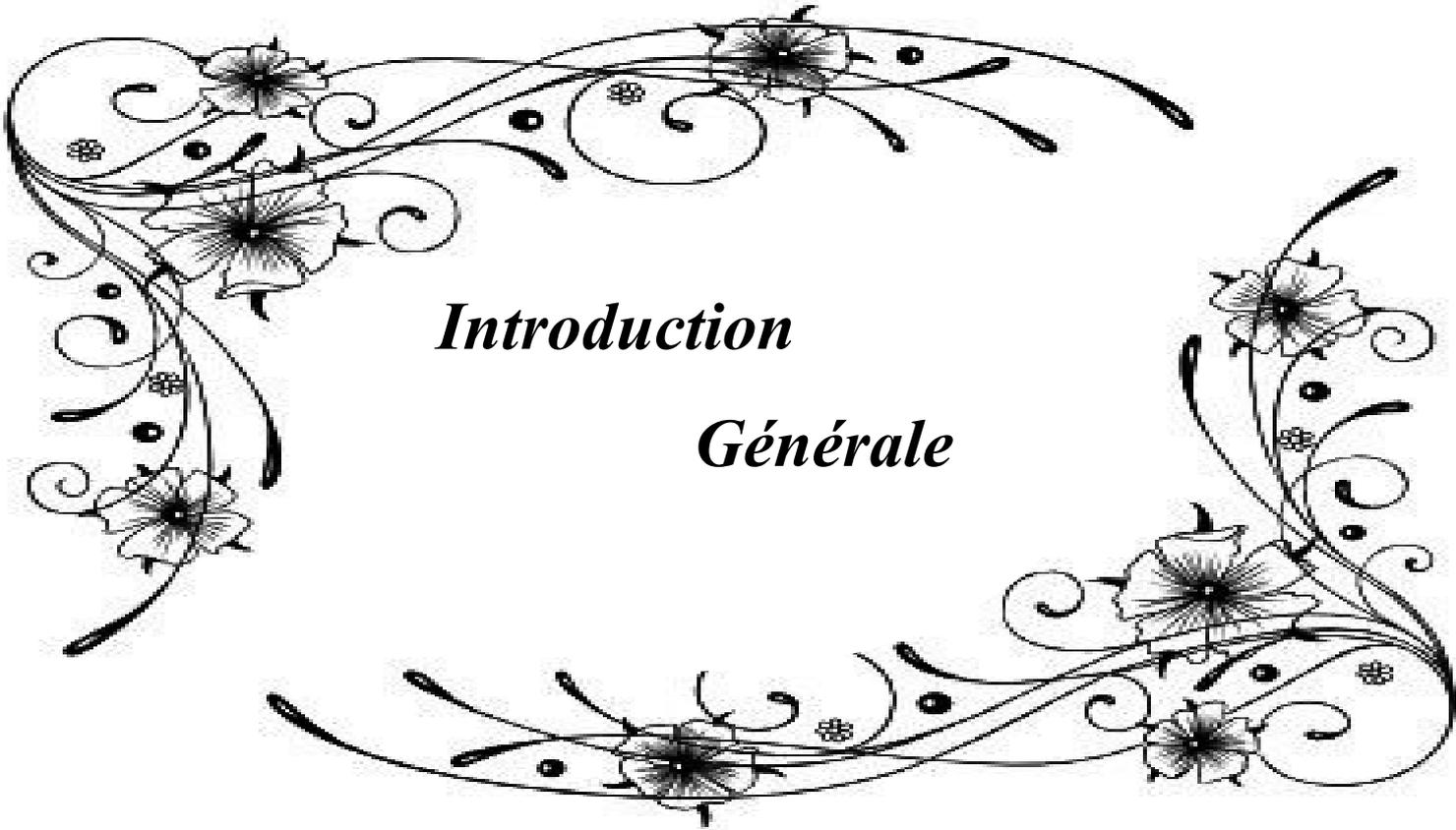
« leaye » Ma petite sœur.

A tous mes collègues « Mariem. Sonia. Nadia. Halima. Ahlame . Sarah. Ilham » Et A tout.

Yasmine



Béton cellulaire

A decorative border composed of black line art. It features elegant, flowing scrollwork and several stylized flowers with five petals and a central dot. The border frames the central text on the left, top, and right sides.

Introduction

Générale

Introduction générale

Le béton est un matériau centenaire. Depuis le début des années 80, la recherche sur le béton connaît une grande évolution. Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde.

Le béton est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction et du bâtiment, malgré sa complexité. Il est fabriqué à partir d'un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes.

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par des ingénieurs. Ses caractéristiques spécifiques, suggèrent de nouvelles applications architecturales.

La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement. Son faible poids, sa résistance et ses autres propriétés le rendent pertinent à utiliser dans des conditions de mise en chantier plus spécifiques.

Les bétons dits légers sont obtenus par fois par incorporation d'air dans le béton lorsque l'air est incorporé dans la pâte de ciment, le béton est qualifié de béton cellulaire.

Le Béton cellulaire est un matériau de construction qui possède des propriétés physiques (Légèreté & solidité, isolation thermo acoustique, ininflammabilité) en font un matériau d'exception. Les techniques de production de béton cellulaire sont maîtrisées depuis plusieurs décennies et l'utilisation de tels bétons pour réaliser l'enveloppe de bâtiments est commune.

La fabrication du béton cellulaire repose sur une synthèse hydrothermale d'un liant de type silicate de calcium obtenu à partir d'un mélange de chaux et de silice. L'aspect alvéolaire est induit par l'ajout de poudre d'aluminium dans le mélange basique,

La tendance actuelle de la recherche de nouveaux matériaux de construction répondant aux exigences technico-économiques tel que le béton cellulaire ainsi la valorisation des matériaux locaux pour la mise au point de ces matériaux performants avec le moindre coût. En effet, l'Algérie est connue par sa nature montagneuse (source de calcaire) au nord et par ses dunes de sable qui occupent plus de 60% de la surface de l'Algérie, à cet égard l'idée de promouvoir l'utilisation du sable de dunes et concasser dans la fabrication des bétons cellulaires dont le but est la valorisation de ressources locales,

s'avère intéressante. D'un point de vue économique, énergétique et environnemental. En effet, l'utilisation de matériaux légers dans la construction, notamment dans les régions du sud algérien permet d'assurer un meilleur confort thermique des locaux et contribue à la diminution de la consommation énergétique des maisons tant en hiver qu'en été. et on oublie L'utilisation de déchets de laitier, poudre d'alumine et de chaux qui sont rejetés aléatoirement et former une menace sur la nature, si dans ce contexte que nous avons opté d'intervenir approfondi ment et d'une manier scientifique utilisent tous ces déchets pour la fabrication d'un autre alternative qu'on peut l'appeler un béton cellulaire environnementale et qui jouer un rôle très importante pour résoudre des problèmes techniques, économique et environnementale.

Objectif de l'étude :

Comme nous venons de le voir à travers cette étude bibliographique, la lutte contre le gaspillage d'énergie dans le secteur de bâtiment passe par la mise en œuvre d'une isolation thermique des parois qui composent l'enveloppe.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons d'étudier l'aspect d'isolation thermique des bâtiments à travers la fabrication d'un nouveau béton cellulaire à base des produits disponible localement et pas chère en combinaison avec des déchets industriel largement disponible en Algérie. Notre recherche est axée sur deux points :

- le premier axe consistera à valoriser des déchets industriels tel que le laitier des hauts fourneaux, la chaux résiduelle et la poudre d'aluminium.
- le deuxième axe consistera en l'amélioration de l'isolation à travers des bétons allégés avec la forte introduction d'air par un procédé chimique, et l'augmentation de la finesse des différents matériaux utilisée.

Structure de mémoire :

Introduction générale

Problématique

Objectif

❖ Chapitre I : Généralité sur le béton cellulaire.

- Les bétons (définition, les types de béton, les propriétés.....)
- Une revue bibliographique sur les bétons légers, (ses caractérisations, leurs classifications...et leurs propriétés)

- Une revue bibliographique sur le béton cellulaire, (définition, fabrication classifications...et leurs applications)
- ❖ **Chapitre II : Généralité sur les matières premières utilisées**
 - (classification, l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civile et
 - Revue bibliographique sur la chaux (définition, les différents type de la chaux, le cycle de la chaux, leurs propriétés et l'utilisation, Les applications de déchets de la chaux dans l'environnement
- ❖ **Chapitre III: élaboration et caractérisation des bétons**
 - Caractérisation des différents matériaux utilisés dans la confection des bétons
 - Etudier expérimentalement les propriétés du béton cellulaire à l'état durci à travers, des essais destructifs (compression), essais thermiques.
- ❖ **Chapitre IV : résultats et analyse**
- ❖ **conclusion générale**
- ❖ **les références bibliographiques.**

Problématique :

Grâce aux propriétés spécifiques du béton cellulaire comme sa légèreté, son isolation thermique et acoustiques qui lui confèrent plusieurs avantages technico-économiques offrent une possibilité d'être un matériau alternatif dans toute l'enveloppe des constructions, son utilisation au niveau local reste modeste c'est pour cette raison, qu'il faut commencer à le prendre en charge dans notre pays l'Algérie pour arriver à réduire la facture énergétique et protéger notre environnement des rejets de déchets tels que la chaux, le laitier des hauts fourneaux et la poudre d'aluminium.

Les problèmes majeurs du béton cellulaire sont en sa **mauvaise distribution cellulaire et sa faible résistance mécanique**. En raison de ce problème, nous avons pensé d'améliorer cette propriété mécanique on se base sur des matériaux locaux (sable de dune, sable concassé), un ajout minéral actif (le laitier des hauts fourneaux), poudre d'alumine et deux différents types de chaux éteinte.

A decorative border composed of black lines forming elegant, swirling patterns. Interspersed within these swirls are several stylized flowers, some with five petals and some with six, along with small circular motifs. The border frames the central text on the left, top, and right sides.

Chapitre I
Généralité sur le béton
cellulaire

I. Introduction

La limitation de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment est basée en premier lieu sur le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe. Parmi les matériaux de construction les plus utilisés le béton. Il est facile à fabriquer et présente des propriétés structurelles intéressantes et une bonne durabilité. Cependant, il a une masse volumique élevée d'où la mise en place de fondations importantes pour supporter le poids de construction. Globalement, ce matériau est performant du point de vue mécanique, mais il est moins intéressant de point de vue thermique.

Pour une bonne isolation thermique il faut utiliser des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure tel que le béton cellulaire le béton de chanvre et le béton léger, etc. Elles sont performantes et durables. La recherche des conditions de confort de l'habitation passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois.

I.1. Le béton

C'est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment et d'eau. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats [1] .

I.1.1. Constituants du béton

Les bétons sont composés de ciment, de sables, de gravier, d'eau et d'adjuvants. Les paramètres de composition sont largement variables, en fonction de l'utilisation du béton.

I.1.1.A. Granulats

Les granulats est un ensemble des grains minéraux appelés fillers, sablons, sables, gravies, et gravillons suivants leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaire terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaires) ou encore par recyclage de produits tel que les matériaux de démolition. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou de dragués en rivières ou en mer, et concassés obtenus à partir de roches exploitées en carrière. [1]

Les granulats sont désignés par leur classe granulaire d/D où d et D représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions du produit.

Familles de granulats		
Familles	Dimension	Caractéristique
Fillers	0 / D	D < 2 mm avec un moins 70 % de passant à 0.063 mm
Sablons	0 / D	D ≤ 1 mm avec au moins de 70% De passant à 0.63 mm.
Sables	0/ D	1 mm < D ≤ 6.3 mm
Gravies	0/ D	D > 6.3 mm.
Gravillons	d/ D	d ≥ 1 mm et D ≤ 125 mm.
Ballasts	d/ D	D ≥ 25 mm et D ≤ 50 mm.

Tableau I.1 : Dimensions et caractéristiques des familles de granulats. [1]

Plus de 70 % en poids du béton est constitué de granulats. Ce sont les composants majeurs de l'ouvrage puisqu'ils conditionnent sa résistance mécanique et son aspect visuel, Les performances mécaniques, esthétiques et de durabilités recherchées sont déterminantes dans le choix des granulats. [1]

I.1.2. Les différents types de béton

I.1.2. A. Les Bétons Prêts à l'Emploi

Les "Bétons Prêts à l'Emploi", abrégés en BPE, sont des bétons conçus et produits industriellement dans une centrale à béton. Le béton est livré frais sur le chantier dans des camions-toupies. Il est prêt à être mis en œuvre soit directement avec la goulotte du camion-toupie, soit à l'aide d'un tapis ou d'une pompe à béton. [2]



Figure I.1 : Camion toupie alimentant une pompe à béton

I.1.2.B. Le béton armé

C'est un matériau composite qui allie les propriétés mécaniques du béton et celles de l'acier (alliage de fer et carbone en faible pourcentage). La résistance en traction du béton étant assez mauvaise, on ajoute des armatures en acier qui viennent renforcer le béton. L'acier ayant une bonne résistance tant en traction qu'en compression, il compense les faiblesses du béton et retarde ainsi l'ouverture des microfissures qui apparaissent lorsque le béton ne résiste plus à la traction. [2]

I.1.2.C. Le béton de ciment alumineux (ou béton fondu)

Le béton de ciment alumineux est un béton dans lequel le liant utilisé est du ciment alumineux. Il s'agit un ciment à base d'aluminates de calcium. Ces aluminates ne libèrent pas de chaux au cours d'hydratation et offrent plusieurs propriétés spéciales au béton ou au mortier alumineux.

Cela permet :(une prise rapide, une résistance chimique élevée, une résistance aux températures élevées et une bonne accélération de la prise par temps froid).

I.1.2.D. Les bétons caverneux, drainant et poreux

Ce sont des bétons à structure ouverte de granulométrie discontinue, avec, à l'état durci, des vides entre les plus gros éléments granulaires. La porosité ouverte utile (pourcentage de vides communiquant entre eux et avec l'extérieur) représente alors plus de 10 % du volume du béton compacté. Le béton devient donc suffisamment poreux pour être drainant. [2]

Il ya aussi des autre type de béton comme :

- Le béton décoratif :
- Les bétons auto compactant, auto plaçant et auto nivelant
- Le béton projeté
- Le béton fibré

I.1.3. Propriétés des bétons**I.1.3.1.Ouvrabilité**

Elle caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité, tel que la nature, le dosage en ciment, la forme, les dimensions des granulats, et

Le dosage en eau. [1]

I.1.3.2 .Retrait

Au cours de son évolution, le béton subit diverses déformations volumiques appelées retrait (ou gonflements) qui croient avec le temps pour tendre, après quelques années, vers une limite qui dépend notamment de la composition du béton, des dosages en ciment et en eau, de l'épaisseur des pièces et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. [1]

I.1.3.3. Résistance mécanique

La résistance mécanique du béton est caractérisée par la valeur mesurée à 28j. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton et du rapport E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment).

I.1.3.4. Fluage : C'est une déformation lente que subit un matériau soumis à une charge constante et permanente, le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente. Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. [1] Il est fonction notamment des caractéristiques du béton, de son âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps.

I.2. Les bétons légers

Les bétons dits légers sont obtenus par incorporation d'air, trois types de bétons légers sont classiquement distingués selon la façon dont l'air est introduit dans le béton, lorsque l'air est incorporer dans la pâte de ciment, le béton est qualifier de béton cellulaire, lorsqu'il vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats, le béton est qualifier de béton sans fines ou béton caverneux, et enfin lorsque les granulats sont eux-mêmes allégés, le béton est alors qualifier de béton de granulats légers, la premier catégorie(béton cellulaire) que nous allons intéresser dans ce travail. [3]

I.2.1. Définition

La masse volumique du béton peut être diminuée en remplaçant une quantité de matériau par de l'air [4]. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits : soit dans les granulats, soit dans la pâte de ciment ou entre les gros granulats par élimination des granulats fins.

La commission des bétons légers **RILEM** [5] propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont La masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800

Kg/m³ D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'**American Concret Institute**, limite la masse volumique apparente des bétons légers à **1800 Kg/m³** après séchage à l'air pendant 28j.

I.2.2. Classification des bétons légers

La classification des bétons légers proposée par Lafarge « bétons-granulats légers » est représentée par la figure

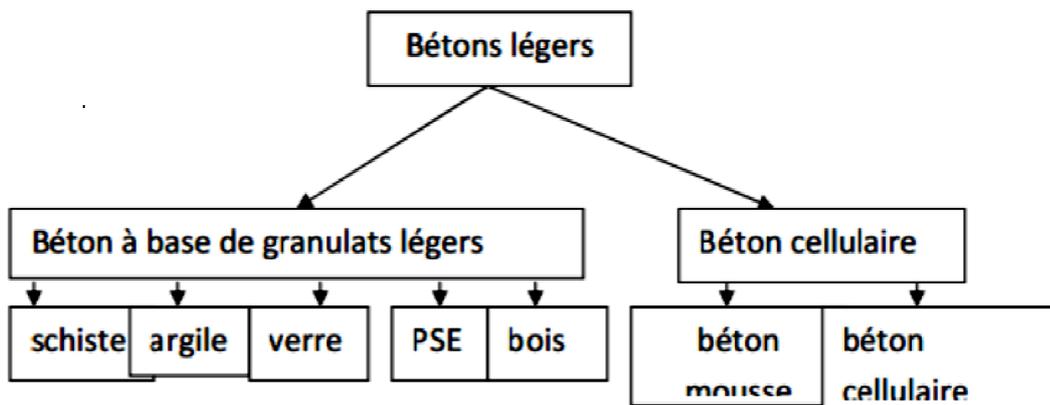


Figure I.2: classification du béton léger [6]

Les bétons de granulats légers sont généralement classés suivant l'origine du granulat utilisé, ainsi on distingue 2 types :

- **Les granulats légers naturels** : la ponce ou la pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse. Les granulats légers ayant subi un traitement thermique : granulats d'argile, de schiste, d'ardoise ou de perlite expansée. [6]
- **Les granulats légers de matériaux artificiels** : le mâchefer, sous-produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères. De nouveaux types de granulats légers sont actuellement utilisés : le verre expansé (Meilleure résistance et faible absorption d'eau), le polystyrène (possibilité de mise en œuvre par pompage) et les granulats de bois

Les granulats légers de matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux : granulats de nombreux déchets industriels, comme le laitier de haut fourneau que l'on peut expanser.

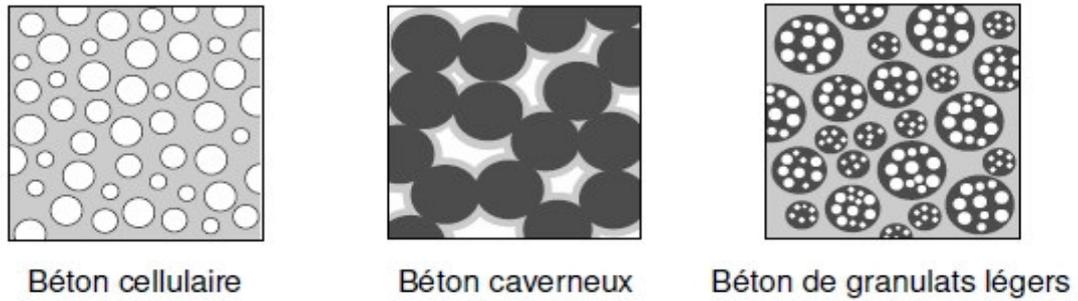


Figure I. 3: Classification des bétons légers [6]

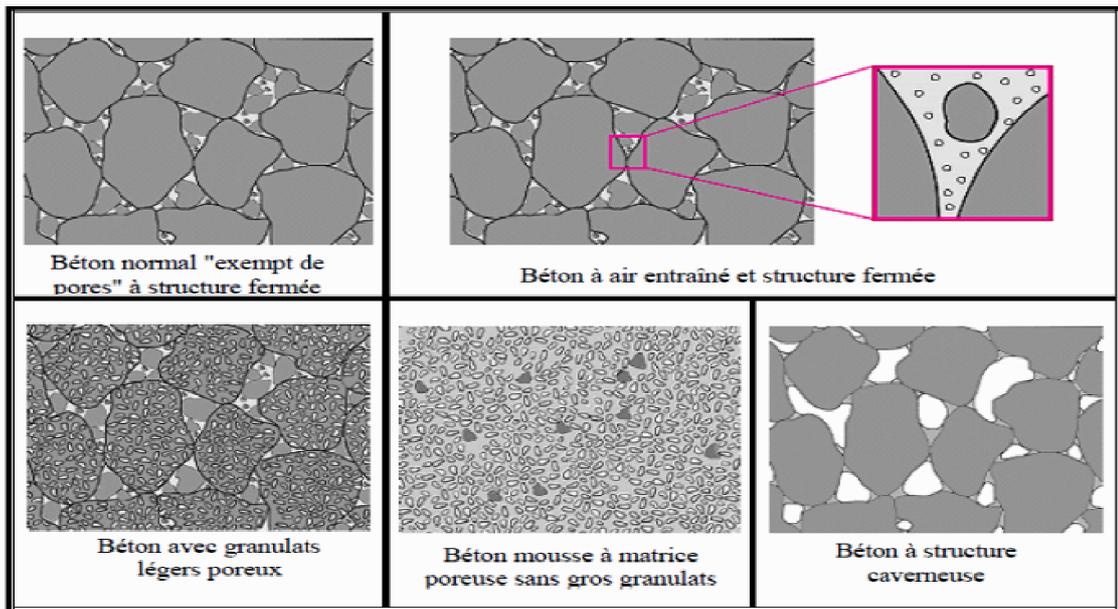


Figure I.4 : Structure des bétons légers.

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide [7] distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **tableau I.2**

classification	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	< 7

Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon la masse volumique [4]

De même [8], en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM [4], selon le **tableau I.3**:

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique ³ (kg/m)	< 1800	Non précise	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W/m.K)	-	< 0.75	< 0.30

Tableau I.3 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

- **Des bétons de remplissage** : Leur masse volumique apparente est comprise entre **300 et 1000 kg/m³**, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes. [9]
- **Des bétons porteurs isolants** : Leur masse volumique apparente est comprise entre **1000 et 1400 kg/m³**, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués
- **Des bétons de structure** : Leur masse volumique est comprise entre **1400 et 1800 kg/m³**. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible. [9]

I.2.3. Propriétés des bétons légers

I.2.3.1. Légèreté

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/ m³ alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/ m³ pour un béton d'argile expansée,

entre 600 et 900 kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire. L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction. [10]

I.2.3.2. Comportement et performances mécaniques :

Il existe une relation entre les résistances mécaniques et le dosage en ciment en particulier la résistance à la compression. Le ciment ayant une densité beaucoup plus élevée que celle des granulats légers et de l'eau, pour n'importe quel granulats particulier, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique, mais, selon le type de granulats, un béton de 20 MPa peut nécessiter entre 260 et 330 Kg de ciment par mètre cube, alors qu'un béton de 40 MPa en exigera de 420 à 500 kg/m³. Des résistances à la compression plus élevées exigent des dosages en ciment très élevés [10]

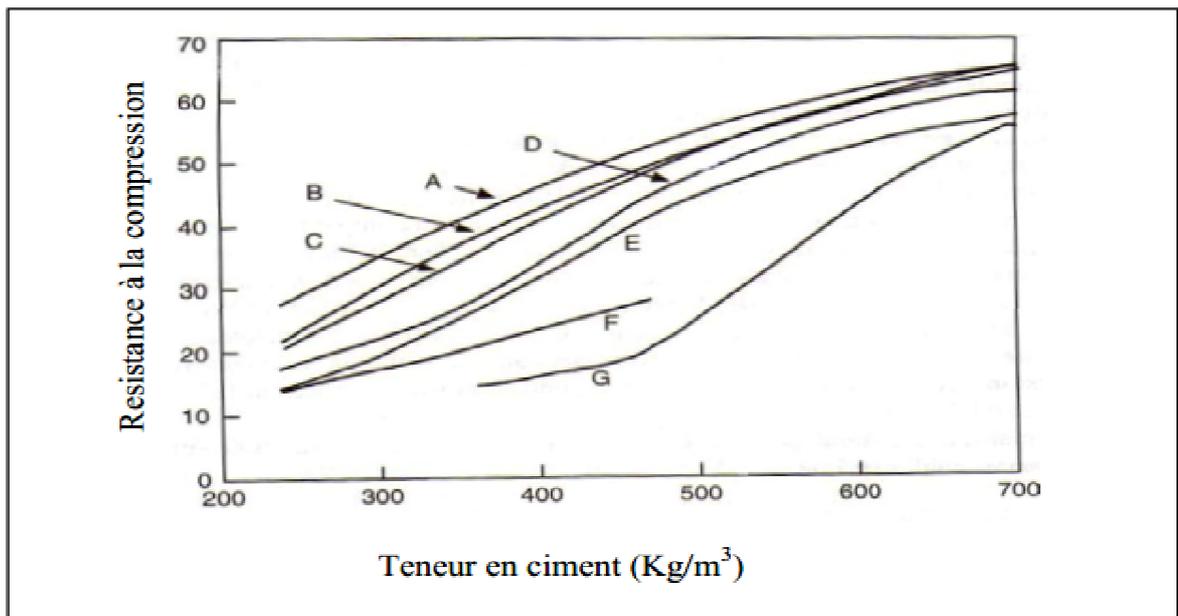


Figure I.5. : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment d'après [3], avec : **A**:cendres volantes frittées et granulats fin ordinaire, **B**:laitier de haut fourneau en boulettes et granulats fin ordinaire, **C** : cendres volantes frittées, **D** : schiste fritté, **E**: ardoise expansée **F**: argile expansée et sable, **G**: laitier expansé [10]

D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module E augmentent lorsque la porosité propre des granulats est diminuée. Dans le cas du béton cellulaire, la grande proportion de vides d'air dans le matériau est un facteur essentiel dans le niveau de

performances. On distingue deux types de pores: les **macrospores** (diamètre supérieur à 60 μm) et les micropores (diamètre < 60 μm) [10].

Des études expérimentales montrent qu'il existe une relation linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type Liapor, Arnauld [10] a obtenu une relation Linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique figure I-16.

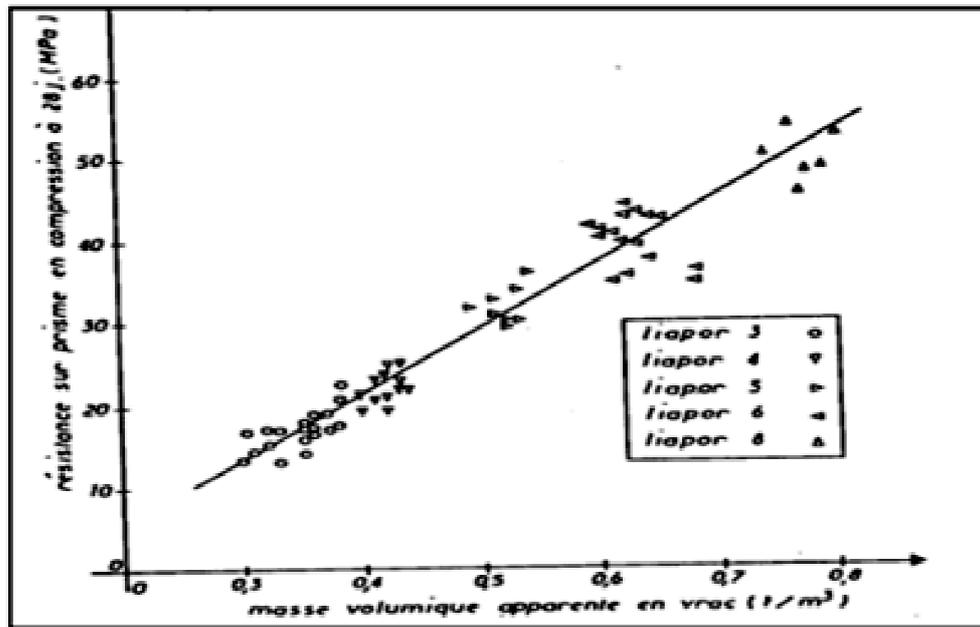


Figure I.6 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique [11]

Comme pour le béton de densité normale, la fumée de silice améliore l'évolution de la résistance du béton léger. D'autres ajouts peuvent être aussi incorporés dans le béton léger. De façon générale, pour un béton de même résistance, le dosage en ciment doit être plus élevé dans un béton léger que dans un béton de densité normale ; le dosage supplémentaire en ciment peut dépasser 50% dans le cas des résistances élevées [11].

	Constituants			ρ (kg/m ³)	Porosité ε	R_c (MPa)	E(GPa)	α (m/m)
	Nom	Masse(Kg)	Volume(m ³)					
Granulats	Granulat minéral (grés, granite			2600	< 1%	-	60	-
	Argile expansée			850	60à70%	6à9	-	
	Copeau de bois en vrac			275	75 %	-	10à12	
	Granulat bois Agresta			600	60%	-		
Béton hydraulique	Granulat	755	0.285	2330	9%	30	36	1.10 ⁴
	Sable	925	0.350					
	Ciment	440	0.140					
	Eau	210	0.215					
	Air	-	0.015					
Béton argile expansé	Granulat	351	0.414	1600	36%	25	14	-
	Sable	602	0.230					
	Ciment	400	0.127					
	Eau	193	0.193					
	Air	-	0.025					
Béton cellulaire	Mortier ciment			350-650	75à82%	5	2 à 3	2.10 ³
	air							
Béton de bois	Copeaux de bois	170	0.212	600-900	52 %	3.5à4	-	-
	Ciment	350	0.113					
	Eau	200	0.200					
	Air	-	0.379					
	Sable	250	0.096					
	Filler	-	-					

Le tableau I.4 : Qui suit résume quelques caractéristiques des bétons légers [12]

1.2.3.3. L'absorption

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. Cependant, l'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas

au phénomène d'absorption. Une étude expérimentale menée par Vaquier dans [11] a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats Légers et en analysant les conséquences sur l'absorption.

I.2.3.4. La sorption/ désorption

Les matériaux possèdent la capacité de condenser l'eau présente dans le milieu extérieur à l'état vapeur. C'est le phénomène de sorption-désorption. Il se quantifie en mesurant les variations de masses des échantillons en fonction des conditions thermodynamiques de conservation (température T fixe et hygrométrie extérieure HR variable). Les courbes de sorption-désorption représentent usuellement la teneur massique en eau ω du matériau sous une humidité HR variant entre 0 et 100 %. La figure suivante représente les courbes de sorption et désorption du béton cellulaire.

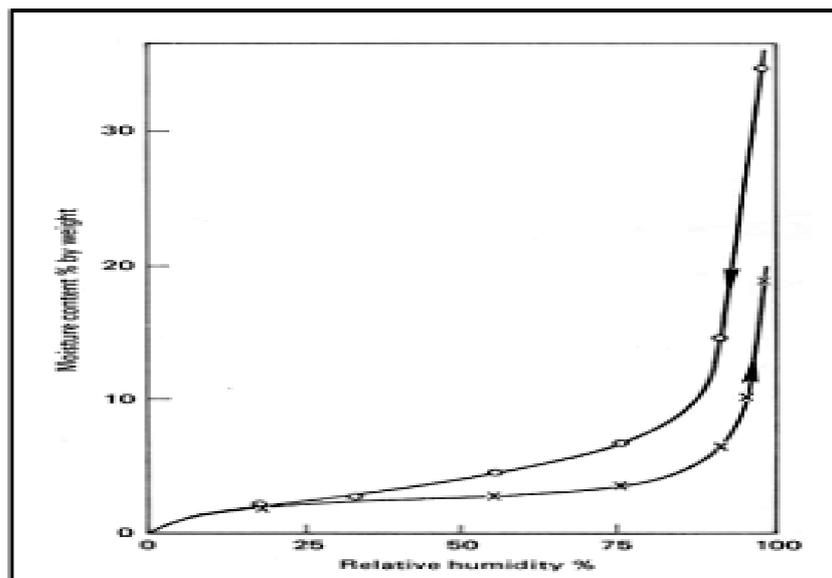


Figure I.7 : Courbes de sorption et désorption du béton cellulaire de $\rho = 500\text{kg/m}^3$ à $T = 20^\circ\text{C}$ [13].

I.2.3.5. Durabilité

Le réseau poreux d'un granulat léger est généralement discontinu, la porosité des granulats eux-mêmes ne modifie pas la perméabilité du béton, qui est contrôlée par la perméabilité de la pâte de ciment. La faible perméabilité du béton léger est le résultat de plusieurs facteurs : le faible rapport eau/ ciment de la pâte est le résultat de plusieurs facteurs : la qualité élevée de l'interface pâte granulats, ce qui empêche l'écoulement autour des granulats ; [14]

La compatibilité entre les modules d'élasticité des granulats et de la matrice cimentaire engendre très peu de microfissuration sous l'application d'une charge ou par suite d'une variation de température.

De plus, la réserve d'eau contenue dans les granulats permet la poursuite de l'hydratation du ciment et la réduction de la perméabilité [14]. La susceptibilité à la détérioration de béton légers exposé à de très basses température (-156°C) dépend des propriétés de la pâte de ciment hydraté, tout comme le béton de densité normale. Les bétons légers permettent un plus grand mouvement de l'humidité que les bétons de densité normale. Ils ont un important retrait initial de séchage, d'environ 5 à 40 % plus élevée que celui du béton ordinaire, mais le retrait total peut même être encore plus important avec certains granulats légers ; les bétons confectionnés avec des granulats d'argile, de schiste et de laitier expansés sont dans la gamme des plus faibles retraits.

I.2.3.6. Propriétés thermiques

La conduction thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure. Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau, en ajoutant l'air intra-particule.

A titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$ tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [15]. Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/(kg.K) . Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C . Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure [15].

Des caractéristiques thermiques de certains matériaux sont illustrées dans le **tableau I.5**.

Tableau I.5. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [15]

	ρ (kg/m ³)	Porosité ϵ (%)	C (J/(kg.K))	λ (W/(m.K))
Air	1.2	-	1000	0.026
Eau liquide	998	-	4180	0.602
Béton hydraulique	2330	8	1050	1.80 à 2.00
Béton argile expansé	1600	36	900	0.46
Béton cellulaire	350à650	75 à 82	880	0.16 à 0.33
Béton de bois	600 à 900	52	1200	0.09 à 0.30
Brique	1800	-	860	1.15

Un dernier élément concernant les propriétés thermiques des bétons légers est lié au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant. [15]

I.3. Le béton cellulaire

I.3.1. Introduction

Depuis 1953 le béton cellulaire est présent sur le marché de la construction en Belgique. Tout au long de ces cinq décennies, son utilisation n'a cessé d'augmenter, et plus particulièrement au cours de la dernière.

Le béton cellulaire répond à ces critères. Au mélange de chaux, de ciment et de sable qui constitue le béton traditionnel est ajouté de la poudre d'aluminium.

Le béton cellulaire est, à la fois, un matériau solide et léger qui convient à tous les types de construction, du plancher à la toiture. De par leurs grandes dimensions, les blocs, linteaux et dalles armées contribuent à la rapidité et à la simplicité de la construction, facteurs qui influencent favorablement le coût de celle-ci. L'utilisation de produits en béton cellulaire se révèle être source de réels avantages à toutes les étapes du projet et de la construction.

Le béton cellulaire est un matériau de construction, vraiment moderne, se doit donc de répondre, non seulement aux besoins de son temps, mais encore et surtout à ceux du futur

I.3.2. Historique

- ✓ en 1880 à W. Michaelis. La première invention est attribuée à la mise en contact d'un mélange de chaux, sable et eau avec de la vapeur d'eau saturée sous haute pression.
- ✓ En 1889, La seconde invention concerne l'émulsification des mortiers
- ✓ En 1914, J.W. Aylsworth et F.A. Dyer ont breveté un procédé utilisant de la poudre d'aluminium ou de zinc comme émulsifiant.
- ✓ En 1924, le Suédois J.A. Eriksson débute la production de béton cellulaire à base d'un mélange de sable fin, de chaux et d'eau, auquel il ajoute une petite quantité de poudre de métal.
- ✓ après 1945, la fabrication en série de petits et de grands formats, d'éléments armés ou non de béton cellulaire avec un degré de précision suffisant a été développée.
- ✓ en 1953, la Belgique a commencé à produire des blocs de béton cellulaire.

De nos jours le processus de production du béton cellulaire est le plus novateur dans le domaine des matériaux de construction pierreux. Il est entièrement automatisé [16].

I.3.3. Définition

Le béton cellulaire est un matériau de construction solide et léger constitué de mélange Sable, chaux et ciment, Celles-ci sont intimement mélangées dans des proportions bien déterminées, après quoi on y ajoute de l'eau. Auquel est ajoutée d'un agent expansif qui va donner ses propriétés « aérées » et lever la pâte de béton cellulaire. Tels que : [9]

- poudre d'aluminium
- agent moussant
- Entraîneur d'air.

Dans le béton cellulaire la chaux réagit en présence d'eau avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite). La chaux et le ciment servent de liant

L'adjonction de la poudre d'aluminium a pour effet de libérer de l'hydrogène qui fait lever la pâte et donne naissance à des quantités de cellules gorgées d'hydrogène, rapidement expulsé sous la pression de l'air ambiant. C'est ce qui fait précisément la particularité la plus remarquable du béton cellulaire. Il s'agit, en effet, d'un matériau gorgé d'air. De là, l'expression "d'air pétrifié". Il n'en est pas moins solide, léger et thermiquement très isolant.

La pâte est ensuite coulée dans des moules qui ne sont que partiellement remplis pour éviter tout débordement de la pâte lors de la levée. Le produit passe ensuite à l'autoclave ou il est soumis à une température de 180°C et à une pression de 10 atmosphères. [16]

Revenons à notre procédé de fabrication. Après démoulage, la masse est découpée à l'épaisseur et dans de nombreuses dimensions de 5 à 30 mm suivant le type de produit : les blocs, les linteaux, les éléments armés, les carreaux et les panneaux.

De par le peu de matière première nécessaire à sa production, le béton cellulaire participe à la sauvegarde des ressources naturelles : 500 kg de matière suffisent à réaliser 1m³ de maçonneries soit de 1/2 à 1/3 de ce qui est nécessaire pour d'autres matériaux porteurs de gros œuvre.

La fabrication ne nécessite que peu d'énergie : 300 kW/h suffisent à produire 1m³ de béton cellulaire autoclave soit 10 fois moins que pour fabriquer des briques pleines de terre cuite, et participe ainsi au respect de l'environnement Parce que ne dégage aucun gaz toxique et ne pollue absolument pas l'eau. [16]

Il s'utilise **pour toutes les étapes de la construction, en intérieur comme en extérieur** (murs, cloisons, plafonds,...), du gros œuvre extérieur aux divers aménagements et finitions intérieurs.

I.3.4. Matière premier

Les matières premières nécessaires à la fabrication du béton cellulaire sont :

- du sable blanc très pur (95% de silice) [16]
- de la chaux
- du ciment
- de la poudre d'aluminium
- de l'eau

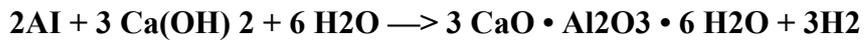
A noter qu'il s'agit uniquement de matières minérales présentes en abondance dans la nature.

La poudre d'aluminium extrêmement fine (env. 50 µm), utilisée en très faible quantité (+/- 0,05%), sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer les cellules.



Figure I.8 : Béton cellulaire [16]

En milieu alcalin, la poudre d'aluminium réagit comme suit :



C'est l'hydrogène ainsi libéré qui crée les cellules. Encours de durcissement de la pâte, l'hydrogène se libère et les cellules se remplissent d'air. [16]

En moyenne, la proportion de matières premières utilisées lors de la fabrication est la suivante :

- sable quartzueux +/- 65%
- ciment +/- 25%
- chaux +/- 15%
- poudre d'aluminium +/-0.06%
- eau

I.3.4.1. Le sable

I.3.4.1.1. Introduction

Le sable c'est une Matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable. Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives n après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière.

I.3.4.1.2. Les sable de dunes

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. D'après Fookes et Higginbotham (1968) (M.H.BEN DHIA le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. [17]

I.4.3.1.2.a. Identification des sables de dunes du Sahara

➤ **Composition chimique** : Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface.

➤ **Granulométrie** : Le diamètre des plus gros éléments des sables des dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm. [17]

➤ **Propreté** : Le sable de dunes ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité WL de l'ordre de 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60 %. La valeur du bleu est de l'ordre de 0,1.

➤ **Comportement mécanique** : Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés par Ould Sid et al. (1995) (M.H.BEN DHIA [17]

Les principaux résultats trouvés sont que: - l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %) ; - la cohésion a une valeur très faible, de l'ordre de 5 kPa ; - l'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable. Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent.

I.3.4.1.2.b. Utilisation du sable de dunes:

a - Utilisation du sable de dunes dans le béton:

Le sable de dunes était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers, mais l'utilisation comme constituant principal du béton n'apparaît qu'après la naissance du béton de sable en 1853, Cette naissance a donné le courage de commencer une nouvelle investigation qui a étudié la possibilité d'utiliser le sable de dunes comme un constituant principal dans les structures des ouvrages en génie civil. [17]

I.3.4.2. Ciment

I.3.4.2.1. préhistorique

1756 : Smeaton découvre que les chaux les plus hydrauliques (celles de Portland) sont obtenues à partir d'un mélange calcaire + argile en grande proportion (25%)

1818 : Louis Vicat montre qu'il est possible de fabriquer industriellement un liant hydraulique en dosant calcaire et argile, et définit la théorie de l'hydraulicité

1824 : Joseph Aspdin dépose un brevet de Ciment Portland Artificiel

1846 : premiers fours verticaux pour la fabrication du ciment dans la région de Boulogne-sur-Mer

1887 : Henri Le Chatelier découvre les mécanismes de formation, puis de durcissement, du ciment : base de la chimie des ciments [18]

I.3.4.2.2. Définition : Le ciment est un liant hydraulique : la réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau. Le ciment se présente sous la forme d'une poudre fine de couleur grise ou blanche. [19]

La dimension des grains de ciment est caractérisée par la valeur de la finesse Blaine qui mesure la surface totale des grains contenus dans 1 gramme ; la finesse Blaine des ciments est de l'ordre de 3 500 à 4 500 cm²/g. La dimension caractéristique des grains de ciment est d'environ 30 à 50 μ. Obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange homogène de calcaire et d'argile, dans la proportion 80 % - 20 %. [20]

I.3.4.2.3. Composition et caractéristiques du ciment

Le ciment est caractérisé par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques (la forme et la finesse des grains). Les grains de ciment sont hétérogènes et polyphasés. Au contact de l'eau ils donnent naissance à des produits dont la composition chimique est variable. Il est principalement composé de clinker, de sulfate de calcium, et d'ajouts éventuels.

I.3.4.2.3.A. Le clinker

C'est le constituant principal des ciments, il est obtenu d'un mélange de calcaire et d'argile ces matières sont broyées, finement moulues et mélangées dans des proportions bien définies, ensuite ils sont placés dans un four et chauffés à environ 1450 °C. Au cours de la

calcination les matières premières vont réagir, pour former à la fin de la cuisson, un produit de composition complexe appelé clinker.

Principaux constituants du clinker sont:

Il est usuel d'abrégé les formules des oxydes communs à une simple lettre, tel que C pour CaO ou S pour SiO₂. Le silicate tricalcique devient alors C₃S. [21]

Tableau I.6: Composants du clinker

Composés	Composition	Appellation abrégée	Taux
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C ₂ S	45 à 65%
Silicate bicalcique	2 CaO.SiO ₂	C ₃ S	15 à 35%
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	4 à 14%
Aluminoferrite tétracalcique	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	10 à 18%

I.3.4.2.3.B. Le gypse(CaSO₄.2H₂O)

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement. [22].

I.3.4.2.3.C. Ajouts cimentaires C'est des poudres fines actives ou inertes ajoutées au ciment pour réduire le coût de production, pour des raisons économiques et/ou pour leurs propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques, diminuer les émissions de CO₂ et améliorer les propriétés du béton.

✓ **Le Laitier de haut fourneau** : Matériaux issu de l'industrie de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est composé principalement de chaux (45-50%), de silice (30-35%), d'alumine (10-15%) et de magnésie (7-10%).

✓ **Pouzzolane naturelle** : Produits d'origine volcanique, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer. [23]

- ✓ **Fumée de silice** : Particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice ($\geq 85\%$), issue de l'industrie de fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.



Figure 1. 9 : Les compositions de fabrication du ciment.

I.3.4.2.5. Les classifications de ciment

Tableau I.7 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15- 301 [23]

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	-----	0 à 5%
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	L'un des Ajouts - 6 à 20 %	
CEM II /B		65 à 79 %	- 21 à 35 %	
CEM III/A		35 à 64 %	- 35 à 65 %	
CEM III/B	Ciment de haut fourneau	20 à 34 %	Laitier - 66 à 80 %	
CEM III/C		5 à 19 %	- 81 à 95 %	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane, - 10 à 35 %	
CEM IV/B		45 à 64 %	cendre ou fumée silice - 36 à 55 %	
CEM V/ A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	laitier - 18 à 30 %	
CEM V/ B		20 à 39 %	et cendre - 31 à 50 %	

I.3.4.2.6. Domaine d'utilisation des différents ciments

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

Figure I.8 : L'utilisation des différents types de ciment [23]

I.3.4.3. L'eau

Dite L'eau de gâchage, doit présenter les propriétés d'une eau potable Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. [20] La quantité, d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m³. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent, utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simples connus.

I.3.5. Fabrication du béton cellulaire

Les produits en béton cellulaire sont fabriqués dans des unités de production hautement industrialisées. L'emploi de matières premières stables, l'automatisation de la fabrication ainsi que le contrôle permanent, tant interne qu'externe, sont les garants d'une qualité de produits constante et de haut niveau. Les phases importantes de la fabrication sont [16] :

- la préparation, le dosage et le malaxage des matières premières
- la fabrication et le traitement anticorrosion des armatures nécessaires à la production des éléments. Armes.

- la préparation des moules.
- la coulée, la levée et le durcissement de la pâte.
- le découpage et le profilage des produits.
- l'autoclavage.
- la mise sur palettes et sous housses plastiques rétractables (blocs).

Le béton cellulaire appartient au groupe des bétons légers, autoclaves. Les matières premières entrant dans sa préparation sont le ciment, le sable pur (95% de silice), la chaux, poudre d'alumine et l'eau.

Le sable est broyé finement soit à sec, soit en présence d'eau. On y ajoute ensuite le ciment,

La chaux, la poudre d'aluminium et l'eau. Le produit obtenu, après mélange intime des constituants, est coulé dans des moules d'une capacité de 4,5 à 8 m³ que l'on remplit à mi-hauteur environ.

Pour la production d'éléments armés, avant remplissage des moules, des treillis d'armature préalablement traités contre la corrosion y sont déposés avec précision et maintenus par entretoises. Pour la production de blocs, les moules sont remplis uniquement du mélange.

L'aluminium réagit avec les autres constituants, réaction qui produit un dégagement d'hydrogène permettant la formation des cellules sphériques et fermées qui caractérisent le béton cellulaire.

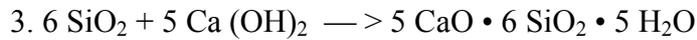
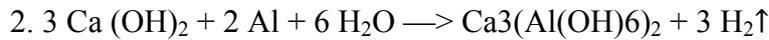
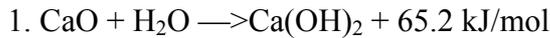
Après quelques heures, la masse cellulaire a acquis une dureté telle (on parle à juste titre d'un "gâteau") qu'elle peut être démoulée. Elle est alors découpée au moyen de fils en acier, soit dans le sens de la longueur s'il s'agit d'éléments armés, soit longitudinalement et transversalement s'il s'agit de blocs. [16]

Malgré la coupe, le "gâteau" conserve la forme qu'il a reçue dans le moule.

Le produit semi-fini ainsi obtenu subit ensuite un traitement thermique en autoclave, sous une pression d'environ 10 bars et à une température de 180°C environ.

Dans ces conditions, a lieu une autre réaction chimique au cours de laquelle le sable se lie à la chaux, formant des cristaux de forme et de composition bien particulière (Tobermorite).

Les réactions chimiques simplifiées, depuis le mélange des matières premières jusqu'à l'obtention du produit fini, sont les suivantes :



= Tobermorite

(Silicate de calcium hydraté)

C'est à la Tobermorite - $\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{Si}_3\text{O}_9)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ ou $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ (appellation industrielle) - que les fines parois cellulaires ont emprunté leur grande solidité.

La variation des masses volumiques s'obtient en adaptant, de façon minutieuse et rigoureuse, le dosage des matières premières.

Chaque catégorie massique, possédant ses caractéristiques spécifiques, répond aux exigences des normes NBN B 21-002 et EN 771-4 (blocs) ou NBN B 21-004 et EN 12602 (éléments armés). [16]

I.3.6. Classification du béton cellulaire

Basons sur le mode de cure le béton cellulaire peut être non-autoclave (BCNA) ou autoclave (BCA). Les résistances mécaniques, le retrait de séchage, l'absorption etc. dépendent directement du mode et la durée de cure. Le développement des résistances est plutôt lent pour les produits non-autoclaves (cure humide). L'autoclavage amorce une réaction entre la chaux et la silice/alumine. Il existe une large variation dans la pression et la durée suggérée par plusieurs auteurs (durée 8-16h et la pression 4-16 MPa) [24]. Les autres variables significatifs sont l'âge et les paramètres du mélange au début du cycle de cure, et le taux de changement de température et pression. L'autoclavage est rapporté pour réduire le retrait de séchage significativement et est essentiel si le béton cellulaire est exigé dans des niveaux acceptables de résistance et retrait [24].

Les normes belges NBN B 21-002 ainsi que les normes européennes EN 771-4 classifient qualitativement le béton cellulaire en catégories en fonction de leur masse volumique sèche apparente (classe ρ) et de leur résistance à la compression (classe f) et la résistance caractéristique à la compression (R_c)

Tableau I.9 : Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression. [24]

Classe ρ	Critères	Classe f	R_c (MPa)
$\rho 0.4$	$300 \text{ kg/m}^3 \rho 400 \text{ kg/m}^3$	f2	$R_c \geq 2$
$\rho 0.5$	$400 \text{ kg/m}^3 \rho 500 \text{ kg/m}^3$	f3	$R_c \geq 3$
$\rho 0.6$	$500 \text{ kg/m}^3 \rho 600 \text{ kg/m}^3$	f4	$R_c \geq 4$
$\rho 0.7$	$600 \text{ kg/m}^3 \rho 700 \text{ kg/m}^3$	f5	$R_c \geq 5$
$\rho 0.8$	$700 \text{ kg/m}^3 \rho 800 \text{ kg/m}^3$	f6	$R_c \geq 6$

I.3.7. Propriétés du béton cellulaire

I.3.7.1. La structure

La structure du béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse solide et macroporeuse. Les macropores sont formées en raison de l'expansion de la masse causée par le dégagement du gaz et les micropores apparaissent dans les parois entre les macropores. Les macropores sont des pores avec un diamètre de plus de $60 \mu\text{m}$ [24]. Le système poreux du béton cellulaire est aussi classifié en fonction de distribution de taille de pores : des pores artificiels, des pores intra-particules et des pores intra-liant, et la distribution des pores dans la matrice a une grande influence sur les propriétés du béton cellulaire. Bien que les restes de système poreux soient en grande partie identiques, il existe une différence dans la structure du **BCA** et **BCNA**, causé par les changements incidents dans les produits d'hydratation, qui explique la variation dans leurs propriétés. En autoclavage, une partie de la matière siliceuse réagit chimiquement avec la matière calcaire comme la chaux, et la chaux libérée par l'hydratation du ciment, formant une structure microcristalline stable avec une surface spécifique très réduite. Tada et al [25] ont montré que le **BCNA** a un plus grand volume de micropores en raison de la présence excessive d'eau. Il a été observé que la distribution de taille de macropores n'a pas beaucoup d'influence sur la résistance mécanique. Les propriétés du béton cellulaire comme résistance, perméabilité, diffusivité, le retrait, et le fluage sont intimement liés à sa porosité et la distribution de taille des pores. Ainsi, la caractérisation de la structure des pores est extrêmement importante, et plus dans le cas du béton cellulaire où la porosité peut être aussi haute que 80 %. La porosité et la distribution de taille de pore de béton cellulaire varient considérablement avec la composition et le mode de cure. [16]

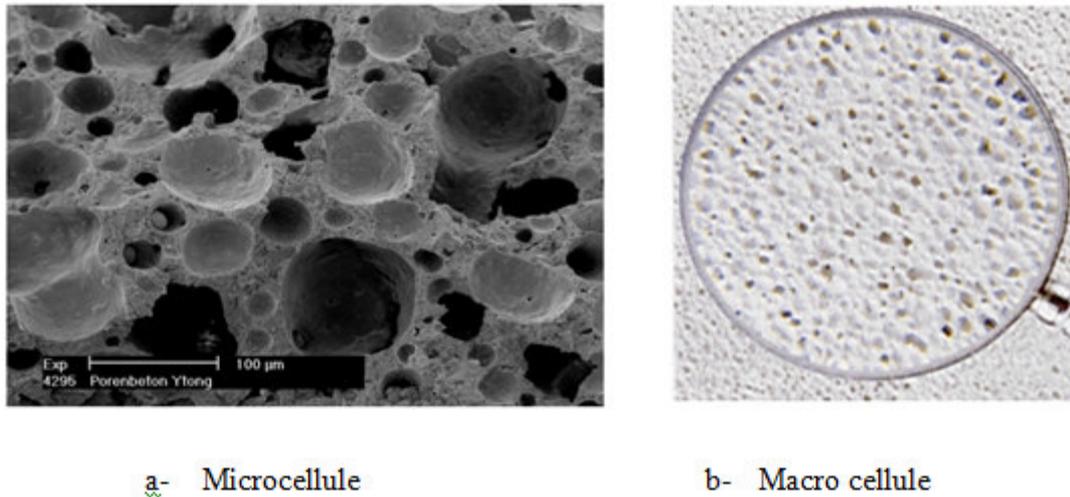


Figure I.10: Structures des bétons cellulaires [16]

Au total le volume d'air représente donc 80% du volume du béton cellulaire, tandis que la masse solide est de 20%.

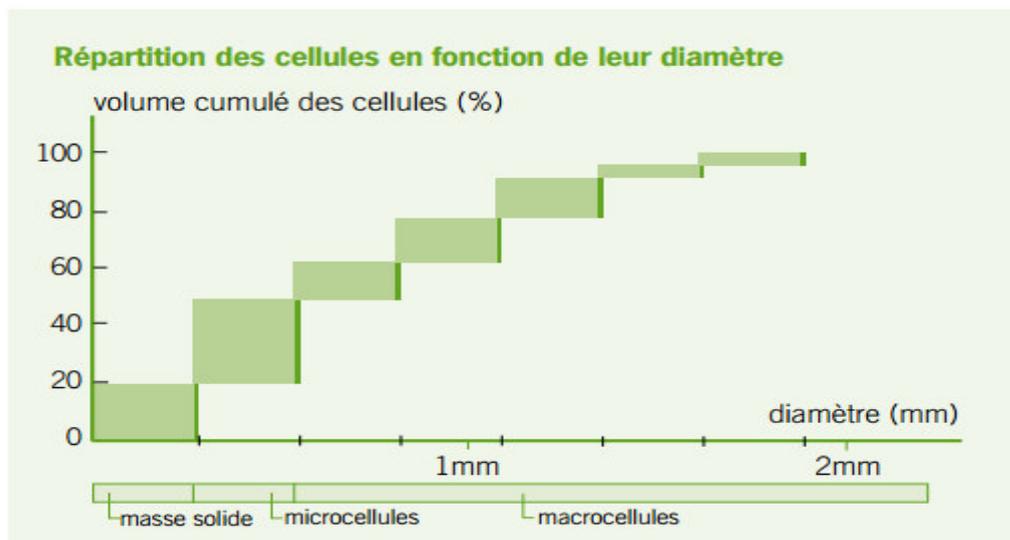


Figure I.11 : Répartition des cellules en fonction de leur diamètre

I.3.7.2. La densité

Le béton cellulaire dépend de la densité (300-1800 kg/m³), il est essentiel que ses propriétés soient qualifiées avec la densité. En spécifiant la densité, les conditions d'humidité, (c'est-à-dire, séchage à l'étuve ou à l'air libre) doivent être indiqués. Le béton cellulaire avec une vaste gamme de densité pour des applications spécifiques peut être fabriqué avec la

variation de la composition qui à son tour influe sur la structure, la taille et la distribution des pores. Une structure cellulaire stable et de préférence sphérique est nécessaire pour des propriétés structurelles et fonctionnelles optimums [26]. Aussi les pores doivent être distribués uniformément dans la masse pour obtenir des produits de densité uniforme. Le développement des macros pores dans la matrice est influencé par la densité d'une façon significative [27-28]. En terme conventionnels, la densité du béton cellulaire est liée à sa compacité et porosité.

I.3.7.3. Légèreté

Le Béton cellulaire présente un poids léger par, rapport aux autres matériaux de construction. Cette propriété donne l'avantage d'un transport et d'une construction plus facile. Sa légèreté permet une économie de masse sur les structures et les fondations [29]



Figure I.12 : Légèreté d'un béton cellulaire

I.3.7.4. Résistance à la compression :

La résistance à la compression du béton cellulaire augmentée avec une augmentation de la densité [27,31]. La valeur moyenne des résistances mécanique utilisant des éprouvettes cubiques de densité sèche de 400 kg/m³ a été rapportée égale environ 2 MPa ; pour une densité sèche de 700 kg/m³, elle a été rapporté à environ 6 MPa[24]. Un autre rapport a montré que pour une gamme de densité de 500 à 700 la résistance à la compression était de 2 à 4 MPa[32]. L'autoclavage améliore les résistances mécaniques d'une façon significative sous des températures et pressions élevées ce qui donne une forme stable de la tobermorite. La résistance mécanique du **BCNA** augmente 30-80% entre 28 jours et 6 mois et marginalement au-delà de cette période une partie de cette augmentation est attribué au processus de carbonatation. Avec le contenu de l'humidité de 5 et 10%, la résistance compressive est réduite environ 20 et 25% respectivement.

La résistance à la compression augmente en fonction de la masse volumique du béton cellulaire, Les cellules sont plus petites dans un béton cellulaire de forte densité, ce qui accroît la largeur de leur paroi, et par conséquent leur résistance. [24]

ρ kg/m ³	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
R _c MPa	3.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0

Tableau I.10 : la Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité.

I.3.7.5. La résistance à la traction :

La résistance à la traction du béton cellulaire est normalement égale 1/6 à 1/4 de la résistance à la compression. Un gradient d'humidité dans l'échantillon de test a un grand effet sur le résultat de test de la résistance à la traction. La mesure de cette propriété est encore plus sensible pour les conditions de test que la mesure de la résistance à la compression [33]. Pour le béton cellulaire, la résistance caractéristique à la traction pure représente 12% de la résistance en compression.

($R_t = 0,12 R_c$). La résistance caractéristique à la traction par flexion est de 22% de la résistance en compression : $R_t = 0,22 R_c$

I.3.7.6. Résistance aux agents chimiques

La résistance aux agents chimiques du béton cellulaire est similaire à celle du béton lourd. L'un et l'autre résistent toutefois moins bien aux acides puissants que l'on ne trouve habituellement pas en habitation ou en construction industrielle. Grâce à son alcalinité élevée, le béton cellulaire résiste aux pluies acides. Seuls quelques mm peuvent être légèrement altérés [16].

I.3.7.7. Résistance au gel et dégel

En général, les cycles gel et dégel ne causent pas de dégâts au béton cellulaire. Uniquement pour quelques constructions spéciales, des précautions doivent être prises, par exemple, la construction de chambres froides. En général, les matériaux poreux ne résistent pas au gel au-dessus d'une teneur en humidité critique. Ceci est le cas tant pour le béton lourd que pour le béton cellulaire. Le seuil d'humidité critique pour un béton cellulaire, type C4 n'est atteint qu'au taux de 45% du volume [16].

I.3.7.8. Le retrait au durcissement

Le retrait arrive en raison de la perte d'eau adsorbée du béton, et il est significatif dans le béton cellulaire à cause de sa haute porosité total (40-80%) et la surface spécifique de pores (au tour de $30 \text{ m}^2/\text{g}$) [24]. La diminution dans les tailles de pores, avec un pourcentage élevé des micropores augmente le retrait. La théorie de tension capillaire de retrait de matériaux de construction poreux affirme que l'eau dans les pores existe sous tension et ceci crée une force attractive entre les parois des pores [25]. Le retrait du béton cellulaire avec seulement le ciment comme liant est restitué plus important que cela produit avec la chaux ou le mélange (chaux ciment), le retrait du mélange est le moindre. Les spécimens durcis à l'air libre ont un retrait très élevé [34].

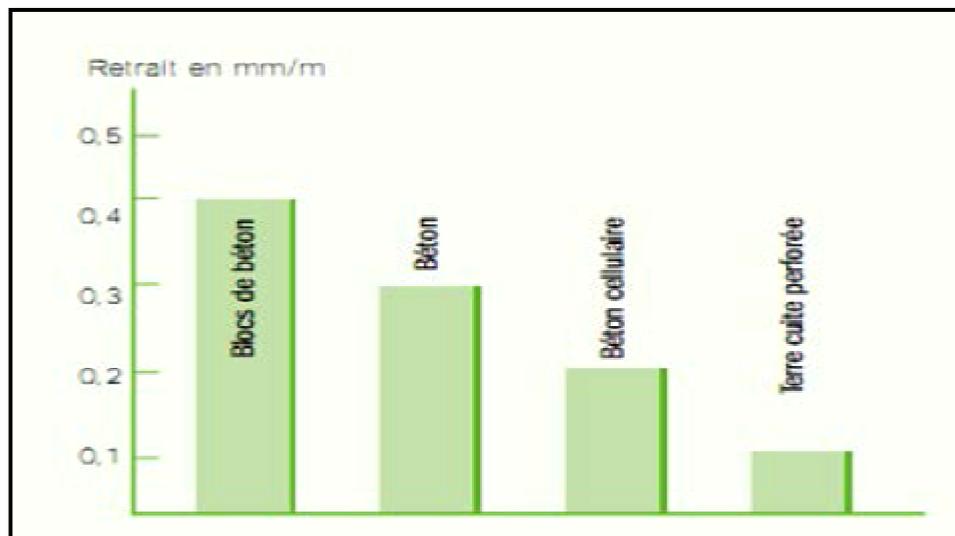


Figure I.13 : Comparaison de retrait dû au séchage pour différents matériaux [33].

I.3.7.9. Absorption d'eau et capillarité du béton cellulaire

Le béton cellulaire étant poreux, il y a une forte interaction entre l'eau, la vapeur d'eau et le système poreux et il existe divers mécanismes de transport d'humidité. Dans les conditions normales d'humidité, la migration d'humidité est principalement par la diffusion : avec un accroissement du taux d'humidité la migration est donc par capillarité [35]. La succion capillaire prédomine pour un élément en contact avec l'eau. La capillarité est importante pour le mouillage et le dessèchement des matériaux. La succion capillaire est lente dans le béton cellulaire comparé avec d'autres matériaux poreux comme les briques d'argile. Les phénomènes de transport d'humidité dans les matériaux poreux, en absorbant et transmettant l'eau par capillarité, ont été définis par une propriété facilement mesurable appelé la sportivité, qui est basé sur la théorie de flux non saturée.

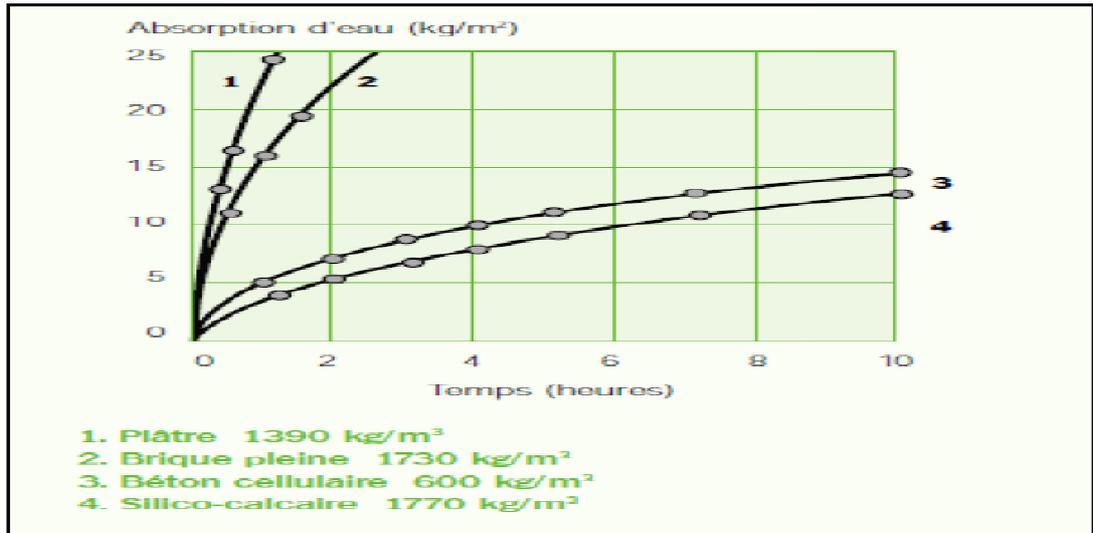


Figure I.14 : Absorption capillaire pour différents matériaux [33]

I.3.7.10. Propriété thermique

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplis d'air [33]. La conductivité thermique λ , du béton cellulaire dépend principalement de sa densité. D'autres facteurs comme le contenu d'humidité, le niveau de température, la structure poreuse et des matières premières influent aussi la conductivité thermique [35]. La relation entre la conductivité thermique et la densité des spécimens secs d'un BCA est montré dans la figure I.15. [37]. Comme attendu, la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité [38]. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire

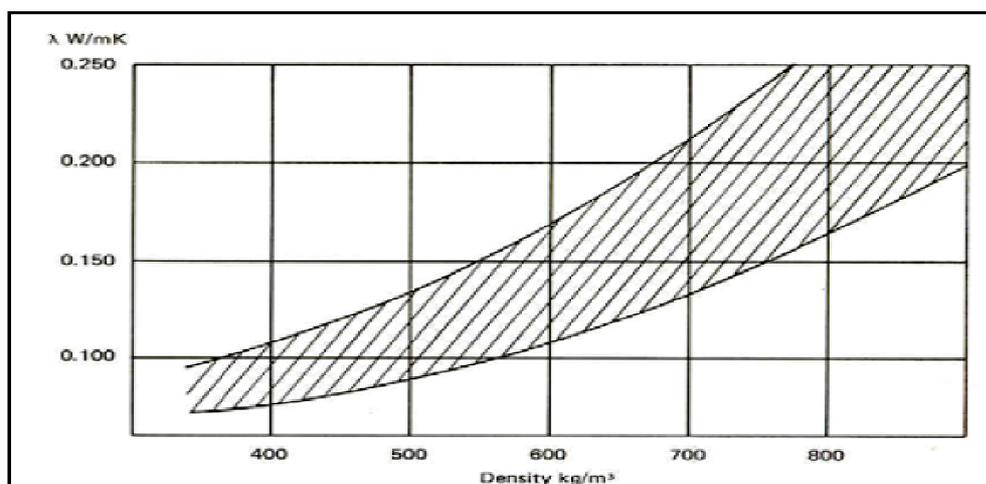


Figure I.15 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton Cellulaire. [37]

Grâce aux bulles d'air emprisonnées dans ses cellules, le béton cellulaire acquiert des propriétés **d'isolation thermique** significatives. Il assure une ambiance agréable à l'intérieur Par l'élimination des ponts thermiques.

Le béton cellulaire absorbe l'augmentation de la température extérieure durant le jour et restitue l'énergie accumulée pendant la nuit.

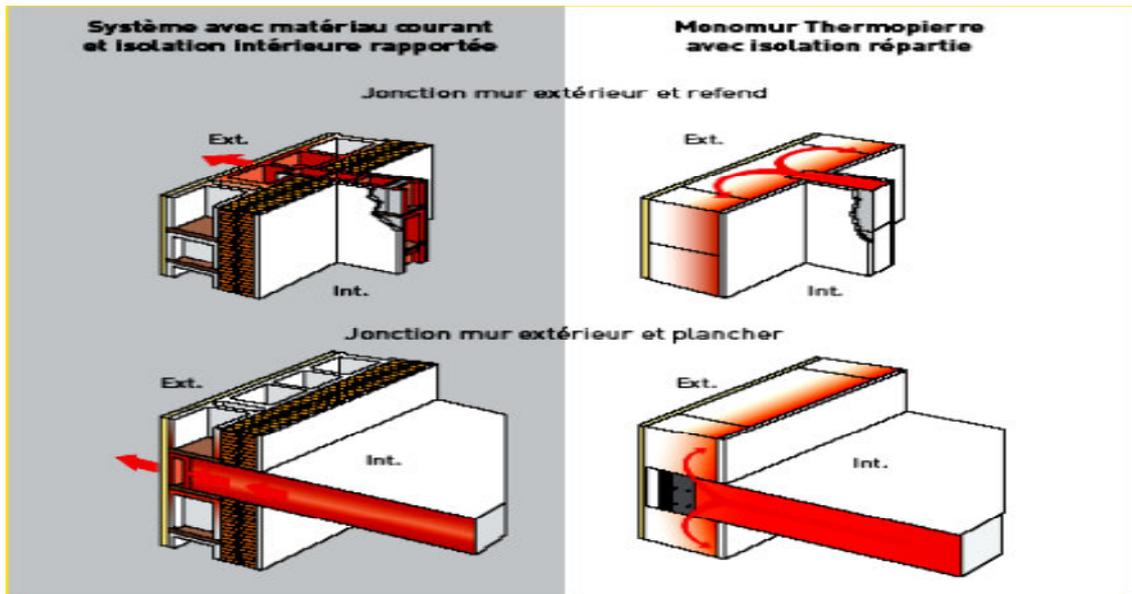


Figure I.16 : System d'isolation répartie [39]

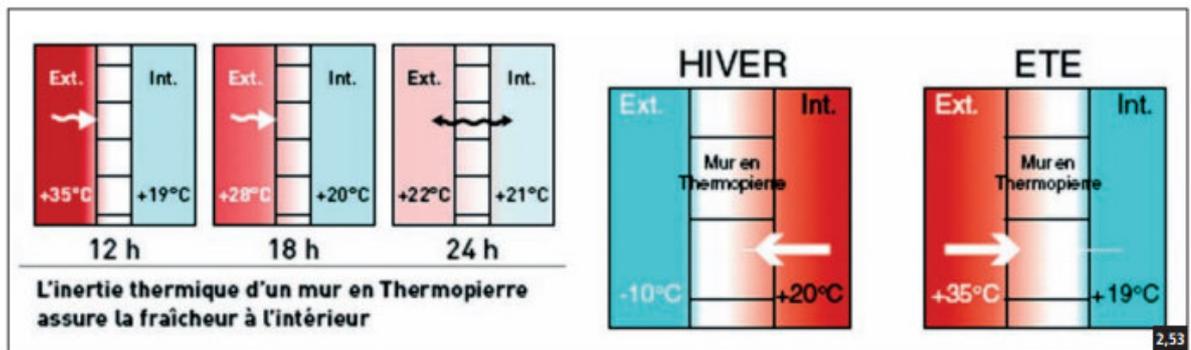


Figure I.17 : Température en équilibre quasi-constant. [39]

I.3.7.11. Résistance au feu

Le béton cellulaire est une garantie de sécurité contre le feu. Grâce à son matériau minéral naturel, il est incombustible et coupe feu de 1 heure à 6 heures selon l'épaisseur. Il assure une protection exceptionnelle et remarquable contre le feu tant pour les bâtiments industriels que pour

L'habitation individuelle sans dégagement des fumées ou gaz toxiques.

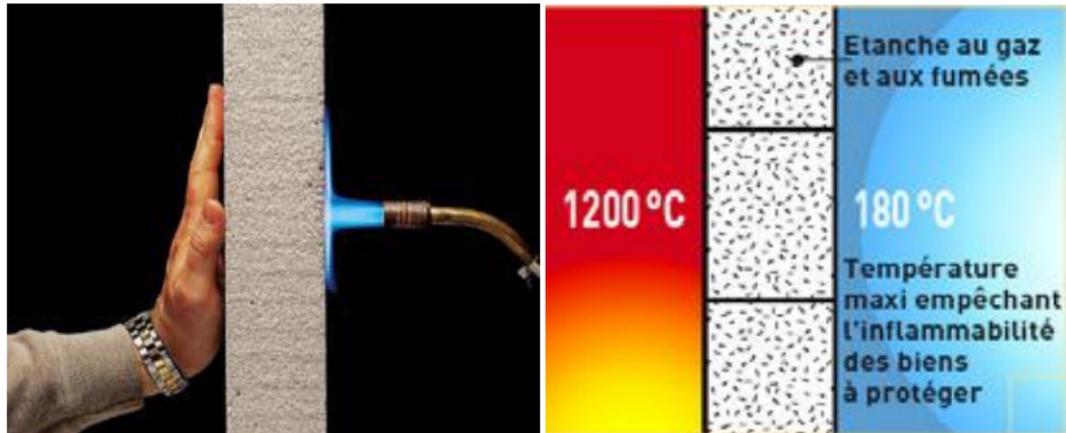


Figure I.18 : La résistance au feu

I.3.7.12. Affaiblissement acoustique

Le Béton Cellulaire répond aux exigences de la nouvelle réglementation acoustique en vigueur, celui-ci permet une parfaite isolation phonique aussi bien pour les bruits intérieurs qu'extérieurs à l'habitation. [39]

I.3.8. Gamme de produits

I.3.8.1. les produits non arme

I.3.8.1.a. Les blocs

Destinés à la réalisation de murs extérieurs et de séparation, de murs de remplissage, de sous-sol et de murs coupe-feu.



Figure I.19 : Les blocs de béton cellulaire

I.3.8.1.b. Les carreaux :

Les carreaux sont destinés à la réalisation de cloisons massives de séparation ou en doublage de mur, en aménagement intérieur tant en neuf qu'en rénovation. [39]

I.3.8.1.c. Les linteaux :

Les linteaux sont des éléments armés préfabriqués de dimensions standard. Ils complètent et

améliorent les qualités thermiques en supprimant les ponts thermiques. Leur utilisation garantit une totale sécurité de résistance. Leur mise en œuvre s'effectue par une simple pose collée, sans étai ni coffrage et sans arrêt du chantier.

I.3.8.2. Élément arme

I.3.8.2.a. Dalles de bardage

Les dalles de mur sont généralement utilisées en combinaison avec une ossature en béton, en acier ou en bois. La mise en œuvre peut être horizontale ou verticale. Elles sont placées devant ou entre les colonnes. Elles sont autoportantes et superposables jusqu'à des hauteurs usuelles en constructions industrielles. Certains éléments peuvent être spécialement renforcés pour reprendre des charges particulières (par exemple : allèges, linteaux, frontons, silos à pomme de terre...).

I.3.8.2.b. Dalles de toiture

Les dalles de toiture se posent sur maçonnerie portante, sur ossature béton, acier ou bois. Elles sont autoportantes, thermiquement très isolantes, reprennent des surcharges et peuvent participer au contreventement de la structure. [40]

I.3.8.2.c. Dalles de plancher

La conception des dalles de plancher est calquée sur celle des dalles pour toiture. Toutefois, les armatures sont calculées pour reprendre des surcharges plus élevées.

I.3.9. Les avantages de béton cellulaire

- Le Béton Cellulaire permet de réaliser des économies, notamment en gain de temps sur les chantiers grâce à sa conception. Ses pouvoirs d'isolation phonique et thermique vous font faire des économies sur votre consommation d'énergie. La résistance du Béton Cellulaire dans le temps permet de ne pas engendrer de travaux de rénovation (contrairement aux autres systèmes de construction).
- Le Béton Cellulaire est idéal pour les ouvrages réalisés en zones sismiques, grâce notamment à la légèreté des matériaux et à son système de pose collé mince. Toutefois, pour une bonne isolation, il est recommandé une homogénéité de la construction en utilisant les mêmes matériaux de la cave au grenier, sans oublier de respecter les règles en vigueur concernant les zones sismiques.
- Les matières premières nécessaires à la fabrication de béton cellulaire existent en abondance dans la nature et le béton cellulaire n'en abuse pas, puisque 500 kg à peine suffisent à produire 1m³ de produit fini.

- Grâce à la légèreté du matériau, le transport est réduit tant pour ce qui concerne les matières premières que pour les livraisons sur le chantier.
- Le Béton Cellulaire respecte l'environnement. Il ne contient ni matière toxique, ni élément radioactif. Il est l'ami de la nature tant lors de sa production que lors de son utilisation dans les travaux du bâtiment, il assure ne pollue pas l'atmosphère et l'eau.

A decorative border composed of elegant, swirling black lines, small black dots, and stylized five-petaled flowers. The border frames the central text on all four sides, with the top and bottom sections being more prominent.

Chapitre II
Généralité sur les
matières premières

II.1. Les ajouts minéraux :

II.1.1. Introduction :

Les différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux. Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux [41].

II.1.1.2. Classification des ajouts minéraux :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (II.1) ci-dessous. [42]

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, , terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

Tableau II.1 : Classification des ajouts selon leur réactivité. [42]

II.1.1.2.1. Les principaux ajouts minéraux actifs :

La pouzzolane et le laitier sont des matériaux à grande surface spécifique qui présentent des structures amorphes ; avec la chaux et en présence d'eau, ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique [42].

II.1.1.2.1. A. Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, coproduit de l'élaboration de la fonte, est constitué par la partie non ferreuse du minerai (la gangue), la cendre du coke et le fondant. [43]. Dès la construction des premiers hauts fourneaux se posa la question de l'évacuation et de l'utilisation du laitier. On l'employa tout naturellement, après refroidissement spontané et concassage pour la confection de remblais et des voies d'accès aux usines. Le matériau ainsi obtenu est un produit cristallisé présentant de **bonnes propriétés mécaniques** qui l'orientèrent vers la confection des voies de communication (route, ballast de chemin de fer) et qui reçut même quelques applications dans le bâtiment. Pour accélérer le refroidissement, le laitier en fusion fût déversé dans **des fosses contenant de grandes quantités d'eau**. On obtenait ainsi un produit fragmenté (d'où le **nom de laitier « granulé »**), ce qui facilitait grandement la reprise et évitait l'onéreuse opération de concassage.

La propriété des mélanges de laitier granulé moulu et de chaux de faire prise en présence de l'eau fut découverte par Langen en 1862 et est à l'origine de son emploi dans les ciments et bétons. Le premier brevet précisant les conditions de préparation des ciments de laitier fut déposé par Passow en 1902. Dès cette époque, on s'aperçut que les propriétés hydrauliques étaient en relation avec la structure vitreuse qui caractérise le laitier granulé et qui est due à l'effet de trempe [43].

II.1.1.2.1. A.1. Obtention du laitier granulé

La première étape dans la production d'acier est l'obtention de fonte. Le fer est naturellement contenu dans le minerai de fer, dont la teneur en oxydes peut atteindre 60 %. Ce minerai, combiné à du coke comme combustible et à de la chaux comme fondant, est alimenté dans un haut fourneau, sorte **de grand four vertical dans la partie basse duquel sont soufflés de larges volumes d'air chaud**. Ce procédé fonctionne en continu, la colonne de matières brutes descendant au fur et à mesure que le fer est extrait du minerai et s'accumule au fond du haut fourneau, recouvert par une couche de laitier plus léger. Ce laitier est une roche liquide (1 500 °C environ) composée **des parties non métalliques**

du minerai combinées à la chaux. Le fer fondu (sous forme de fonte) et le laitier, tous deux en fusion, sont périodiquement soutirés du haut-fourneau. Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 à 300 kg de laitier. [44].

✓ **Production du laitier de haut fourneau granulé**

Lors du soutirage, après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier est dirigé vers un dispositif dans lequel il va subir un arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) destiné à le vitrifier. L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément du laitier vitrifié. Ce dispositif s'appelle un granulateur et le laitier ainsi vitrifié, laitier granulé. Par la suite, le laitier est finement moulu dans un broyeur pour permettre son utilisation dans les ciments ou les bétons. [44]

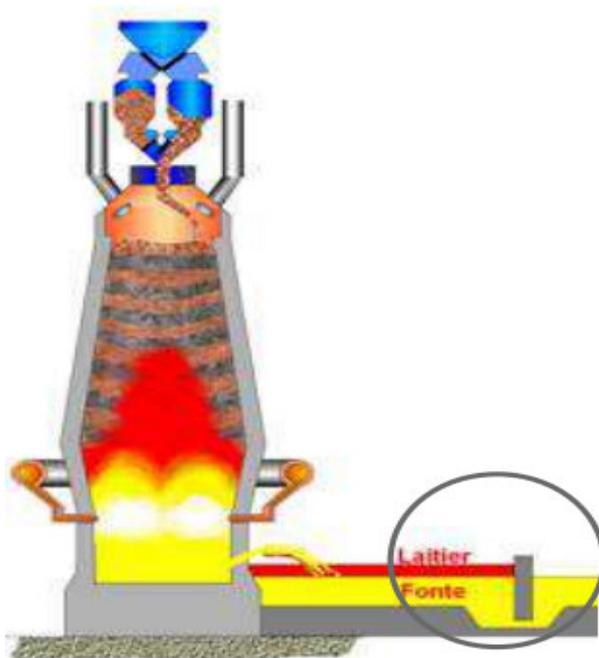


Figure II.1: Haute fourneau de laitier 2000c°

II.2.1.A.2. Les caractéristique de laitier de haut fourneau

Une des caractéristiques les plus importantes du laitier est sa réactivité ou hydraulicité. Cette prise hydraulique, en présence d'eau et d'un agent basique, est très peu exothermique, est lente et permet d'atteindre de très hautes performances sur une longue durée. Le laitier peut entrer dans la composition du ciment comme additif pour sa

fonction de liant hydraulique, mais il peut également remplacer une partie du clinker ce qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le laitier est également un sous-produit d'une réaction à faible valeur ajoutée. Le producteur essaie de le valoriser au maximum, et vu les propriétés ici du laitier, ce produit peut facilement entrer dans l'industrie cimentière. Encore une fois, pour cette raison, nous ne tiendrons pas compte de la pollution liée à sa production. Seul son transport sera comptabilisé. [44].

➤ Caractéristiques chimiques

Les laitiers HF contiennent essentiellement quatre éléments dont l'expression conventionnelle en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres constituants sont des oxydes secondaires tels que FeO et MnO ainsi que des composés sulfurés. Ils ne contiennent ni argile et matière organique. [45].

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%		0.15

Tableau II.2 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau. [45].

II.1.1.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes [N F P 18- 305].

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. [46], [47]

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les

propriétés physiques du ciment portland et le béton (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau et durabilité).

Parmi ces additifs on distingue les fillers de marbre et la poussière.

II.1.1.2.2.1 Fillers de calcaires :

Un filler est un matériau très finement broyé à une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland, qui, en raison de ses propriétés physiques, a un effet bénéfique sur certaines propriétés du béton, telles que la maniabilité, la masse volumique, la perméabilité, la capillarité, le ressuage ou la tendance à la fissuration. [48].

Les fillers sont en général chimiquement inertes, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, le même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation.

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes).

Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.



Figure II.2 : Filler calcaire

II.1.1.2.2.1.1. L'effet filler :

On explique parfois à tort l'activité d'une addition **calcaire** par ce que l'on appelle "**l'effet filler**"; intuitivement, on imagine que les grains fins de la poudre se glissent entre les grains plus gros (ceux du sable), qu'ils augmentent ainsi la compacité et, par conséquent, la résistance. Or, même si les grains fins de l'addition participent à l'optimisation de la courbe granulométrie, cela n'a pas de conséquence sur la valeur de l'indice d'activité tel qu'il est défini. Une caractéristique importante du béton frais est sa porosité $e+v$ (somme du dosage en eau nécessaire e pour avoir cette consistance et de la teneur en air occlus v dans le béton, après mise en place). Si l'on fait varier le dosage en éléments fins du béton (tous les grains inférieurs à 63 micromètres, qu'ils appartiennent au ciment, à l'addition ou aux granulats), on observe l'existence d'un dosage optimal pour lequel la porosité du béton frais est minimale.

Pour un béton dont la dimension maximale du plus gros granulat est de 20mm, ce dosage optimal en éléments fins est de l'ordre de **350 kg/m³**. [49]

Il n'y a aucune raison pour que l'effet filler soit considéré comme une propriété des additions puisque c'est, en fait, une propriété, à consistance constante, de la granulométrie optimale des bétons. Cet optimum granulométrique et, tout particulièrement, l'optimum en éléments fins, a bien d'autres effets bénéfiques sur le comportement du béton frais : il limite le ressuage, augmente la cohésion, facilite le démoulage immédiat.

II.1.1.2.2.1.2. 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 écologiques. . [41].

❖ Intérêt du point de vue technique

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration. . [42].

❖ Intérêt du point de vue économique

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland. . [42].

❖ Intérêt du point de vue environnemental

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. . [42].

II.1.1.2.2.1.3. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.

II.2. La chaux**II.2.1.historique**

On peut supposer que les hommes de la préhistoire ont découvert la chaux à partir du Moment où ils ont maîtrisés le feu.

Des pierres calcaire entourant un foyer, le feu brûlant nuit et jour et ces pierres ont fini par se décarbonate. Plus tard, la pluie sur un foyer éteint et la chaux vive s'est hydraté . . . cts.

Les premières traces de la fabrication organisée de la chaux remontent à dix mille ans avant J.C. en Mésopotamie. La plupart des peuples de l'antiquité connaissaient la chaux: Égyptiens, Étrusques, Phéniciens, Grecs, Romains. Elle était utilisée comme liant dans les constructions et servait dans la fabrication d'enduits ou la réalisation de fresques.

Les Romains étaient parvenus à améliorer la qualité de leur mortier de chaux en y ajoutant de la brique pilée. Ils l'utilisaient également pour assécher les sols humides ou pour des applications chimiques. [49]

Les civilisations non méditerranéennes connaissaient également l'usage de la chaux tels que les Incas (Ils ajoutaient du sang d'animaux à leur mortier afin d'en améliorer les caractéristiques) et les Mayas pour leurs constructions, de même que les Chinois lors de l'édification de la Grande Muraille.

Il y a près de 5000 ans, les moines du Tibet stabilisaient les sols argileux à la chaux avant d'y édifier leurs temples. Au Moyen Age, les alchimistes découvrent ses propriétés caustiques et créent un savon à base de cendre de bois.

Au 18^{ème} siècle, l'anglais Black et le français Lavoisier décrivent les réactions chimiques se produisant lors de son élaboration puis les savants Vicat, Debray et Le Chatelier compléteront leurs travaux au cours du siècle suivant et feront une approche de ses applications possibles.

La naissance de l'ère industrielle, avec le développement de la sidérurgie, va entraîner une demande considérable en chaux.

Dès lors, ses moyens de production vont sans cesse se perfectionner, ses critères de qualité seront de plus en plus précis de même que ses applications qui vont se diversifier sans cesse . . . [49]

II.2.2. Définitions

La chaux est, d'une façon générale, obtenue par calcination d'un calcaire à une température supérieure à 900°C. Le carbonate de calcium, constituant essentiel du calcaire, se dissocie à cette température pour donner de l'oxyde de calcium (**Chaux vive**) et du gaz carbonique : [41]



Les chaux grasses obtenues à partir d'un calcaire très pur doivent leur nom à l'onctuosité qu'elles donnent aux mortiers, lorsqu'elles sont utilisées en construction. Autrefois avec des **calcaires un peu moins purs** on fabriquait aussi des chaux maigres. Lorsqu'elles sont utilisées en construction **les chaux grasses et les chaux maigres** font prise en se décarbonatant en contact du gaz carbonique de l'air. Elles sont donc appelées **chaux aériennes**. Elles peuvent **être vives** ou, comme nous le verrons plus loin, ou **éteintes**. **Les oxydes de calcium et de magnésium réagissent** avec **l'eau** pour donner des hydroxydes de calcium et de magnésium. Cette réaction est **appelée extinction** ou **hydratation**. [49]



Chaux vive + l'eau → chaux éteinte

Oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium sont des produits basiques.

II.2.3. Structures cristallines

L'oxyde de calcium, pur, cristallise dans le système cubique (maille élémentaire: [50] $a = 4.8 \text{ \AA}$). Les particules de chaux éteinte sont microcristallines ou de taille colloïdale, et peuvent cristalliser dans le système hexagonal ($a = 3.58 \text{ \AA}$, $c = 4.9 \text{ \AA}$).

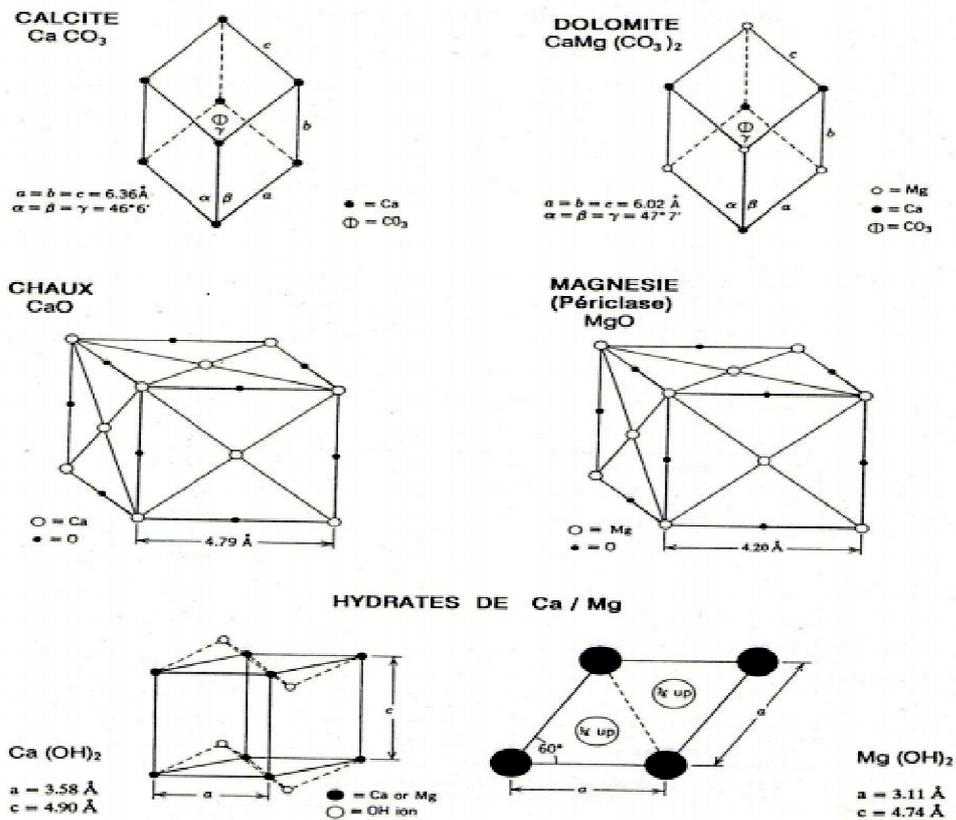


Figure II. 3 -Mailles élémentaires des principaux carbonates, oxydes et hydroxydes de Ca et de Mg

II.2.4. les différents types de chaux

Pour commencer, la chaux est issue de roches calcaires (carbonate de calcium) que l'on cuit au four entre 900 et 1300°C.

A ce stade, la chaux est appelée chaux vive. Composée d'oxyde de calcium, elle dégage de la chaleur au contact de l'eau. La roche n'ayant pas été pilée, elle se présente sous différents états granulaires, de la roche à la poudre. Son utilisation est dangereuse, et il est impératif de porter les protections d'usage lors de sa manipulation (gants, lunettes, manches longues). En raison de cette dangerosité, elle est pratiquement introuvable pour le particulier.

Ensuite, on va éteindre cette chaux avec de l'eau. Les chaux éteintes sont à l'état de poudre ou de pâte. Elles se composent d'hydroxyde de calcium. Les chaux en poudre ont été éteintes de façon contrôlée, avec juste la quantité d'eau nécessaire. Les chaux en pâte sont éteintes en plaçant la chaux vive dans une fosse, et en remplissant la fosse d'eau jusqu'à obtention de la pâte souhaitée. [51]

II.2.4.1. La chaux vive

C'est le produit direct de la combustion du calcaire, Le principal constituant de la chaux vive est l'oxyde de calcium, qui a pour formule CaO . Après apport d'eau, elle devient la chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utilisée dans le bâtiment pour la maçonnerie et la réalisation d'enduits .

La chaux vive est un produit potentiellement dangereux, essentiellement employé dans l'industrie et l'agriculture. Hydrophile, elle est utilisée pour assécher, détruire les matières organiques riches en eau. [51]

II.2.4.2. Les chaux aérienne

La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée en particulier d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et on la dit aérienne car elle réagit avec le CO_2 de l'air. Ces chaux font leur prise avec le gaz carbonique contenu dans l'air. Elles sont classées en fonction de leur teneur en oxyde de calcium et magnésie. Plus la teneur est élevée, plus la chaux est grasse et pure. Ce type de chaux donne des mortiers très onctueux utilisés surtout pour les enduits fins et la décoration. . [51]

Les chaux aérienne peuvent se conserver très longtemps dans l'eau (chaux de Marmara).

II.2.4.3. Les chaux hydraulique naturelle

On les appelle souvent chaux maigres. Elles sont constituées en plus de silicate et d'aluminate car elle provient à l'origine de calcaire moins pur. Elle est désignée

hydraulique parce qu'elle durcit en présence d'eau. La teneur en argile leur permet de faire leur prise plus rapidement. Une fois la prise à l'eau terminée, elles poursuivent leur prise de manière aérienne. Lorsque la prise aérienne est terminée, l'enduit peut faire apparaître une chaux libre qui referra une prise à l'eau. La réaction de la chaux est quasiment infinie, certains ouvrages réalisés à la chaux par les Romains continuent de faire leur prise actuellement. Elles contiennent de 12 à 50% de chaux libre (carbonate de calcium pur). C'est à la cuisson que l'on détermine le type de chaux hydraulique que l'on va réaliser. Plus la température est élevée et le taux de silice important, moins il y aura de chaux libre, et plus la chaux sera hydraulique.

On utilise les chaux hydrauliques pour réaliser les éléments de gros œuvre (dalles, chapes, corps d'enduit et enduits extérieurs). . [51]

II.2.4.4. Les chaux avec liants recomposé

Il s'agit de chaux hydrauliques auxquelles on ajoute, après cuisson, des éléments pouzzolaniques (issus des volcans). Le pourcentage de ces éléments ajoutés peut aller jusqu'à 20% après cuisson. Il existe certaines chaux auxquelles on ajoute du ciment. L'intérêt de cette adjonction, réside dans la modification des propriétés mécaniques et des performances de la chaux. Ainsi, il est possible de formuler des chaux pouvant prendre sous l'eau, grâce à l'adjonction de tuf ou de trac volcanique. [51]

II.2.4.5. Chaux grise ou chaux artificielle

Attention, il ne s'agit pas de chaux. Ces produits sont en fait constitués de ciment amaigri réalisé avec des déchets inertes broyés. La chaux artificielle était auparavant appelée ciment à maçonner. [51]

II.2.5. Fabrication de la chaux

II.2.5.1. La préparation du calcaire

Avant d'être cuit, le calcaire doit être préparé. La première opération consiste à forer des trous à intervalles réguliers. Ces trous sont ensuite remplis d'explosif, puis on procède au tir de mine. Une fois le tir effectué, il subsiste au pied du front de taille des pierres d'une grosseur allant de quelque centimètre à un mètre cube. [50]

Le calcaire est déposé dans des bennes par des pelles mécaniques ou déchargeuses puis transporté vers un concasseur qui réduit sa granulométrie. Il est ensuite criblé.

Il en résulte alors trois produits de granulométries différentes :

- Les 0 à 30 mm pouvant être commercialisés en l'état ou réduit en poudre pour des applications spécifiques. Ils sont destinés à être cuits dans des fours rotatifs.
- Les 30 à 60 mm pour un traitement similaire ou pour leur cuisson en four vertical.
- Les 60 à 200 mm également pour cuisson en four vertical.

II.2.5.2. La cuisson

Il est nécessaire de porter le calcaire à une température suffisamment élevée pour le transformer en chaux vive. Pour ce faire, tout type de combustible peut être utilisé.

- Le gaz naturel (méthane), c'est le plus commode et le plus utilisé.
- Le plus ancien, le bois. Il est employé en buches mélangées à la pierre, ou réduit en sciure, dans les fours modernes.
- Le fuel lourd et ses résidus plus épais, également pour les fours modernes.

Le charbon, qui a pleinement participé à la révolution industrielle, est mélangé au calcaire ou injecté sous forme pulvérulente.

Après cuisson, la chaux vive à garder le même aspect physique, mais sa masse volumique apparente est devenue plus faible. La chaux vive ainsi obtenue a de nombreuses applications : En agriculture, pour la construction de routes ou dans l'industrie. Elle est employée en l'état, granulée ou broyée. [41]

II.2.6. Les propriétés de la chaux aériennes

II.2.6.1. Propriétés physico-chimiques

Ces propriétés découlent directement de la constitution du calcaire de départ et de la température à laquelle il a été calciné. Nous rappellerons succinctement les principales d'entre elles.

II.2.6.2. Réactivité à l'eau et extinction de la chaux vive

L'oxyde de calcium donne à la chaux vive un caractère hydrophile important. En présence d'eau, la chaux vive (en roche ou sous forme de poudre) devient instable et se transforme aisément en hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou chaux éteinte qui, en conditions et quantités d'eau contrôlées, s'obtient sous forme solide. De plus, cette réaction d'hydratation est fortement exothermique (1155 kJ/kg de CaO).

La réactivité de la chaux vive est une mesure de la vitesse à laquelle la chaux vive réagit en présence d'eau. Le suivi de la production de chaleur au cours du temps est, par ailleurs, mis à profit pour tester.

Chaque type de chaux possède sa réactivité propre qui dépend à son tour des spécifications d'application et du procédé de fabrication.

La réactivité de la chaux dépend de différents paramètres liés aux matières premières et au procédé employés. Ces paramètres sont :

- La température et la durée de cuisson.
- La structure cristalline du calcaire.
- Les impuretés présentes dans le calcaire.
- Le type de four et de combustible.

II.2.6.3. Solubilité et pH

Comme la plupart des sels de calcium, la chaux est **peu soluble dans l'eau** (un peu plus de 1g/litre) et sa solubilité décroît avec la température. Si l'on mélange chaux et eau de façon à dépasser le seuil de solubilité, la chaux en excès passe en suspension pour devenir **de l'eau de chaux puis « lait de chaux »** pour des concentrations **plus élevées (30 à 150 g/l de chaux éteinte)**. **Lorsque cette teneur est augmentée de 40 à 60 %, on obtient une pâte malléable constituant un excellent mortier pour l'industrie du bâtiment** et pour les façonnages en sculpture. [50]

II.2.6.4. Flocculation, réactions pouzzolaniques

La chaux permet la coagulation et la précipitation de nombreuses matières organiques en suspension dans un liquide, dans une réaction de flocculation. Ce caractère intervient pour concentrer des boues usées, traiter des sols argileux en industrie routière ou des résidus pétroliers comme les « marées noires » ou encore, lorsqu'il s'agit de donner une structure grumeleuse à des produits organiques, pour mieux les séparer ou les manipuler ;

Elle effectue des réactions pouzzolaniques avec plusieurs matériaux comme les basaltes, l'argile ou les cendres, en formant avec eux les silicates ou aluminates de calcium qui durcissent comme un ciment (assises de chaussées, traitement de sols, réactions avec le laitier des hauts fourneaux...) [50]

II.2.7. Les applications de la chaux dans la protection de l'environnement

II.2.7.1. Origine et description de la chaux éteinte (le déchet industriel)

La chaux éteinte humide est un sous produit du processus de fabrication de l'acétylène à partir de carbure de calcium et d'eau. Ce processus industriel a longtemps été le seul utilisé avant que les prix du charbon et de l'électricité, toujours croissants, ne poussent les industriels de la chimie à favoriser une autre technique de production basée sur le gaz naturel et le naphta.

Anciennement donc, l'acétylène était produit par réaction entre le carbure de calcium (CaC_2) et l'eau (H_2O), le carbure de calcium étant lui-même produit à partir de coke (C) et de chaux vive (CaO).

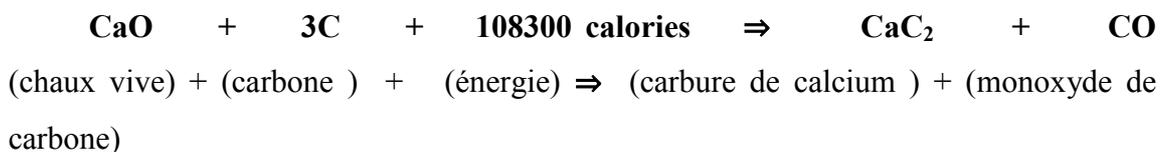
La distillation de la houille ou du charbon à haute température ($1100 - 1300^\circ\text{C}$) permet d'obtenir le coke, Il se composait d'environ 90 % de carbone, 10 % de matières minérales, et de faibles quantités d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de soufre.

Le coke destiné à la fabrication du carbure est un coke plus léger et plus poreux que celui utilisé dans la métallurgie. Il contient des composés volatils, de l'eau et des cendres.

La chaux vive et le coke étaient finement broyés puis mélangés, Le mélange obtenu passait dans un four où il était soumis à une réaction électrothermique très élevée portant le mélange coke/chaux à des températures de l'ordre de $2000 - 2500^\circ\text{C}$.

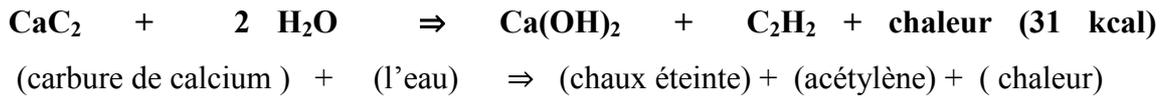
Dans la réaction, le coke représente le réducteur, et la chaux vive, qui comporte un atome d'oxygène, est l'oxydant. . [52]

La réaction suivante se produisait :



Le mélange chaux vive coke en fusion est ensuite versé dans une cuve de refroidissement et le carbure de calcium ainsi produit était broyé et criblé suivant l'usage souhaité.

Pour produire de l'acétylène à partir de carbure de calcium, celui-ci doit être mis en présence d'eau selon 2 procédés possibles. . [52]



L'atome de calcium du carbure décompose l'eau (H₂O) (on parle de procédé humide) dont il fixe l'oxygène pour donner l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) sera récupéré sous forme de pâte ou de boue de chaux blanche en surface du bloc., tandis que le carbone se combine à l'hydrogène pour produire de l'acétylène gazeux.

En se basant sur cette équation, les chimistes calculent qu'un 1kg de carbure de calcium demande 560 g d'eau pour se transformer en 350 litres d'acétylène et 1160 g de chaux hydratée (chaux éteinte). La réaction s'accompagne du dégagement d'une quantité de chaleur égale à 430 kilocalories [52]

Le deuxième procédé demande une quantité d'eau moindre (on parle de technique « production sèche ») et débouche sur la production d'acétylène gazeux et d'hydroxyde de calcium récupéré sous forme d'une poudre sèche et fluide.

Dans le cas présent, la production d'acétylène a été réalisée par voie humide et les boues d'hydroxyde de calcium étaient rejetées dans des bassins de décantation. Le fait même que l'hydroxyde de calcium soit stocké dans un milieu humide et compact a eu pour conséquence l'absence de carbonatation de la chaux en profondeur. Ainsi, bien que la production d'acétylène n'ait plus cours depuis plus de 30 ans, seule la couche de surface présente **une carbonatation** de l'hydroxyde de calcium en carbonate de calcium (CaCO₃).

L'hydroxyde de calcium extrait des anciens de bassins de décantation a été étudié en effectuant des forages à travers toute l'épaisseur du produit. Il en ressort une homogénéité remarquable du produit, Ce produit est considéré comme **un déchet industriel**. [52]

II.2.7.1.1. Récupération de l'eau du lait de chaux

De la fabrication de l'acétylène, on obtient comme sous-produit des quantités considérables de lait de chaux, représentant un volume sensiblement double de celui du carbure de calcium frais. Ces boues ont un aspect blanc pur, gris blanc ou gris cendré, selon les impuretés qui se trouve (Al₂O₃, SiO₂, MgO, Fe₂O₃) découlant du mode de fabrication du carbure de calcium. Donc, on entend par lait de chaux une suspension de particules d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ en milieu aqueux. . [53]

L'appellation de lait de chaux est utilisée lorsque la concentration en solide ou le rapport chaux/eau est supérieur à la solubilité de l'hydroxyde de calcium (1,35 g/L à 0°C) et inférieur à 300 g/L pour laquelle le lait de chaux devient visqueux. Cette dernière purgée en permanence et stockée dans une fosse de décantation).

L'eau de chaux issue d'eau de débordement de la fosse de décantation est stockée dans des fosses à eau de chaux [53] Cette eau est réutilisée dans le procédé pour la production et le lavage de l'acétylène à un débit de 3,1 m³/h et une température de 30°C

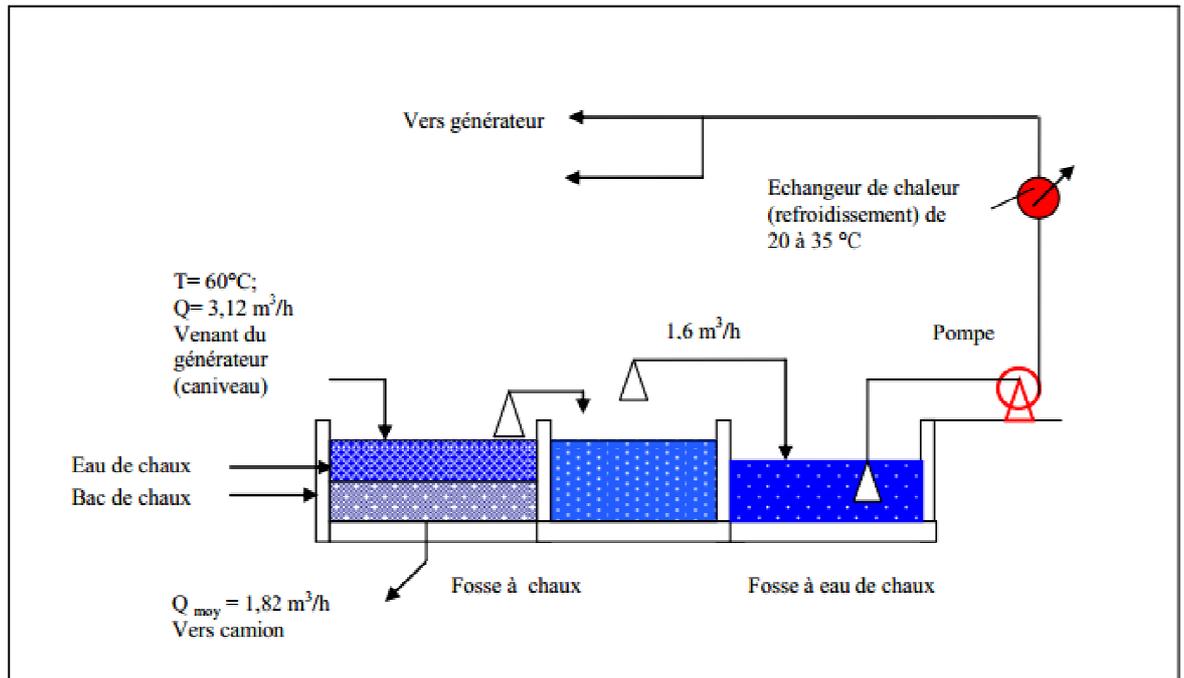


Figure II.4 : Schéma de principe de récupération de l'eau de chaux.

II.2.7.2. Analyse environnementale de la chaux

Un échantillon composite réalisé initialement sur l'entièreté du stock a permis de procéder à une évaluation qualitative du produit. Le tableau ci-dessous reprend les résultats ainsi qu'une comparaison avec le seuil limite en deçà duquel une terre est considérée comme non contaminée au sens de l'arrêté du gouvernement wallon du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets (AGW). Les seuils limites sont pondérés par la teneur en argile et en matière organique. Étant donné l'absence de ces deux éléments dans l'hydroxyde de calcium, la pondération est obtenue, conformément à l'AGW, en considérant une valeur minimale de 1 % pour l'argile et 1 % pour la matière organique. Ce tableau est cité juste comme exemple de la composition d'un déchet à base de chaux. [52]

Des traces métalliques en mg/ kg de matière sèche	Terres non contaminées Seuil limite	Hydroxyde de calcium humide issu de la production d'acétylène
Cadmium	0.85	< 0.05
Chrome	55.51	< 5
Cuivre	42.06	< 5
Nickel	30.77	< 5
plomb	61.38	< 5
Zinc	120.29	< 5
Arsenic	16.79	< 0.1
Mercuré	1.48	< 0.05
Benzène	0.2	< 0.05
Toluène	0.4	< 0.05
Ethylebenzène	0.6	< 0.05
Xylène	0.7	< 0.05
Styrène	0.2	< 0.05
Naphtalène	0.3	< 0.05
Phénanthrène	0.1	< 0.05

Tableau II.3 : Analyse environnementale de la chaux éteinte [52]

II.2.7.3. Utilisation de la chaux éteinte pour l'environnement

La fabrication d'acétylène consiste à faire réagir le carbure de calcium avec un excès d'eau. Un tel procédé conduit nécessairement à la production en parallèle de la chaux sous forme de lait de chaux. La quantité de ce sous-produit, considéré comme un déchet industriel, Le rejet de ce sous-produit à causer des effets écologiques néfastes.

Pour résoudre de ces problèmes il faut utiliser ces déchets dans le domaine de la protection de l'environnement, notamment pour le traitement des eaux, des fumées, des déchets urbains et industriels et dans le domaine de construction tel que la fabrication de béton cellulaire. [54]

II.2.7.3.1. Un liant pour bâtir et pour restaurer

L'utilisation de la chaux, dans le bâtiment comme matériau de construction, représente moins de 3 % de la production totale française de chaux aérienne ou magnésienne. Si l'on considère seulement la chaux sous sa forme éteinte, ce pourcentage correspond à un peu plus de 15 %.

Dans le cas de la brique silico-calcaire fabriquée à partir d'un mélange de chaux et de sable siliceux, compacté et étuvé. Il faut signaler également les bétons cellulaires (à base de mortier de sable, de chaux et/ou de ciment) qui résultent de l'action de la chaux sur de l'aluminium en poudre (dégagement de bulles de gaz).

En outre, la fabrication du verre, matériau de plus en plus présent dans l'architecture contemporaine, nécessite l'adjonction en faible quantité de calcaire (souvent sous forme de chaux) dans un mélange essentiellement à base de silice ou de quartz.

Depuis fort longtemps, la chaux a été employée pour stabiliser les routes et chemins. Son utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques physiques du sol. [54]

II.2.7.3.2. En agriculture

Elle sert à diminuer le pourcentage d'eau contenu dans un sol humide (chaux vive) et à flocculer les argiles du sol provoquant ainsi une réaction physico-chimique et à permettre le passage d'une structure plastique à une composition stable, grumeleuse (chaux vive ou chaux éteinte). Cet usage connaît ces dernières années une croissance justifiée par des critères environnementaux ; la chaux éteinte alors considérée comme « matériau naturel ». L'utilisation de chaux humide en stabilisation des sols en zones sèches ou tropicales n'est pas nouvelle.

Le lait de chaux est abondamment utilisé pour stabiliser des terres argileuses trop sèches. Le traitement d'un matériau dont la teneur en eau est proche de son optimum Proctor, pouvait donc être envisagé au moyen d'une chaux humide. [49]

Le traitement au moyen d'une chaux éteinte humide envisagé n'est pas une amélioration de sol dont le but est la modification de la consistance du matériau pour écarter le comportement plastique, Ce traitement est néanmoins nécessaire pour stabiliser le matériau dans le but de garantir une insensibilité à l'eau, une stabilité volumique et une durabilité des performances de la portance. [52]

II.2.7.3.3. Dans la sidérurgie et le traitement des métaux non ferreux

La sidérurgie est un domaine où l'emploi de la chaux intervient très largement. Elle a le pouvoir de réagir à haute température avec les impuretés des métaux et participe ainsi à leur affinage. La chaux est employée : Dans les convertisseurs produisant de l'acier, à partir de la fonte (fer et carbone). La chaux vive forme avec les impuretés (silicium, phosphore, soufre) des scories, plus faciles à isoler et à éliminer. Les procédés actuels demandent 60 à 70 kg par tonne d'acier. La chaux éteinte (en poudre ou en pâte) a plusieurs fonctions : comme lubrifiant pour le tréfilage de l'acier, comme revêtement dans les moules utilisés pour la fusion en lingots de l'acier (évite le collage), mais aussi comme protection temporaire contre la corrosion.

Dans le traitement des métaux non ferreux, où elle sert d'agent d'attaque de la bauxite, pour en extraire l'aluminium, par enlèvement du silicium.

Dans la préparation du magnésium par précipitation de la magnésie hydratée, à partir d'une solution de chlorure de magnésium. Dans la séparation par flottation de différents sels métalliques, tels que le calcium métal, le cuivre, le zinc, le plomb, l'or, l'argent et l'uranium.[54]

II.2.7.3.4 En chimie et dans le traitement des eaux

Dans les eaux de consommation ou de certains travaux industriels, la chaux intervient comme agent de précipitation et de floculation.

Elle est aussi employée dans le traitement des eaux usées pour flocculer les matières organiques, les phosphates issus des détergents, pour précipiter les sels de métaux lourds des eaux industrielles et comme bactéricide par élévation du PH. [49]

Enfin elle est utilisée pour déshydrater, stériliser et stabiliser les boues issues du traitement des eaux. et aussi pour la neutralisation des eaux acides provenant de forêts et de tourbières.

Ces applications dans le secteur de la protection de l'environnement sont nombreuses, on peut citer le traitement des : [54]

- Gaz de combustion (élimination des ans hydriques sulfureux S02 et acide chlorhydrique HCl, élimination du mercure).
- Eaux potables (adoucissement, contrôle ou pH, contrôle du développement des agents pathogènes, élimination des impuretés).

- Eaux de vidange, des effluents industriels.
- Boues de stations d'épuration.

Pour le secteur de la chimie, on retrouve la chaux dans de nombreux procédés industriels (production des alcalis avec le procédé soude-chaux, production de l'acide citrique, de la magnésie, des hypochlorites de calcium...) mais aussi pharmaceutique (production des phosphates de calcium, des fluors, bromures...). [54]

II.2.7.3.5. Traitement des fumées

Les combustibles, tels que le Fuel lourd ou le charbon contiennent naturellement du soufre en quantité plus ou moins importante suivant leur provenance. Les déchets ménagers et aussi certains déchets industriels (verrerie, briqueteries, tannerie ... etc.) dégagent également du soufre ou du chlore au cours de leur incinération.

La chaux neutralise les acides sulfhydriques, chlorhydriques, fluorhydriques et adsorbe la plupart des métaux lourds présents dans les fumées.

Ces émissions sont à l'origine des pluies acides.

Il existe différents procédés pour neutraliser ces émissions de gaz acides:

- Lit fluidisé, ou la chaux est ajoutée au produit avant incinération.
- Voie sèche, ou les gaz acides sont piégés par la chaux dans un réacteur.
- Voie semi-sèche, selon le même principe, mais avec un lait de chaux.
- Voie humide, les gaz passent à travers un rideau d'eau. Cette dernière est ensuite neutralisée à la chaux. [49]

II.2.7.3.6. Traitement des déchets ménagers et industriels

La chaux joue un rôle très important (déshydratation, stabilisation et fixation des métaux lourds) dans les différentes opérations de traitement des déchets ménagers et industriels. C'est le moyen le plus sûr de traiter les décharges d'immondices afin de prévenir le développement d'odeurs nauséabondes, la contamination des eaux de lixiviation et la présence d'animaux tels que les rats ou les oiseaux. [53]

II.3. Conclusion

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal

argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

A decorative border composed of elegant, swirling black lines, small black dots, and stylized five-petaled flowers. The border frames the central text on the left, top, and right sides.

Chapitre III :
Elaboration et
caractérisation des
bétons cellulaires

III .1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'identification et à la caractérisation des différents matériaux retenus dans le programme expérimental avec les essais effectués et d'élaborer un béton cellulaire à base de sable mixte.

Les matières premières utilisées de notre travail expérimental.

1. Le sable mixte
2. Ciment
3. La chaux
4. Poudre alumine
5. L'eau de gâchage

Les essais physiques, et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir EL Ibrahimi ; Bordj Bou Arreridj.
- Laboratoire de recherche en CNERIB de Souidania Alger.

III.1.2. caractérisation des matières premières :**III.1.2. 1.Le sable mixte****III.1.2.1.A. sable de dune (d'oued souf)**

L'un du sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale est un sable de dune, ce sable a été prélevé de la région d'oued souf, il est apprécié pour ses bonnes caractéristiques.

III.1.2.1.A.1 L'analyse granulométrie par tamisage [NA EN933-1]

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des Ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

❖ Appareillage

- Une série de tamis normalisés (0.08 - 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5) mm avec couvercle et fond pesés préalablement, Une balance et Un tamiseur mécanique

On met la série dans une tamiseuse mécanique, on verse lentement notre échantillon dans le tamis supérieur et on met notre tamiseur en marche pendant 10 minutes.



Photos. III.1 : Série des tamis.

III.1.2.1.A.2. Le module de finesse

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible plus le sable est riche en éléments fins, il est égale au 1/100 de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : {5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08}

Tableau III .1 : Modules de finesse du sable

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Les résultats de l'analyse granulométrique **de sable d'oued souf** sont représentés dans le tableau suivant :

Fraction et masse	Diamètre de tamis (mm)	Refus Élémentaire (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés %	Tamisât Cumulés %
Sable normale 0 /5 1000g	5	0	0	0	100
	2.5	9	9	0.9	99.1
	1.25	54	63	6.3	93.7
	0.36	229	292	29.2	70.8
	0.315	446	738	73.8	26.2
	0.160	207	945	94.5	5.5
	0.08	44	989	98.9	1.1
fond	6	995	99.5	0.5	

Tableau III.2 : Analyse granulométries de sable d’oued souf

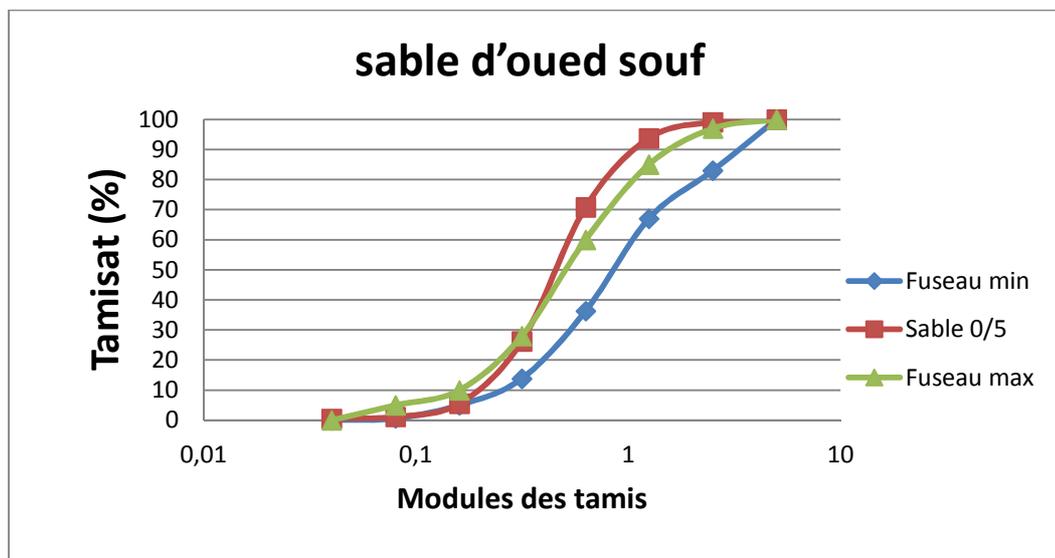


Figure III.1 : Courbe granulométrique de sable d’oued souf

❖ Le module de finesse

Après l’analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable testé est égal à : $MF = 1/100[\text{Refus cumulés \%}\{0,16-0,315-0,63-1,25-2,50-5\}]$

$MF = (94.5 + 73.8 + 29.2 + 6.3 + 0.9) / 100 = 2,047$ Donc le sable utilisé est **un sable fine** .

III .1.2.1.A.3. Analyse granulométrique laser

III.1.2.1.A.3.1. Objet de l'analyseur granulométrique

L'analyseur granulométrique CILAS est conçu pour mesurer la taille de particules, allant de 0.04 μm à 2500 μm en fonction du modèle, sans changement de l'optique, ni étalonnage de l'appareil.

Le principe de mesure est basé sur la diffraction d'une source de lumière par l'échantillon. Les résultats sont traités par un ordinateur de type PC ou compatible,



Photos. III.2 : L'appareil de l'analyse granulométrie laser CILAS (1190)

Les informations obtenues par analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre de Sable utilisée pour synthèse est présentée sur le **Figures III. 3** :

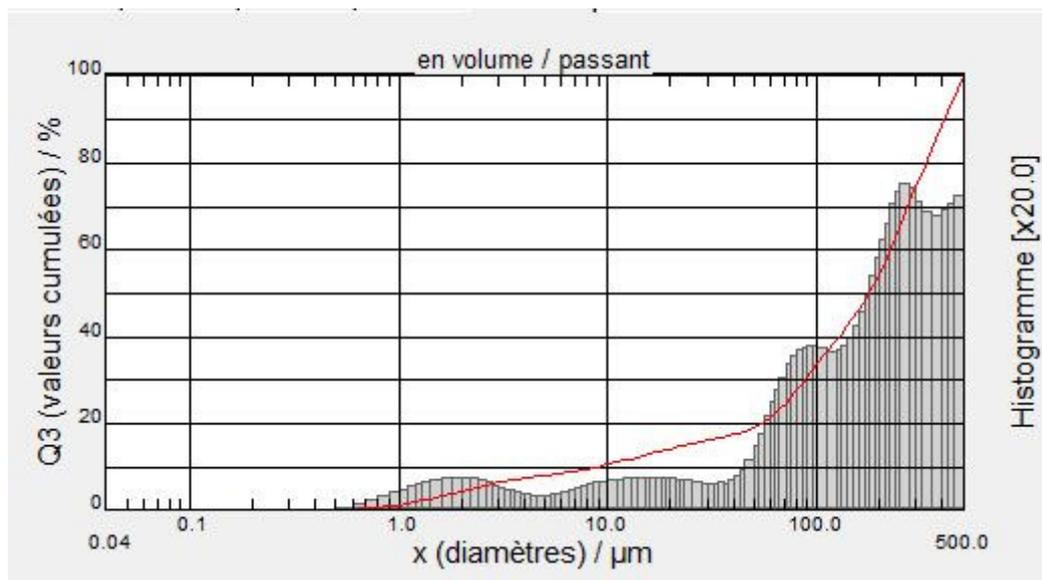


Figure. III. 2 : Courbe granulométrie laser d'un Sable (**Distribution multi modale ou hétérogène**).

La **Figure III. 2**, il ressort les informations suivantes :

La poudre de matériau du Sable contient :

- 10% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 8.78 μm ;
- 50% des particules de diamètres inférieurs ou égales à 178.16 μm ;
- 90% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 409.84 μm .

III.1.2.1.A.4. L'équivalent de sable

L'essai dit "équivalent de sable piston" (norme P 18-597) permet de mesurer le degré de propreté du sable qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

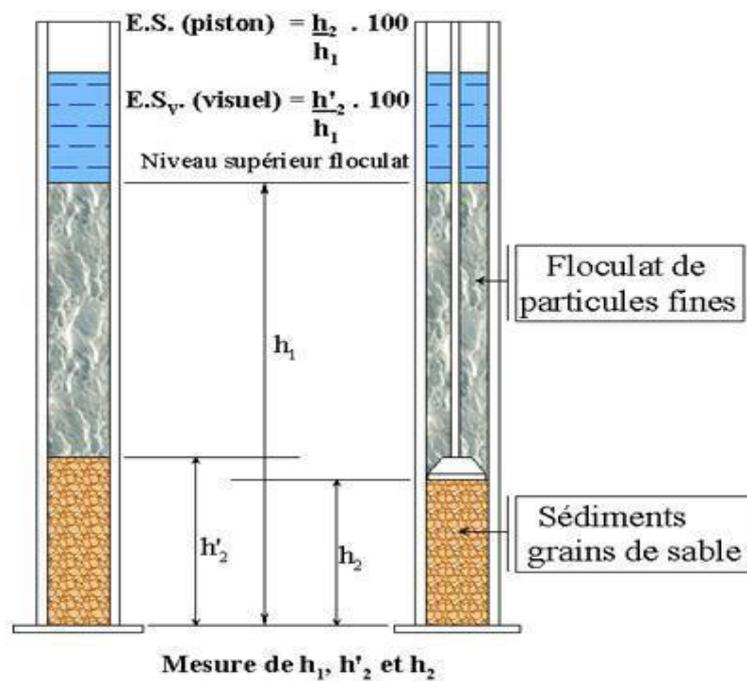


Figure III .3 : Essai d'équivalent de sable visuel et par piston.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Hauteur (mm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E_{vs} (%)	E_{vsmoy} (%)	h'_2 (cm)	E_{sp} (%)	E_{spmoy} (%)
(1)	11.8	8.7	73.72	73.55	8.7	73.72	73.75
(2)	11.5	8.5	73.39		8.6	73.78	

Tableau III.3 : Résultats d'essai d'équivalent de sable d'oued sauf testé.

Le sable testé donne les résultats suivant :

$$\left. \begin{array}{l} E_{sv} = 73.55(\%) \\ E_{sp} = 73.75(\%) \end{array} \right\} \text{ donc :}$$

Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité. .

III.1.2.1.A.6. La masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps. Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité, comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

III.1.2.1.A.6.a. La masse volumique apparente (γ) C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (γ compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm^3 ; Kg/m^3 ; t/m^3).

➤ Mode opératoire

- Peser le récipient à vide et noter M1
- Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,

- Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- Araser à la règle.
- Peser le contenu et noter M2.

Il résulte que :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Essai	M 2(kg)	M 1(kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
1	1.698	0.064	1	1.634	1.654
2	1.720			1.656	
3	1.736			1.672	

Tableau III.4 : Masse volumique apparente du sable d'oued souf.

III.1.2.1.A.6 .b. La masse volumique absolue (ρ)

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (t/m³, kg/dm³, g/cm³).

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

Essais	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/cm ³)	$\rho_{\text{abs moy}}$ (g/cm ³)
1	300	300	418	2.54	2.55
2	300	300	417	2.56	

Tableau III.5 : Masse volumique absolue du sable d'oued souf.

III.1.2.1.B. Sable concasse

L'autre sable utilise aussi est le sable concasse, ce sable a été prélevé de la région BBA d'EL AUCHE.

III.1.2.1.B.1. Analyse granulométrie de sable concassé

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable concassé sont représentés dans le tableau suivant.

Fraction et masse	Diamètre de tamis (mm)	Refus Elémentaire (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés %	Tamisât Cumulés %
Sable concassé de BBA	2	1121	1087	3.4%	96.6%
	1.25	1018	1240	25.6%	74.4%
	0.36	974	1159	44.1%	55.9%
	0.315	884	1015	57.2%	42.8%
	0.160	837	953	68.8%	31.2%
	0.08	809	921	80%	20%
1000g	fond	825	961	93.6%	6.4%

Tableau III.6 : Analyse granulométrique du sable concassé.

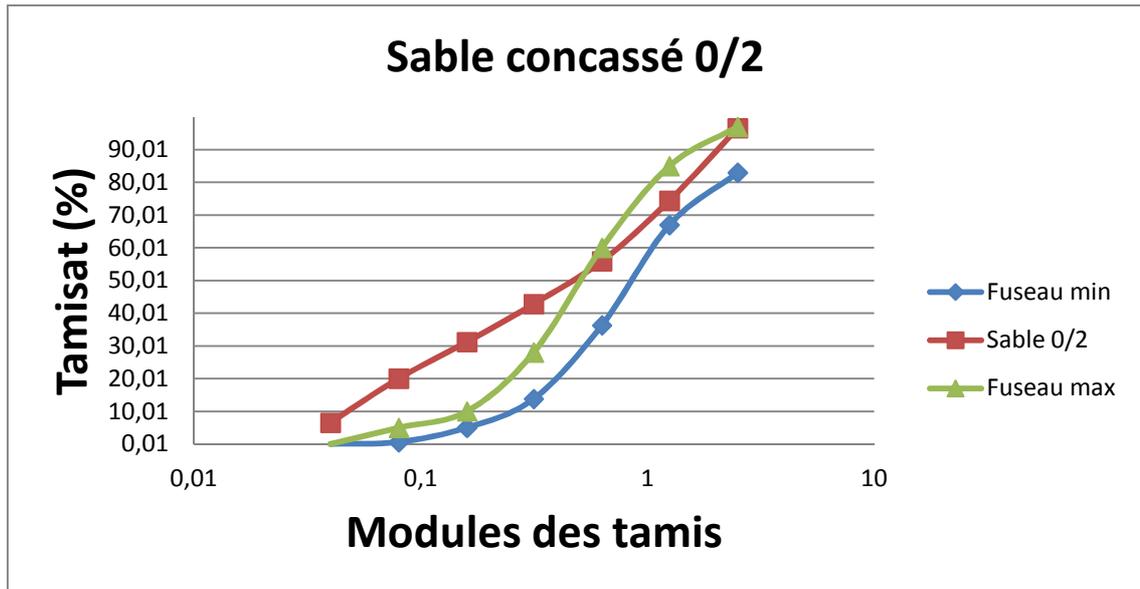


Figure III.4 : Courbe granulométrie de sable concassé

III.1.2.1.B.2. La Masse volumique

III.1.2.1.B.2.a. Masse volumique apparente

M1 (masse du récipient vide)	M2 (masse du récipient et le sable)	V (volume de récipient)	$\gamma = (M2 - M1) / V$
58 g	1658 g	1 litre	1.6 Kg/l

Tableau III.7: La masse volumique apparente de sable concassé

III.1.2.1.B.2.b. Masse volumique absolue

Le Volume d'eau V1	une masse M du sable concassé	le nouveau volume V2	Le volume absolu ou réel V = V2 - V1	La masse volumique réelle $\rho = M / (V2 - V1)$
400 ml	300 g	510 ml	110 ml	2.72Kg/l

Tableau III.8 : la masse volumique absolue de sable concassé

III.1.2.1.C. Le sable mixte (sable d'oued souf + sable concassé)

III.1.2.1.C.1. Analyse granulométrique de sable mixte

Tableau III.9 : Analyse granulométrique de sable mixte 2000 g

Tamis (mm)	Tares (g)	Refus+ tare (g)	Refus partiels R_i (g)	Refus cumulés		Tamisat 100- $(\sum R_i/M).100$ (%)
				$\sum R_i$ (g)	$\left(\frac{\sum R_i}{M}\right) \cdot 100$ (%)	
2	1087	1087	0	0	0 %	100 %
1.25	1017	1240	223	223	11.15 %	88.85 %
0.63	974	1229	255	478	23.9 %	76.1 %
0.315	884	1579	695	1173	58.65 %	41.35 %
0.16	837	1336	499	1672	83.6 %	16.4 %
0.08	809	1009	200	1872	93.6 %	6.4 %
fond	825	953	128	2000	100 %	0 %

❖ Le module de finesse

Après l'analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable mixte est égal à : MF = 1.773

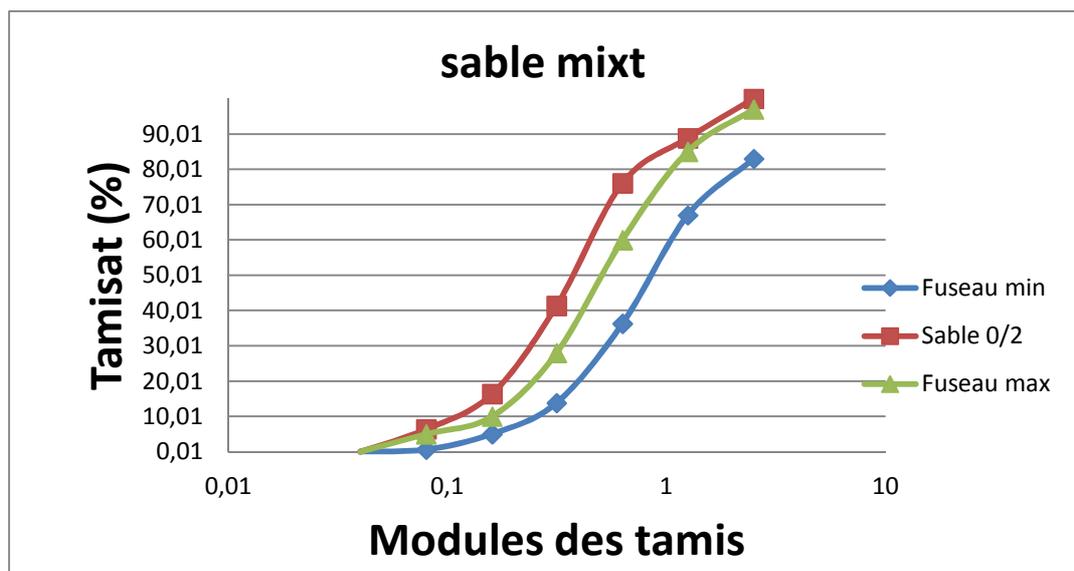


Figure III.5: Courbe granulométrique de sable mixte

III.1.2.1.C.2. Equivalente de sable mixte

Le resultat obtenue sur l'équivalente de sable mixte est :

Hauteur (mm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E_s $E_{vs}(\%)$	E_{vsmoy} (%)	h_2 (m)	E_{sp} (%)	E_{spmoy} (%)
Essai (1)	11.5	8.7	75.65	75.87	8	69.56	70.62
Essai (2)	11.3	8.6	76.10		8.1	71.68	

Tableau III.10 : Les résultats de l'équivalente de sable mixte

III.1.2.2. Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment au cours de cette expérimentation. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II /A 52.5 NA 442- 2000 (**SARIE**). Provenant de la cimenterie de LAFARGE ALGERIE

Le SARIE, ciment Gris pour bétons à résistances élevées à jeune âge, destiné aux ouvrages d'art et à la préfabrication, Il est résiste mieux au cycle gel/dégel qu'un ciment courant, Grâce à sa prise rapide, Sarie est recommandé pour le travail par temps froid.

III.1.2.2.1 Les caractéristiques techniques

- **Analyse chimique**
 - Perte au feu 5-9 %
 - Tenure en sulfates SO_3 2.5-3.5 %
 - Teneur en oxyde de magnésium MgO max 4%
 - Teneur en chlorures max 0.1 %
- **Les propriétés physiques**
 - Consistance normale de la pâte de ciment 25-31 %
 - Retrait à 28 jours en $< 1000 \mu\text{m/m}$.

III.1.2.2.2.La masse volumique de ciment SARIE**III.1.2.2.2.a. La masse volumique apparente****Tableau I11.11** : Masse volumique apparente du ciment CPJ SARIE

Essai	Volume de récipient (l)	Poids de récipient vide (kg)	Poids de récipient +ciment (kg)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
1	1	0.079	1.127	1.048	1.040
2			1.116	1.037	
3			1.115	1.036	

III.1.2.2.2.b. Masse volumique absolue

Le resultat obtenue sur la masse volumique absolue est :

$$N_0 = 0 \text{ cm}^3.$$

$$N_1 = 21 \text{ cm}^3.$$

$$\rho_c = 64 / N_1 - N_0 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_c = 64 / 21 = 3 \text{ g/cm}^3.$$

❖ La finesse du ciment

La finesse de ciment obtenue est egale 3500 cm²/g

III.1.2.2.3.L'analyse granulométrie laser de ciment utilisé

Les informations obtenues par analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre de Ciment utilisée pour synthèse est présentée sur le **Figures III. 8**:

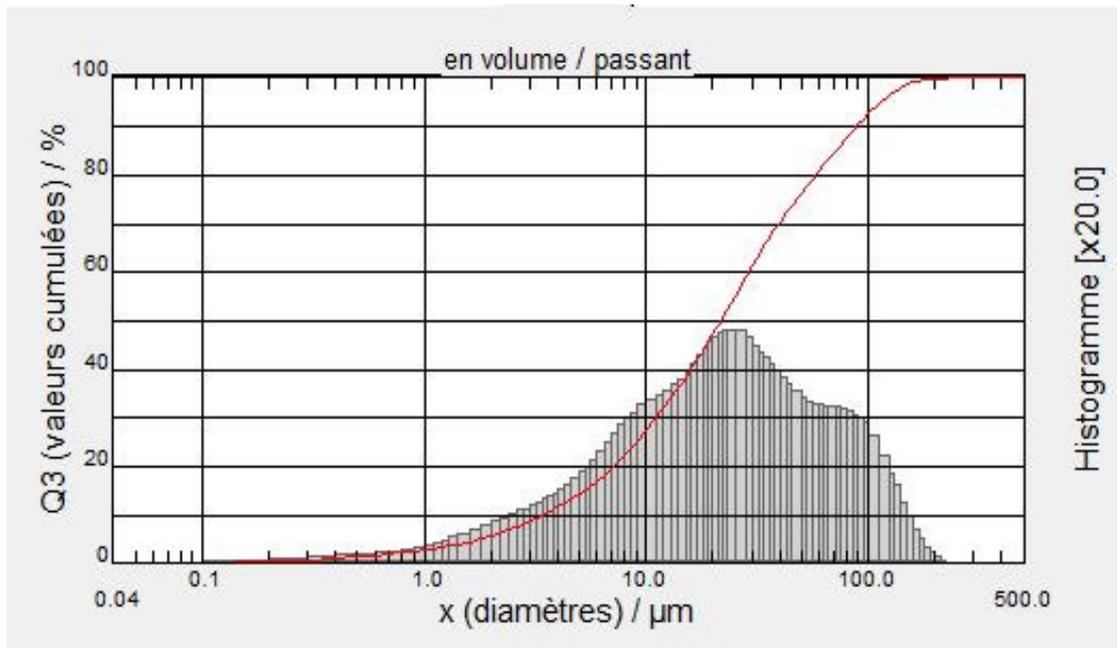


Figure III.6: Courbe granulométrie d'un Ciment (**Distribution multi modale ou hétérogène**).

La **Figure III.6**, il ressort les informations suivantes :

La poudre de matériau du Ciment contient :

- 10% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 3.41 μm ;
- 50% des particules de diamètres inférieurs ou égales à 21.67 μm ;
- 90% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 88.54 μm .

Plusieurs populations avec différentes tailles moyennes.

❖ **Avantages Produit**

- ✓ Ciment de classe vraie très élevée avec un faible retrait,
- ✓ Résistance élevée à jeune âge
- ✓ Compatibilité accrue avec les différents adjuvants (platinant, retardateurs de prise, accélérateurs de prise et de durcissement...

❖ **Domaines d'application :**

- ✓ Préfabrication lourde et légère
- ✓ Infrastructures (fondations) et éléments de superstructures nécessitant un décoffrage rapide permettant d'optimiser les délais de réalisation
- ✓ Bétonnage par temps froid

✓ Tous travaux techniques nécessitant des résistances élevées à jeune âge et de hautes performances

III.1.2.3. La poudre d'aluminium

La poudre d'aluminium utilisée comme agent réactif pour l'expansion du béton confectionné est un aluminium pur à 99%, de granulométrie d'environ 100 μ m, fabriqué par la société **METANOF**, notons que la qualité de l'aluminium influe sur la réaction d'expansion (aluminium –chaux) et par conséquent sur la densité du produit fini.

III.1.2.3.1. Fiche technique

La fiche technique de cette poudre est de société algérienne **d'ALZINC - Spa – Filiale - METANOF Service Contrôle Qualité M'sila**, et l'analyse dans le tableau VI.11

Tableau I11.12 : L'analyse chimique de la poudre fine aluminium

Les Elément	Les Valeur %
AL	97.66
Zn	1.16
Fe	1.08
Pb	0.066
Cu	0.026
Cd	0.0082
Mn	0.0078

III.1.2.3.2. L'analyse granulométrie LASER de poudre d'alumine utilisée

Les informations obtenues par analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre d'alumine utilisée pour synthèse est présentée sur le **Figures III.9** :

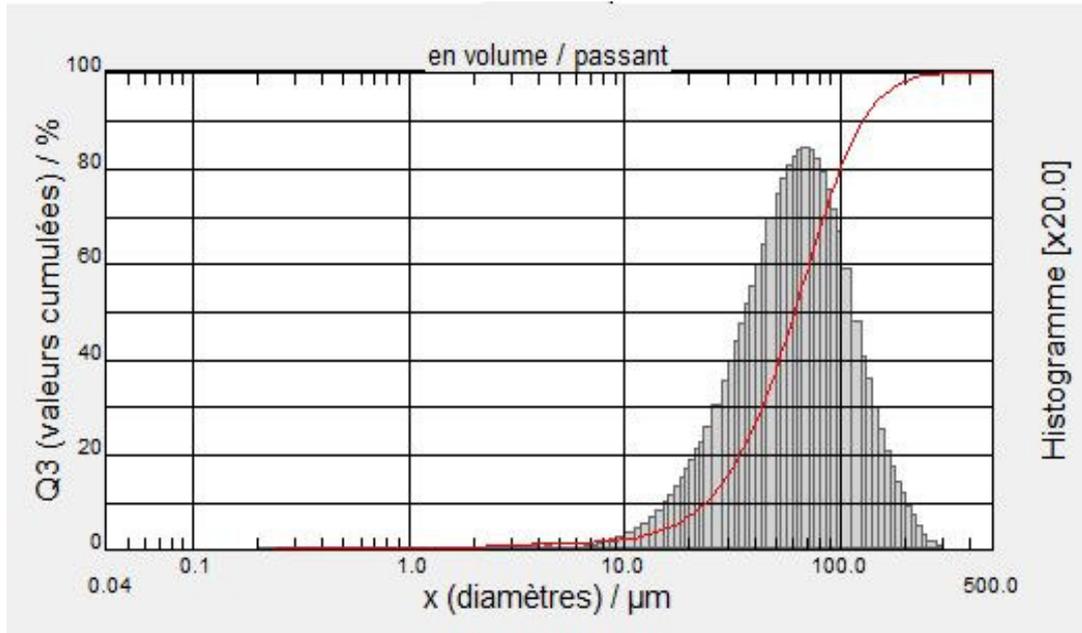


Figure III.7 : Courbe granulométrie laser d'Alumine (Distribution mono modale ou homogène)

La **Figure III.7**, il ressort les informations suivantes :

La poudre de matériau d'alumine contient :

- 10% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 23.51 µm ;
- 50% des particules de diamètres inférieurs ou égales à 61.13 µm;
- 90% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 126.79 µm.

III.1.2.3.3. La masse volumique

III.1.2.3.3.a. Masse volumique apparente

Essais	poids de récipient vide M_1 (g)	Poids de récipient + poudre AL (g)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(1)	301	1367	1.066	1.068
(2)	299	1407	1.108	
(3)	365	1396	1.031	

Tableau III.13 : Masse volumique apparente de la poudre d'alumine

III.1.2.3.2.b. Masse volumique absolue

Le resultat obtenue sur la masse volumique absolue est :

$$N_0 = 0 \text{ cm}^3.$$

$$N_1 = 24 \text{ cm}^3.$$

$$\rho_c = 64 / N_1 - N_0 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_c = 64 / 24 = 2.66 \text{ g/cm}^3.$$

III.1.2.4. La chaux

Dans ce travail expérimentale nous avons utilisé deux type de chaux la première type c'est une chaux éteinte commerciale de wilaya de Saida et la deuxième type c'est le déchet industriel (chaux éteinte humide) qui résulte de la fabrication de l'acétylène de la région de ANABA

III.1.2.4.1. Fiche technique de la chaux éteinte commerciale

- La chaux qu'en a utilisé constitue essentiellement de 85% de CaO.
- Densité : 0.9 t/m³.
- Produit cuit d'une finesse de : 0 à 4 mm
- PH : 12 .4



a : la chaux éteinte commerciale



b : la chaux déchet

Photos. III.3 : Les deux types de la chaux utiliser **a-** la chaux éteint commerciale

b- la chaux déchet

III.1.2.4.2. Masse volumique de la chaux déchet

III.1.2.4.2.a. Masse volumique apparente

Essais	poids de récipient vide M_1 (g)	Poids de récipient + la chaux (g)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(1)	311	855	0.544	1.563
(2)	306	822	0.516	
(3)	313	816	0.503	

Tableau III.14 : les résultats de la masse volumique apparente de la chaux déchet

III.1.2.4.2.b. Masse volumique absolue

Le resultat obtenue sur la masse volumique absolue est :

$$N_0 = 0 \text{ cm}^3.$$

$$N_1 = 24 \text{ cm}^3.$$

$$\rho_c = 56 / N_1 - N_0 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_c = 56 / 24 = 2.33 \text{ g/cm}^3.$$

III.1.2.4.3. L'analyse granulométrie laser de la chaux déchet.

Les informations obtenues par analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre de Chaux IND utilisée pour synthèse est présentée sur le Figures III.10 :

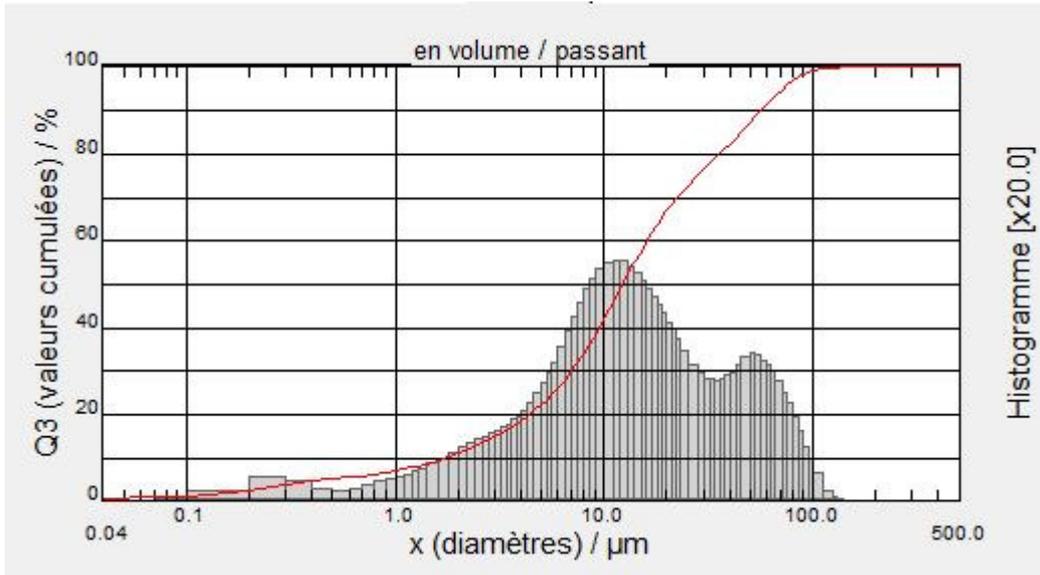


Figure III.8 : Courbe granulométrie laser du la Chaux déchet (Distribution multimodale ou hétérogène).

La **Figure III.8**, il ressort les informations suivantes :

La poudre de matériau du Chaux déchet contient :

- 10% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 1.73 μm ;
- 50% des particules de diamètres inférieurs ou égales à 12.29 μm ;
- 90% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 56.20 μm .

III.1.2.4.4.L'analyse granulométrie laser de la chaux commerciale

Les informations obtenues par analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre de Chaux utilisée pour synthèse est présentée sur le **Figures III.11** :

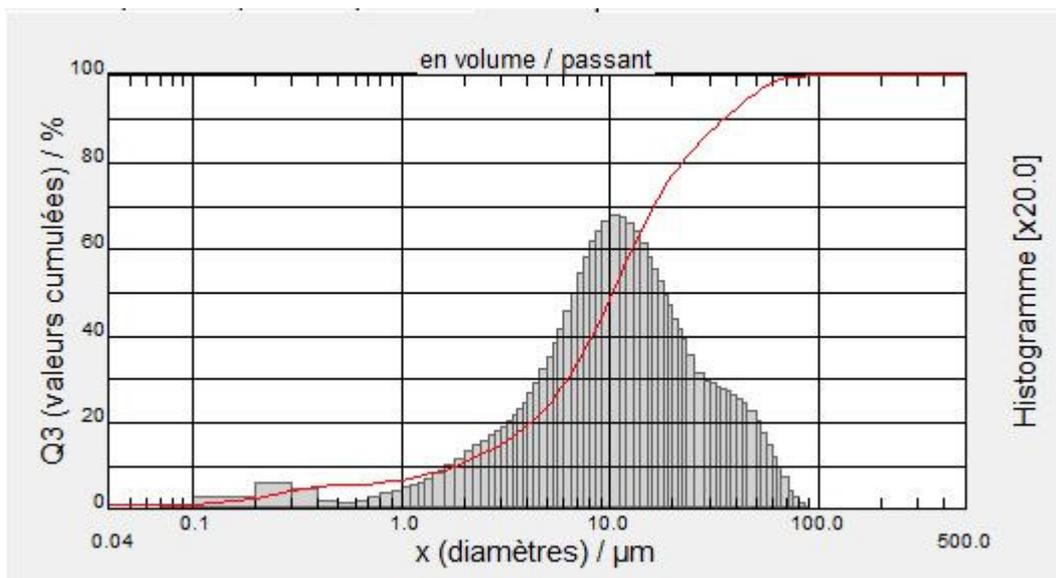


Figure III.9 : Courbe granulométrie du la Chaux commerciale (Distribution multimodale ou hétérogène).

La **Figure III.9**, il ressort les informations suivantes :

La poudre de matériau du Chaux contient :

- 10% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 1.73 μm ;
- 50% des particules de diamètres inférieurs ou égales à 12.29 μm ;
- 90% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 56.20 μm .

III.1.2.5. Le laitier de haut fourneau

Le Laitier qui est choisi pour le programme expérimental est un laitier de production local (EL HADJER), qui a été broyé aux finesses de 3700 cm^2/g .

III.1.2.5.1 L'analyse granulométrie laser de laitier de haut fourneau utilisé

Les informations obtenues par analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre de Laitier utilisée pour synthèse est présentée sur le **Figures III.12** :

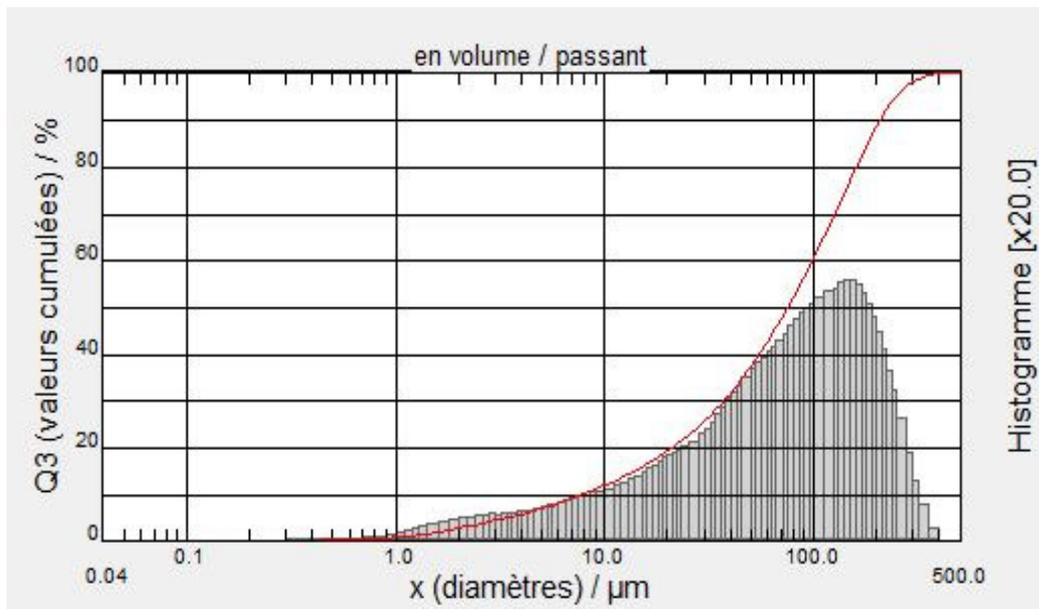


Figure III.10 : Courbe granulométrie d'un Laitier (Distribution multi modale ou hétérogène)

La **Figure III.10**, il ressort les informations suivantes :

La poudre de matériau du Laitier contient :

- 10% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 7.74 μm ;
- 50% des particules de diamètres inférieurs ou égales à 75.13 μm ;
- 90% de particules de diamètres inférieurs ou égales à 208.29 μm .

III.1.2.5.2. Masse volumique de laitier utilisé

III.1.2.5.2.a. La masse volumique apparente

Tableau III.16 : Les resultate de la masse volumique apparente de laitier.

Essai	poids de réceptier vide M_1 (g)	Poids de réceptier + la chaux (g)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(1)	301	1867	1.566	1.620
(2)	301	1960	1.659	
(3)	301	1938	1.637	

III.1.2.5.2.b. Masse volumique absolue

Le resultat obtenue sur la masse volumique absolue est :

$$N_0 = 0 \text{ cm}^3.$$

$$N_1 = 24 \text{ cm}^3.$$

$$\rho_c = 58 / N_1 - N_0 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_c = 58 / 24 = 2.41 \text{ g/cm}^3.$$

III.1.2.5.3. La composition chimique de laitier de haut fourneau

Tableau III.15: les compositions chimiques de laitier

Les compositions	Le laitier de haute fourneau %
SiO ₂	35.52
Al ₂ O ₃	8.88
Fe ₂ O ₃	2.92
CaO	26.11
MgO	2.58
SO ₃	1.50
K ₂ O	1.26
Cl ⁻	0.002
LSF	23.35
A/F	3.04

III .1.2.6.Eau de gâchage

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'El Bachir El Ibrahim Bordj Bou Arreridj.

Tableau III.17 : Analyse physico-chimique de l'eau utilisée

Paramètre	Quantité	Commentaire
PH	8.18	Acceptable pour le gâchage
Conductivité	1250 us/cm	-
Taux de (Cl ⁻)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO ₂ ⁻)	0,15 mg/l	>à la concentration max (0.1)
Taux de (NO ₃ ⁻)	1,8 mg/l	<à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	-
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	-

III.1.3. Elaboration de béton cellulaire

Dans la fabrication de béton cellulaire à basse de sable mixte on va utiliser des matières premières avec les pourcentages suivants :

Les constituants utilisés	% des constituants solide	% des constituants de la pate
Sable	59.19	42.19
Ciment	19.73	14.05
Chaux	16.14	11.50
Poudre d'aluminium	4.93	3.51
Eau	/	28.75

Tableau.III.18 : Pourcentage massique des constituants des bétons cellulaires formulés.

Au cours de notre travaille expérimentale nous avons préparé deux groupe de béton cellulaire la première est un des mélanges de sables mixte avec et sans ajouts (laitier de haut fourneaux) par substitution du sable avec un taux fixe de 15% en présence de la

chaux commerciale et de quantité de l'eau variable de 820 à 900ml , et la deuxième avec un taux de laitier variable 50,75 et 100% en présence de chaux issu de la fabrication d'acétylène et la quantité de l'eau fixé 850 ml par toute.

III.1.3.1 Les Différents types de bétons seront élaborés :

- ❖ **le premier groupe avec la chaux commerciale (50c°- 100c°)**
 - Béton témoin BT
 - Béton témoin avec 15 % laitier BTL
- ❖ **Le deuxième groupe avec la chaux déchet (50c°-100c°)**
 - Béton à basse de sable mixte avec 50 % laitier BTL D
 - Béton à basse de sable mixte avec 75% laitier BTL D
 - Béton laitier 100% BL
 - Béton à basse de sable concassé 0% laitier BC
 - Béton à basse de sable concassé 15% laitier BCL.
 - Béton à basse de sable fin 15% laitier BSL.
 - Béton à basse de sable fin 50% et 75% laitier BSL D
- Dans le première groupe avec la chaux commercial nous avons préparé 3 essai a chaque type, chaque essai contient 5 éprouvettes, ces mesures pour 2Kg.

constitution Type de béton	Sable broyé (g)	Sable concassé (g)	Ciment (g)	Chaux (g)	Poudre d'alumine (g)	L'eau (ml)	Laitier (g)
BT (3 essai)	660	660	440	360	110	900	/
	660	660	440	360	110	850	/
	660	660	440	360	110	800	/
BTL (3 essai)	560	560	440	360	110	830	200
	560	560	440	360	110	850	200
	560	560	440	360	110 110	850	200

Tableau III.19 : les constitutions et les type de béton élaboré dans le premier groupe.

- Dans le deuxième groupe avec la chaux issue de la fabrication de l'acétylène (la chaux déchet) nous avons préparé 1 essai à chaque type de béton, chaque essai contient 3 éprouvettes, ces mesures pour 2Kg et la quantité de l'eau fixe 850 ml.

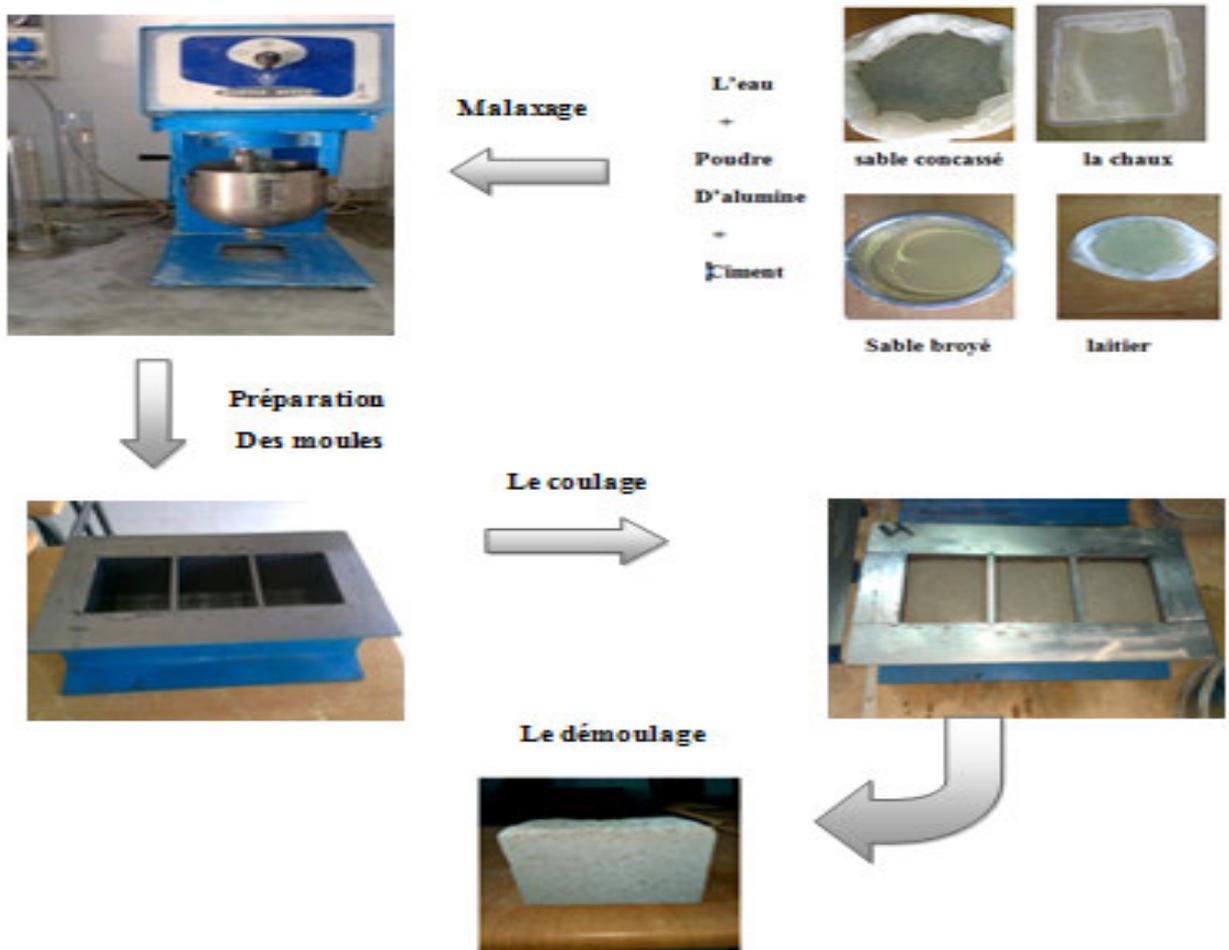
Constituants Les Types des B	Sable fin (oued sauf) (g)	Sable Concassé (g)	Laitier (g)	La chaux déchet	Poudre D'alumine (g)	ciment (g)	L'eau (ml)
BTLD (50% Sm et 50% L)	330	330	660	360	110	440	850
BTLD (25% Sm et 75% L)	165	165	990	360	110	440	850
BL (0 % Sm et 100 % L)	0	0	1320	360	110	440	850
BC (100% et 0 % L)	0	1320	0	360	110	440	850
BCL (85% SC et 15% L)	0	1120	200	360	110	440	850
BSL (85% SF et 15% L)	0	1120	200	360	110	440	850
BSLD (75% L)	330	0	990	360	110	440	850
BSLD (50 % L)	660	0	660	360	110	440	850

Tableau III.20 : les types des bétons élaborés suivant les pourcentages de sable et de laitier.

III.1.3.1 Malaxage du béton

Le but de cette opération est d'homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion, pour cela on commence à malaxer selon les étapes suivantes :

- **La 1^{er} étape** : on va préparer et peser toute les constitues avec les quantités déterminer dans tableau.
- **La 2^{ém} étape** : dans une cuvette on va mélanger bien une quantité bien déterminée du sable fin et le sable concassé
- **La 3^{ém} étape** : Verser la poudre d'alumine dans le cuve et malaxer avec la chaux Ajouter une quantité de l'eau de $T= 37\text{ c}^{\circ}$ pendant 30s, le malaxeur en marche à vitesse lente. Au coure de malaxage on ajoute le ciment puis un arrêt pour racler les parois et surtout le fond de la cuvette pour homogénéiser le mélange, après 10 s verser le mélange de sable ensuite on à introduire la quantité d'eau restante, Malaxer pendant 2 min à vitesse rapide.
- La 4^{ém} étape** : verser le mélange préparer dans les moules qui graisser par le huile.



Photos . III.4 : Élaboration de béton cellulaire

III.1.3.2. Conservation des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'étuve pendant 24 heures à température variable par alternance 50c° - 100c° - 180c°



Photos. III.5 : L'étuve de conservation des éprouvettes.

III.1.4. Les essais sur les prouvettes élaboré

III.1.4.1. Résistance à la compression

- **Objectif de l'essai : (EN 12390-3)**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression des éprouvettes de béton.

- **Principe de l'essai**

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture, la contrainte de rupture à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette

A) Description de l'appareil La presse utilisée répond aux normes NF P18-411 et NF P18-412, elle comporte deux parties :

Première partie - Unité de commande constituée de : - Un cadran pour valeur maximale de charge. - Commande de réglage de la vitesse.

Deuxième partie - Clapet de charge-décharge. - La presse où met l'éprouvette d'essai

B) Déroulement des essais

On met l'éprouvette entre les plateaux de la presse, on charge avec une vitesse de 0.1 KN /s, le plateau remonte jusqu'à il touche l'éprouvette. Après rupture on décharge et on note la charge maximale correspondante à la rupture P.



Photos III.6 : Presse hydraulique pour mortier de 15 à 250 KN

III.1.4.2. Mesure de la conductivité thermique

III.1.4.2.1. But et méthode de mesure

Le CT METRE, appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux, tels que : les briques, les roches, la terre, béton cellulaire les résines ou produits complexes, etc....

Le principe de fonctionnement, consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), qui posé au milieu de l'éprouvette coupée, cette sonde mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.



Photos . III .7 : Coupure des prouvettes

Après la coupure de l'éprouvette on mesure la conductivité thermique par le **CT METRE**



A : les éprouvettes après la coupeur

B : l'appareil de CT METRE

Photos . II I.8 : Mesure la conductivité thermique des prouvettes par CT METRE

- **A :** les éprouvettes après la coupeur

- **B :** l'appareil de CT METRE

A decorative border composed of black line art. It features elegant, swirling acanthus-like leaves and several five-petaled flowers, possibly hibiscus, arranged in a circular pattern around the central text. The design is symmetrical and intricate.

Chapitre IV :
Résultat et
discussion

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués tel que la résistance à la compression et la conductivité thermique sur le béton cellulaire élaboré, Il s'agit de présenter les différents résultats concernant les propriétés physiques en particulier l'évolution de la masse volumique pour les différents types de bétons, ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques à savoir la contrainte à la compression à 28 jours.

Les groupes	Appellation	T °C	Type de sable	Laitier %	Type de la chaux
Groupe I	BT	100°C	Mixte	/	Commercial
	BTL	100°C	Mixte	15%	Déchet
Groupe II	BTLD	100°C	Mixte	50%	Déchet
	BTLD	100°C	Mixte	75%	Déchet
Groupe III	BT	100°C	Mixte	/	Commercial
	BTL	100°C	Mixte	15%	Déchet
	BCD	100°C	Concassé	/	Déchet
Groupe IV	BTL	100°C	Mixte	15%	Commercial
	BCD	100°C	Concassé	/	Déchet
	BSL	100°C	Fin	15%	Déchet
Groupe V	BTLD	100°C	Mixte	50%	Déchet
	BTLD	100°C	Mixte	75%	Déchet
	BL	100°C	/	100%	Déchet
Groupe VI	BCD	100°C	Concassé	/	Déchet
	BCD	100°C	Concassé	/	Déchet

Tableau IV.1 : Les groupes des bétons élaborés.

IV.1. La Masse volumique

IV.1.1. Groupe I (chaux commerciale)

La masse volumique moyenne en (Kg /m ³)	
N° des groupes	100°C
BT	648
BTL 15%L	646

Tableau IV.2 : La Masse volumique pour le groupe I (chaux commerciale)

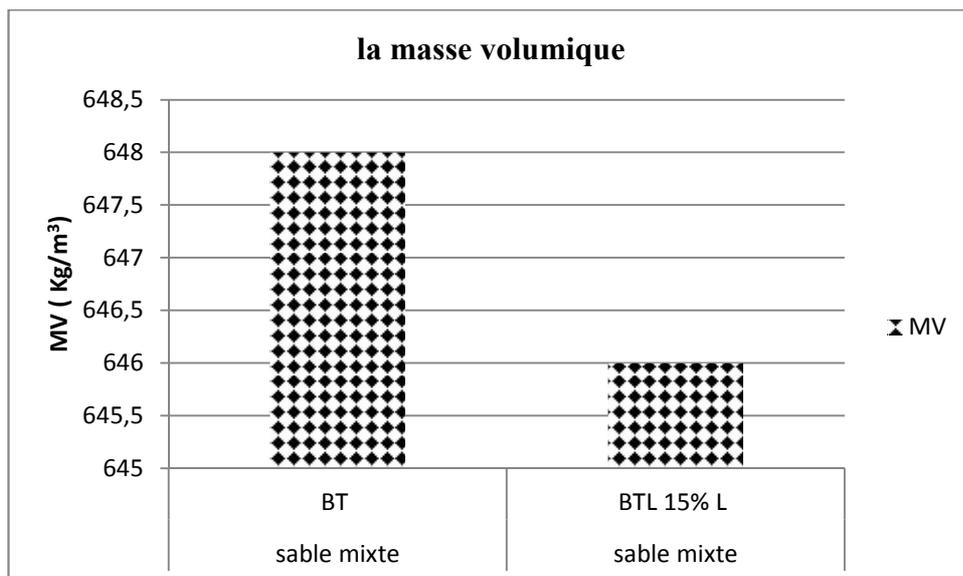


Figure IV .1 : La variation de la masse volumique en fonction de taux de laitier (chaux commerciale) à 100 °C.

IV.1.2. Groupe II (chaux déchet)

La masse volumique moyenne en (Kg /m ³)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50%L	678
BTLD 75%L	669

Tableau IV.3. La masse volumique pour le groupe II (chaux déchet)

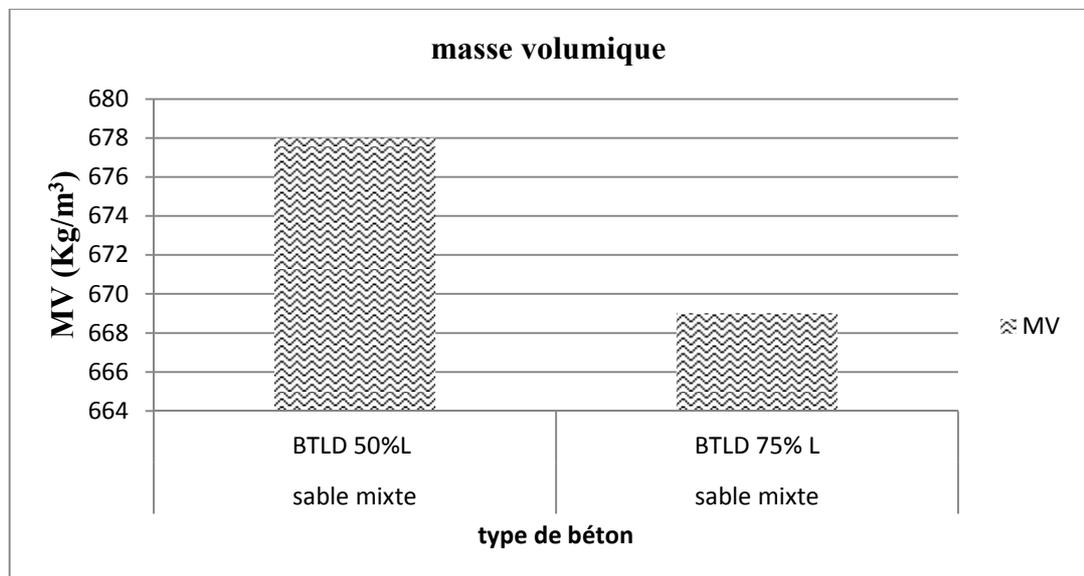


Figure IV.2 : La variation de la masse volumique en fonction de taux de laitier
(Chaux déchet)

IV.1.3. Group III (chaux déchet)

La masse volumique moyenne en (Kg /m ³)	
N° des groupes	100°C
BT	648
BTL 15%L	646
BCD 15%L	674

Tableau IV.4. La masse volumique pour le groupe III (chaux déchet)

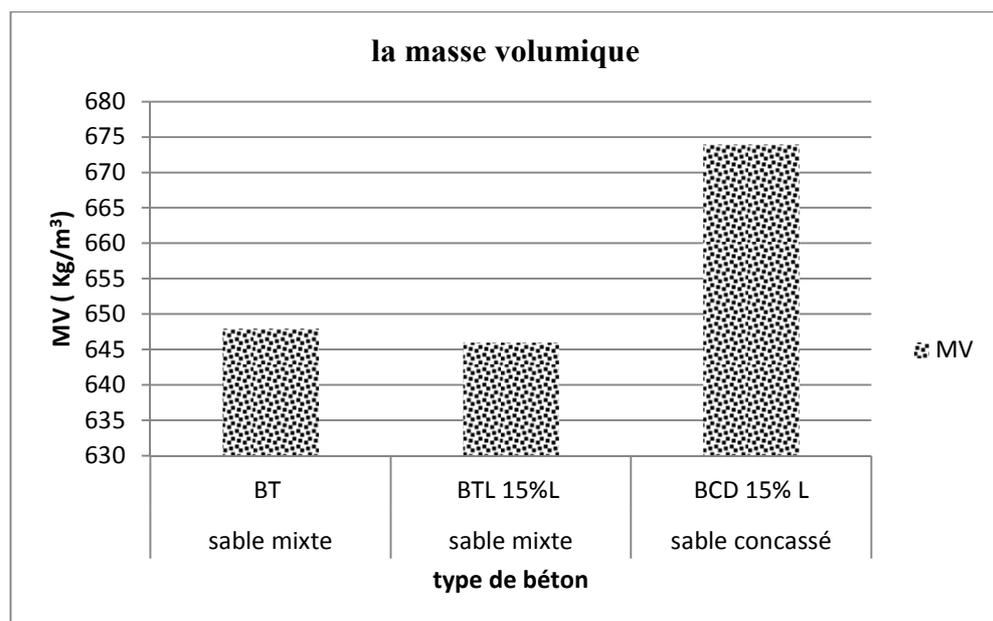


Figure IV.3 : La variation de la masse volumique en fonction du taux de laitier à 100°C

IV.1.4. Group IV (chaux déchet)

La masse volumique moyenne en Kg /m ³	
N° des groupes	100°C
BTLD 50%L	678
BTLD 75%L	669
BL 100%	657

Tableau IV.5. Masse volumique pour le groupe IV (chaux déchet)

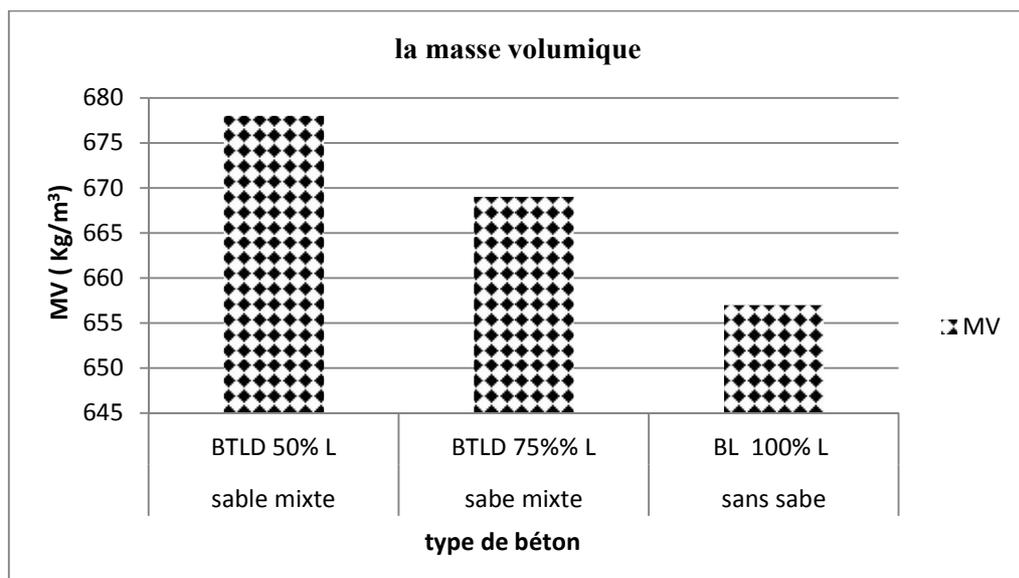


Figure IV.4 : La variation de la masse volumique en fonction de taux de laitier avec (chaux déchet)

IV.1.5 .Group V (chaux déchet)

La masse volumique moyenne en Kg /m ³	
N° des groupes	100 °C
BCD 0%L	666
BCD 15%L	656

Tableau IV.6 : La masse volumique pour le groupe V (chaux déchet)

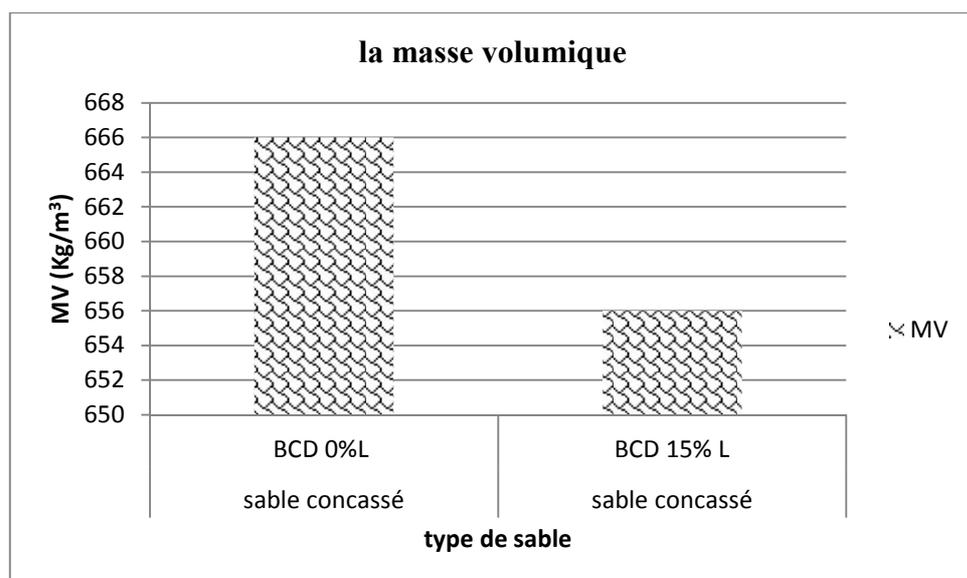


Figure IV.5 : La variation de la masse volumique en fonction de pourcentage de laitier avec la chaux déchet.

Discussion et interprétait

Vu les résultats obtenus de la masse volumique apparente des bétons cellulaire formulés (Figure IV1 ; Figure IV 5) on constate l'effet des facteurs variable, la présence de l'ajout laitier ainsi le type de sable utilisé, ou les éprouvettes à base de sable mixte et

contiennent l'ajout laitier traité à 100°C présente les meilleurs résultats de densité (plus léger) ce qui est due à la finesse, la densité du laitier.

IV. 2. La résistance à la compression

IV.2.1. Groupe I (chaux commerciale)

La résistance à la compression moyenne en (Mpa)	
100°C	
Numéro des groupes	100°C
BT	1.983
BTL 15% L	3.77

Tableau IV.7. La résistance à la compression pour le groupe I (chaux commerciale)

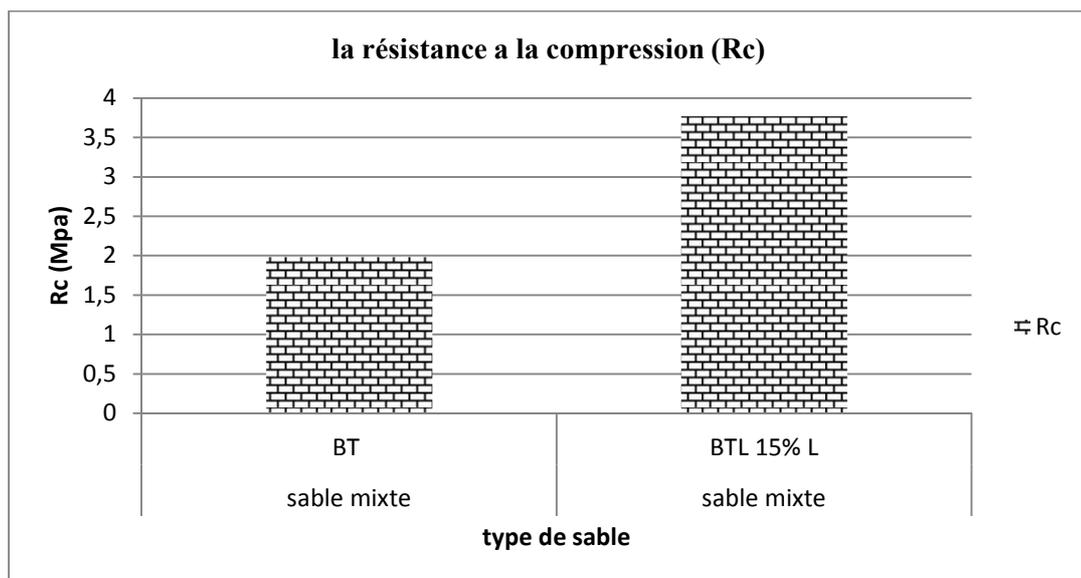


Figure IV.6 : La variation de la résistance à la compression en fonction de taux de laitier (chaux commerciale)

IV.2.2. Groupe II (chaux déchet)

La résistance a la compression moyenne en (Mpa)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50%L	3.696
BTLD 75% L	2.835

Tableau IV.8. La résistance à la compression pour le groupe II (chaux déchet)

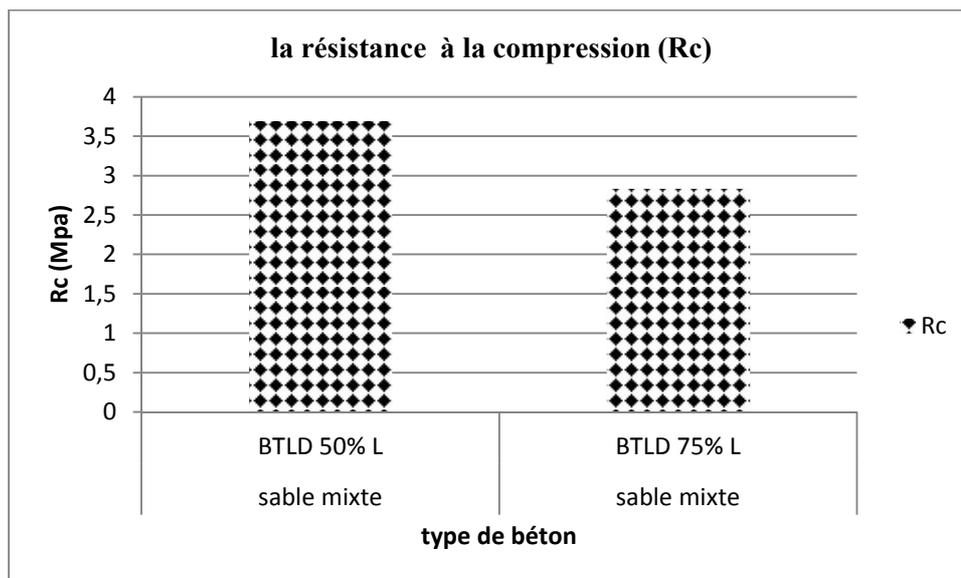


Figure IV.7 : La variation de la résistance à la compression en fonction de taux de laitier (chaux déchet)

IV.2.3. Groupe III (chaux déchet)

La résistance à la compression en (Mpa)	
N° des groupes	100 °C
BT	1.983
BTL 15%L	3.77
BTLD 50%L	2.608

Tableau IV.9 : La résistance à la compression pour le groupe III (chaux déchet).

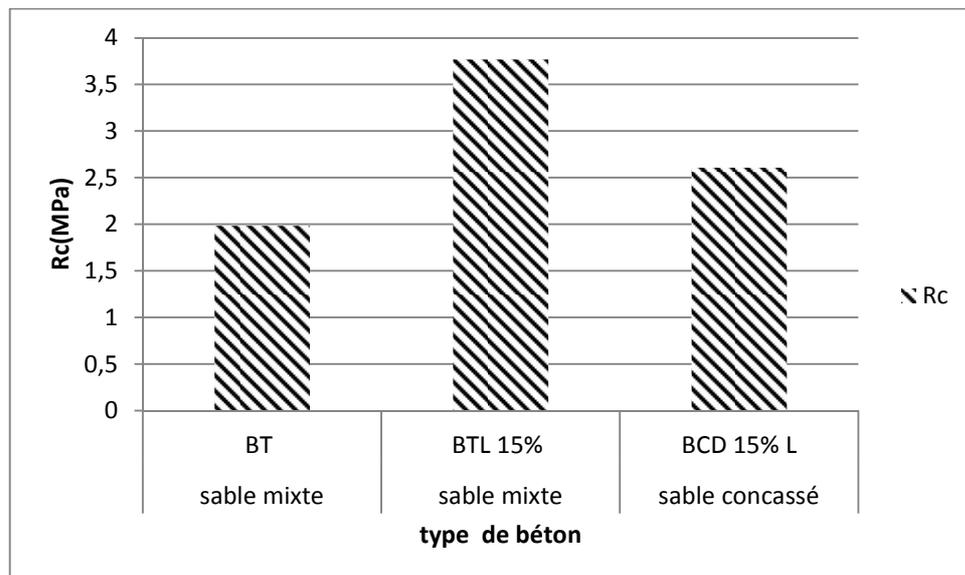


Figure IV 8 : La variation de la résistance à la compression en fonction de taux de laitier (chaux déchet)

IV.2.4. Groupe IV (chaux déchet)

La résistance à la compression en (Mpa)	
N° des groupes	100°C
BTL 15% L	3.77
BCD 15% L	2.608
BSL 15 % L	2.710

Tableau IV.10 : La résistance à la compression pour le groupe IV (chaux déchet).

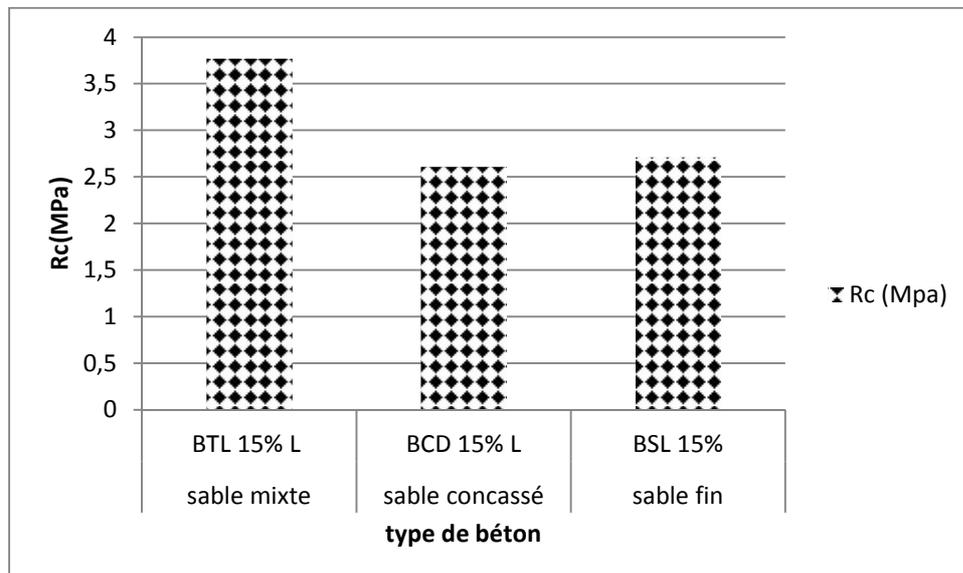


Figure IV 9 : La variation de la résistance à la compression en fonction de type de sable (chaux déchet)

IV.2.5. Groupe V (chaux déchet)

La résistance à la compression en (Mpa)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50% L	3.696
BTLD 75% L	2.835
BL 100%	3.6

Tableau IV.11 : La résistance à la compression pour le groupe V (chaux déchet).

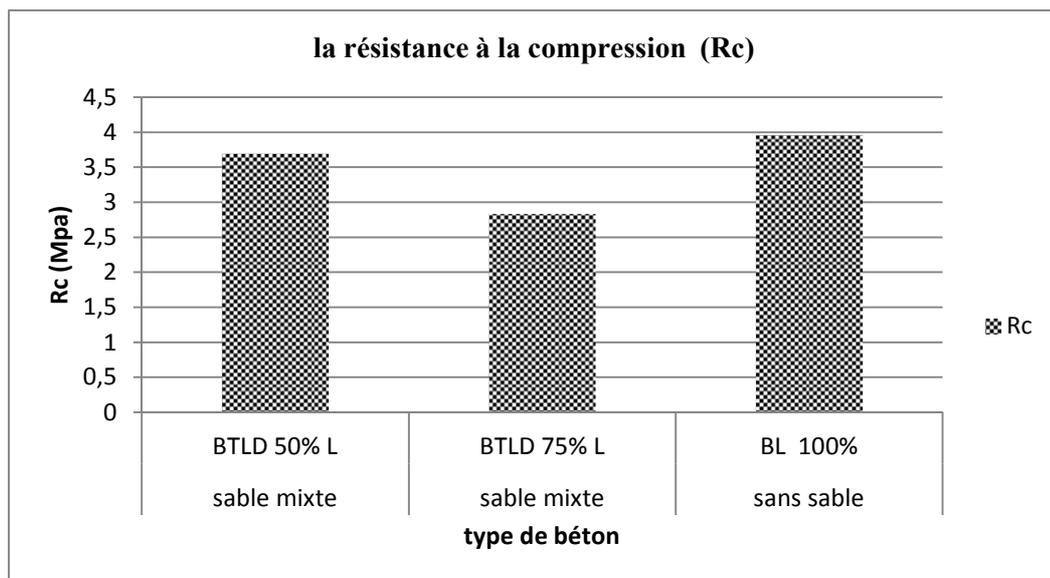


Figure IV.10 : La variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de laitier (chaux déchet)

IV.2.6. Groupe VI (chaux déchet)

La résistance à la compression moyenne en (Mpa)	
N° des groupes	100°
BCD 0%	2.984
BCD 15% L	2.608

Tableau IV.12 : La résistance à la compression pour les groupes de béton VI (Chaux déchet)

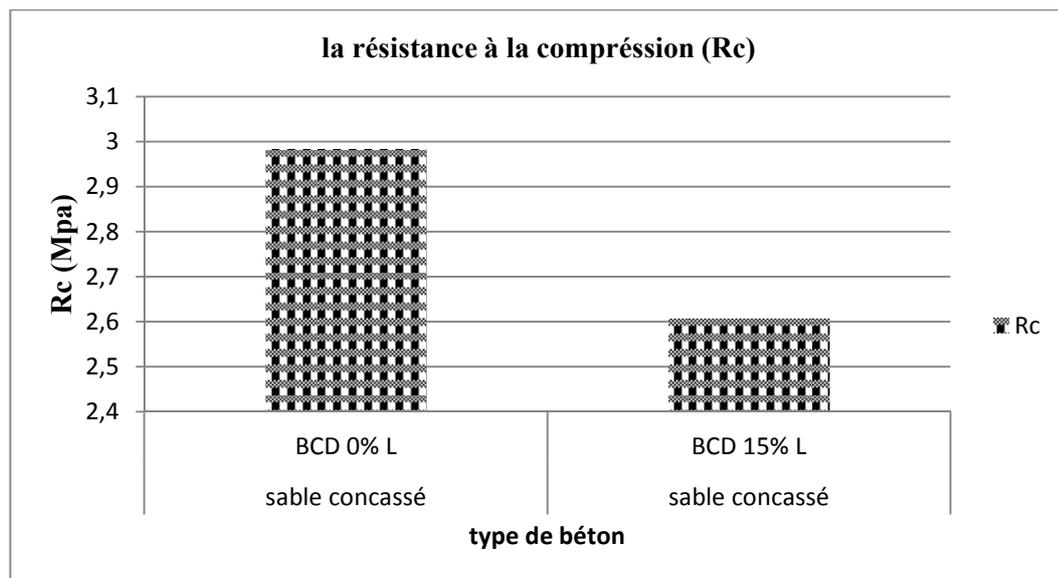


Figure IV.11 : La variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de laitier (chaux déchet).

IV.2.7. Comparaison de la résistance à la compression de béton de sable mixte et le béton de sable fin.

Les groupes de béton	La résistance à la compression en (Mpa)	
	Béton de sable mixte	Béton de sable fin
BL 100% L	3.96	4.31
BTLD 75% L	2.83	2.86
BTLD 50% L	3.68	3.60

Tableau IV.13 : Les valeurs de la résistance à la compression de béton de sable mixte et le béton de sable fin

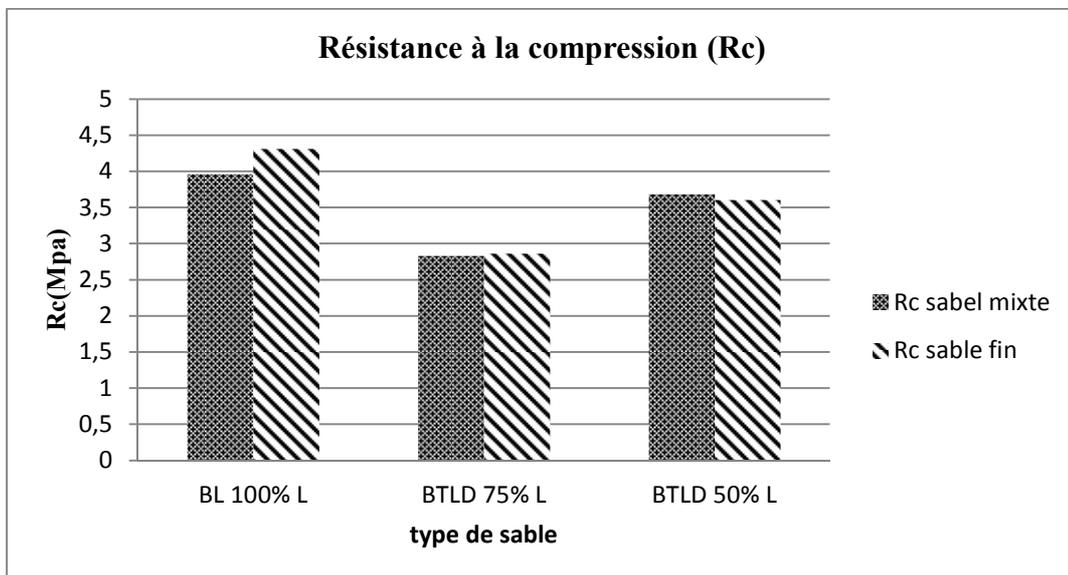


Figure IV.12 : La variation de la résistance à la compression en fonction de type de sable.

➤ **Etude thermomécanique**

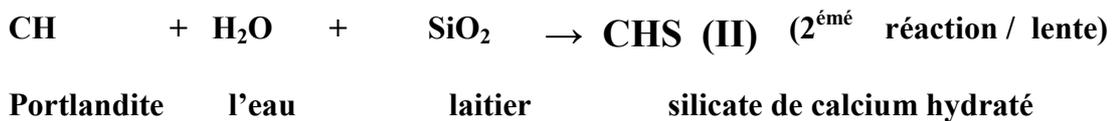
L'une des caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction est évidemment la résistance mécanique. En terme de matériau isolant et plus au moins porteur, la qualité recherchée pour un matériau de construction est une résistance thermique maximale, à laquelle s'ajoute une résistance mécanique acceptable. Notre but est principalement l'amélioration des qualités thermiques du béton en lui intégrant des matériaux chimiquement actif lors de son gâchage, afin de nous conservant des performances mécaniques suffisantes à supporter une tel charge. Il nous a paru par conséquent nécessaire de mener une étude thermomécanique. En se basant sur des résultats expérimentaux concernant la résistance mécanique obtenus par Elbakkouri [57] pour le béton de liège et ceux obtenus par Chafi [58] pour le béton de polystyrène, et l'ensemble de nos résultats présenté précédemment concernant la résistance thermique, nous donnons la variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique dans l'objectif de caractériser un domaine où les valeurs de ces deux caractéristiques sont acceptables.

➤ **Discussion et interprétation :**

les résultats obtenus et représentés dans la figure IV.6 et la figure IV.8 , pour la résistance à la compression à 28 jours confirment le bénéfice des ajouts incorpores dans le sable mixte(sable de dune+ sable concassé) pour l'amélioration des résistances mécaniques par rapport au béton cellulaire témoin qui contient un sable concassé sans et avec ajout ce qui nous avons confirmé les résultats des études précédente [60] et [61] qui ont déclaré que l'utilisation du 15% du laitier est importante pour améliorer le comportement mécanique, d'autre part il est possible de confectionné un béton cellulaire pour des usages multiple on utilisons une quantité très importante de déchet laitier arrivons à un pourcentage maximal (remplacement de sable total), néanmoins l'effet physique de la dureté du sable concassé vu son origine et sa dureté (figure IV.11) est claire on le comparons avec un béton cellulaire partiellement remplacé par le laitier.

Lors de la réalisation de notre programme expérimentale qui est basé principalement sur la valorisation d'une chaux résiduel issu d'un procédé de fabrication industriel, nous avons constaté que les résultats des résistances mécaniques (figure IV.6, IV.9) sont comparables à celle confectionné à base de chaux commerciale.

Le laitier présente une activité liante croissante avec sa quantité, sa finesse, sa composition chimique, ce type de d'ajout influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance. L'analyse des figure IV.6 ; IV.9 montre que la réaction d'hydratation du liant et du laitier donne :



A partir de ce principe et d'après les analyse des résultats on remarque bien que notre laitier contient un pourcentage important de silice (35.52 %), développe de bonne résistances à 28 jours, ce qui explique le développement du processus d'hydrations de la deuxième réaction traduit par ce qu'on appelle l'activité pouzzolanique.

En outre l'effet de la silice est subordonnée à la présence d'autre éléments chimiques notamment la CaO existe dans deux sources, la chaux du mélange et la chaux libérer au cours des réactions chimique et qui participe fortement au processus d'hydrations, par conséquence dans le développement des réponses mécanique du produit fini.

IV.3. La conductivité thermique.

IV.3.1. Groupe I (chaux commerciale)

La conductivité thermique λ en (W/m.°K)	
N° des groupes	100°C
BT	0.235
BTL 15% L	0.251

Tableau IV.14 : La conductivité thermique pour le groupe I (chaux commerciale)

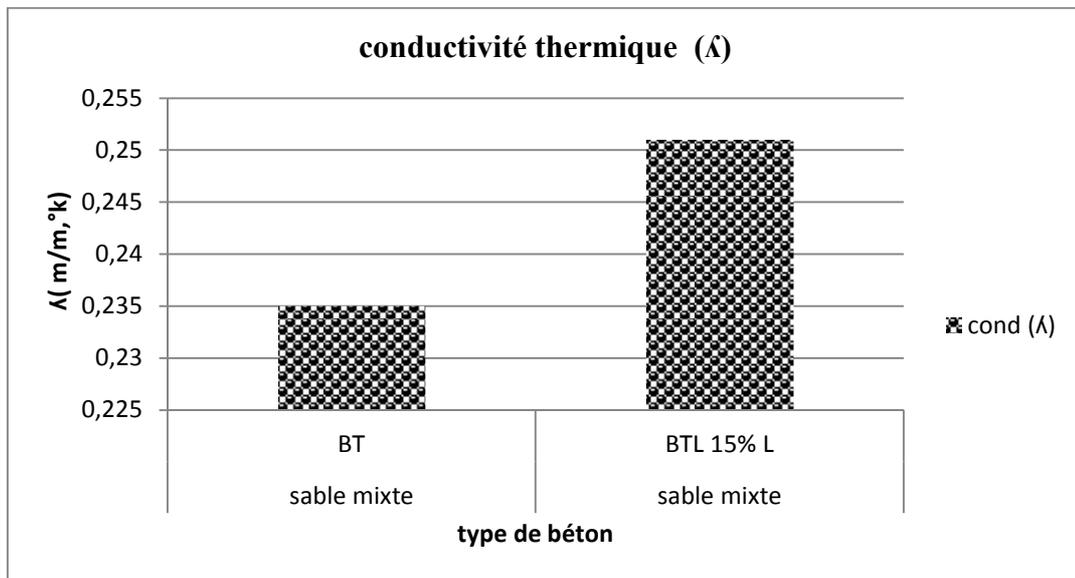


Figure IV.13: La variation de la conductivité thermique en fonction du taux de laitier (Chaux commerciale)

IV.3.2. Groupe II (chaux déchet)

La conductivité thermique λ en (W/m.°K)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50% L	0.216
BTLD 75% L	0.233

Tableau IV.15 : La conductivité thermique pour le groupe II (chaux déchet)

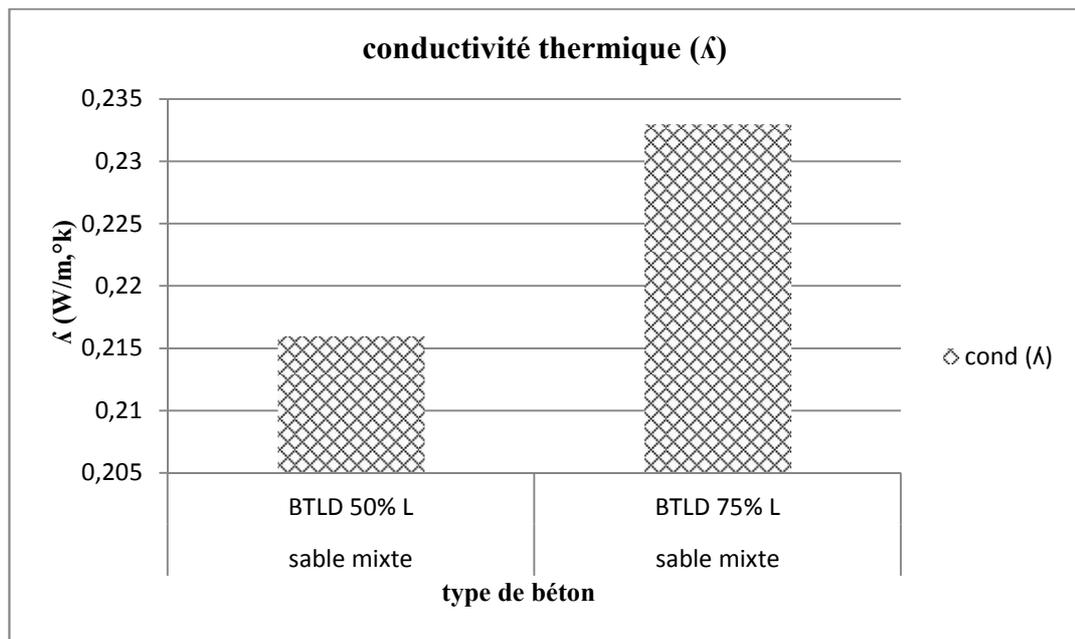


Figure IV.14 : La variation de conductivité en fonction de taux de laitier
(Chaux déchet)

IV.3.3. Groupe III (chaux déchet)

La conductivité thermique λ en (W/m. °K)	
N° des groupes	100°C
BT	0.235
BTL 15% L	0.251
BCD 15%L	0.229

Tableau IV.16 : La conductivité thermique pour le groupe III (chaux déchet)

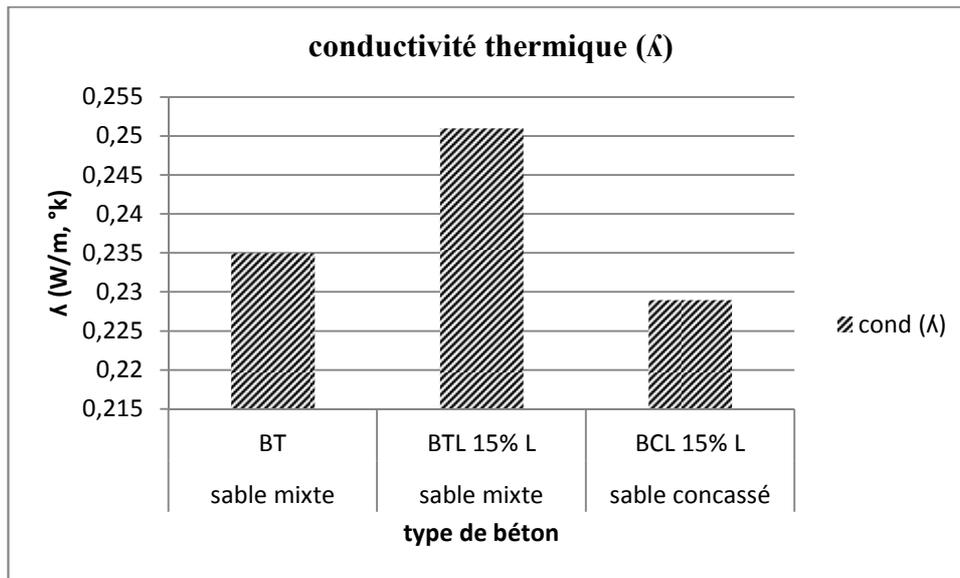


Figure IV.15 : La variation de conductivité en fonction de taux de laitier et type de sable (chaux Déchet)

IV.3.4. Groupe IV (chaux déchet)

La conductivité thermique λ en (W/m. °K)	
N° des groupes	100°C
BTL 15%L	0.251
BCD 15% L	0.229
BSL 15% L	0.224

Tableau IV.17 : La conductivité thermique de groupe IV (chaux déchet)

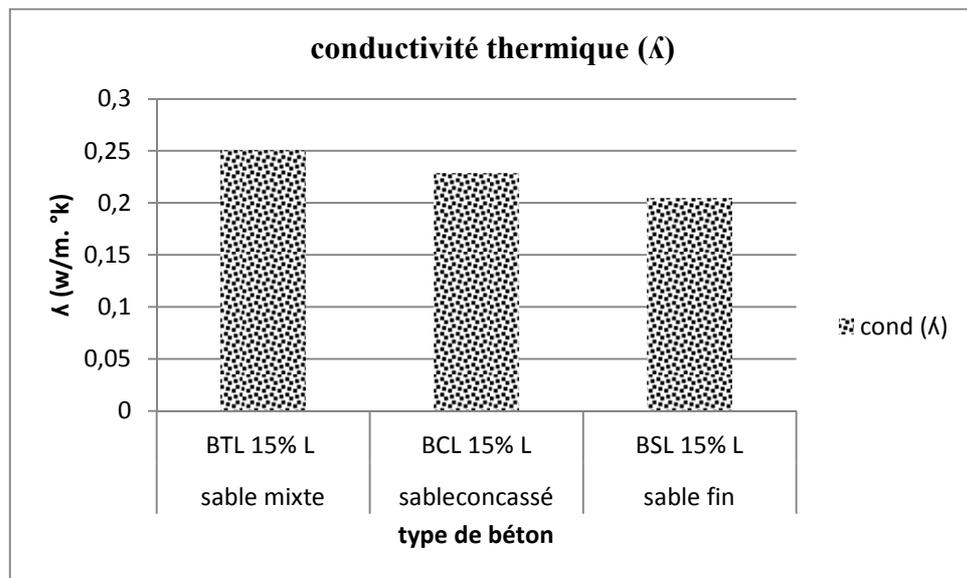


Figure IV.16 : La variation de la conductivité thermique en fonction de type de sable (chaux déchet)

IV.3.5. Groupe V (chaux déchet)

La conductivité thermique λ en (W/m. °K)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50%L	0.216
BTLD 75% L	0.233
BL 100%	0.210

Tableau IV.18 : La conductivité thermique pour le groupe V (chaux déchet)

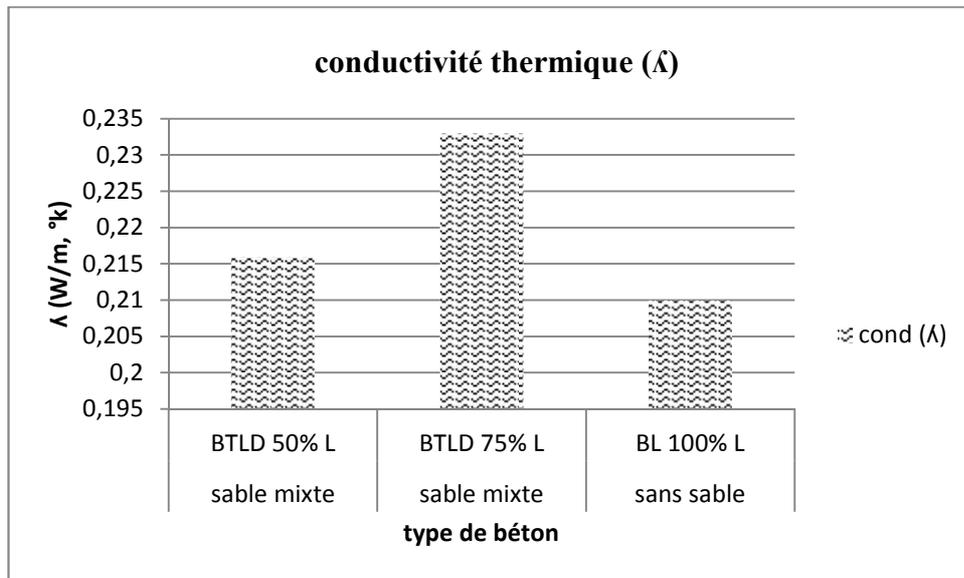


Figure IV.17: La variation de la conductivité thermique en fonction de taux de laitier (Chaux déchet)

IV.3.6. Groupe VI (chaux déchet).

La conductivité thermique λ en (W/m. °K)	
N° des groupes	100°
BCD 0% L	0.224
BCD 15%L	0.229

Tableau IV.19 : La conductivité thermique pour le groupe VI (chaux déchet).

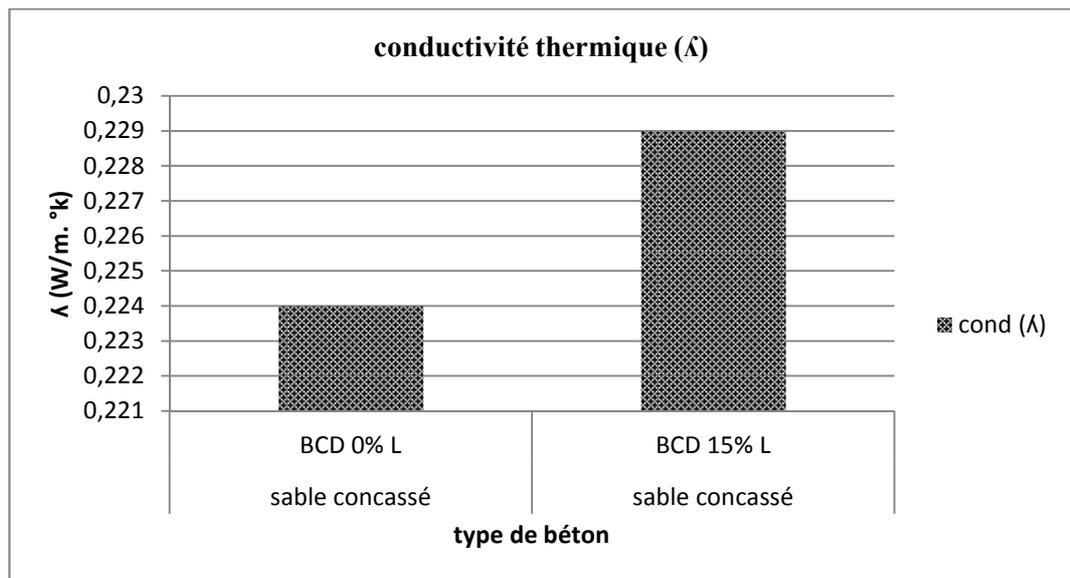


Figure IV.18 : La variation de la conductivité thermique en fonction de pourcentage de laitier (chaux déchet)

IV.3.7. comparaisant de La conductivité thermique λ de béton de sable mixte et Le béton de sable fin

N° des groupes	La conductivité thermique λ en (W/m. °K)	
	Béton de sable mixte	Béton de sable fin
BL 100% L	0.216	0.210
BTL D 75% L	0.233	0.208
BTL D 50% L	0.21	0.213

Tableau IV.20 : Les valeurs de la conductivité thermique de béton de sable mixte et Le béton de sable fin.

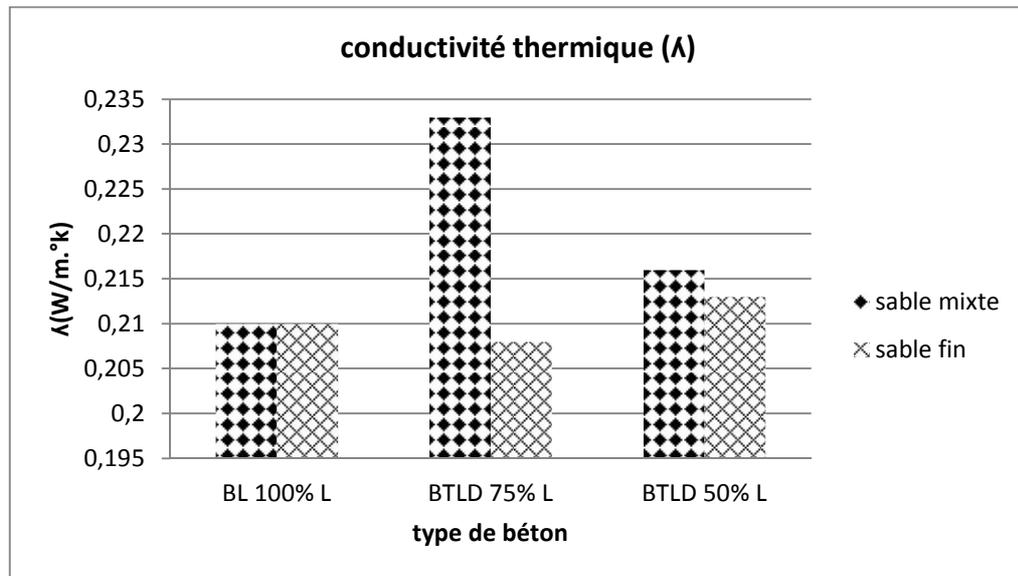


Figure IV.19 : La variation de conductivité thermique en fonction de type de sable et du taux de laitier (chaux déchet).

Discussion et interprétation

Les résultats obtenus et représentés sous forme d'histogramme dans les figures IV (13 - 19) montrent que la conductivité thermique de l'ensemble des bétons cellulaires préparés est acceptable et en bonne concordance vis-à-vis des normes qui limitent la conductivité thermique des matériaux de construction, le meilleur résultat est enregistré pour le mélange qui contient plus de sable concassé et le maximum pourcentage de laitier (remplacement total de sable), ce qui favorise l'utilisation de ce type de matériaux dans la fabrication des matériaux de séparation à faible conductivité thermique et à forte isolation thermique.

La comparaison des résultats de conductivité thermique des bétons cellulaires à base de chaux commerciale destinés à l'utilisation dans le domaine de génie civil et la chaux issue d'un procédé de fabrication industriel (déchet), nous a confirmés l'aptitude de ce dernier d'être utilisé pour la fabrication d'un matériau de séparation comme le béton cellulaire avec un intérêt thermique intéressant.

La finesse des matériaux est un paramètre très important et qui a une influence majeure sur la distribution cellulaire ainsi que sur la quantité des cellules à faire rentrer après la réaction chimique de la poudre d'alumine (50% des particules de diamètres inférieurs ou égaux

à **61.13** μm) avec la chaux (**50%** des particules de diamètres inférieurs ou égales à **12.29** μm) en présence du ciment (**50%** des particules de diamètres inférieurs ou égales à **21.67** μm) permettent la libération d'hydrogène responsable de l'introduction de l'air au sein de la pâte de béton cellulaire à l'état frais, pour cela nous avons opté à limiter le diamètre max pour chaque constituant notamment le matériau sable (**50%** des particules de diamètres inférieurs ou égales à **178.16** μm) qui représente le matériau dominant (59%), le remplacement partiel ou total du sable par le laitier (**50%** des particules de diamètres inférieurs ou égales à **75.13** μm) qui présente une finesse beaucoup plus basse, favorise fortement l'augmentation du volume des vides ainsi la bonne distribution cellulaire, une légèreté importante et par conséquent une conductivité thermique minimale ($\lambda = 0.210$) pour le béton le plus léger (100% laitier) et ($\lambda = 0.224$) pour le béton à base de 100% sable, ce qui conduit à une isolation thermique importante.

Le calcul de la granulométrie moyenne des constituants solides permet de faire voir la différence point de vue grosseurs de la matrice solide entre le béton confectionné à base de sable entièrement concassé ou mixte et celui à base de laitier (remplacement total), pour le premier (sans ajout) **50%** des particules de diamètres sont inférieurs ou égales à **115.15** μm , par contre pour le mélange ou nous avons fait une substitution entière (remplacement total du sable) **50%** des particules de diamètres inférieurs ou égales à **54.36** μm ce qui montre la différence entre les bétons cellulaires avec et sans ajout laitier, ce qui a été confirmé par la différence enregistrée au niveau des masses volumiques ou nous enregistrons $\rho = 690 \text{ kg/m}^3$ pour le mélange à 100% sable concassé et $\rho = 657.5 \text{ kg/m}^3$ pour le mélange qui contient 100% laitier.

IV. 4. La chaleur spécifique

IV.4.1. Groupe I (la chaux commerciale)

La Chaleur spécifique moyenne C en J/(Kg.°K)	
N° des groupes	100°C
BT	860.2
BTL 15% L	860.6

Tableau IV.22. La chaleur spécifique pour les groupes des bétons I
(Chaux commerciale)

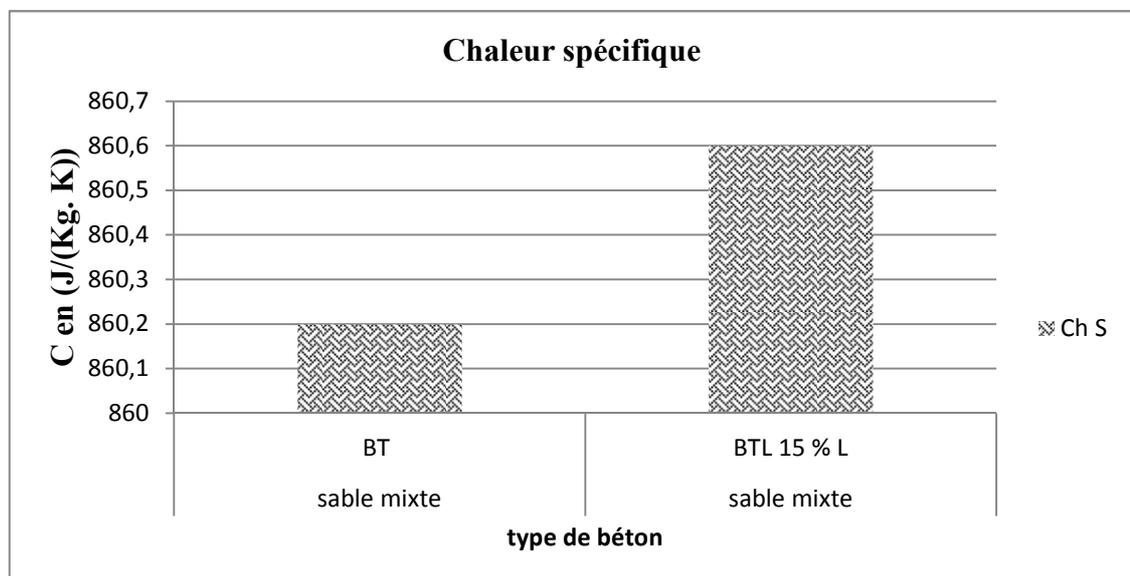


Figure IV.20 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier
(chaux commerciale)

IV.4.2. Groupe II (chaux déchet)

La Chaleur spécifique moyenne C en J/(Kg.K)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50% L	786.5
BTLD 75% L	839.5

Tableau IV.23 : La chaleur spécifique pour le groupe II (chaux déchet)

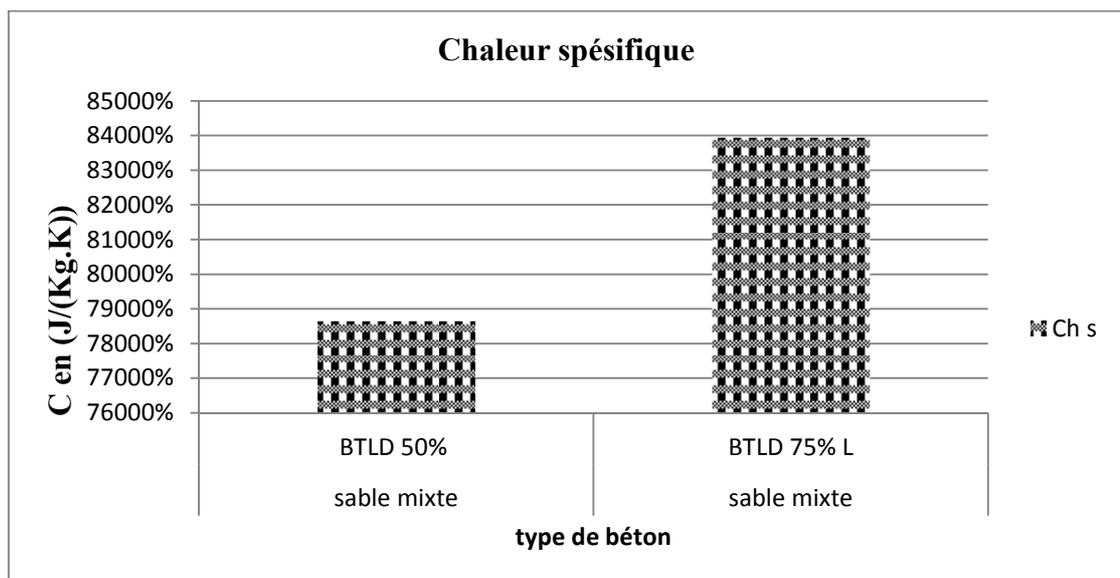


Figure IV.21 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier (Chaux déchet)

IV.4.3. Groupe III (chaux déchet)

La Chaleur spécifique moyenne C en J/ (Kg. K)	
N° des groupes	100°C
BT	860.2
BTL15%L	860.6
BCD 15%L	889.9

Tableau IV.24 : La Chaleur spécifique pour le groupe III (chaux déchet).

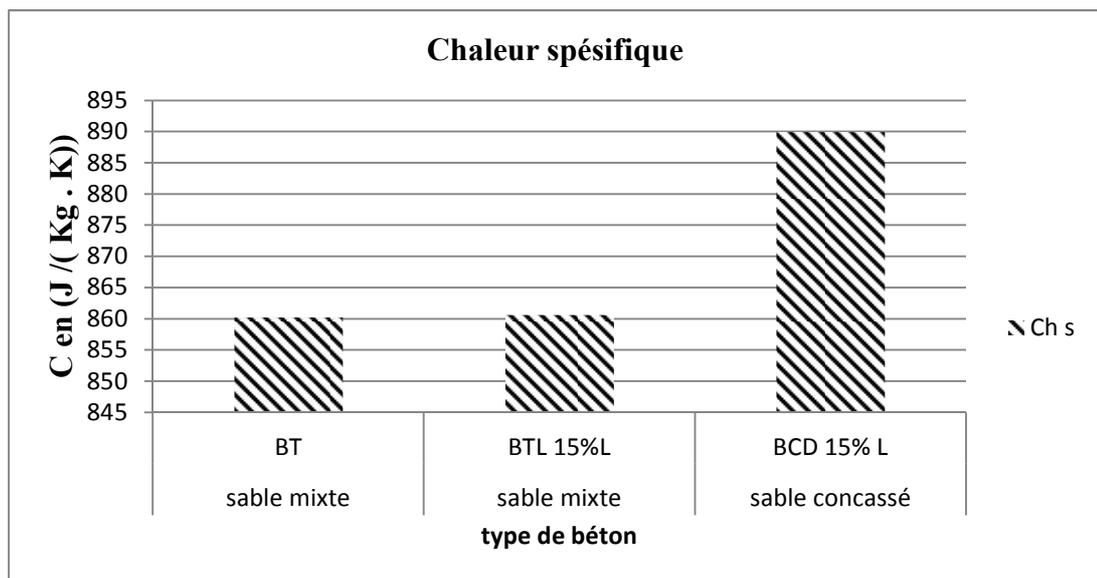


Figure IV.22 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier
(Chaux déchet)

IV.4.4. Groupe IV (chaux déchet)

La Chaleur spécifique moyenne C en J/(Kg.K)	
N° des groupes	100°C
BTL 15% L	860.6
BCD 15% L	889.9
BSL 15% L	698.9

Tableau IV.25 : La Chaleur spécifique pour le groupe IV (chaux déchet).

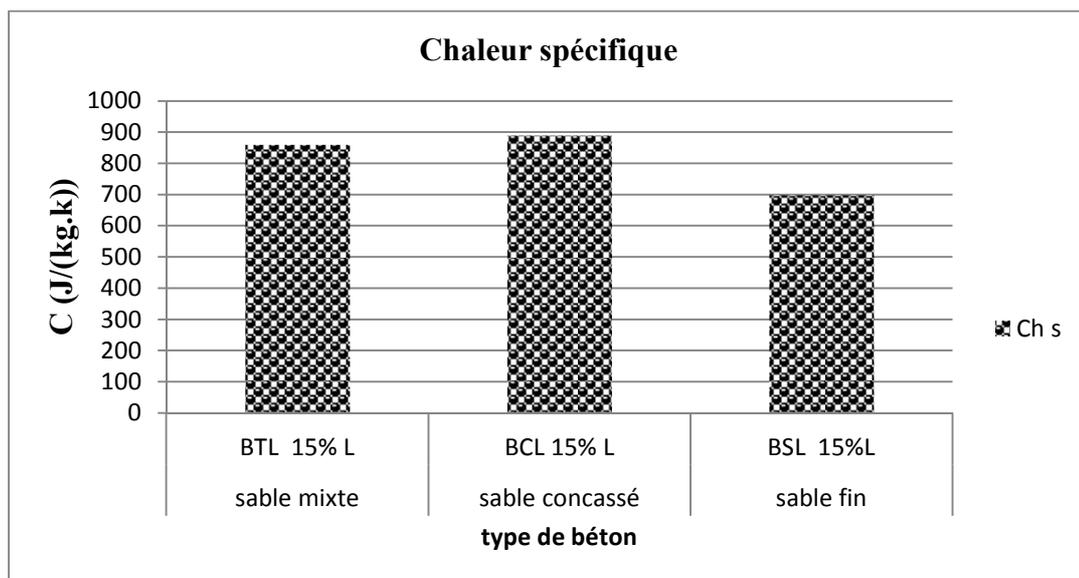


Figure IV.23 : La variation de la chaleur spécifique en fonction de type de sable 15% Laitier (Chaux déchet)

IV.4.5. Groupe V (chaux déchet)

La Chaleur spécifique moyenne C en J/ (Kg. K)	
N° des groupes	100°C
BTLD 50%L	786.5
BTLD 75%L	839.5
BL 100% L	756.6

Tableau IV.26 : La Chaleur spécifique pour le groupe V (chaux déchet)

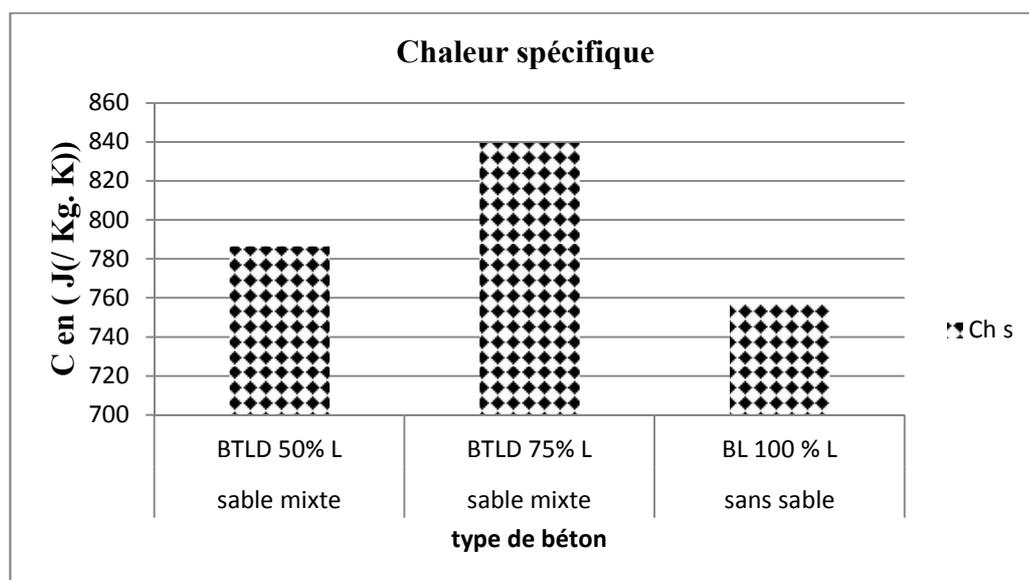


Figure IV.24 : La variation de la Chaleur spécifique en fonction de taux de laitier
(Chaux déchet)

IV.4.6. Groupe VI (chaux déchet)

La Chaleur spécifique moyenne C en J/(Kg.K)	
N° des groupes	100°C
BCD 0% L	853.8
BCD 15% L	889.9

Tableau IV.27 : La Chaleur spécifique pour le groupe VI (chaux déchet)

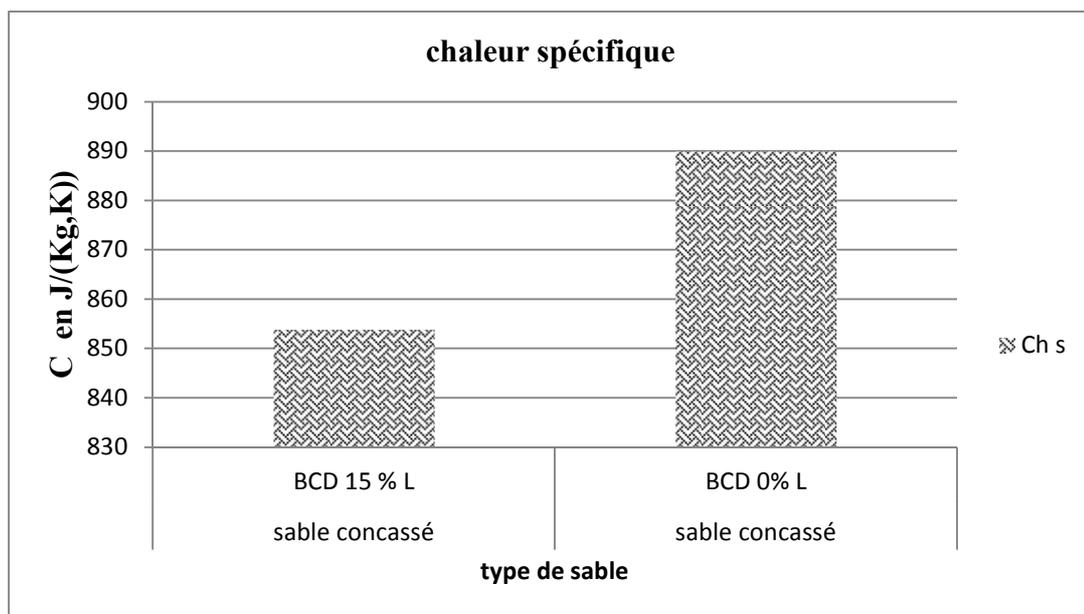


Figure IV.25: La variation de la chaleur spécifique en fonction de taux de laitier
(Chaux déchet)

IV.4.7. comparaisant de La chaleur spécifique de béton de sable mixte et le béton de sable fin

groupes de béton	La chaleur spécifique C en J/(Kg.K)	
	Béton de sable mixte	Béton de sable fin
BL 100% L	756.6	740.5
BTLD 75% L	839.5	745.4
BTLD 50% L	736.5	751

Tableau IV.28 : Les valeurs de La chaleur spécifique de béton à basse de sable mixte et le béton à basse de sable fin.

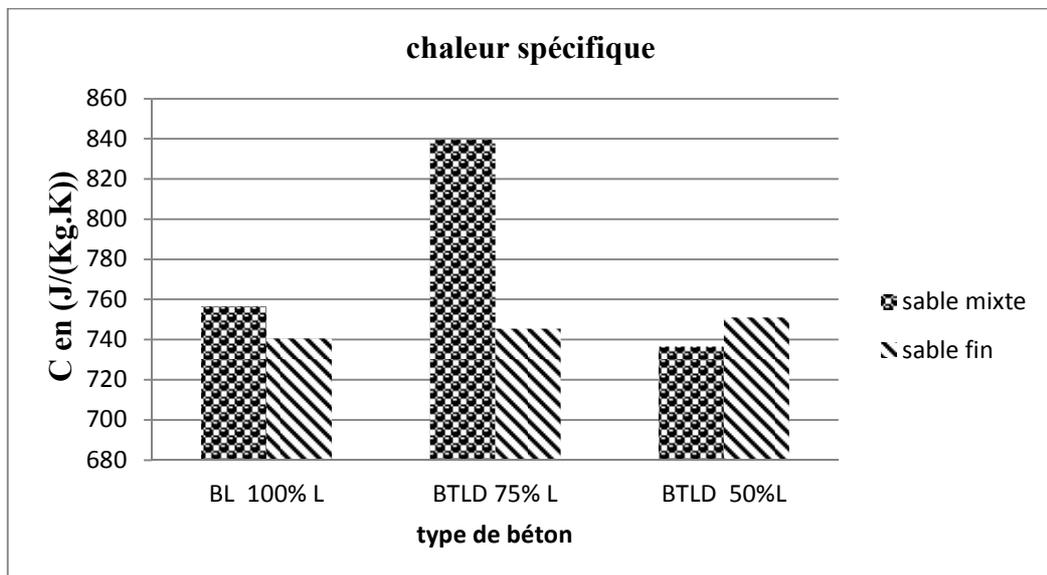


Figure IV.26 : La variation de la chaleur spécifique en fonction de type de sable (Chaux déchet)

Discussion et interprétation

Vue les résultats obtenus de la chaleur spécifique des béton cellulaire confectionné à base des facteurs variable tel que la température de traitement, le type de sable (avec et sans ajout laitier), l'ensemble de résultats enregistré sont inférieure à la limite normalisé (1000 J/Kg. °C). Ce qui rend possible de confectionner un béton cellulaire pour des usages multiple on utilise une quantité très importante de déchet laitier arrivons à un pourcentage maximal (remplacement de sable total) tout en gardons les caractéristiques acoustique dans les limites normal

Tableau IV. 29 : les valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

Les types des bétons	La masse volumique en (Kg/m ³)	La conductivité thermique λ en (w/m.°k)
BL (100% L)	657	0.229
BT	648	0.235
BTL 15% L	646	0.251
BCD 15% L	674	0.216

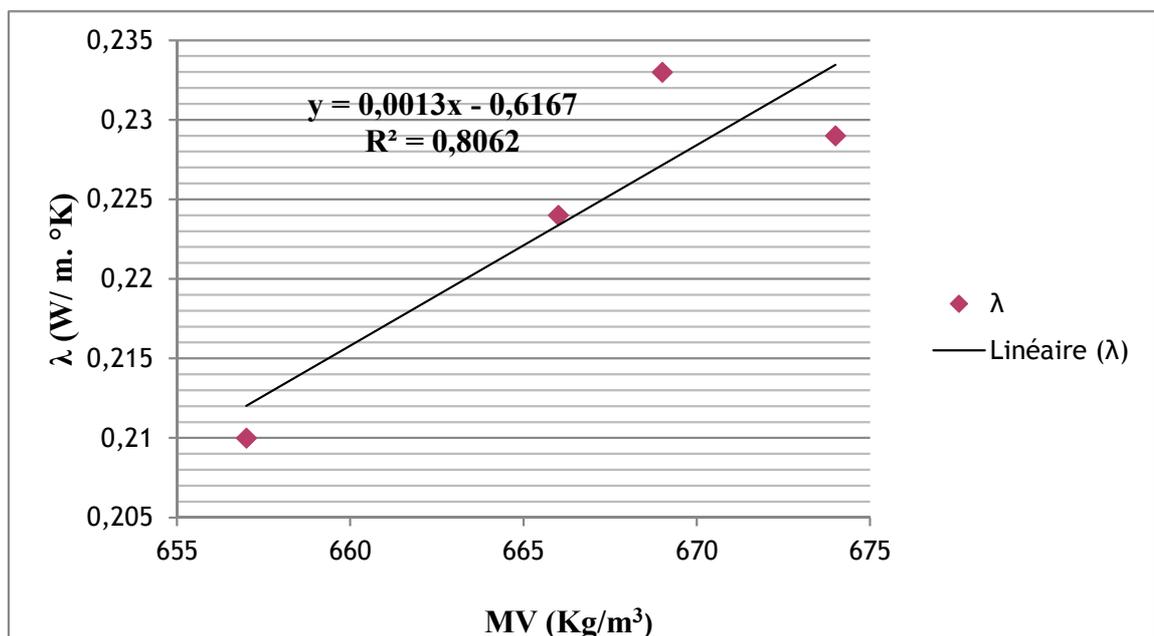


Figure IV. 27: Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique

Tableau IV. 30 : les valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

Les types des bétons	La résistance à la compression (Mpa)	La conductivité thermique λ en (w/m. °k)
BL	2.608	0.210
BTLD 50 % L	2.608	0.216
BCD 0% L	2.984	0.224
BTL 15 % L	3.77	0.251

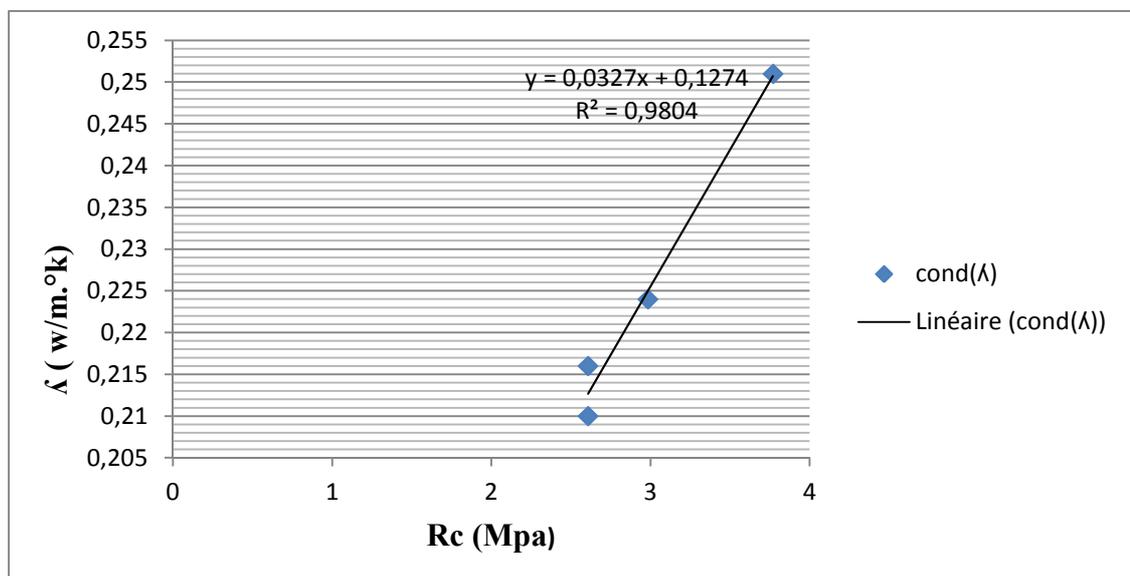


Figure IV.28 : Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à a compression.

Tableau IV. 31: les valeurs de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique.

Les types des bétons	La masse volumique en (Kg/m ³)	La résistance à la compression (Mpa)
BT	648	1.983
BCD 15 % L	656	2.608
BTLD 75 % L	669	2.835
BTLD 50 % L	678	3.690

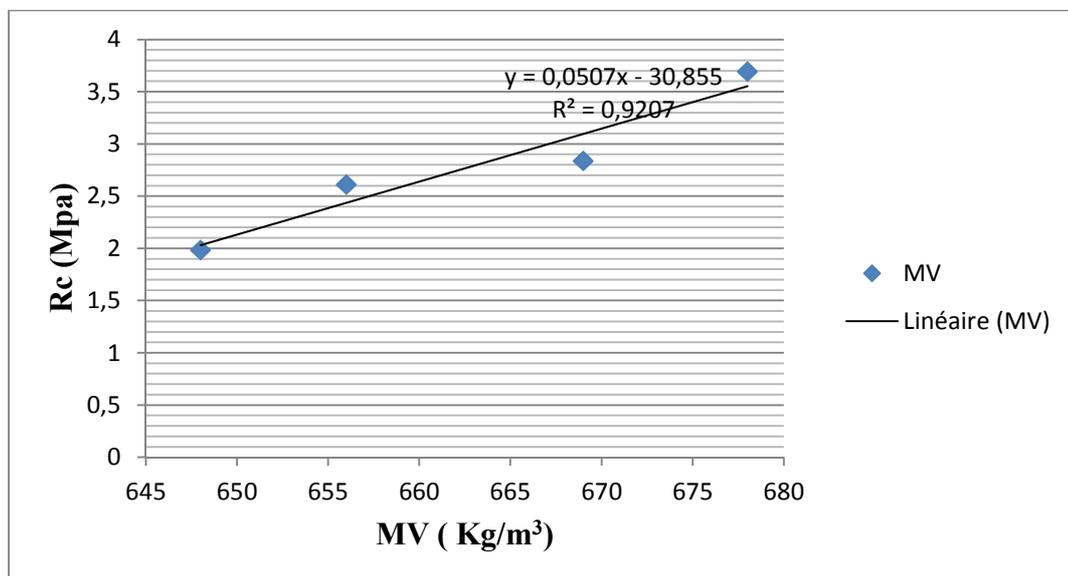


Figure IV.29 : Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique.

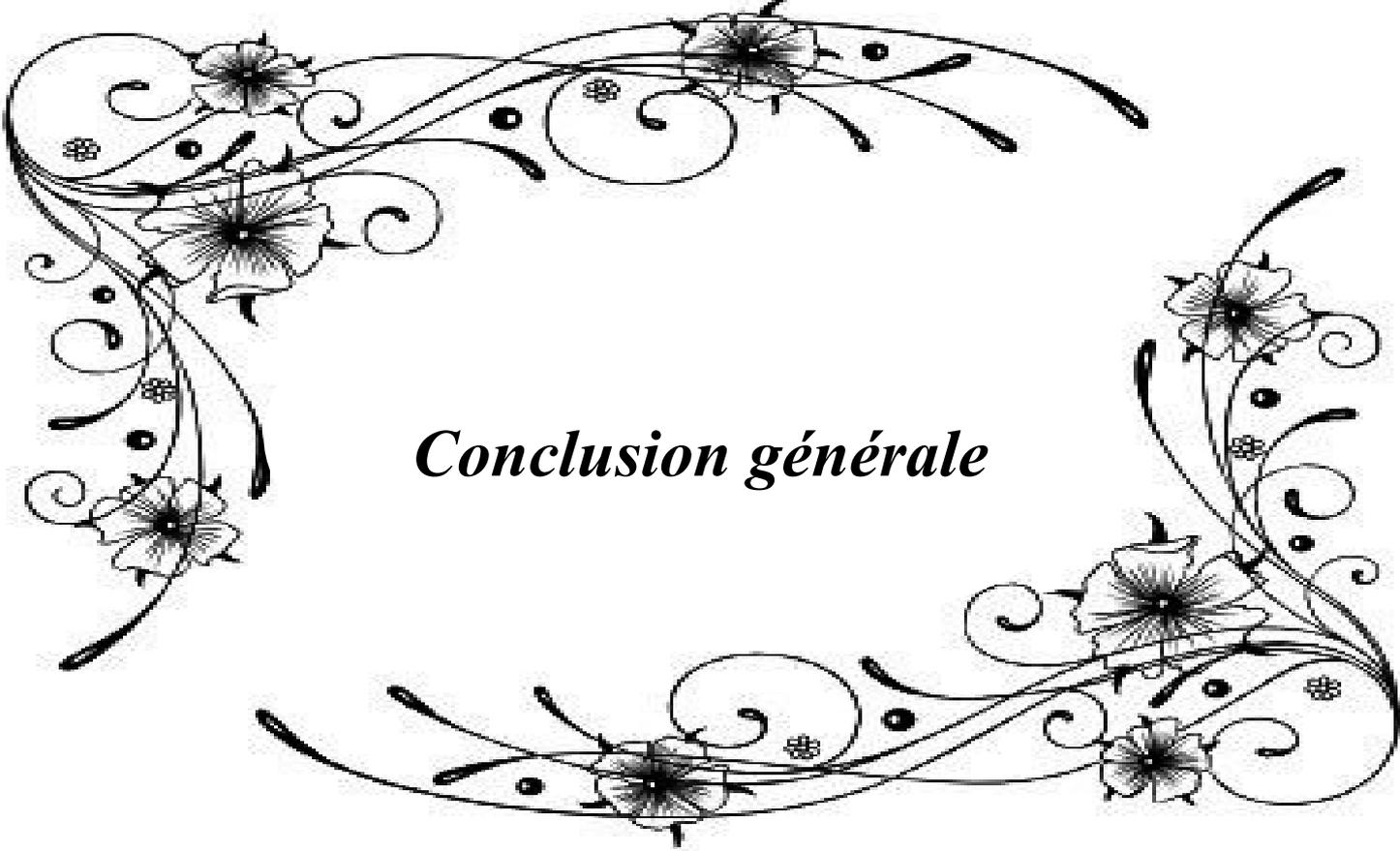
- **Influence du dosage de laitier**

L'évolution de la conductivité thermique des bétons allégés en fonction du dosage en laitier est représentée sur la figure IV (13-19) et Les figures IV (27-28-29) peuvent être considérées comme des références pour choisir les masses volumiques des bétons testés qui pourraient être utilisés comme des matériaux isolants à résistance plus au moins acceptable. Il suffit donc de fixer les limites thermiques ou mécaniques pour déterminer le domaine de la masse volumique correspondant ou le contraire.

- **Influence de la masse volumique**

L'ensemble des résultats de mesure relatifs à l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente des bétons cellulaire sont regroupés dans les tableaux IV (29 – 30 – 31), et illustrés respectivement par les figures IV (27 – 28 – 29)

Nous pouvons remarquer que quel que soit l'état des bétons étudiés, leur conductivité thermique apparente, s'accroît proportionnellement avec la masse volumique apparente. En effet, d'une part la densification croissante des matériaux bouche les pores et élimine l'air qui s'y trouve, ce dernier possède une conductivité thermique inférieure aux conductivités thermiques des matrices solides, et d'autre part, plus le matériau est compact (dense) plus il comporte des particules élémentaires susceptibles de transporter de l'énergie thermique (le cas des bétons à base de sable concassé). Or, la conductivité thermique représente la somme algébrique de la contribution de chacune de ces particules, à la conduction au sein du matériau.

A decorative border composed of black line art. It features elegant, flowing scrollwork and several stylized flowers with five petals and a central stamen. The border is arranged in a roughly rectangular shape, framing the central text.

Conclusion générale

Conclusion générale et Perspectives

Le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques dans le secteur de bâtiment. Généralement, les matériaux utilisés dans le domaine de la construction et du génie civil sont des milieux poreux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif principal est d'étudier la possibilité de valoriser des déchets industriels et les introduire au sein de la composition massique de la formulation des bétons cellulaires tout en assurant des caractéristiques thermique, physique et mécanique admissible pour la construction des parois composant l'enveloppe de bâtiment dans le but d'améliorer son isolation thermique.

L'exploitation des résultats expérimentaux obtenus, nous a permis de quantifier des grandeurs thermo physiques caractéristiques des échantillons que nous avons élaborés. Les intérêts eu à travers ce travail expérimental peuvent être divisés en trois plans :

Sur le plan technique :

La granulométrie des matériaux de construction, modifie considérablement leurs propriétés thermo physiques et mécaniques. Par ailleurs, il apparaît que l'introduction de laitier de hauts fourneaux par substitution du sable dans le béton cellulaire lors de sa préparation a une **influence positive** sur ses performances physiques, mécaniques et thermiques (conductivité et chaleur spécifique).

La masse volumique reste l'un des paramètres essentiels pour suivre l'évolution des paramètres thermophysiques des matériaux car elle permet d'apprécier globalement leurs qualités isolantes.

Les travaux que nous avons effectués sur les propriétés thermophysiques des bétons cellulaire préparés ont permis de mettre en évidence l'influence de la teneur en laitier, de la masse volumique, et de la fraction massique de matériaux de base sur ces propriétés.

En effet la conductivité thermique du matériau est d'autant plus importante que sa teneur en ajout fin est plus élevée, elle est fortement influencée par la masse volumique, et augmente au fur et à mesure que le matériau est dense. Cette densification croissante (cas des bétons à base de sable concassé) provoque une diminution de sa résistance thermique.

L'ajout des granulats à faible diamètres au matériau initial améliore ses performances thermiques, L'augmentation linéaire de la chaleur spécifique avec la teneur en matériaux fin semble confirmer la validité de ces résultats,

Si on prend comme seul critère de choix les performances thermiques du matériau, les bétons cellulaires à base des matériaux de grande finesse présentent les meilleurs avantages. Ils ont une faible masse volumique, des conductivités faibles et de grandes résistances thermiques (chaleur spécifique). Cependant il faut tenir compte d'autres critères de choix comme la durabilité du matériau.

L'étude thermomécanique, a permis de présenter la courbe de variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique, qui doit être considérée comme un critère de choix de ces matériaux pour qu'ils soient utilisés comme des isolants plus au moins porteurs.

Sur le plan environnemental :

La récupération des déchets et l'utilisation des sous-produits industries c'est une question importante visant à soutenir les tendances actuelles concernant la conservation des ressources naturelles, la préservation de l'environnement et les économies d'énergie.

Notre objectif de départ, été de faire une tentative de valorisation des déchets résiduaire, pour l'élaboration d'un béton cellulaire avec des caractéristiques thermo physique et mécanique comparable à celle d'un béton cellulaire à base des matériaux conventionnelle.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de ces déchets est **très favorable** pour la confection des bétons cellulaire à haut performances thermo physique et des caractéristiques mécaniques acceptable.

Sur le plan économique :

La récupération des déchets industriels tel que le laitiers des hauts fourneaux, la chaux et la poudre d'aluminium n'a pas seulement un intérêt environnementale mais aussi un intérêt économique, d'autre part le traitement thermique des éprouvettes du béton cellulaire produits à une très faible température durant 24 Heurs (50 °C), offre un gain très important à l'échelle industriel.

Ce travail ouvrent de nombreuses perspectives telles que:

- ✓ Etude de l'influence de type de ciment sur les performances mécanique des bétons cellulaires.
- ✓ Influence du mode de cure sur les différentes propriétés physiques et thermomécaniques des bétons cellulaires.
- ✓ Etudes des effets des adjuvants sur comportement physique, mécanique et thermique des bétons cellulaires.

Les références bibliographiques

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON CELLULAIRE

- [1] : **Sotehi N.** caractéristique thermique des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation ; thèse de doctorat, université Constantine (2010).
- [2] : Thibault Baste. Marc Bouffard, César Hurlait .Rémi Lacroix, Simon Marcellin, Thibault Oliveira, le béton, Projet IFPS: Institut de Formation d'ingénieur. Université Paris – Sud 1.2008
- [3] : **Adam M., Neville** : Propriétés des bétons. Traduit par le CRIB Edition Eyrolles, Paris (2000).
- [4] : **RILEM**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69
- [5] : **American Concrete Institute** : Guide pour le béton de structure à base des granulats légers. Traduction du CATED, SDT BTP (1970).
- [6] : **MOHELLEBI S**, Caractérisation et Modélisation des paramètre physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites, thèse de doctorat en génie civile, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU ; Soutenu le : 29 Mai 2014 .
- [7] : **ACI 213R-87**: Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of concrete Practice, parts I: Material and general properties of concrete, Detroit, Michigan, (1994).
- [8] : **Kass J.L et Compbell D**: Functional classification of light weight concrete, Matériaux et Constructions, (1972) Vol.5 N°27, pp171-172
- [9] : **SAITI ISSAM** : Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA, mémoire de magistère, UNIVERSITE KASDI MERBAH –OUARGLA, Soutenu le 18 /12/2014.
- [10] : **JACOBS & MAYER**: Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16 1992.
- [11] : **ARNOULD 86** : granulats de béton légers, Paris (1986).
- [12] : **Véronique Cerozo** : Propriétés mécaniques thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales ; approche expérimental et modalisation. These de doctorate (2005)

[13] **AAC, 78:** Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology; Lancaster England, The construction Press Ltd (1978).

[14] **D.W.S Ho,R.K Lewis :** the water sorptivity of concretes :the influence of constituents under continuous curing. Durability of building Materials, 4,(1987),pp241 -252

[15] : **Véronique Cerozo :** Propriétés mécaniques thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales ; approche expérimental et modalisation. Thèse de doctorat (2005).

[16] : **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire :** Le béton cellulaire, Bruxelles.

[17] - **M.H.BEN DHIA,** «Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 213 – janvier - février 1998 - réf. 4159 - pp33-42.

[18] : **AMCO-2387 ,** chapitre 4 ,Guide des liants minéraux utilisés dans la construction et la restauration , P171 à 175.

[19] : **Dr. Ir. P. Boeraeve,** Cours de Béton armé, Chapitre 1. Composition du béton, 17/01/2010

[20] : **Lucien Pliskin .le béton**

[21] **DJOBO YANKWA Jean Noël :** effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les Propriétés de ciments gépolyinérés a base scories volcanique.

[22] **Belhocine. Negoudi :** « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux »Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil, 2013 à l'université KASDI MERBAH OUERGLA.

[23] : **Dr Hadj Sadok, A,** Chapitre II ; Le ciment Portland (2011).

[24]: **NARAYANAN.N and RAMAMURTHY.K:** Structure and proprieties of aerated concrete; a review: cement and concrete research (2000).

[25]: **S.Tada, S.Nakano :** Microstructural approach to properties of moist cellular concrete. **Wittmann FH Amesterdam:** Elsevier (1983) pp71-89

[26]:**N.Narayanan, K.Ramamurthy:** Microstructural investigations on aerated concrete. Cement and concrete research 30 (2000) 457-464.

[27]: **C.Lian, Y. Zhuge, S.Beecham:** The relationship between porosity and strength for porous concrete. Construction and building materials 25 (2011) 4294-4298.

[28]: **A.Laukaitis et al**: Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. Construction and building materials 23 (2009) 3034-3042.

[29]: Blocs Béton cellulaire, carthago béton cellulaire, www.carthagoceramic.com

[31] : **C.Boutin** : Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode auto cohérente. Matériaux et constructions 29 (1996) pp609-615

[32] : **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire** : Le béton cellulaire. Structure and properties of aerated concrete; a review: cement and concrete research (2000).

[33] : **Christian Guegan, Philippe Legras, Jean Francois Mazzoleni, Christian Colin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier** : «Mémento du béton cellulaire» (2005).

[34] : **K.Ramamurthy, N.Narayanan**: Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete. Materia et constructions 33 (2000) pp243-250

[35] : **Goual M. S** : Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : Caractérisation et comportement thermo hydrique; Thèse Doctorat d'état. L'ENP d'Alger (2001).

[36]:**S.Tada**: Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials. Wittmann FH Amsterdam (1992) pp53-63

[37]: **AAC, 78**: Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology; Lancaster England, The construction Press Ltd (1978).

[38] : **J.P.Laurent** : La conductivité thermique 'à sec' des bétons cellulaires autoclaves : un modèle conceptuel. Matériaux et constructions 24 (1991) pp221-226.

[39] : blocs béton cellulaire thermo pierre (pdf).

[40] : Ph. LEGRAS, J.-F. MAZZOLENI et C. GUEGAN © Groupe Eyrolles, 2007, ISBN : 978-2-212-11986-2

CHAPITRE. II : GENERALITES SUE LES MATIERES PREMIERES UTILISANT

[41] : **R. CHAID**. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires Locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006

[42] : **DJOBO YANKWA Jean Noël** , effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les Propriétés de ciments géopolyinères a base scories volcanique.

[43] : **Manai. K**, « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants », Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.

[44].**P.C. AITCIN.** «Les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fontethomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de Construction. Mai1968

[45] :**De Larrard. F,** « Structures granulaires et formulation des bétons », Collection Etudes recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, série Ouvrage d'Art OA34-LCPC, Paris, France.2002, page 12.

[46] :**Bombed. R,** « Rhéologie du béton frais : influence des ajouts de fillers au ciment ». 8th Congrès Int. De Chimie des Ciments, RIO DE JANEIRO. Sept. 1986, IV, 190-196.

[47] : **Husson. S,** « Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers ». Application aux mortiers, Thèse de Doctorat, Université Saint-Etienne, 1991

[48]: **Miller. E.W,** « Blended cements - Applications and implications », Cément and Concrete Composites, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.

[49]: La Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes, devenue aujourd'hui l'Union des Producteurs de Chaux, <http://upchaux.fr>, que je remercie a gracieusement fourni certaines informations complémentaires.

[50]: **Mohammed Bourezg,** Etude Geologique et Meniere de quelques roches industriels; cas d'appications dans le nord-est algerien,these de doctorate n science, université Constantine 1 (p 30).

[51]: livre*les Materia Naturals*de Jean Francois Bertoncello et Julien Fouin, aux éditions du Rouergue.

[52]: **Jacques detry;** Traitement de produits de scalpage (graves de précriblage) de débris de construction au moyen d'un résidu industriel sous forme de chaux éteinte p(4-5)

[53] : **AYECHE Riad ; THESE DOCTORAT :**

Valorisation de la chaux résiduaire, sous-produit de la fabrication d'acétylène, dans le traitement des eaux, BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA Année 2013.

[54] : Groupe Eyrolles, **Techniques et pratique de la chaux** ECOL D'AVIGNON ; Deuxième édition **2003**

CHAPITRE. IV : RESULTATS ET DISCUSSION

[55] : Miled, K., Sab, K., Le Roy, R. Effet d'échelle dans le béton léger de polystyrène expansé ; Colloque Microstructure et Propriétés des matériaux, pp. 189- 194. , ENPC (2005).

- [56]: Khabbazi, A., Lahahar, N., Terhmina, O. Etude expérimentale hygrothermique d'un nouveau matériau isolant à base de granulats de liège ; Phys. Chem. News. Vol. 14, pp. 22-25, (2003).
- [57] : Elbakkouri, A. Caractérisation hygroscopique, thermophysique et mécanique des matériaux allégés : cas du béton allégés avec du liège ou avec des grignons d'olive ; thèse de doctorat, Tetouan (2004).
- [58] : Chafi, N. Matrice cimentaire renforcée de fibres ; thèse de magistère, Constantine (2005).
- [59] : Dreux, G., Gorisse, F. Composition des bétons : méthode Dreux-Gorisse ; Annales de L'ITBTP, n° 414, (1983).
- [60] : Daghache . A, Boudrouaz. A, Etude des caractéristique d'un béton cellulaire à base d'un sable préparé, Université de BBA, (2015/2016)
- [61] : BE LDJILALI IMADE DDINE, Etude de comportement technique de béton cellulaire à basse de sable concassé, université BBA, année (2015/2016).