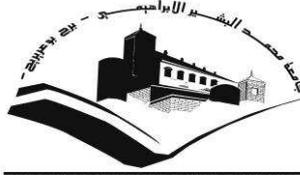


République Algérienne Démocratique et Populaire

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 Génie Civil



جامعة محمد البشير الإبراهيمي «برج بوعريريج»
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

Mémoire de fin d'étude

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME : Master

Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux

THEME :

**Etude des caractéristiques d'un béton cellulaire à
base d'un sable préparé**

Préparé par : Boudrouaz Abd Elhafid
Daghache Abderrahman

Soutenu le : 21/06/2016

Devant le jury composé de :

Mr. Bouguerra. M	Président
Mr. Noui. Ammar	Encadreur
Mr. Bouglada. Salah	Co-Encadreur
Mr. Attia. A	Examineur
Mr. Loumachi. L	Examineur

Promotion : 2015/2016

Remerciement

Nous voudrais très chaleureusement remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réussite de ce travail.

*Nous remercions particulièrement nos encadreurs **Mr. A.Noui** et*

***Mr. S. Bouglada** pour l'encadrement, ses disponibilités et ses conseils.*

*Nous voudrions remercier l'ensemble de notre jury de mémoire, qui ont bien voulu examiner ce travail : **A. Atia, L. Loumachi**, Président : **A. Bouguerra***

Et Tous les enseignants de : Génie Civil

Nous adressons nos remerciements encore à tous les responsables du laboratoire de Génie Civil qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement. Nous remercions aussi l'administration de génie civil.

*Nous voudrais exprimer nos reconnaissances aux **Mr.Mezian** et **Mr.Amara** Qui nous a permis de fait des mesures thermiques au laboratoire de CNERIB ;*

Nous remercie chaleureusement tous nos collègues étudiants en master 2, plus particulièrement nos camarades de master 2 en Génie Civil Hakim, Ammar, Bougue, Yamine, Samir, Taous, Siham, Salma ; pour leur esprit de fraternité et de collaboration qu'ils nous ont témoigné durant notre recherche.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je remercie le dieu le tout puissant de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce travail à :

- ✦ *Ma très chère mère, qui m'a accompagné durant les moments les plus rudes de ce long parcours de mon éducation, qui n'a cessé de me soutenir par ses prières et ses conseils, Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments pénibles de ma vie.*

- ✦ *A mon père qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments pénibles de ma vie.*

- ✦ *A Ma famille et mes proches.*

- ✦ *A mon binôme abd elhefid et Tous mes amis et tous qui a connu Abderrahman.*

- ✦ *A Tous mes enseignants du primaire à l'université.*

- ✦ *À ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage.*

abderrahman

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je remercie le dieu le tout puissant de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce travail à :

- ✦ *Ma très chère mère, qui m'a accompagné durant les moments les plus rudes de ce long parcours de mon éducation, qui n'a cessé de me soutenir par ses prières et ses conseils, Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments pénibles de ma vie.*

- ✦ *A mon père qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments pénibles de ma vie.*

- ✦ *A Ma famille et mes proches.*

- ✦ *A mes frères et mes sœurs et ses fils ; Lokman, Salma, Zako, Safa, Yacine, Nadjla.*

- ✦ *A mon binôme abderrahman et Tous mes amis et tous qui a connu Abd elhafid.*

- ✦ *A Tous mes enseignants du primaire à l'université.*

- ✦ *À ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage.*

Abd elhafid

Notations employées

Φ_1 : porosité intrinsèque du liant.

V_{liant} : volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

ρ_b : masse volumique apparente du béton en t/m^3 .

M_f : module de finesse.

ρ_{app} : masse volumique apparente (kg/m^3).

ρ_{abs} : masse volumique absolue (kg/m^3).

M : Masse du matériau.

ρ_1, ρ_0 : Masse volumique du solide et du fluide en (g/cm^3).

η : viscosité.

D : Diamètre de la particule.

g : Accélération de la pesanteur.

S : Surface spécifique (cm^2/g).

k : Constante de l'appareil Blaine.

e : Porosité de la couche tassée.

t : Temps mesuré en secondes.

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

P : Porosité

S : sable.

T : température ($^{\circ}C$).

HR : l'humidité relative %

ESp : équivalent de sable au piston

ESv : équivalent de sable visuel

R_t : résistance à la traction (MPa).

F_t : Charge à la rupture (N)

b : largeur de la section carrée du prisme (mm)

R_c : résistance à la compression (MPa)

ε : la porosité totale

V_v : volume des vides (m³).

V_t : volume total

$M(t)$: masse de l'échantillon humide à l'instant t .

$M(0)$: masse initiale de l'échantillon à l'état sec.

ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm³).

i : volume d'eau absorbé par unité de surface.

S_w : sorptivité (mm.mn^{-0.5}).

t : temps de mesure (min).

λ : Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

t : Temps de passage de l'air dans la couche de poudre en seconde.

e : porosité de la poudre dans la cellule.

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm²)

BCNA : béton cellulaire non autoclave

BCA : béton cellulaire autoclave

Abréviations des bétons formulés

BT : béton témoin

BP : béton pouzzolane

BL : béton laitier

BTA : béton témoin adjuvant

BPA : béton pouzzolane adjuvant

BLA : béton laitier adjuvant

BTC : béton témoin de sable concassé

BPC : béton pouzzolane de sable concassé

BLC : béton laitier de sable concassé

BTCA : béton témoin de sable concassé adjuvant

BPCA : béton pouzzolane de sable concassé adjuvant

BLCA : béton laitier de sable concassé adjuvant

BSO : béton cellulaire de sable d'oued souf

BSC : béton cellulaire de sable concassé

Sommaire

Chapitr I Introduction général

I.1 Introduction.....	1
I.2 problématique	2
I.3. Objectifs.....	2
I.4 Structure de mémoire.....	2

Chapitre II Revue bibliographie

II.1. Revue bibliographique sur les matériaux de séparation.....	4
II.1.1. les matériaux de séparation dans les bâtiments.....	4
II.1.1.1. Les briques	4
II.1.1.2. Les blocs en béton cellulaire	5
II.1.1.3. Les Plaques de plâtre.....	5
II.1.1.4. les panneaux alvéolaires.....	6
II.2. Revue bibliographique sur les bétons légers	7
II.2.1. Introduction.....	7
II.2.2.Définition	7
II.2.3.Classification des bétons légers	7
II.2.4. Propriétés des bétons légers	10
II.2.4.1.Légèreté	10
II.2.4.2.Comportement et performances mécaniques	11
II.2.4.3.L'absorption	14
II.2.4.4. La sorption/ désorption.....	15
II.2.4.5.Durabilité.....	16
II.2.4.6. Propriétés thermiques.....	17
II.3. Revue bibliographique sur les bétons cellulaires.....	19
II.3.1.Introduction.....	19
II.3.2. historique.....	19

Sommaire

II.3.3.Définition	20
II.3.4.Matières premières	22
II.3.5.Constituant de béton	24
II.3.5.1.Ciment	24
II.3.5.1.a.Définition	du
ciment.....	24
II.3.5.1.b. Processus de fabrication des ciments courants.....	24
II.3.5.1.b.1.Clinker.....	24
II.3.5.1.b.2. Le gypse($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	25
II.3.5.1.c. Classification des ciments courants.....	26
II.3.5.2. La chaux	27
II.3.5.2.a. Historique.....	27
II.3.5.2.b. Matière première.....	27
II.3.5.2.b.1. Le calcaire.....	27
II.3.5.2.c.Fabrication de la chaux.....	28
II.3.5.2.c.1. La préparation du calcaire.....	28
II.3.5.2.c.2. La cuisson.....	28
II.3.5.2.d. Le cycle de la chaux.....	29
II.3.5.3. L'eau de gâchage.....	30
II.3.5.4 Les adjuvants.....	30
II.3.5.4.a. Classification et utilisation.....	31
II.3.6. Fabrication du béton cellulaire.....	32
II.3.7. Avantages du béton cellulaire	36
II.3.8. Classification du béton cellulaire.....	37
II.3.9.Propriétés du béton cellulaire.....	38
II.3.9.1.La structure.....	38
II.3.9.2.La densité	39
II.3.9.3.La résistance à la compression	39

Sommaire

II.3.9.4.La résistance à la traction	41
II.3.9.5. Résistance aux agents chimiques	42
II.3.9.6. Résistance au gel et dégel.....	42
II.3.9.7.Le retrait au durcissement	42
II.3.9.8.Absorption d'eau et capillarité du béton cellulaire	43
II.3.8.9.Conductivité thermique	44
II.3.9.10.Conductivité acoustique	46
II.3.9.11. Résistance au feu	46
II.3.9.12. Légèreté	46
II.3.10. Impact environnementale et économique du béton cellulaire.....	47
II.3.11. Gamme de produits	49
II.3.11.1. Élément non arme.....	49
II.3.11.2.Elément arme.....	50
II.4. conclusion	51

Chapitre III Les ajouts minéraux

III.1. Introduction	52
III.2. les ajouts minéraux	52
III.2.1. Les principaux ajouts minéraux actifs	52
III.2.1.1. Les laitiers de haut fourneau	52
III.2.1.1.a. L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons.....	53
III.2.1.2. La pouzzolane	54
III.2.1.2.a. Types de pouzzolane.....	55
III.2.1.2.b. L'effet de La pouzzolane sur les caractéristiques des bétons.....	56
III.2.1.3. Les cendres volantes	57
III.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes	57
III.2.2.1. Fillers calcaires	58

Sommaire

III.2.2.1.a. L'effet filler.....	59
III.3. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....	59
III.4. Conclusion.....	60

Chapitre IV méthode des essais et Caractérisation de matières premières

IV.1. Introduction.....	61
IV.2. Méthode des essais.....	61
IV.2.1. Essais sur sable.....	61
IV.2.1.1. Analyse granulométrique par tamisage.....	61
IV.2.1.2. Le module de finesse.....	62
IV.2.1.3. Equivalent de sable.....	63
IV.2.1.3.a. Equivalent de sable visuel.....	64
IV.2.1.3.b. Equivalent de sable piston.....	65
IV.2.1.4. La masse volumique.....	65
IV.2.1.4.a. Masse volumique apparente.....	65
IV.2.1.4.b. Masse volumique absolue.....	66
IV.2.2. Essais sur Ciment.....	67
IV.2.2.1. La masse volumique.....	67
IV.2.2.1.a. Masse volumique apparente.....	67
IV.2.2.1.b. Masse volumique absolue.....	67
IV.2.2.2. La Finesse de mouture (finesse de Blaine).....	68
IV.2.3. Essais sur les ajouts.....	70
IV.2.4. Les essais destructifs sur béton durci.....	70
IV.2.4.1. La résistance à la compression (essai d'écrasement).....	70
IV.2.4.2. Mesure de la conductivité.....	71
IV.2.4.2.a. But et méthode de mesure.....	71
IV.3 caractérisation des matériaux utilisés.....	72

Sommaire

IV.3.1.. Sable d'oued souf	72
IV.3.1.1. L'analyse granulométrie	72
IV.3.1.2. Le module de finesse	74
IV.3.1.3. L'équivalent de sable	74
IV.3.1.4. La masse volumique	75
IV.3.1.4.a. Masse volumique apparente.....	75
IV.3.1.4.b. Masse volumique absolue.....	75
IV.3.2. Sable concasse	76
IV.3.2.1. Analyse granulométrie.....	76
IV.3.3. Ciment	77
IV.3.3.1. Caractéristiques physique	78
IV.3.3.1.a.Masse volumique apparente.....	78
IV.3.3.1.b. Masse volumique absolue.....	78
IV.3.3.1.c. La finesse du ciment.....	78
IV.3.3.2. Caracteristiques chimiques	79
IV.3.3.3. Utilisations.....	80
IV.3.4. La poudre d'aluminium	80
IV.3.4.1. Fiche technique	80
IV.3.5. La chaux	81
IV.3.5.1. Fiche technique de la chaux éteinte	81
IV.3.5.2. Précautions d'emploi	81
IV.3.6. Les ajouts minéraux.....	81
IV.3.6.1. La pouzzolane	81
IV.3.6.2. Le laitier.....	81
IV.3.6.3. Les caractéristiques chimiques	82
IV.3.6.4. Les caractéristiques physiques.....	82

Sommaire

IV.3.7. Super plastifiants	83
IV.3.8. Eau de gâchage	83
IV.4. Formulation de béton	84
IV.5. Types de béton formulés	84
IV.6. Confection et contrôle des éprouvettes	86
IV.6.1. Malaxage du béton	86
IV.6.2. conservation dans l'étuve	87
IV.7. Conclusion.....	87

Chapitre V présentation et analyse des résultats

V.1 Introduction	88
V.2 résultats et discussion	88
V.2.1 résistance à la compression (sable oued souf)	88
V.2.1 résistance à la compression (sable concasse).....	92
V.2.2 masse volumique	95
V.2.3 conductivité thermique.....	98

Chapitre VI conclusion général

VI.1. Conclusion générale.....	100
VI. Perspective.....	101

Liste des figures et tableaux

Listes des figure

Chapitre II revue bibliographique

Figure II.1 : Classification des bétons légers.....	9
Figure II.2 : Structure des bétons légers.	9
Figure. II.3 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores	11
Figure II.4 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment d'après	12
Figure II.5 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique.....	13
Figure II.6 : Courbes de sorption et désorption du béton cellulaire	16
Figure II.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau ω du matériau	19
Figure II.8 : Autoclavage d'un béton cellulaire.....	22
Figure II.9 : Schéma représentent la légèreté du béton cellulaire.....	23
Figure .II.10 : Poudre de ciment courant	24
Figure II.11 : Microphotographie d'un clinker	25
Figure II.12 : Four à chaux la ville à Montluçon.....	30
Figure II.13 : Calcaire	30
Figure II.14 : Chaux Vive.....	31
Figure II.15 : Réaction en cours	31
Figure II.16 : Schéma de fabrication des blocs	36
Figure II.17 : Schéma de fabrication des éléments armés	37
Figure II.18 : Structures des bétons cellulaires.....	41
Figure II.19 : Répartition des cellules en fonction de leur diamètre.....	41
Figure II.20 : Principe du transfert des contraintes dans le béton et le béton cellulaire	43
Figure II.21 : Comparaison de retrait dû au séchage pour différents matériaux	45
Figure II.22 : Absorption capillaire pour différents matériaux.....	46

Liste des figures et tableaux

Figure II.23 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire	47
Figure II.24 : System d'isolation repartie	48
Figure II.25 : Température en équilibre quasi-constant.....	48
Figure II.26 : La résistance au feu	49
Figure II.27 : Légèreté d'un béton cellulaire	49
Figure II.28 : Consommation de matières première et d'énergie nécessaire à la production de matériaux de construction	51
Figure II.29 : Déférénts types des blocs.....	52
Figure II.30 : Déférénts types des carreaux	52

Chapitre III les ajouts minéraux

Figure III.1 : Le laitier de haut fourneau	53
Figure III.2 : type de pouzzolane.....	55
Figure III.3 : cendre volante	57
Figure III.4 : Filler calcaire.....	58

Chapitre IV Chapitre IV méthode des essais et Caractérisation de matières premières

Figure IV.1 : La tamiseuse utilisée.	62
Figure IV.2 : Essai d'équivalent de sable visuel et par piston.	64
Figure IV.3 : Le densimètre le Chatelier	68
Figure IV.4 : Appareil de Blaine.....	69
Figure IV.5 : presse hydraulique.....	70
Figure IV.6 : l'éprouvette après la coupure	72

Liste des figures et tableaux

Figure IV.7 : Le CT METRE	72
Figure IV.8 : Courbe granulométrie de sable.....	74
Figure IV.9 : Courbe granulométrique du sable concassé.	77
Figure IV.10 : sac de 20 kg de la chaux éteinte	81
Figure IV.11 : malaxeur utilisé.	86
Figure IV.12 : l'étuve de conservation.....	87

Chapitre V présentation et analyse des résultats

Figure V.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (oued souf) au cours du temps.....	89
Figure V.2 : Evolution de la résistance à la compression des bétons adjuvantés en fonction des sables préparés (oued souf) au cours du temps.....	90
Figure V.3 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (oued souf) a 28 jours.....	91
Figure V.4 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (sable concassé) au cours du temps.....	93
Figure V.5 : Evolution de la résistance à la compression des bétons adjuvantes en fonction de sable préparé (sable concassé) au cours du temps.....	94
Figure V.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (sable concassé) a 28 jours.	94
Figure V.7 : les densités des bétons cellulaires à base des deux sables préparés sans adjuvant	96
Figure V.8 : les densités des bétons cellulaires adjuvanés à base des deux sables préparés ..	96
Figure V.9 : les densités de tous types de béton cellulaire formulé.....	97
Figure V.10 : la conductivité thermique λ du béton cellulaire a base des deux sables préparés sans adjuvant	98

Liste des figures et tableaux

Figure V.11 : la conductivité thermique λ du béton cellulaire adjuvante a base des deux sables préparés.....	99
---	----

Liste des tableaux

Chapitre II revue bibliographique

Tableau II.1 : Classification des bétons légers selon la masse volumique.....	9
Tableau II.2 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction.	9
Tableau II.3 : Caractéristiques de quelques bétons légers.....	14
Tableau II.4 : Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre $>2 \mu\text{m}$	15
Tableau II.5 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux	18
Tableau II.6 : Les différents types d ciment courants	27
Tableau II.7 : Classification et utilisation des adjuvants selon la norme européenne	32
Tableau II.8 : Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression.....	38
Tableau II.9 : Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité	41
Tableau II.10 : Formules empiriques reliant la résistance à la compression, la composition et la porosité	42
Tableau II.11 : Valeurs caractéristiques de la résistance à la traction par flexion	43
Tableau II.12 : comparaison entre le béton cellulaire et les autres matériaux de construction	50

Chapitre IV méthode des essais et Caractérisation de matières premières

Tableau IV.1 : Tamis utilisés pour le tamisage du sable.	62
Tableau IV.2 : Modules de finesse du sable.	63

Liste des figures et tableaux

Tableau IV.3 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP	65
Tableau IV.4 : Analyse granulométrique du sable d'oued souf	73
Tableau IV.5 : Résultats d'essai d'équivalent de sable d'oued souf testé.	74
Tableau IV.6 : Masse volumique apparente du sable d'oued souf	75
Tableau IV.7 : Masse volumique absolue du sable d'oued souf.	75
Tableau IV.8 : Analyse granulométrique du sable concassé	76
Tableau IV.9 : Masse volumique apparente du ciment CPJ	78
Tableau IV.10 : Composition chimique du ciment utilisé.	79
Tableau IV.11 : L'analyse chimique de la poudre fine aluminium	80
Tableau IV.12 : Analyse chimique des ajouts.	82
Tableau IV.13 : Les caractéristiques physiques des ajouts utilisés.	82
Tableau IV.14 : les caractéristiques de superplastifiant	83
Tableau IV.15 : Analyse physico-chimique de l'eau utilisée	83
Tableau IV.16 : Résultats de formulation d'un m ³ des bétons étudié (sable oued souf).....	85
Tableau IV.17 : Résultats de formulation d'un m ³ des bétons étudié (sable concasse).....	85

Chapitre V présentation et analyse des résultats

Tableau V.1 : Résultats des résistances à la compression des bétons formulés(sable oued souf).....	88
Tableau V.2 : Résultats des résistances à la compression des bétons formulés (Sable concasse)	92
Tableau V.3 : les résultats des masses volumiques des bétons à base des deux types des sables utilisés.....	95
Tableau V.4 : les résultats des conductivités thermiques des bétons à base des deux types de sable.....	98

I.1 Introduction

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, ce qui conduit à la libération d'hydrogène. Le bullage est accompagné de la formation d'hydrates C_3AH_6 produits par réaction de l'hydroxyde d'aluminium avec la chaux, conduisant à un raffermissement suffisant de la pâte permettant de stabiliser la forme du matériau en expansion. Un traitement de cure, généralement une synthèse hydrothermale, favorise ensuite la formation de tobermorite $C_5S_6H_5$ (silicate de calcium) par réaction de la chaux sur la silice. Dans leur gamme courante de masse volumique (400 à 600 kg/m³), ces matériaux présentent un compromis acceptable en termes d'isolation thermique et de performances mécaniques, la conductivité thermique de tels matériaux reste comprise entre 0,1-0,3W/ (mK). Les propriétés mécaniques sont suffisantes pour garantir une utilisation du béton cellulaire en bloc constructif assurant le rôle structurel sur une à deux hauteurs d'étage (résistance en compression de 4 à 7 MPa) [1].

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. et En effet, l'Algérie est connu 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, a cet égard l'idée de promouvoir l'utilisation du sable de dunes dans la fabrication des bétons cellulaire dont le but de 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.

Dans ce contexte, nous menons une tentative d'utilisation et valorisation des matériaux locaux pour la fabrication d'un béton cellulaire on introduit dans le squelette granulométrique du sable de dune de la région d'oued Souf et sable concassé de la région de BBA des ajouts minéraux (pouzzolane, laitier des haut fourneaux) par substituant partiels en présence de la chaux éteinte et la poudre d'aluminium comme agent expansive.

I.2 problématique

Dans le monde contemporaine la technologie du béton cellulaire progresse sans cesse et prend de l'ampleur et devient de plus en plus important compte tenu de ses propriétés spécifiques notamment en terme de légèreté et d'isolation thermique et acoustique ce qui gère plusieurs avantages technico-économique .

En dépit de ces propriétés qui lui offrent le pouvoir d'être un matériau alternatif dans toutes les construction ,son utilisation reste à nos jours très modeste et ne convient du tout a ses avantages ,il est temps à notre pays l'Algérie de commencer à utiliser ce type de béton car l'augmentation de la facture énergétique devient de plus en plus assez importante.

En revanche le problème majeur des blocs du béton cellulaire demeure en sa faible résistance mécanique comparativement à un béton ordinaire et même par rapport à la brique à base d'argile cuite. Pour cette raison, nous avons pensé d'améliorer cette caractéristique mécanique a base des matériaux locaux (sable de dune, sable concassé) en présence des ajouts minéraux actif (la pouzzolane, le laitier des haut fourneaux).

I.3. Objectifs

Ce travail est consacré à la formulation d'un béton cellulaire à base des matériaux locaux qui répond aux exigences de l'évolution de la construction moderne, dont l'objectif est d'évaluer l'effet du sable préparé sur les caractéristiques du béton cellulaire notamment les performances mécaniques tout en gardant une légèreté et une isolation thermique acceptables.

I.4 Structure de mémoire

Chapitre I : Introduction générale

- introduction générale
- problématique
- objectif
- structure de mémoire

Chapitre II : se divise en trois parties ;

- Un aperçu général sur les matériaux de séparation.
- Une revue bibliographique sur les bétons légers, (ses caractérisations, leurs classifications...)

- Une revue bibliographique sur le béton cellulaire, (caractérisations, classifications...)

Chapitre III : Revue sur les ajouts minéraux concerne, leur classification, l'utilisation, et leurs effets sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.

Chapitre IV : Matériaux, matériels et essais

- Caractérisation des différents matériaux utilisés dans la confection des bétons (sable, ciment, chaux, eau de gâchage, et ajouts).
- Déterminer la formulation du béton utilisé dans cette étude.
- Etudier expérimentalement les propriétés du béton confectionné à l'état durci à travers, des essais destructifs (compression), essais thermiques.

Chapitre V : Résultats et analyses

Chapitre VI : Enfin, une conclusion générale clôture notre travail avec quelques recommandations, suivi de références bibliographiques.

II.1. Revue bibliographique sur les matériaux de séparation

II.1.1. les matériaux de séparation dans les bâtiments

Si on parle sur les matériaux ou blocs de maçonnerie dans les bâtiments surtout qui ont un rôle de séparation, on prend en compte des conditions très importantes tel que l'isolation thermique et acoustique, tous ces matériaux ont une propriété commun c'est la légèreté, donc le choix est très vaste, parmi les sont [2] :

- Les briques
- Les Blocs de béton cellulaire
- Les Plaques de plâtre
- Les panneaux alvéolaires
- Les plaques de ciment.

II.1.1.1. Les briques

Les briques pour cloison sont en terre cuit le plus souvent creuses.

- **Caractérisations**

Elles offrent à la fois une isolation thermo-acoustique, la régulation de l'humidité et une bonne résistance mécanique. Les briques creuses sont plutôt légères : 38,4 kg/m² pour une épaisseur de 5 cm. Suivant les dimensions, elles se déclinent en diverses épaisseurs. Enfin, ce matériau s'adapte facilement aux besoins (murs courbes, par exemple) [2].

- **Avantages**

Les cloisons en briques de terre cuite sont solide, insensible aux dégâts des eaux et a une durée de vie importante [2].

- **Inconvénients**

Elles sont chères, leur pose nécessite un temps de séchage des plâtres très long, ralentissant le chantier. Prix : de 600 DA le m² [2].

- **Astuce**

Une pose en double épaisseur et en quinconce renforce leurs qualités mécanique et thermo-acoustique [2].

II.1.1.2. Les blocs en béton cellulaire

Le béton cellulaire appartient à la famille des bétons légers. Les carreaux sont faits de sable siliceux, de ciment et de chaux [2].

- **Caractérisations**

C'est un produit à "isolation répartie" (dans la masse du matériau d'isolation). Il ne nécessite pas la pose d'un isolant supplémentaire. Ces carreaux pèsent presque deux fois moins lourd que les briques plâtrières ou les carreaux de plâtre. Ils peuvent donc les remplacer sur des planchers moins résistants [2].

- **Avantages**

Très léger, il offre une isolation thermique et acoustique performante, tout en étant ininflammable. En outre, il a une grande résistance mécanique et s'avère un bon régulateur d'hygrométrie [2].

- **Inconvénients**

Les carreaux en béton cellulaire nécessitent un enduit. Et pour épouser toutes les formes, ils doivent être façonnés par grattage ou ponçage (production de poussière) [2].

- **Astuce**

Pour une isolation encore meilleure, il suffit d'augmenter l'épaisseur du béton cellulaire utilisé. Le surcoût est compensé par l'inutilité d'un isolant [2].

II.1.1.3. Les Plaques de plâtre

Ce sont de grands panneaux de plâtre habillés d'un parement en carton sur les deux faces. La plaque classique, la fameuse BA 13, a une épaisseur de 13 mm [2].

- **Caractérisations**

Les plaques sont polyvalentes et s'adaptent à tous les usages. Selon l'emploi, il existe trois modèles : à bords amincis, arrondis ou ronds amincis. Elle est également disponible hydrofugée (résistance à la condensation et aux projections d'eau) et ignifugée (résistance au feu) [2].

- **Avantages**

C'est le type de cloisons le plus facile à mettre en œuvre. Légères, elles ne créent pas de grosses surcharges. Et elles affichent un bon rapport qualité/prix [2].

- **Inconvénients**

Des performances acoustique et thermique moyennes sans isolation [2].

- **Astuce**

Pour améliorer l'isolation phonique et thermique, il suffit de remplir de laine minérale le vide entre les plaques [2].

II.1.1.4. les panneaux alvéolaires

Les panneaux sont constitués de deux plaques de plâtre réunies par une âme cartonnée en forme de nid-d'abeilles [2].

- **Caractérisations**

Comme les plaques de plâtre, ils se déclinent en trois types de joints : à bords amincis, arrondis ou ronds amincis. La plupart du temps, ils sont épais de 5 cm. On les trouve en deux dimensions : 2,50 x 1,20 m et 2,50 x 0,60 m [2].

- **Avantages**

Les cloisons en matériau alvéolaire sont relativement économiques et leur mise en œuvre rapide [2].

- **Inconvénients**

Pour fixer à la cloison un objet lourd, des vis spéciales à écartement sont nécessaires. Prix : de 20 à 25 euros le m².

- **Astuce**

Ce type de matériau est une alternative lorsque le poids pose un problème (dans des combles, par exemple) [2].

II.2. Revue bibliographique sur les bétons légers

II.2.1. Introduction

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 incorporé dans la pâte de ciment, le béton est qualifié de béton cellulaire, lorsqu'il vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats, le béton est qualifié de béton sans fines ou béton caverneux, et enfin lorsque les granulats sont eux-mêmes allégés, le béton est alors qualifié de béton de granulats légers, la première catégorie (béton cellulaire) que nous allons nous intéresser dans ce travail.

II.2.2. Définition

Le béton confectionné avec des granulats naturels provenant de roche dure a une masse volumique qui varie peu parce que la densité de la plupart des roches varie peu [3].

Bien que le volume des granulats dans le béton affecte sa masse volumique, ce n'est pas un facteur important. Ainsi en pratique, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200kg/m^3 à 2600kg/m^3 . En conséquence, le poids propre des éléments de béton est élevé et peut représenter un fort pourcentage de la charge sur la structure.

La commission des bétons légers **RILEM** [4] propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800Kg/m^3 . D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'American Concrete Institute [5] limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800Kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours.

II.2.3. Classification des bétons légers

Il existe Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton [6] :

- la matrice : le béton, dans ce cas, est appelé « béton cellulaire ». Les bulles d'air sont créées, lors du malaxage, soit par réaction chimique, soit par action physique.

- entre les gros granulats : le béton, dans ce cas, est appelé « béton caverneux » (ou sans fines, c.-à-d. sans sable).
- dans les granulats : le béton, dans ce cas, est appelé «béton de granulat légers».

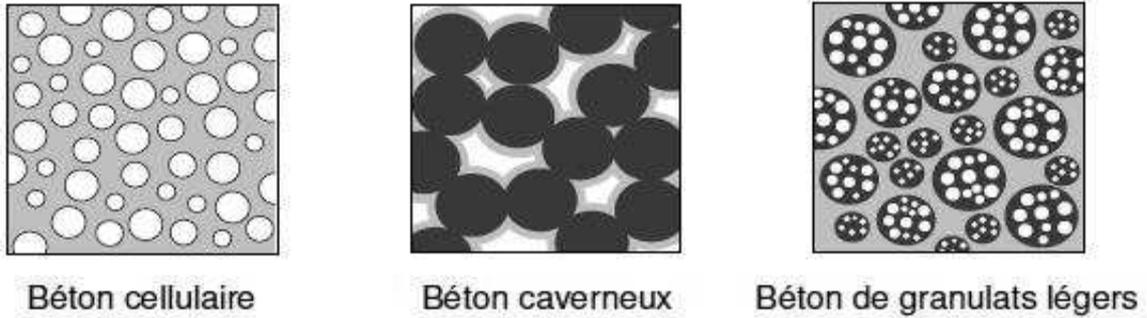


Figure II.1 : Classification des bétons légers

De nouveaux types de granulats légers sont actuellement utilisés : le verre expansé (Meilleure résistance et faible absorption d'eau) [7], le polystyrène (possibilité de mise en œuvre par pompage) [8, 9] et les granulats de bois [10, 11].

La **figure I.2**, montre quelques exemples de structures de bétons légers appartenant aux Différentes catégories des bétons légers [6].

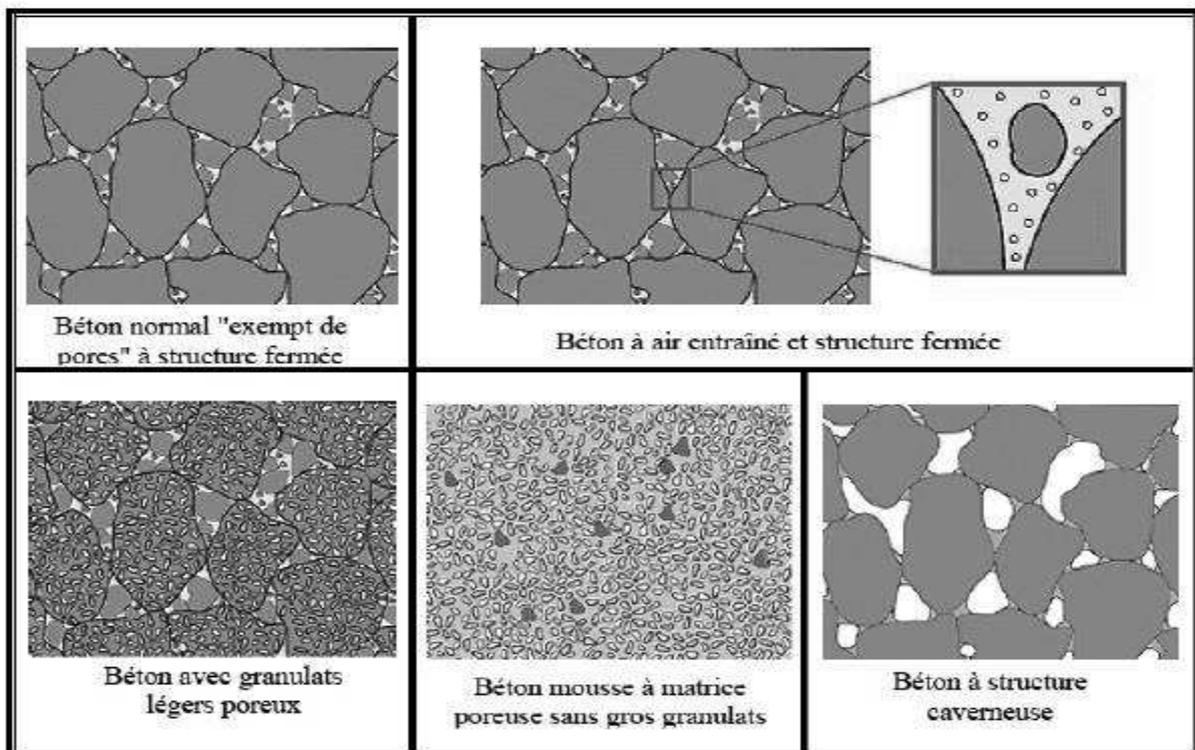


Figure II.2 : Structure des bétons légers.

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide [12] distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **Tableau II.1**

Tableau II.1 : Classification des bétons légers selon la masse volumique [4]

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 De même **Kass J.L et Compbell D [13]**, 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 II.2** :

Tableau II.2 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction [4].

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

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.

- **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.

II.2.4. Propriétés des bétons légers

II.2.4.1. 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.

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée ε_g , due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique.

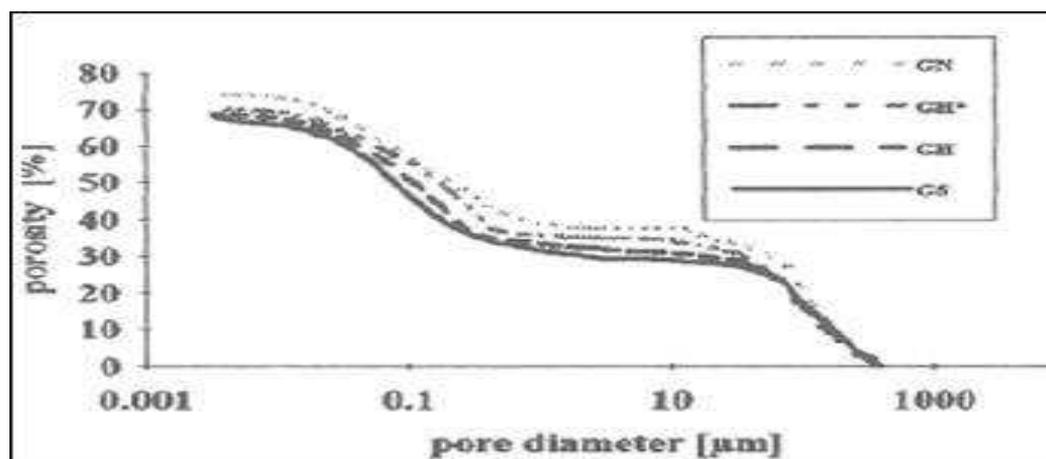


Figure. II.3 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [14]

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant Σ_1 . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H, varie entre 0,01 μm et 5 μm et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre 5 μm et 1000 μm [14].

L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\epsilon_1 = V_{\text{VIDE}} / V_{\text{LIANT}}$$

V_{vide} : volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3)

V_{liant} : volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires à l'origine de la porosité Mésoscopique du matériau.

$$\epsilon_{\text{meso}} = V_{\text{VIDE}} / V_t$$

Avec V_{vides} : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m^3).

V_t : volume total occupé par le matériau (m^3).

II.2.4.2. 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/m^3 . Des résistances à la compression plus élevées exigent des dosages en ciment très élevés par exemple, un dosage en ciment de 630 kg/m^3 est nécessaire pour obtenir une résistance de 70 MPa.

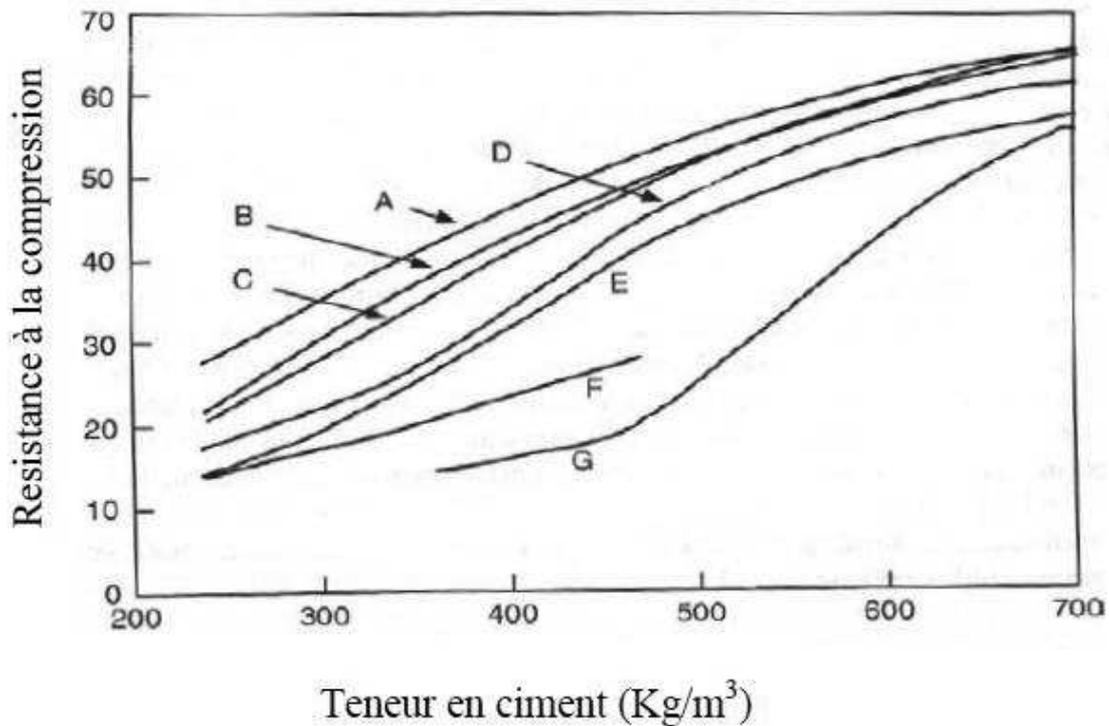


Figure II.4 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment d'après [3], avec : **A** : cendres volantes frittées et granulats fin ordinaire, **B** : laitier de haut fourneau en boulettes et granulats fin ordinaire, **C** : cendres volantes frittées, **D** : schiste fritté, **E** : ardoise expansée **F** : argile expansée et sable, **G** : laitier expansé

Les niveaux des performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre ε_g , qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats ε_g diminue.

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 macropores (diamètre supérieur à 60 μm) et les micropores (diamètre < 60 μm) [14].

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 [15] a obtenu une relation Linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique **figure II.5**.

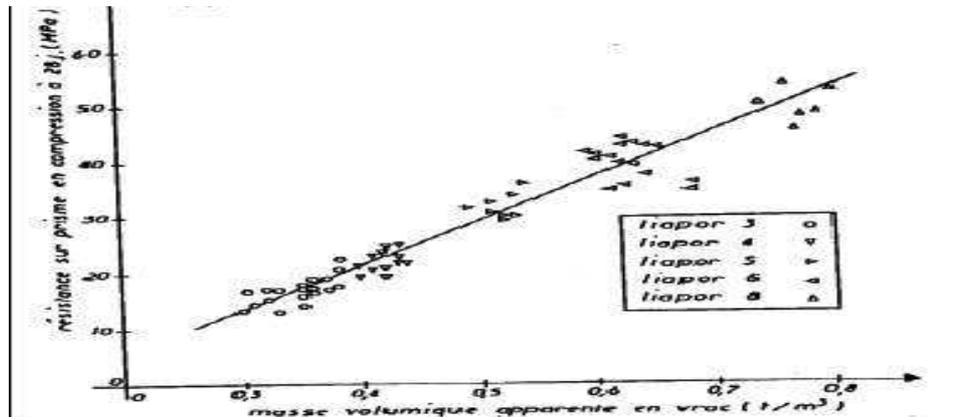


Figure II.5 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique [15]

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 [15]. Le **Tableau II.3** qui suit résume quelques caractéristiques des bétons légers.

Tableau II.3 : Caractéristiques de quelques bétons légers [16]

	Constituants			$\rho(\text{kg/m}^3)$	Porosité ε	$R_c(\text{MPa})$	$E(\text{GPa})$	$\varepsilon(\text{m/m})$
	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*	-	-					

II.2.4.3.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 [15] 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, voir **Tableau II.4**.

Tableau II.4 : Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 μm

	Porosité ouverte %	% pores diamètre >2 μm
Ponce	55.0	68.0
Argile expansée	53.9	11.7
Schiste expansée	37.0	34.7
Cendre frittée	37.0	17.6

Il constate que la plus grande partie de l'eau est absorbée en quelques minutes et que la quantité d'eau absorbée n'est pas corrélée à la porosité ouverte mais à la porosité ouverte de diamètre supérieur à 2 microns. Ceci est confirmé par la comparaison entre le volume de liquide maximal absorbé par les granulats et le volume total des capillaires de diamètre supérieur à 2 microns qui sont quasiment identiques.

II.2.4.4. 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 $W_{\text{conservation}}$ (température T fixe et hygrométrie extérieure H_R variable). Les courbes de sorption-désorption représentent usuellement la teneur massique en eau w du matériau sous une humidité H_R variant entre 0 et 100 %.

La figure suivante représente les courbes de sorption et désorption du béton cellulaire.

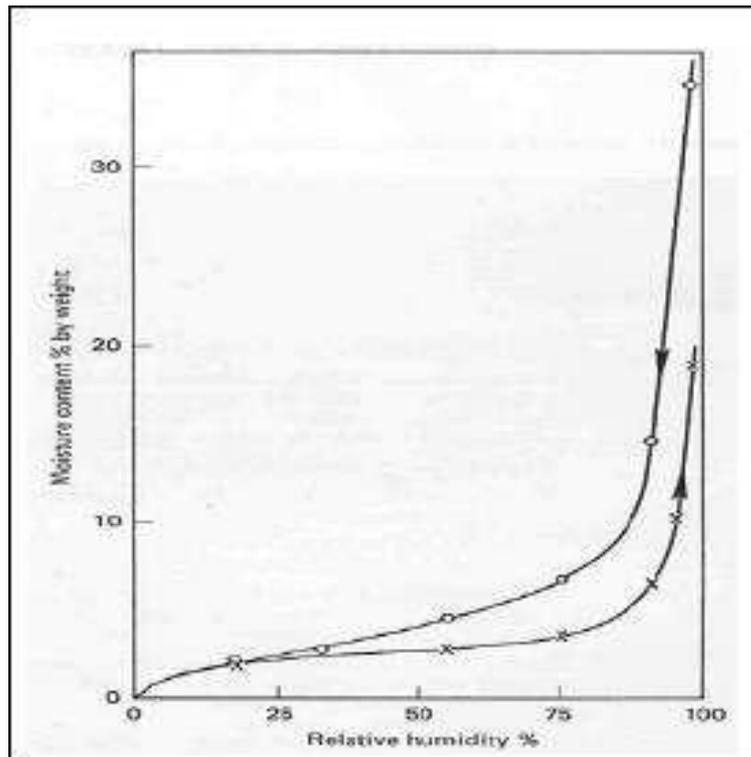


Figure II.6 : Courbes de sorption et désorption du béton cellulaire de $\gamma = 500 \text{ kg/m}^3$ à $T = 20^\circ\text{C}$ [17]

II.2.4.5. 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 ; 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 [18].

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. Ce n'est que si les granulats eux-mêmes sont saturés qu'il peut y avoir désorganisation : leur expansion peut rompre l'adhérence avec la matrice environnante [18].

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.

II.2.4.6. 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.

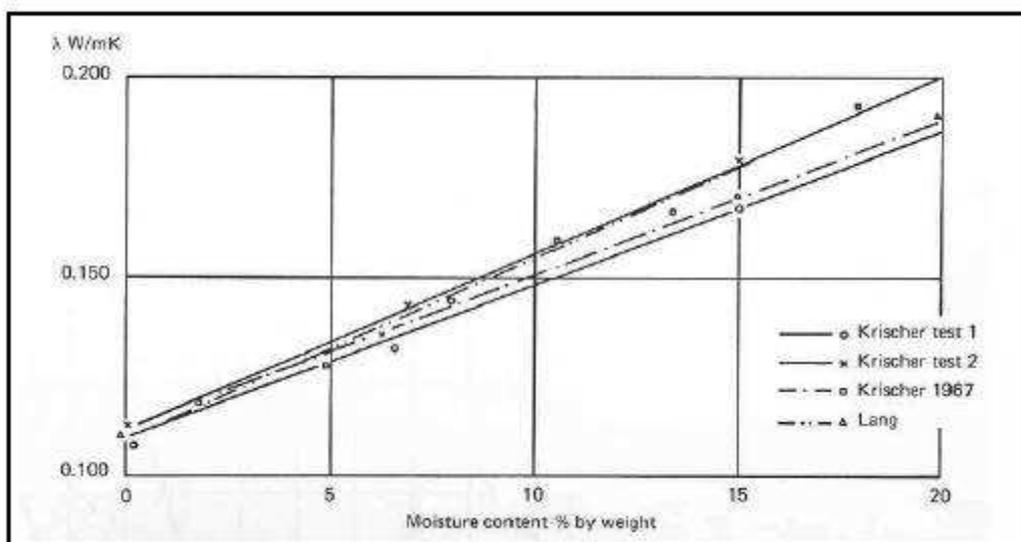
Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion 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 W/ (m.K) tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de 0,60 W/ (m.K) [16].

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 [16]. Des caractéristiques thermiques de certains matériaux sont illustrées dans le **Tableau II.5**

Tableau II.5 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [16]

	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. Des études similaires à celles réalisées sur les bétons de granulats Légers, montrent les variations de conductivité λ en fonction de la teneur en eau, voir **figure II.7**.

Figure II.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau ω du matériau [17]

II.3. Revue bibliographique sur les bétons cellulaires**II.3.1.Introduction**

Le Béton cellulaire est un matériau de construction minéral et massif. Ses propriétés physiques (Légèreté & solidité, isolation thermo acoustique, ininflammabilité) en font un matériau d'exception.

Grâce à sa structure contenant des millions de pores, il présente une faible masse volumique tout en assurant une solidité optimale, ce qui lui permet d'être un matériau simple à construire à usage multiple (résidentiel et industriel).

II.3.2. historique

Le béton cellulaire tel que nous le connaissons de nos jours est né de la combinaison de deux inventions antérieures : l'autoclavage du mélange sable/chaux/eau et "l'émulsifiassions" des mélanges de sable, ciment/ chaux et eau.

La première invention est attribuée en 1880 à W. Michaelis. Ce dernier a mis en contact un mélange de chaux, sable et eau avec de la vapeur d'eau saturée sous haute pression et est ainsi parvenu à donner naissance à des silicates de calcium hydrates hydrorésistants. La chaux réagit avec le sable quartzeux et l'eau. Cette invention est encore et toujours à la base de tous

Les matériaux de construction durcis à la vapeur d'eau saturée sous haute pression. La seconde invention concerne l'émulsifiassions des mortiers. En 1889, cette invention a été octroyée à E. Hoffmann. Il a utilisé de la pierre à chaux finement broyée et de l'acide sulfurique pour émulsionner des mortiers à base de ciment et de gypse. En 1914, J.W. Aylsworth et F.A. Dyer ont brevété un procédé utilisant de la poudre d'aluminium ou de zinc comme émulsifiant. Ces poudres de métal réagissent en milieu alcalin (chaux ou ciment) en dégageant de l'hydrogène. Cette formation de gaz fait lever la masse de béton frais à l'instar de ce qui se produit, lors de la fabrication du pain.

En 1924, le Suedois J.A. Eriksson débute la production de béton cellulaire a base d'un mélange de sable fin, de chaux et d'eau, auquel il ajoute une petite quantité de poudre de métal. Trois ans plus tard, il combine ce processus à l'autoclavage, tel que décrit dans le brevet de Michaelis. Apres avoir lève et s'être solidifie dans un autoclave a une température d'environ 180°C avec de la vapeur d'eau saturée, sous haute pression, le mélange émulsionne durcit. Parallèlement, un processus a base de sable fin, de ciment et d'eau avec adjonction

d'une petite quantité de poudre de métal est développée au début des années trente. K.I.A. Eklund a fait breveter ce procédé en 1939.

La principale avancée par rapport au béton cellulaire de la période antérieure est le durcissement à la vapeur d'eau saturée sous haute pression permettant de réduire très nettement le retrait du au séchage.

Enfin, une troisième étape s'imposait pour arriver au béton cellulaire, tel que nous le connaissons aujourd'hui : la fabrication en série de petits et de grands formats, d'éléments armés ou non avec un degré précision suffisant. Pour ce faire, une méthode de production a été développée après 1945. Les produits sont découpés aux dimensions souhaitées au moyen de fins fils d'acier très tendus ce qui permet d'obtenir des produits finis de grande précision. C'est en 1953 que la Belgique a commencé à produire des blocs de béton cellulaire. Le marché y a vu un intéressant complément aux produits de construction traditionnels. Suite au franc succès du produit, la production a été étendue, dès 1957, à celle d'éléments armés en béton cellulaire. Un développement important car des éléments de grandes dimensions pouvaient désormais être réalisés. Ces éléments sont principalement utilisés dans la construction industrielle.

C'est en Suède, patrie d'Eriksson, que les premières usines ont vu le jour. C'est également de ce pays que le matériau a été diffusé et produit dans le monde entier. 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 [19]

II.3.3.Définition

Le béton cellulaire est un matériau de construction à base de matières minérales présentes en abondance dans la nature, ses constituants sont : du sable fin, du ciment, de la chaux et d'un agent expansif tels que [20] :

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

Sable, chaux et ciment constituent les matières premières de base. Celles-ci sont intimement mélangées dans des proportions bien déterminées, après quoi on y ajoute de l'eau. L'adjonction d'une petite quantité de poudre d'aluminium aura pour effet de faire lever la pâte [19].

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. Dans les moules, destinés à la production d'éléments armés, sont disposées les armatures, calculées en fonction de la vocation des éléments. Ces armatures, préalablement coupées aux dimensions requises, sont soudées automatiquement et sont traitées contre la corrosion.

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 myriades de cellules gorgées d'hydrogène, rapidement chassées 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.

Revenons à notre procédé de fabrication. Après démoulage, la masse est découpée à dimension suivant le type de produit : blocs, linteaux, éléments armés.

Le produit passe ensuite à l'autoclave ou il est soumis à une température de 180°C et à une pression de 10 atmosphères. C'est à l'issue de l'autoclavage que le matériau acquiert définitivement les propriétés qui lui sont propres.

Un procédé ultramoderne de fabrication et le strict respect des normes qualitatives permettent d'offrir un matériau d'exception dont les avantages sont très appréciés dans la construction.

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. La fabrication ne dégage aucun gaz toxique et ne pollue absolument pas l'eau [19].

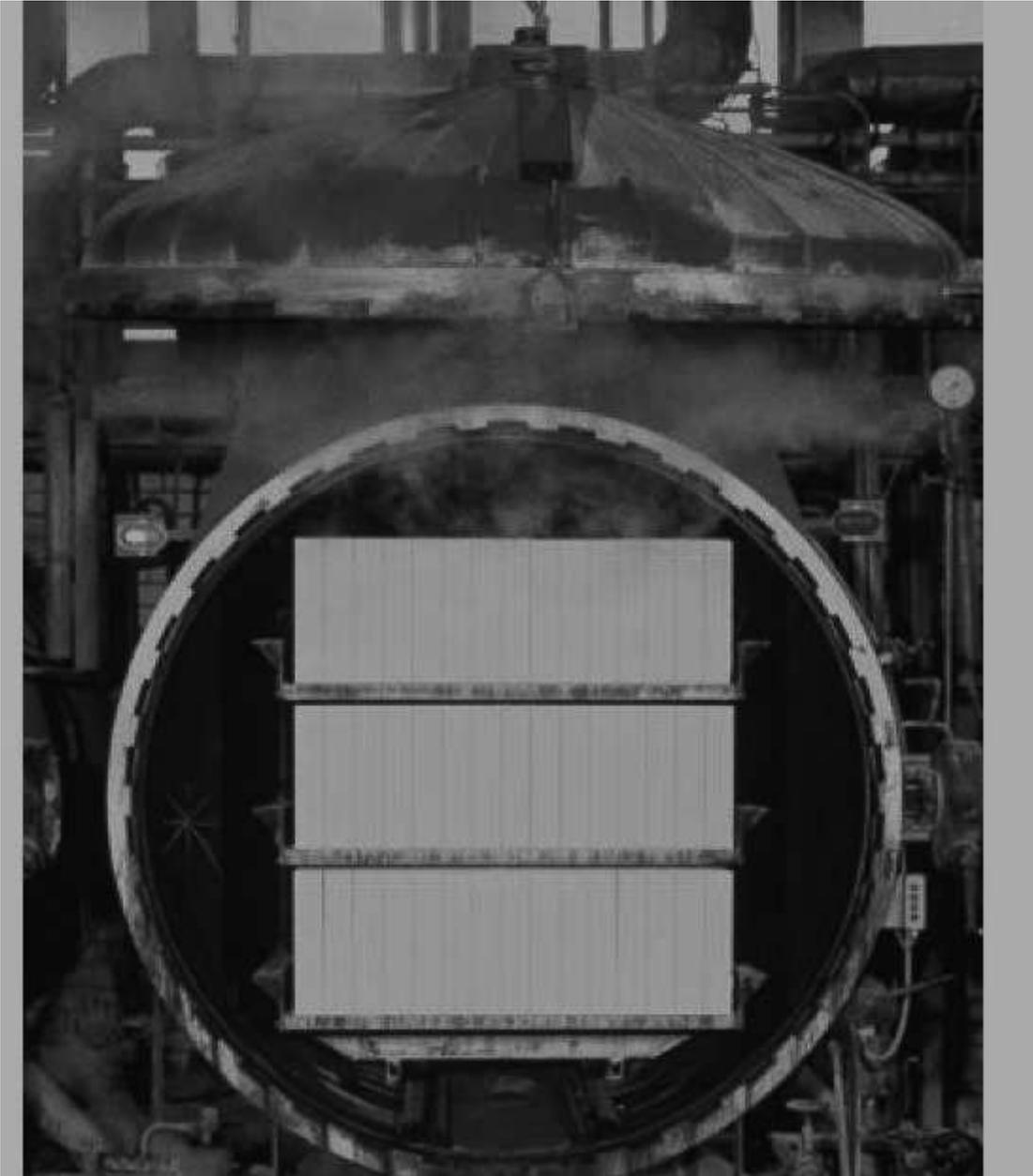


Figure II.8 : Autoclavage d'un béton cellulaire

II.3.4. Matières premières

Les matières premières nécessaires à la fabrication du béton cellulaire sont [19] :

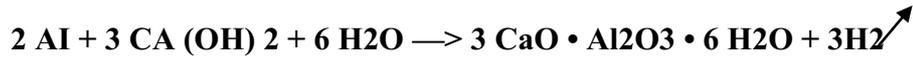
- du sable blanc très pur (95% de silice)
- de la chaux
- du ciment
- de la poudre d'aluminium
- de l'eau

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

En présence d'eau, la chaux réagit avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydrates (tobermorite). Chaux et ciment servent de liants.

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.

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



C'est l'hydrogène ainsi libéré qui crée les cellules. En cours de durcissement de la pâte, l'hydrogène se libère et les cellules se remplissent d'air.

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

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

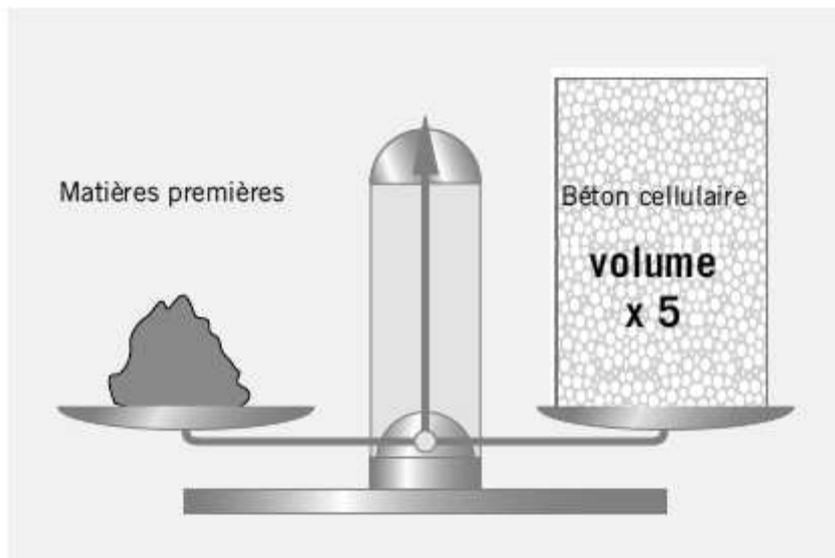


Figure II.9 : Schéma représentant la légèreté du béton cellulaire.

II.3.5. Constituant de béton

II.3.5.1. Ciment

II.3.5.1.a. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [21].



Figure .II.10 : Poudre de ciment courant [21].

II.3.5.1.b. Processus de fabrication des ciments courants

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité. Le processus de fabrication du ciment peut se diviser en deux étapes principales.

La première concerne la fabrication de la roche artificielle appelée clinker, constituant principal du ciment et la deuxième étape consiste à broyer finement ce clinker avec d'autres constituants minéraux pour obtenir un ciment ayant des propriétés bien déterminées [22].

II.3.5.1.b.1. Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃) [22].

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. Les éléments simples (CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants :

1. Silicate tricalcique(C3S)
2. Silicate bi calcique (C2S)
3. Aluminate tricalcique (C3A)
4. Ferro aluminate calcique (C4AF)

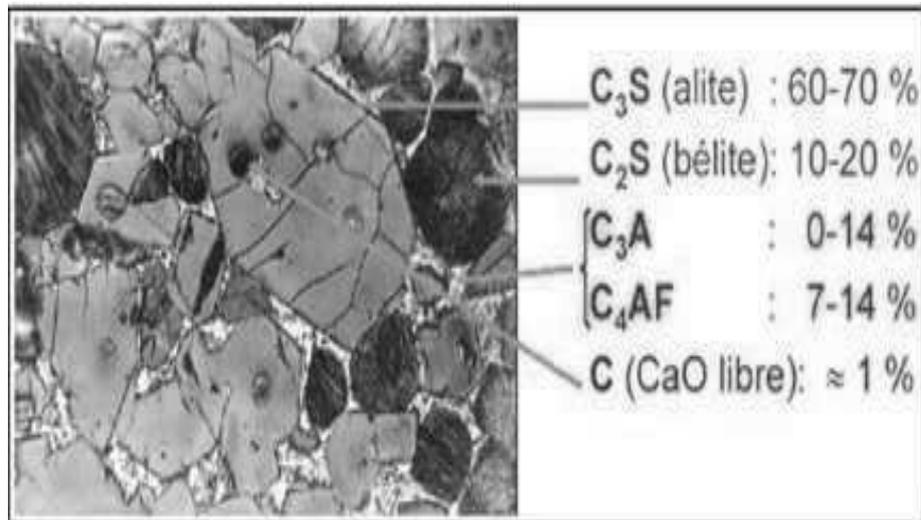


Figure II.11 : Microphotographie d'un clinker [23].

II.3.5.1.b.2. 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 [21].

II.3.5.1.c. Classification des ciments courants :

Tableau II.6 : Les différents types d ciment courants [24].

désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l'un de constituants suivant : laitier pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires (fillers)
C P A- CEM I	Ciment portland	95à100%		0 à 5%
C PJ-CEM II/A	Ciment portland Composé	80à 94%	-de 6à20% de l'une quelconque des constituants, sauf dans les cas ou les constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%	0 à 5%
CPJ-CEMII/B		65 à79%	-de 21à35%avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5%
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35à64%	-35à65% de laitier de haute-fourneau	0 à 5%
CHF-CEM III/B		20à34%	-66à80% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CLK-CEMIII/C		5à19%	-81 à95% de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CPZ-CEMIV/A	ciment pouzzolanique	65 à90%	-10à35%de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%.	0 à 5%
CPZ-CEMIV/B		45à64%	-36à55%comme ci-dessus	0 à 5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40à64%	-18à30% de laitier de haut fourneau et 18 à30% de cendres Siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
CLC-CEM V/B		20à39%	-31 à50%de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5%

II.3.5.2. La chaux**II.3.5.2.a. Historique**

Il est à supposer que les hommes de la préhistoire ont découvert la chaux à partir du moment où ils ont maîtrisés le feu. Des pierres calcaires entourant un foyer, la feu brûlante nuit et jour et ces pierres ont fini par se décarbonater. Plus tard, la pluie sur un foyer éteint et la chaux vive s'est hydratée.

Les premières traces de la fabrication organisée de la chaux remontent à 10 000 ans avant J.C. en Mésopotamie (Irak). La plupart des peuples de l'antiquité connaissaient la chaux. Egyptiens, Etrusques, 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.

Les civilisations non méditerranéennes connaissaient également l'usage de la chaux tels que les Incas et les Mayas pour leurs constructions, de même que les Chinois lors de l'édification de la Grande Muraille.

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 se diversifieront sans cesse. [25].

II.3.5.2.b. Matière première**II.3.5.2.b.1. Le calcaire**

Le calcaire est cuit (calciné) pour créer la chaux vive qui contient des oxydes de calcium et de magnésium. Teneurs moyennes de l'écorce terrestre. 4 % en Ca, 7 % en CaCO_3 .

Le calcium est surtout présent sous forme carbonatée, CaCO_3 (principalement calcite, aragonite) dans des roches calcaires (plus de 50 % de CaCO_3), des dolomies (contenant de la dolomite, $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$), des marnes (calcite et argile).

Le Calcaires particuliers. Craie (90 à 98 % de CaCO_3), castine (fondant utilisé en sidérurgie, métallurgie, verreries...), stalactites, stalagmites, marbre...

Les dépôts de calcaire abondent presque partout dans le monde. Les roches calcaires représentent 20 % des roches sédimentaires. Le calcaire est extrait à ciel ouvert. Une partie du calcaire extrait est employé comme granulats entrant dans la composition des bétons, la structure des chaussées... [25]

Les calcaires sont utilisés sous des formes granulométriques diverses, en agrégats et en moellons, mais aussi broyés, moulus ou micronisés. Ils sont également utilisés sous différentes formes chimiques.

CaCO₃ (calcaire)

CaO (chaux vive),

Ca(OH)₂ (chaux hydratée ou chaux éteinte). [25]

II.3.5.2.c.Fabrication de la chaux

II.3.5.2.c.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.

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.3.5.2.c.2. La cuisson

Les combustibles.

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 bûches 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. [25]



Figure II.12 : Four à chaux la ville à Montluçon. [26].

II.3.5.2.d. Le cycle de la chaux

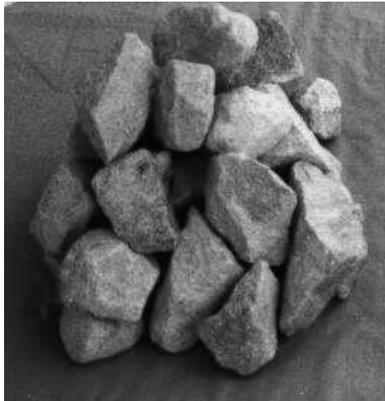


Figure II.13 : Calcaire

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur porté à une température de plus de 1000 degrés. Il se produit alors une réaction chimique : Le calcaire se décompose en chaux vive et en gaz carbonique

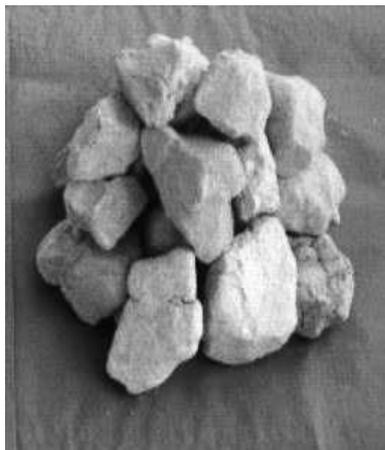


Figure II.14 : Chaux Vive



La chaux vive est avide d'humidité. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en une poudre blanche appelée chaux éteinte

Figure II.15 : Réaction en cours

II.3.5.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et de conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité [27]

II.3.5.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [28].

Les adjuvants employés devront être conformes aux normes NFP 18-340[29]. Généralement on utilise des plastifiants ou super plastifiants dont l'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable en réduisant la quantité d'eau ce qui augmente les caractéristiques du béton. Ils ont un rôle essentiel dans la technique des bétons de sable ; ils déflocculent les éléments fins et permettent de limiter le dosage en eau ; le rapport E/C dans les bétons de sable est plus élevé que dans les bétons traditionnels : diminuer ce rapport permet d'augmenter les performances (accroissement de la compacité et résistances) et de réduire les risques de retrait excessif [30]. D'autres adjuvants tels que les entraîneurs d'air sont ajoutés pour créer un réseau de microbulles d'air qui assurent la protection du béton de sable vis-à-vis du gel et des fondants utilisés en période hivernale. Leur utilisation est obligatoire dans les zones froides [31].

II.3.5.4.a. Classification et utilisation

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement «effets secondaires». Les normes européennes retiennent la classification suivante [28] :

Tableau II.7 : Classification et utilisation des adjuvants selon la norme européenne

[EN 934-2]

Adjuvant	Utilisation
Super plastifiant	nécessité d'une bonne ouvrabilité. préfabrication. béton a haute résistance. béton très ferrailles.
Plastifiant	transport pneumatique du béton (béton pompé). béton coule sous l'eau (délavage diminue). injection coulis et mortier. béton très ferrailles
Accélérateurs	Décoffrage rapide. temps froid. préfabrication. réparation rapide, piste d'aérodrome.
Retardateur	temps chaud. injection a une grande profondeur (élévation de la température). transport de béton sur longue distance. reprise de bétonnage. coulage en continue.
Entraîneur d'air (antigelifs)	route, barrage, pont. travaux maritimes. ouvrage expose au gel, à l'action des eaux agressives.

II.3.6. 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 [19] :

- 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 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. [19]

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

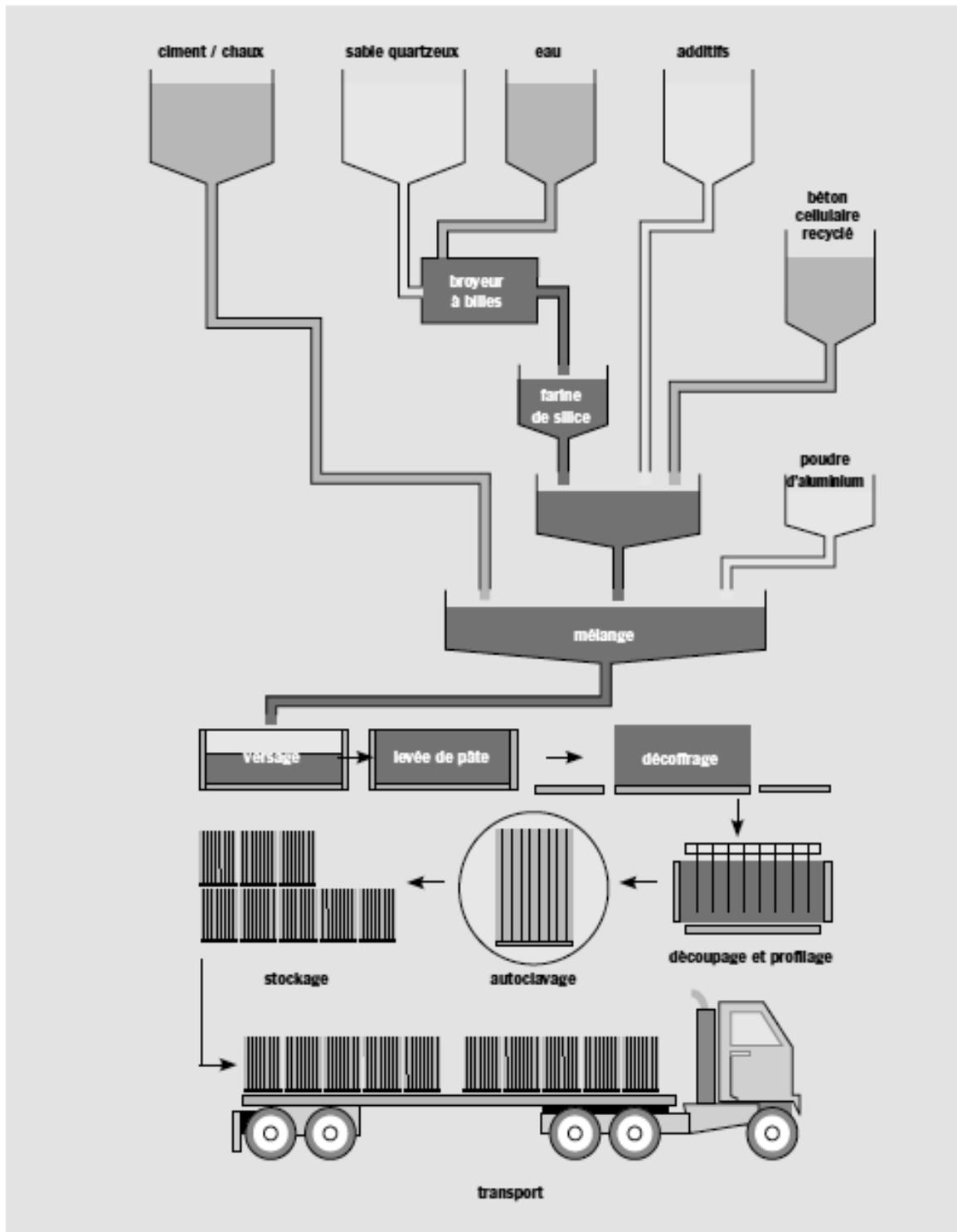


Figure II.16 : Schéma de fabrication des blocs [19].

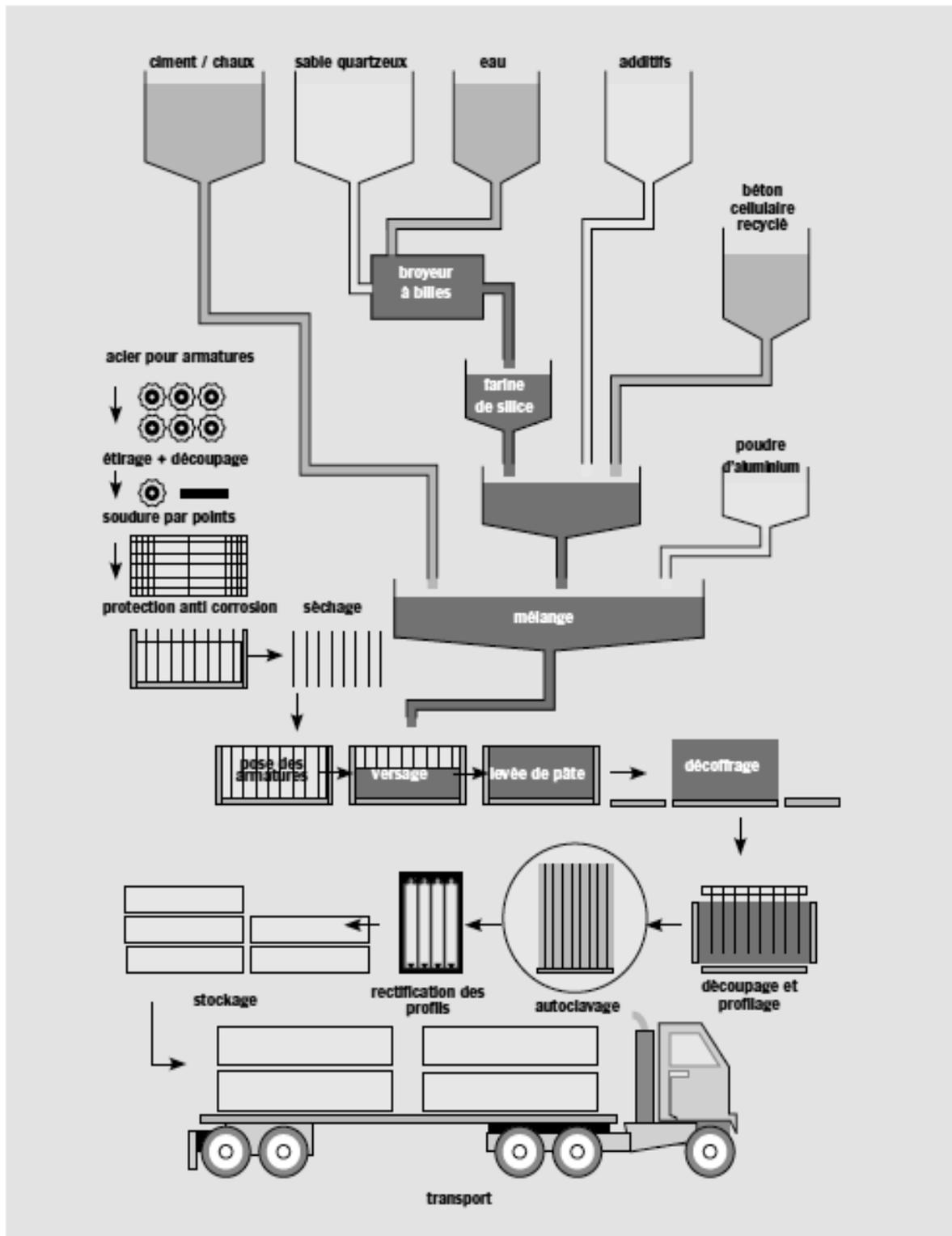


Figure II.17 : Schéma de fabrication des éléments armés [19]

II.3.7. Avantages du béton cellulaire

- C'est un produit que l'on classe dans la catégorie des matériaux de construction dits «propres», dans la mesure où 100 kg de matière suffisent à produire 1 m² de maçonnerie de 25 cm d'épaisseur conforme aux réglementations en vigueur pour la construction de maisons individuelles.
- La fabrication de 1 m³ de béton cellulaire ne nécessite que 250 kWh.
- C'est un matériau non polluant : la fabrication du béton cellulaire ne libère aucun produit polluant, que ce soit dans l'air, dans l'eau ou dans la terre. De plus, grâce à un recyclage à chaque phase de la fabrication, il n'y a pas de gaspillage de ressources (matières premières, eau, énergie).
- C'est un matériau moderne : la fabrication du béton cellulaire est industrialisée et permet la production d'un matériau de construction fini aux dimensions précises, aisé à mettre en œuvre.
- C'est un matériau léger, solide et isolant : le béton cellulaire est rempli d'une multitude de bulles d'air emprisonnées dans des cellules qui lui confèrent légèreté, pouvoir d'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une solidité permettant la réalisation de constructions d'une grande diversité.
- C'est un matériau isotrope : les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont conservées quelles que soient l'orientation ou les découpes faites sur le produit. Ainsi l'homogénéité de la structure est parfaite.
- Ce matériau, à la fois traditionnel et moderne, est adapté à la majorité des constructions, aussi bien pour l'habitat individuel ou collectif que pour les bâtiments industriels.
- Le volume d'air représente 80% du volume total du béton cellulaire, tandis que la masse solide est de 20%. 1 m³ de matières premières permet donc de produire 5 m³ de matériau de maçonnerie en béton cellulaire. Cette très grande économie de matières premières est l'un des aspects écologiques du béton cellulaire.
- A titre d'information, la surface des cellules dans 1kg de béton cellulaire est de 20m² ; reportée au m³ [19].

II.3.8. Classification du béton cellulaire

Basés 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) [32]. 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 [32].

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 II.8 : Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression.

Classe ρ	Critères	Classe f	R_c (MPa)
$\rho 0.4$	$300 \text{ kg/m}^3 \rho 400 \text{ kg/m}^3$	f_2	$R_c \geq 2$
$\rho 0.5$	$400 \text{ kg/m}^3 \rho 500 \text{ kg/m}^3$	f_3	$R_c \geq 3$
$\rho 0.6$	$500 \text{ kg/m}^3 \rho 600 \text{ kg/m}^3$	f_4	$R_c \geq 4$
$\rho 0.7$	$600 \text{ kg/m}^3 \rho 700 \text{ kg/m}^3$	f_5	$R_c \geq 5$
$\rho 0.8$	$700 \text{ kg/m}^3 \rho 800 \text{ kg/m}^3$	f_6	$R_c \geq 6$

II.3.9. Propriétés du béton cellulaire

II.3.9.1. La structure

La structure du béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse solide et macroporeuse. Les macropores sont formés 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 $60\mu\text{m}$ [32]. 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 [33] 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. [19]

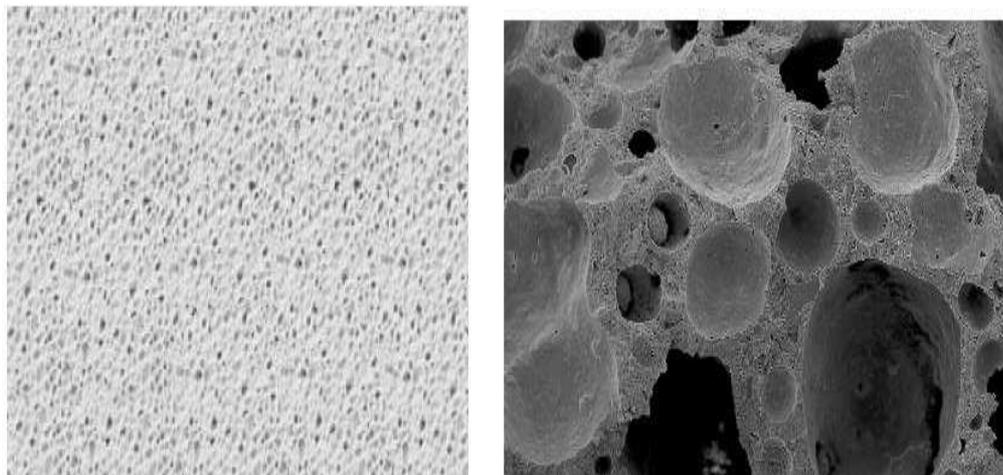


Figure II.18 : Structures des bétons cellulaires

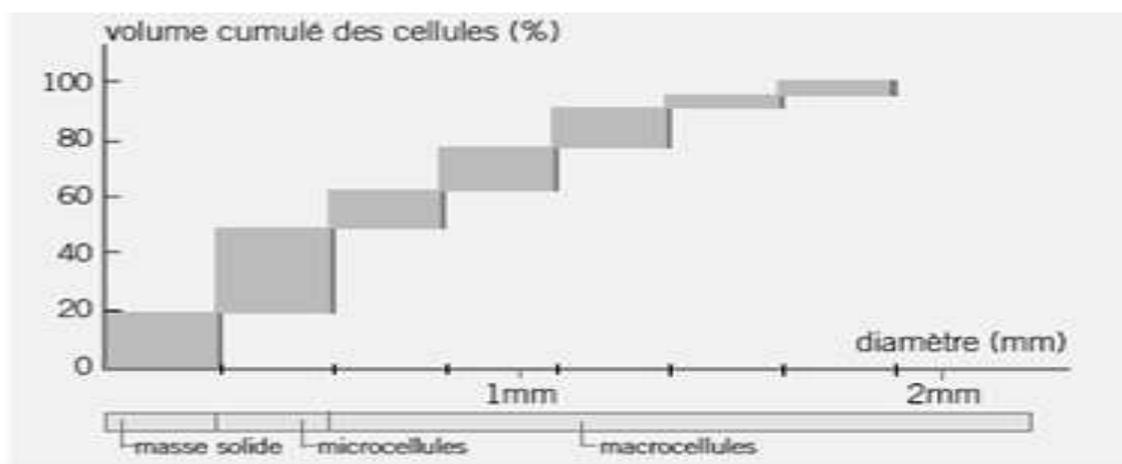


Figure II.19 : Répartition des cellules en fonction de leur diamètre

II.3.9.2. 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 optimales [34]. 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 [35-36]. En termes conventionnels, la densité du béton cellulaire est liée à sa compacité et porosité.

II.3.9.3. La résistance à la compression

La résistance à la compression du béton cellulaire augmente avec une augmentation de la densité [35,37]. La valeur moyenne des résistances mécaniques 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 rapportée à environ 6 MPa [32]. 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 [38]. 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 attribuée 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 de **BCNA** et **BCA**

utilisant les cendres volantes comme un remplacement partiel/complet des fillers a prouvé que l'utilisation des cendres volantes a abouti à un rapport résistance/densité plus élevé [39, 36, 37, 40].

La résistance à la compression augmente en fonction de la masse volumique du béton cellulaire comme en attestent les tableaux extraits des normes belges **NBN B 21-002** et **NBN B 21 004**. 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. Cette caractéristique essentielle est clairement précisée dans le complément national à la norme **EN 771-4**.

Tableau II.9 : Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité

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

Diverses formules empiriques ont été déterminées afin de prédire la résistance en compression R_c du béton cellulaire autoclave en fonction de la porosité, voir **Tableau II.10**.

Tableau II.10 : Formules empiriques reliant la résistance à la compression, la composition et la porosité [32]

	R _c (MPa)	constantes de calage	paramètres
Féret modifié (béton de mousse)	$\sigma = K (1 + E/C + A/Cj)^n$	K, n	E/C : rapport eau/ciment A/C : rapport air/ciment
Schiller	$\sigma = K_s \cdot \ln(\varepsilon_0 / \varepsilon)$	K _s , P _{cr} : porosité Correspondant à $\sigma = 0$	ε : porosité du béton cellulaire
Balshin	$\sigma = \sigma_0 (1 - \varepsilon)^n$	σ_0 : résistance a porosité 0	ε : porosité du béton cellulaire

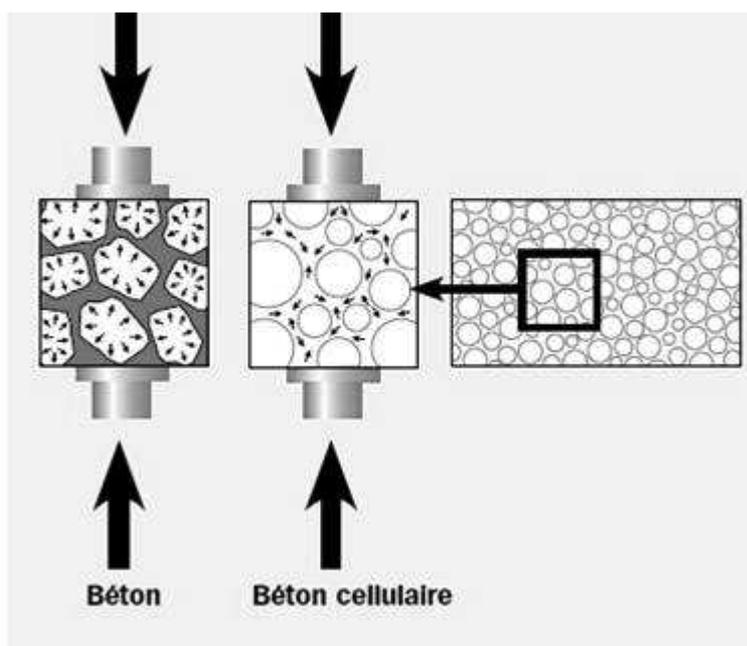


Figure II.20 : Principe du transfert des contraintes dans le béton et le béton cellulaire

II.3.9.4. 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 [41].

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 : $R_t = 0,22 R_c$ (**prEN 12602**), les valeurs de la résistance à la traction par flexion sont montrées dans le **Tableau II.11**.

Tableau II.11 : Valeurs caractéristiques de la résistance à la traction par flexion

Classe	R_t (MPa)
f2	0.44
f3	0.66
f4	0.88
f5	1.10
f6	1.32

II.3.9.5. 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 [19].

II.3.9.6. 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 [19].

II.3.9.7. 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 m²/g) [32]. 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 [33]. 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 [42]. D'autre part les spécimens durcis en milieu humide ont des valeurs de retrait s'étendant de 0.06 à plus de 3% quand séché aux températures ordinaires, les valeurs les plus basses du retrait étant associées à la densité la plus haute et les pourcentages élevés de sable [34]. Tada [43] attribuent le plus grand retrait au **BCNA** à cause du plus grand volume de micropores. Cependant, quand le même produit est autoclave, des changements fondamentaux ont lieu dans la constitution minérale, qui peut réduire le retrait à 1/4 ou même 1/5 de celui de produit durci à l'air. Ceci intervient en cours d'autoclavage lors de la formation des cristaux de silicate de calcium hydraté (Tobermorite) qui lui donne sa résistance caractéristique. A sa sortie de l'autoclave, le processus de durcissement est terminé et tout retrait ultérieur n'est plus à craindre. Il n'y a donc pas lieu d'en tenir compte lors de la mise en œuvre.

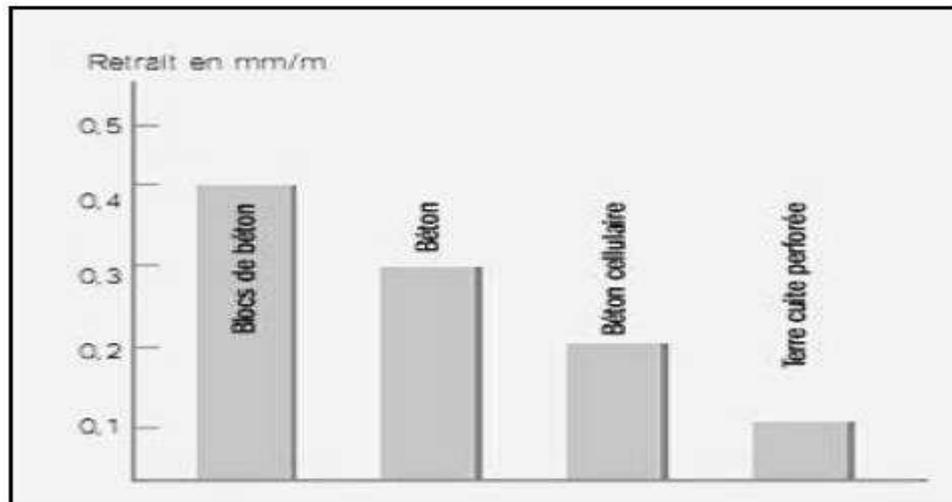


Figure II.21 : Comparaison de retrait dû au séchage pour différents matériaux [41].

II.3.9.8. 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 [44]. 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 sorptivité, qui est basé sur la théorie de flux non saturée.

En contact direct avec l'eau (y compris la pluie) les matériaux absorbent l'eau par capillarité suivant la formule :

$$i(t) = s_w \sqrt{t}$$

$i(t)$: eau absorbée par unité de surface (kg/m^2) pour une période t

S_w : la sorptivité du matériau ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$)

t : temps en contact avec l'eau (s)

La valeur S_w du béton cellulaire varie entre $70 \cdot 10^{-3}$ et $130 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$. Elle est nettement inférieure à celle de la terre cuite ou du plâtre. Dans le cas du béton cellulaire, grâce aux cellules fermées, le transfert de l'eau ne peut se faire que par la matière solide qui constitue les parois de celles-ci et qui ne représente que 20% du volume, ce qui ralentit très sensiblement la progression de l'eau [45].

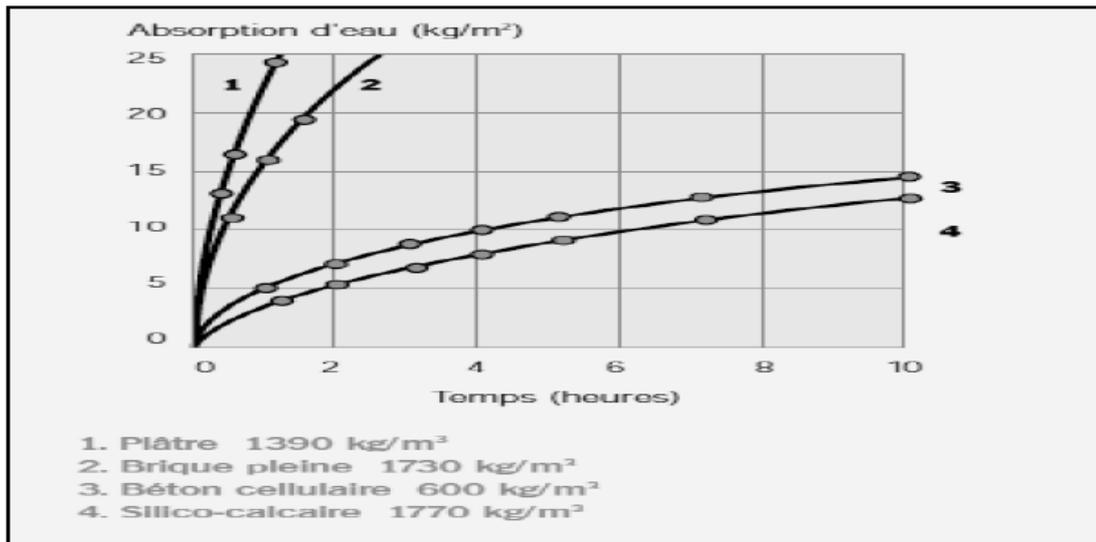


Figure II.22 : Absorption capillaire pour différents matériaux [41].

II.3.8.9. Conductivité thermique

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplis d'air [41]. 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 [43]. La relation entre la conductivité thermique et la densité des spécimens secs d'un BCA est montré dans la figure I.23. [17]. Comme attendu, la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité [46]. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire.

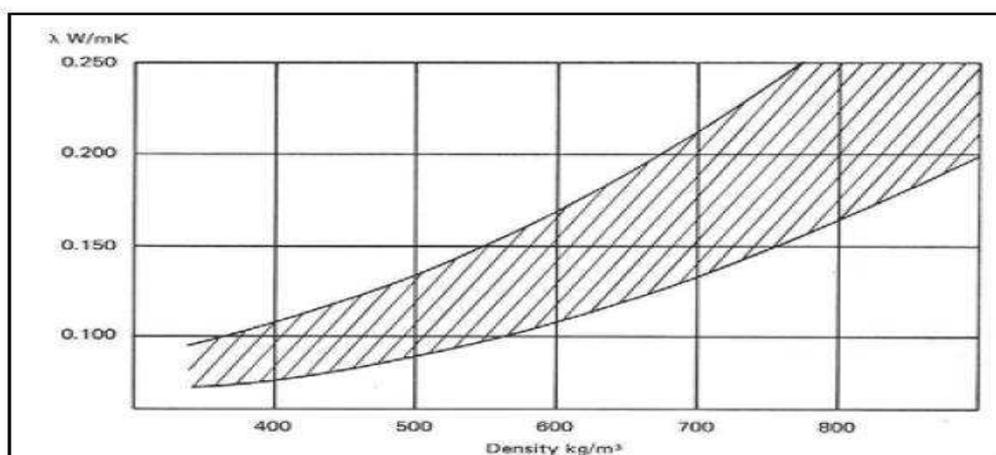


Figure II.23 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire

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.

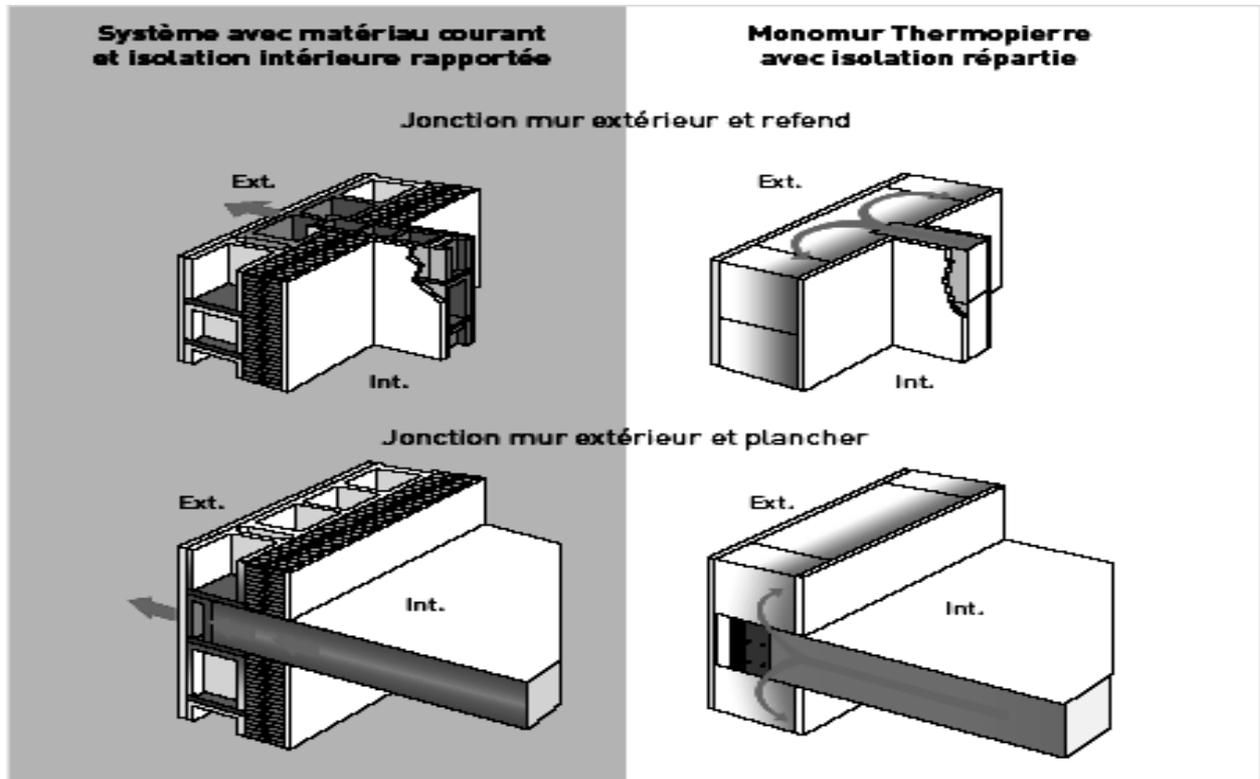


Figure II.24 : System d'isolation repartie

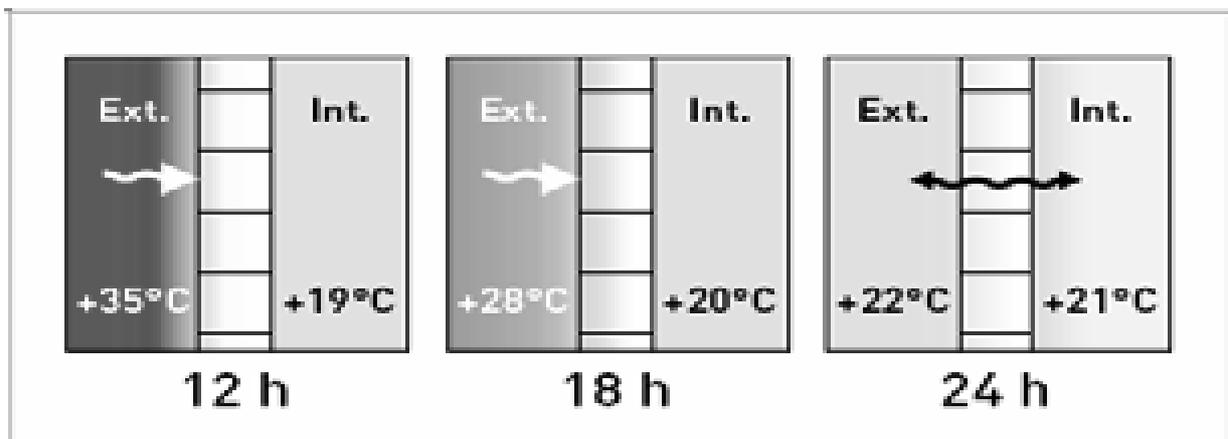


Figure II.25 : Température en équilibre quasi-constant

II.3.9.10. Conductivité 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.

II.3.9.11. 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.

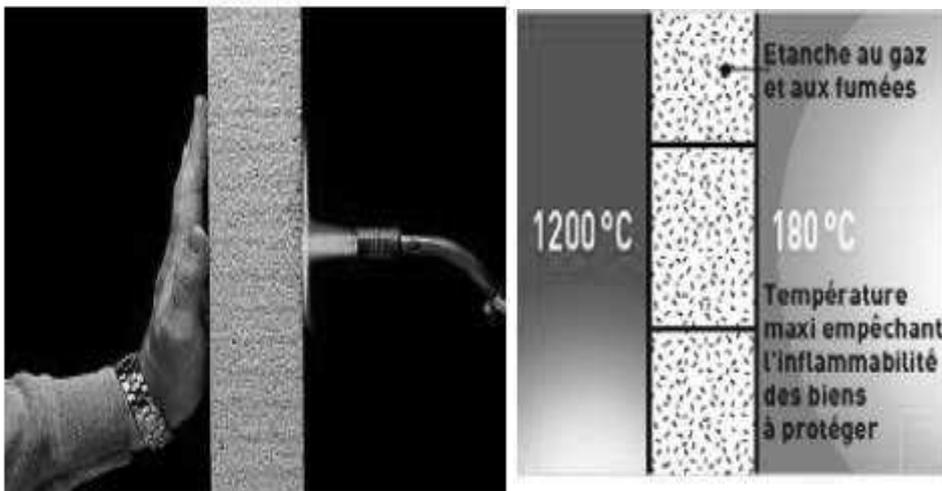


Figure II.26 : La résistance au feu

II.3.9.12. 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.



Figure II.27 : Légèreté d'un béton cellulaire

II.3.10. Impact environnementale et économique du béton cellulaire

le béton cellulaire à plus d'un titre au respect de l'environnement du fait que son industrie s'engage sur la voie de l'économie des ressources naturelle et de l'énergie, ainsi qu'à l'importance du recyclage et le traitement des déchets de fabrication et de chantier.

Ses qualités environnementales ont fait de lui un produit favorable dit « propre » ou « vert » un label décerné par le laboratoire de l'analyse environnementale des matériaux de construction Outre-Rhin en Allemagne [20].

- 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, soit 1/3 environ de ce qui est nécessaire pour fabriquer d'autres matériaux de gros œuvre.
- Grâce au procédé d'autoclavage utilisé en cours de fabrication, 200 kWh/m³ suffisent à produire 1m³ de béton cellulaire.
- Près de 90% de la vapeur d'eau produite pour l'autoclavage est réinjectée dans le circuit.
- 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.
- La fabrication du béton cellulaire ne dégage aucun gaz toxique et n'entraîne aucune pollution de l'eau.

- Par ses qualités d'isolation et d'inertie thermiques, le béton cellulaire assure non seulement des économies d'énergie et le respect de l'environnement, mais contribue également à un confort de l'habitat tout à fait particulier, tant en été qu'en hiver.

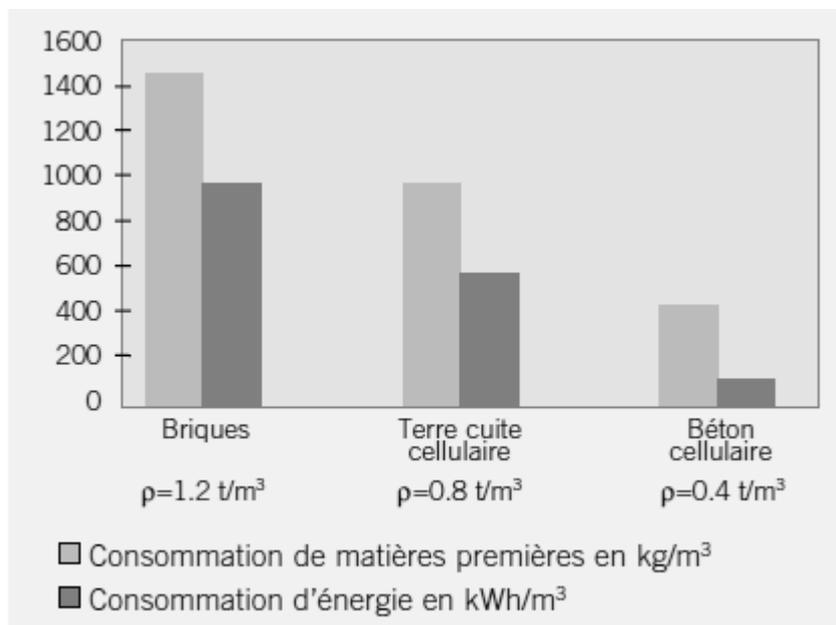


Figure II.28 : Consommation de matières première et d'énergie nécessaire à la production de matériaux de construction

Tableau II.12 : comparaison entre le béton cellulaire et les autres matériaux de construction

Désignations	Épaisseur (cm)	Masse volumique (kg/m3)	Conductivité thermique λ (en W/m.K)	Résistance thermique R (m².K/W)	Affaiblissement acoustique Rw (db) > norme* = 30 db
Béton cellulaire	20	400	0,12	1,54	47
Brique creuse	20	700-1000	0,35	0,57	47
Parpaing creux	20	1000	1,10	0,18	54

II.3.11. Gamme de produits

II.3.11.1. Elément non arme

- **Les blocs**

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

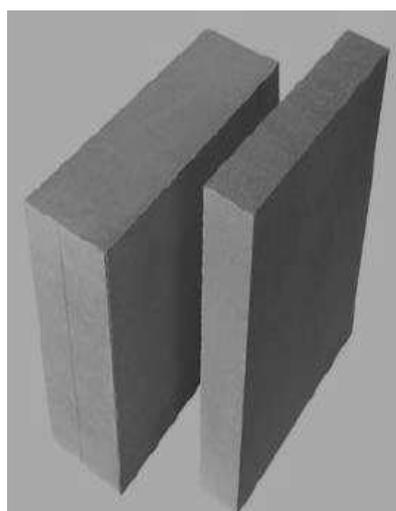


Longueur (cm)	60	60	60
Hauteur (cm)	25	25	25
Épaisseur (cm)	20	25	30
Nombre de pièces/m²	7	7	7
Consommation du mortier colle kg/m²	2,6	3.25	3.9
Avec emboîtement			

Figure II.29 : Différents types des blocs

- **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.



Longueur (cm)	60	60	60
Hauteur (cm)	25	25	25
Épaisseur (cm)	7,5	10	15
Nombre de pièces/m ²	7	7	7
Consommation du mortier colle kg/m ²	1,13	1,41	1,76

Figure II.30 : Différents types de carreaux

- **Les linteaux**

Les linteaux sont des éléments armés préfabriqués de dimension 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 étau ni coffrage et sans arrêt du chantier.

II.3.11.2. Élément armé

- **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...).

- **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.

- **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.

II.4. conclusion

Nous avons présenté en premier lieu dans cette étude bibliographique, une vue d'ensemble sur les types des matériaux de séparation dans les bâtiments tels que les briques, les blocs en béton cellulaireetc. et ses caractéristiques, avantages et inconvénients.

En second lieu Nous avons données une synthèse sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence notable des granulats légers sur les performances mécaniques du béton léger, à l'inverse des granulats de densité normale. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton. La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1800 kg/m³ et la résistance correspondante de 0,3 à 70 MPa, atteignant parfois même 90 MPa [46]. La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers qui sont des matériaux poreux pulvérulents, naturels ou artificiels [17]. Ces bétons peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

Enfin nous avons présenté une image sur le béton cellulaire, qui est l'objet de notre étude et qui sont considérés à part ; de par la légèreté et leur faible conductivité thermique ; Nous avons décelé les propriétés physico-mécaniques qui se résument comme suit :

- * Leurs masse volumique peut être comprise suivant les formulations 400 et 800 kg /m³.
- *La résistance à la compression des bétons cellulaire est fonction de la densité. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 3 et 7 MPa.
- *La conductivité thermique des bétons cellulaire sont caractérisés par leur pouvoir isolant, leur conductivités thermiques sont assez faibles et pouvant descendre jusqu'à 0.02 W.m-1K-1.

III.1. Introduction

De nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton est intéressée à cette nouvelle orientation ; en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton [25]. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

La section suivante traitera l'effet de l'incorporation de certains ajouts minéraux dans les bétons. On fera le point sur l'effet de ces sous-produits sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et physiques des bétons.

III.2. les ajouts minéraux

Selon la norme [ENV 2006], les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes. On distingue ;

III.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 [47].

III.2.1.1. Les laitiers de haut fourneau

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau [47] :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air ; ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,
- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons.

En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton.



Figure III.1 : Le laitier de haut fourneau

III.2.1.1.a. L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons

➤ A l'état frais

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai [48] explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

Venuat [49] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Des recherches sur le sujet trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type du laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton [48]

➤ A l'état durci

Selon Venuat [28], les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Les particules de laitier <10 µm contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules > 45 µm ont de la difficulté à s'hydrater.

Venuat rapporte aussi que les laitiers permettent de réaliser des bétons résistant à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète.

Les mortiers aux laitiers sont de 10 à 100 fois moins perméable à l'eau que les mortiers de ciment portland. Un remplacement de 10% du ciment par le laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition. Les chercheurs montrent l'effet bénéfique des bétons aux laitiers sur la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité, à la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminat.

III.2.1.2. La pouzzolane

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques [50].

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Elles sont généralement rouge ou noir, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes les plus acides, contenant de silice et peu de chaux (CaO) sont en général plus vitreuses. La différence SiO_2 - CaO doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit appréciable [51,52]. Les pouzzolanes sont définis comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes [53].



Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalin agrégats et du retrait au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.

III.2.1.2.a. Types de pouzzolane

A. Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme [CSA A 3001], Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618) [54].

B. Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que, le mach fers, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de brique et de tuile fabriqués avec des argile pures. On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [55].

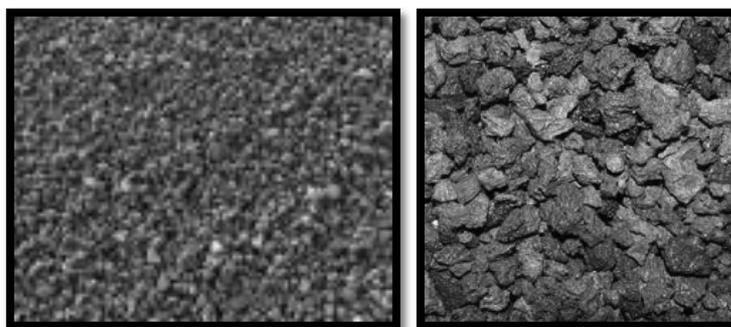


Figure III.2 : type de pouzzolane

III.2.1.2.b. L'effet de La pouzzolane sur les caractéristiques des bétons

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

➤ **A l'état frais**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [56].

➤ **A l'état durci**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre.

Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

III.2.1.3. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé divisé. Ils peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes composition de phase, ils peuvent être classés en quelques grandes familles, parmi ces grandes famille en trouve : les cendres silicoalumineuses, les cendres silico-calciques et les cendres sulfocalcique qui ont une très forte teneur en calcium et en soufre. Ce n'est pas toujours facile d'inclure une cendre volante dans une de ces classes, et pouvoir prédire son comportement pouzzolanique.



Figure III.3 : cendre volante

III.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à $60\mu\text{m}$ 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 [57], [58].

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) [59,60]. Parmi ces additifs on distingue les fillers de marbre et la poussière.

III.2.2.1. Fillers 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 [56].

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 III.4 Filler calcaire

III.2.2.1.a. 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 [56].

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**.

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 granulation 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.

III.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.

III.4. 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.

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la description des essais réalisés pour concrétiser ce travail expérimental, sur les différents matériaux utilisés est les bétons étudiés

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

- ✓ Laboratoire physique de la cimenterie d'Ain el kbira.
- ✓ Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir EL Ibrahimy ; Bordj Bou Arreridj.
- ✓ Laboratoire de CNERIB de Soudania Alger

IV.2. Méthode des essais**IV.2.1. Essais sur sable****IV.2.1.1. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1]****➤ But de l'essai**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ Matériels utilisés

Une colonne de tamis propres et correspondants à chaque fraction.



Figure IV.1 : La tamiseuse utilisée.

Tableau IV.1 : Tamis utilisés pour le tamisage du sable.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/5	(5 - 2.5 - 1.25 - 0.63 - 0.32 - 0.16 - 0.08 et le fond)

➤ **Préparation de l'échantillon**

L'échantillon de sable est préparé selon la norme NF EN 933-1. La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

➤ **Mode Opérateur**

L'opération du tamisage du sable se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 03 fois durant 10 minutes à chaque fois

IV.2.1.2. 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 IV.2 : 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

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd son ouvrabilité. .

$$MF = 1/100 \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

IV.2.1.3. Equivalent de sable [NA EN 933-8]

➤ But de l'essai

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles qui diminuent la qualité du béton et mortier.

➤ Mode opératoire

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g), Prendre une pesée de 120g
- Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère (10 cm).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120 g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin d'éliminer toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc.
- Placer l'éprouvette dans un agitateur mécanique pendant 3 minutes.

- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavande au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter

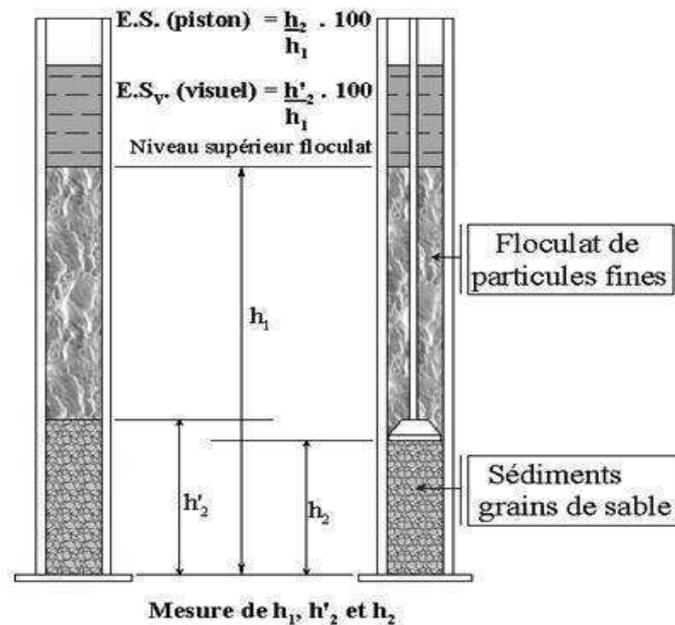


Figure IV.2 : Essai d'équivalent de sable visuel et par piston.

IV.2.1.3.a. Equivalent de sable visuel (E.S.V)

- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

IV.2.1.3.b. Equivalent de sable piston (E.S.P)

- Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, à cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

$$E_{sp} = (h'_2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.

Tableau IV.3 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP [84].

ES a vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES<60%	ES<65%	Sable argileux : risque de retrait ou gonflement .sable a rejeter pour des bétons de qualité
65%<ES<75%	60%<ES<70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
75%<ES<85%	70%<ES<80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
ES>85%	ES> 80%	Sable très propre l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau

IV.2.1.4. La masse volumique

IV.2.1.4.a. Masse volumique apparente [NA EN 1097-6]

➤ Principe de l'essai

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondants.

➤ Matériels utilisés

- Une balance avec une précision de 0.01 g.
- Un récipient avec un volume de 1 litre.
- Une règle à araser.

➤ Mode opératoire

- Peser le récipient vide et tarer.
- Prendre le matériau (sable) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

IV.2.1.4.b. Masse volumique absolue [NA EN 1097-6]

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³, t/m³).

➤ Principe de l'essai

Consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée, car cette méthode est très simple et très rapide.

➤ Matériels utilisés

- Une éprouvette graduée en verre.

➤ Mode opératoire

- Remplir l'éprouvette graduée en verre par un volume d'eau (V1 =400 ml).
- Peser une masse (M =300 g) du matériau (sable).
- Introduire cette masse dans l'éprouvette (s'assuré de bien éliminer les bulles d'air).

- Noter le nouveau volume V_2 .
- Cette opération est répétée 3 fois.
- La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante : $M / (V_2 - V_1)$

IV.2.2. Essais sur Ciment

IV.2.2.1. La masse volumique

IV.2.2.1.a. Masse volumique apparente

➤ **Principe de l'essai**

Remplir une mesure de volume connu $V=1\text{m}^3$ et déterminer la masse du contenu

➤ **Matériels utilisés**

- un entonnoir monté sur trépied
- un récipient calibré
- une règle à araser
- une balance

➤ **Mode opératoire**

Peser un récipient de capacité 1 litre (V_0) et noter sa masse M_1 (g).

Verser la poudre de ciment 200g à l'aide de l'entonnoir dans le récipient et le disposer sans tassement par couche horizontales successives jusqu'au remplissage, la distance entre l'extrémité de l'entonnoir et le bord du récipient est de 5 cm.

Ensuite araser la couche supérieur du pot à l'aide d'une réglette que l'on anime d'un mouvement de (va et vient), peser le récipient plein : soit M_2 (g) sa masse.

- La masse volumique apparente est : $\rho = M_2 - M_1 / V$, $V=1$ litre.

M_2 : Masse de récipient remplie du liant.

M_1 : Masse de récipient vide.

IV.2.2.1.b. Masse volumique absolue [NF EN 196-6]

➤ **Objectif de l'essai**

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue de ciment anhydre qui varier en fonction de la composition du ciment, tout en restant entre 3.0 et 3.2 g/cm^3 .

➤ **Principe de mesure avec le densitomètre Lechatelier**

Il consiste de mesurer le déplacement du niveau de liquide lorsqu'on y introduit la poudre dont on recherche la masse volumique absolue.

➤ **Equipement nécessaire**

- Densimètre Le Chatelier (Voluménomètre) de 250 cm³ de volume.
- Un liquide qui ne doit pas être réactifs avec le ciment (toluène).
- Thermomètre.

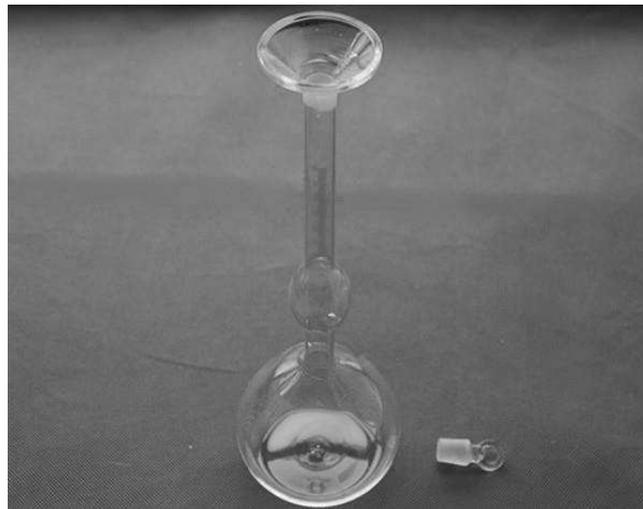


Figure IV.3 : Le densimètre le Chatelier

➤ **Mode opératoire**

- Remplir le Voluménomètre jusqu'au niveau zéro.
- Immerger le Voluménomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20 °C.
- Peser une masse de 64 g de ciment.
- Verser le ciment très lentement en ¼ heure

$$\rho_c = 64 / N1-N0 \text{ g/cm}^3.$$

IV.2.2.2. La Finesse de mouture (finesse de Blaine)

L'essai consiste à la mesure de la surface des grains contenus dans une masse unité de poudre, elle s'exprime en cm²/g.

➤ **Principe de l'essai**

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de poudre compacté à une dimension et une porosité spécifiées. La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de poudre.



Figure IV.4 : Appareil de Blaine

➤ **Conduite de l'essai**

- Peser une quantité de poudre et mettre la dans la cellule puis compacter à l'aide du piston
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSB = \frac{K\sqrt{e}\sqrt{t}}{\gamma(1-e)\sqrt{0.1\eta}}$$

Avec

K: constante de l'appareil.

γ : Masse volumique en g/cm³.

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

t : Temps de passage de l'air dans la couche de poudre en seconde.

e : porosité de la poudre dans la cellule.

IV.2.3. Essais sur les ajouts

La procédure, le mode opératoire et matériel utilisé pour déterminer les caractéristiques physiques des ajouts est quasiment le même que celui utilisé pour le ciment et selon les mêmes normes.

IV.2.4. Les essais destructifs sur béton durci

IV.2.4.1. La résistance à la compression (essai d'écrasement) [NA EN 12390-3]

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubiques normalisée (10*10*10 cm).

➤ La presse hydraulique [NA EN 12390-3]

La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 3000 KN.



Figure IV.5 : presse hydraulique

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette [3].

$$R_c = F/S$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm^2)

IV.2.4.2. Mesure de la conductivité

IV.2.4.2.a. 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 mesure 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.



Figure IV.6 : l'éprouvette après la coupure



Figure IV.7 : Le CT METRE

IV.3 caractérisation des matériaux utilisés

IV.3.1.. Sable 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

IV.3.1.1. L'analyse granulométrie

Les résultats de l'analyse granulométrique de ce sable sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Analyse granulométrique du sable d'oued souf

Sable (0/5) = 2000g				
Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaires (g)	Refus élémentaire (g) (moyen)	Refus cumulés (%)	Tamisâ cumulés (%)
5	0	0	0	100
	0			
	0			
2.5	30	33	1.65	98.35
	34			
	35			
1.25	146	155	9.4	90.6
	146			
	170			
0.63	787	735	46.15	53.85
	686			
	732			
0.315	743	736.66	82.98	10.02
	777			
	690			
0.16	241	275.33	96.75	3.25
	287			
	298			
0.08	53	55.33	99.51	0.41
	56			
	57			
Fond	4	7	99.86	0.14
	9			
	8			

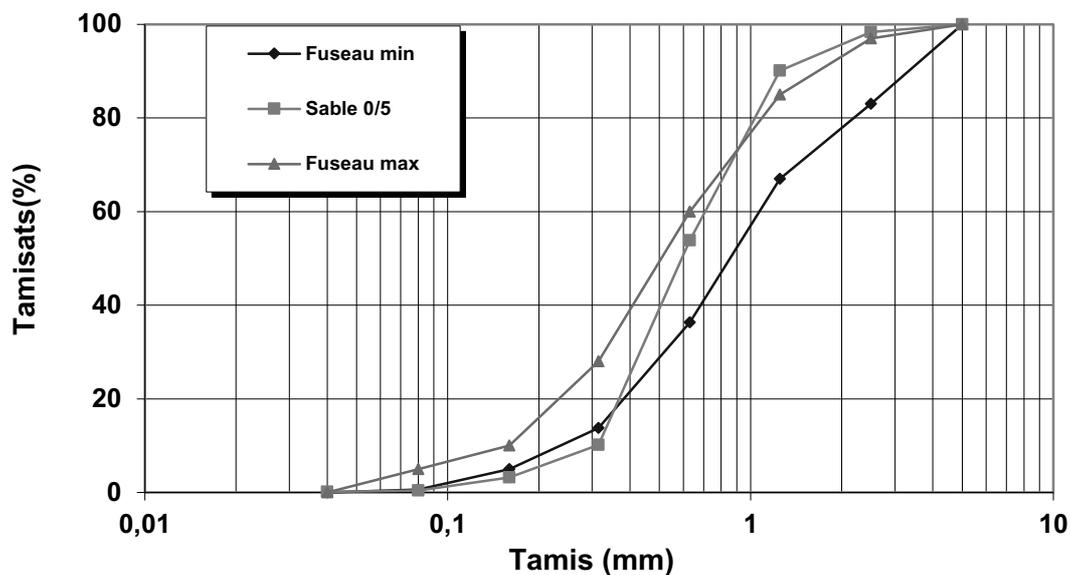


Figure IV.8 : Courbe granulométrie de sable.

IV.3.1.2. Le module de finesse

Après l’analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable testé est égal à : 2.36

IV.3.1.3. L’équivalent de sable

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.5 : Résultats d’essai d’équivalent de sable d’oued souf testé.

Hauteur (mm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	E _{vs} (%)	E _{vsmoy} (%)	h’ ₂ (cm)	E _{sp} (%)	E _{spmoy} (%)
(1)	9.3	8.5	91.39	90.88	8.4	90.32	89.98
(2)	9.4	8.7	92.55		8.7	92.55	
(3)	9.3	8.25	88.70		8.1	87.09	

Le sable testé donne les résultats suivant :

$$\left. \begin{array}{l} E_{sv} = 90.88 (\%) \\ E_{sp} = 89.89 (\%) \end{array} \right\} \text{ donc :}$$

Sable très propre : l'absence totale de fines argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

IV.3.1.4. La masse volumique

IV.3.1.4.a. Masse volumique apparente

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Masse volumique apparente du sable d'oued souf

Essai	M 2(kg)	M 1(kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
1	1.692	0.064	1	1.628	1.642
2	1.714			1.650	
3	1.713			1.649	

IV.3.1.4.b. Masse volumique absolue

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Masse volumique absolue du sable d'oued souf.

N° d'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	2.56
2	300	300	417	2.56	
3	300	300	416	2.58	

IV.3.2. Sable concasse

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

IV.3.2.1. Analyse granulométrie

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable grossier sont représentés dans le (Tableau IV.8.)

Tableau IV.8 : Analyse granulométrique du sable concassé

Tamis	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Refus Cumulé	R' (%)	Tamis (%)
5	6.5	10.5	11	9.33	9.33	0.93	99.07
2.5	212	210	214	212	221.33	22.13	77.87
1.25	335.5	335.5	335.7	335.5	556.83	55.68	44.32
0.63	206.5	200.3	203.3	203.33	760.16	76.01	23.89
0.315	128.8	125.9	129.8	128.5	888.66	88.86	11.14
0.160	75.9	78.5	80.9	78.5	967.16	96.71	3.29
0.08	23.5	22.3	24.6	23.34	990.5	99.05	0.95
Fond	4	5.5	3.8	4.5	995	99.50	0.50

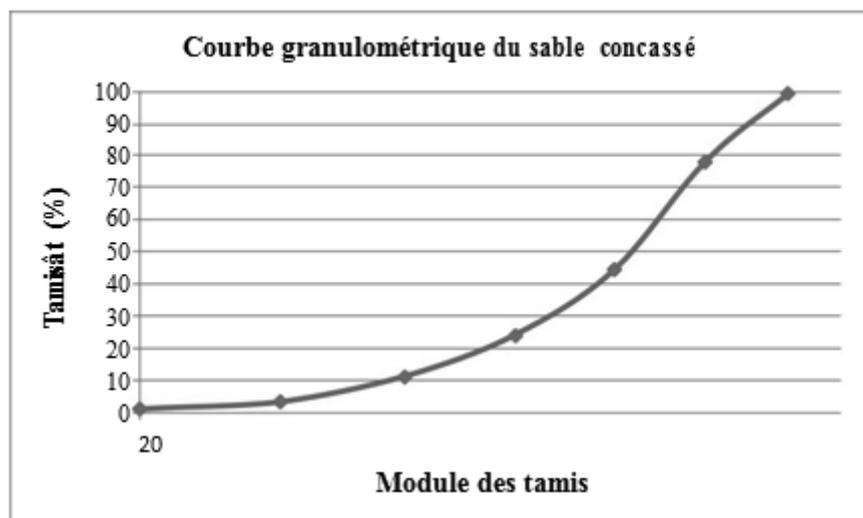


Figure IV.9 : Courbe granulométrique du sable concassé.

IV.3.3. 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 42.5 NA 442 (**MATINE**). Provenant de la cimenterie de LAFARGE usine de Msila. Il est obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. C'est un ciment conforme de la norme NA 442 :2000.

- **Désignation**

Ciment portland composé.

- **Identification**

CPJ-CEM II/A 42, 5.

- **Composition**

Clinker : 80% - 94%

Ajouts : 0% - 20% (laitier – pouzzolane – calcaire).

IV.3.3.1. Caractéristiques physique

IV.3.3.1.a.Masse volumique apparente

Tableau IV.9 : Masse volumique apparente du ciment CPJ

Essai	Volume de récipient (l)	Poids de récipient vide (kg)	Poids de récipient +ciment (kg)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
1	1	0.059	1.385	1.326	1.316
2			1.365	1.306	
3			1.376	1.317	

IV.3.3.1.b. Masse volumique absolue

Le resultat obtenue sur la masse volumique absolue est :

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

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

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

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

IV.3.3.1.c. La finesse du ciment

La finesse de ciment obtenue est egale 3488 cm^2/g

IV.3.3.2. Caractéristiques chimiques

Tableau IV.10 : Composition chimique du ciment utilisé.

Eléments	Teneur (%)
SiO ₂	17.35
Al ₂ O ₃	4.51
Fe ₂ O ₃	2.92
CaO	59.87
MgO	1.62
SO ₃	3.08
K ₂ O	0.617
Na ₂ O	-

IV.3.3.3. Utilisations

Le ciment CPJ-CEM II /A 42,5 convient pour :

- Les bétons armés et non armés, Préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvés
- Les bétons prêts à l'emploi ;
- Le génie Civil (ouvrages et routes) ;
- Les travaux de construction (Logements, locaux commerciaux et Industriels) ;
- Les produits dérivés de ciment ;
- Les mortiers pour chapes et crépis. .

IV.3.4. 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 100µm, 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.

IV.3.4.1. 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 IV.11 : L'analyse chimique de la poudre fine aluminium

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

IV.3.5. La chaux

La chaux utilisée est celle de l'entreprise de conditionnement de chaux De l'est wilaya de Saida :



Figure IV.10 : sac de 20 kg de la chaux éteinte

IV.3.5.1. Fiche technique de la chaux éteinte

- 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

IV.3.5.2. Précautions d'emploi

- conserver au sec.
- refermer hermétiquement après utilisation.
- épandre avec des gants, par temps calme, sans vent.

IV.3.6. Les ajouts minéraux

IV.3.6.1. La pouzzolane

La pouzzolane naturelle utilisée dans ce travail a été ramené de la carrière BeniSaf, qui a été broyé aux finesses de 3700 cm²/g

IV.3.6.2. Le laitier

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 cm²/g.

IV.3.6.3. Les caractéristiques chimiques

La composition chimique des ajouts a été déterminée dans le laboratoire de la cimenterie d'AIN EL KBIRA.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.12 : Analyse chimique des ajouts.

Composition	Laitier %	Pouzzolane %
SiO ₂	35.52	37.26
Al ₂ O ₃	8.88	15.37
Fe ₂ O ₃	2.92	10.55
CaO	26.11	17.01
MgO	2.58	3.06
SO ₃	1.50	0.38
K ₂ O	1.26	1.33
Cl ⁻	0.002	0.009
LSF	23.35	13.15
A/F	3.04	1.46
MS	3.01	1.44
PaF	21.20	15.02

IV.3.6.4. Les caractéristiques physiques

Tableau IV.13 : Les caractéristiques physiques des ajouts utilisés.

	Masse volumique apparente (kg /dm ³)	Masse volumique absolue (kg / dm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
Pouzzolane	0.98	2.38	3700
Laitier	0.864	2.91	3700

IV.3.7. Super plastifiants

Lors de cette étude nous avons utilisé les adjuvants provenant de GRANITEX Oued Smar. (Wilaya d'Alger). Le superplastifiant est : **Medaflow 30**, il est conforme aux exigences des normes NFP 18333 et NFP 18336. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable, **Medaflow 30** est un superplastifiant de la troisième génération de type polycarboxylate, ses caractéristiques sont données par le **Tableau (IV.14)**

Tableau IV.14 : les caractéristiques de superplastifiant

Superplastifiant	extrait sec	Aspect	Couleur	PH	Densité
Medaflow (30)	30	Liquide	Brun clair	6 – 6,5	1,07 ± 0,01

IV.3.8. 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 IV.15 : Analyse physico-chimique de l'eau utilisée

Paramètre	Quantité	Commentaire
PH	8.18	Acceptable pour le gâchage
Conductivité	1250 µs/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	-

IV.4. Formulation de béton

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

- 58 % de sable.
- 18.5 % de ciment.
- 18.5 % de chaux.
- 5 % d'agent d'expansion.
- Eau.

La quantité d'eau nécessaire est déterminée après plusieurs essais de convenance qui vise la préparation d'un béton cellulaire avec un volume contenant environ 45% de solide et 55 % de vide.

IV.5. Types de béton formulés

Béton témoin

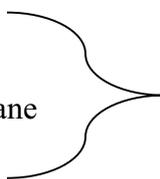
Béton avec 10% pouzzolane

Béton avec 15% laitier

Béton témoin

Béton avec 10% pouzzolane

Béton avec 15% laitier



avec 1.5% adjuvant

Tableau IV.16 : Résultats de formulation d'un m³ des bétons étudié (sable oued souf)

type de béton cellulaire	rapport E/L	Sable (kg)	Ciment (kg)	Chaux (kg)	Poudre d'AL (kg)	Eau (L)	Adj (L)	Pouzzolane (kg)	Laitier (kg)
BT	0.96	660	203	203	20	393	-	-	-
BL	0.97	561	203	203	20	396	-	-	99
BP	0.97	594	203	203	20	396	-	66	-
BTA	0.86	660	203	203	20	352	6.6	-	-
BLA	0.89	561	203	203	20	363	6.6	-	99
BPA	0.89	594	203	203	20	363	6.6	66	-

Tableau IV.17 : Résultats de formulation d'un m³ des bétons étudié (sable concasse).

type de béton cellulaire	rapport E/L	Sable (kg)	Ciment (kg)	Chaux (kg)	Poudre d'AL (kg)	Eau (L)	Adj (L)	Pouzzolane (kg)	Laitier (kg)
BT	1.01	660	203	203	20	412	-	-	-
BL	1.03	561	203	203	20	420	-	-	99
BP	1.03	594	203	203	20	420	-	66	-
BTA	0.93	660	203	203	20	380	6.6	-	-
BLA	0.96	561	203	203	20	390	6.6	-	99
BPA	0.96	594	203	203	20	390	6.6	66	-

IV.6. Confection et contrôle des éprouvettes

IV.6.1. 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 :

- Verser les constituants dans la cuve : le sable et les fines.
- Malaxer à sec pendant 30s.
- Ajouter l'eau pendant 1 min 30s, le malaxeur en marche.
- le super plastifiant est mélangé dans un tiers d'eau après l'introduction du premier tiers d'eau au cours du malaxage, ensuite on à introduire la quantité d'eau restante.
- Malaxer pendant 2 min



Figure IV.11 : malaxeur utilisé.

IV.6.2. conservation dans l'étuve

Après le durcissement du béton on a conservé les éprouvettes dans l'étuve pendant 24 heures.



Figure IV.12 : l'étuve de conservation

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, chimiques, thermiques et mécaniques des composants ont été établies. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges. La méthode de formulation a été développée et le calcul des proportions des constituants de notre programme expérimental étant fait, ainsi, les essais sur béton.

V.1 Introduction

Dans le présent chapitre, on présente les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur le béton cellulaire conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats sera faite à la base des résultats obtenus.

V.2 résultats et discussion

V.2.1 résistance à la compression (sable oued souf)

Tableau V.1 : Résultats des résistances à la compression des bétons formulés

(sable oued souf)

La résistance à la compression moyenne (MPa)			
Type de béton	7 jours	14 jours	28 jours
BT	0.210	0.360	0.440
BL	0.350	0.420	0.880
BP	0.245	0.445	0.760
BTA	0.413	0.497	0.609
BLA	0.430	0.590	0.950
BPA	0.442	0.540	0.915

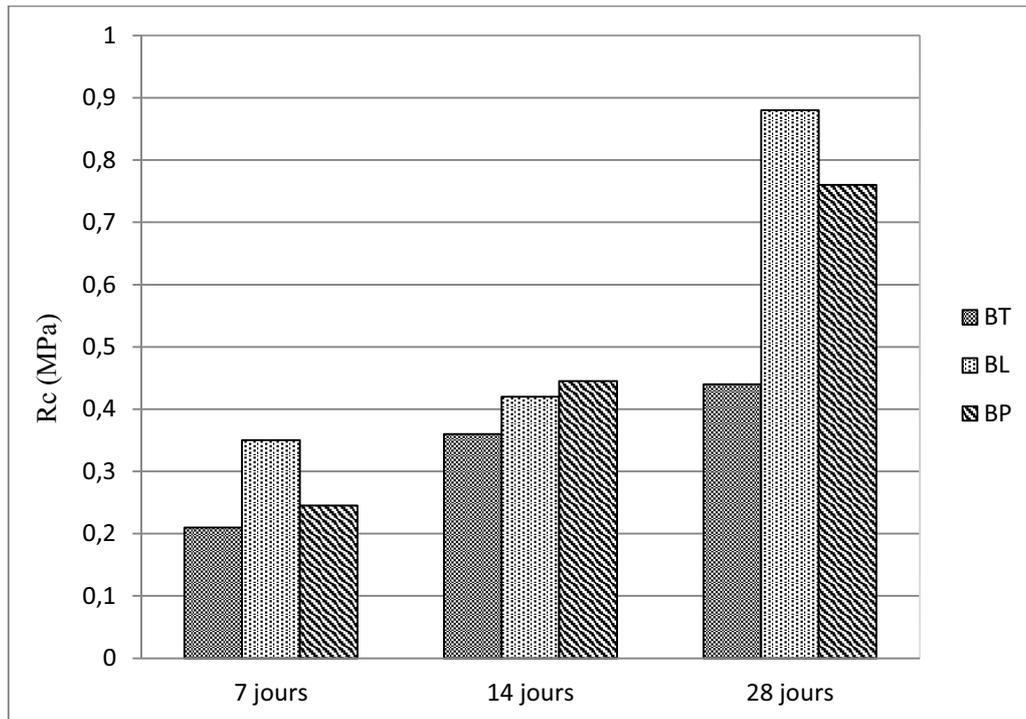


Figure V.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (oued souf) au cours du temps.

Discussion et interprétation

D'après les résultats obtenus et représentés sous forme d'historgramme on remarque que la résistance à la compression évolue au cours du temps, la réponse mécanique des bétons à base de sable qui contiennent des ajouts actifs en particulier le laitier des hauts fourneaux présente les meilleurs résultats notamment à 28 jours. Ce qui peut être expliqué par leurs réactivités chimiques.

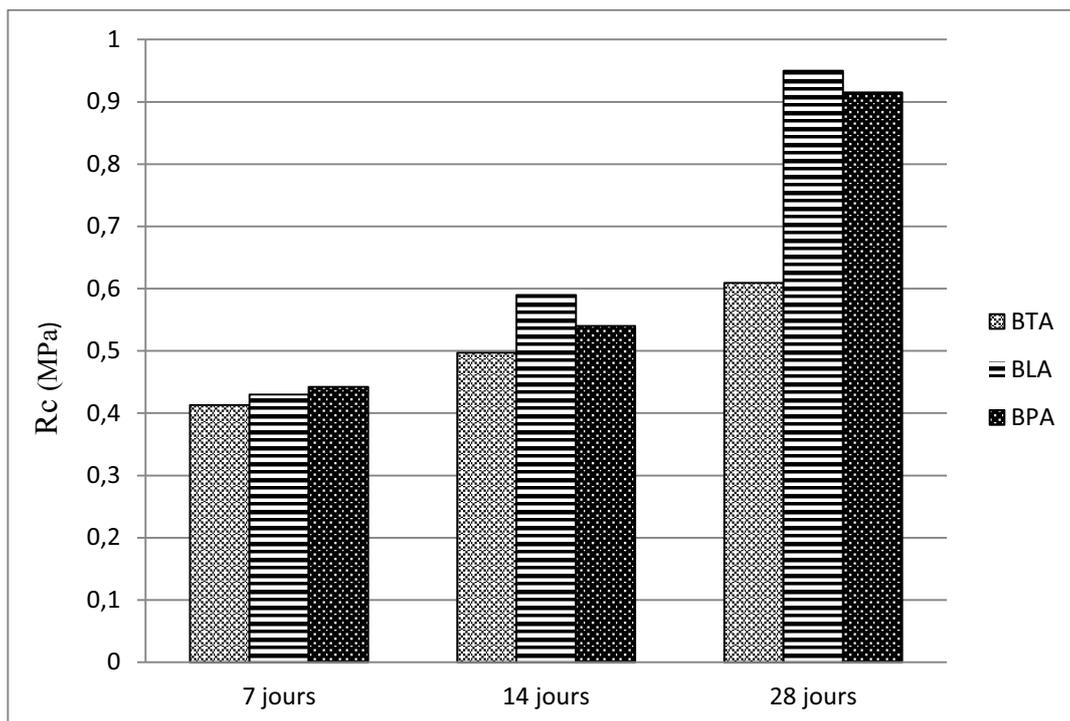


Figure V.2 : Evolution de la résistance à la compression des bétons adjuvés en fonction des sables préparés (oued souf) au cours du temps.

Discussion et interprétation

Les résultats obtenus montrent clairement que l'utilisation de l'adjuvant (superplastifiant) améliore la résistance mécanique des bétons à base de sable d'OUED SOUF comparativement aux bétons sans adjuvant notamment ceux à base de sable qui contiennent des ajouts actifs en particulier le laitier des hauts fourneaux qui présentent les meilleurs résultats.

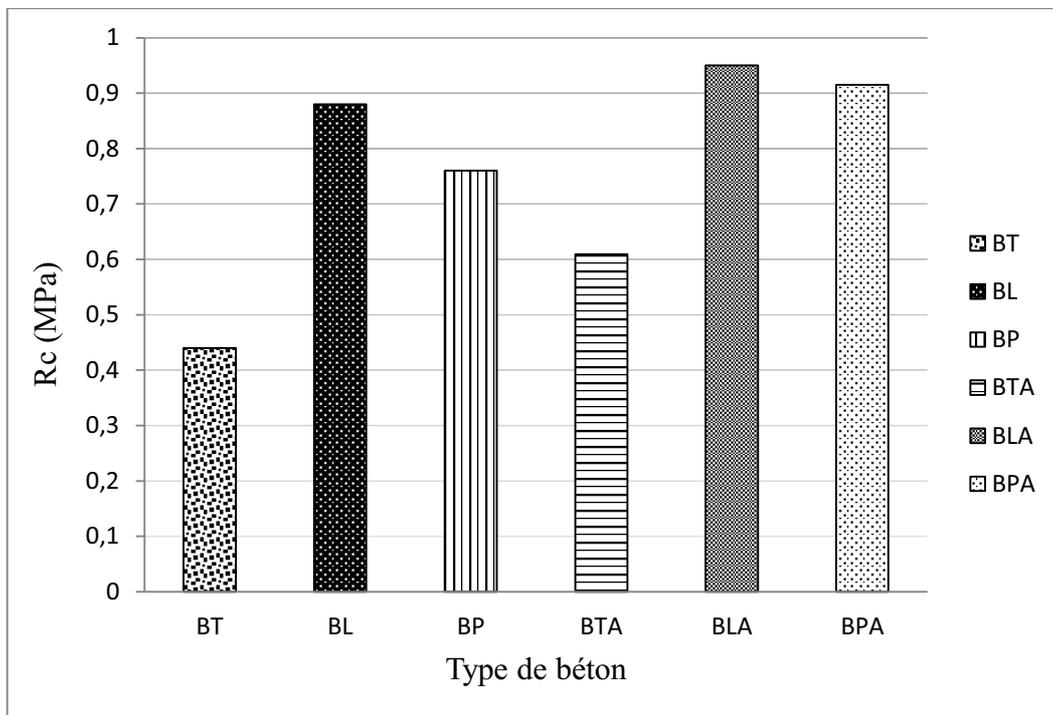


Figure V.3 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (oued souf) a 28 jours.

Discussion et interprétation

Les résultats représentés sur la **figure V.3** montre clairement l'effet de l'adjuvant sur la résistance mécanique ainsi le rôle positif des ajouts incorpores dans le sable qui contribuent à l'amélioration de la résistance finale

Reste a noté que les réponses obtenus par l'utilisation de ce sable (oued souf) sont loin d'être acceptable en comparant avec le béton cellulaire obtenu par voie industriel.

V.2.1 résistance à la compression (sable concasse)

Tableau V.2 : Résultats des résistances à la compression des bétons formulés

(Sable concasse)

La résistance à la compression moyenne (MPa)			
Type de béton	7 jours	14 jours	28 jours
BT	0.154	0.16	2.021
BL	0.476	0.319	5.293
BP	0.180	0.398	4.126
BTA	0.100	0.146	2.823
BLA	0.144	0.164	6.245
BPA	0.213	0.280	5.768

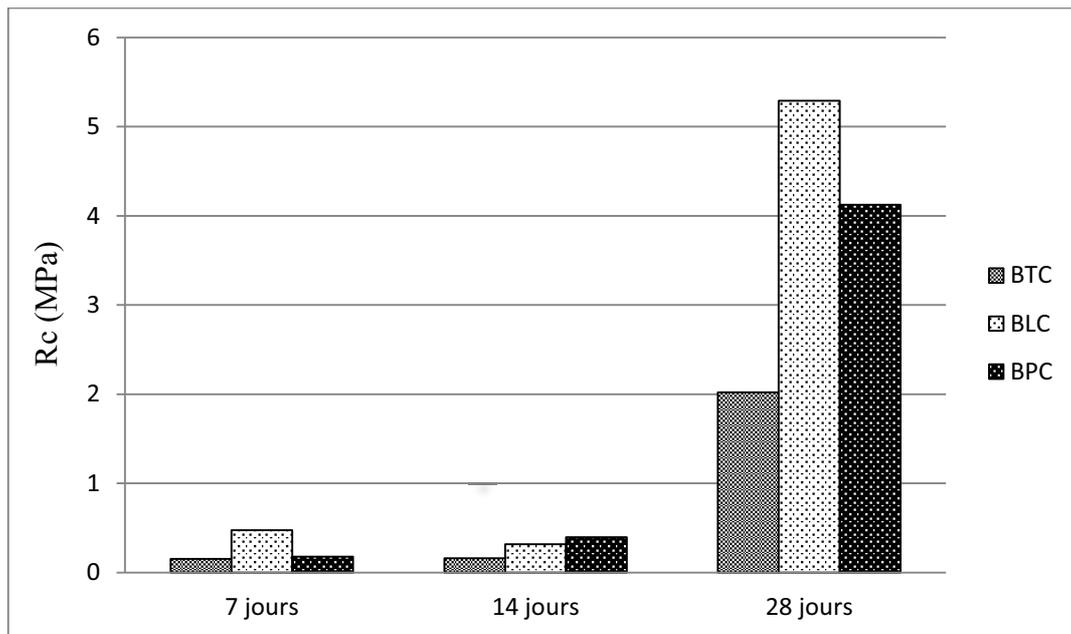


Figure V.4 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (sable concassé) au cours du temps.

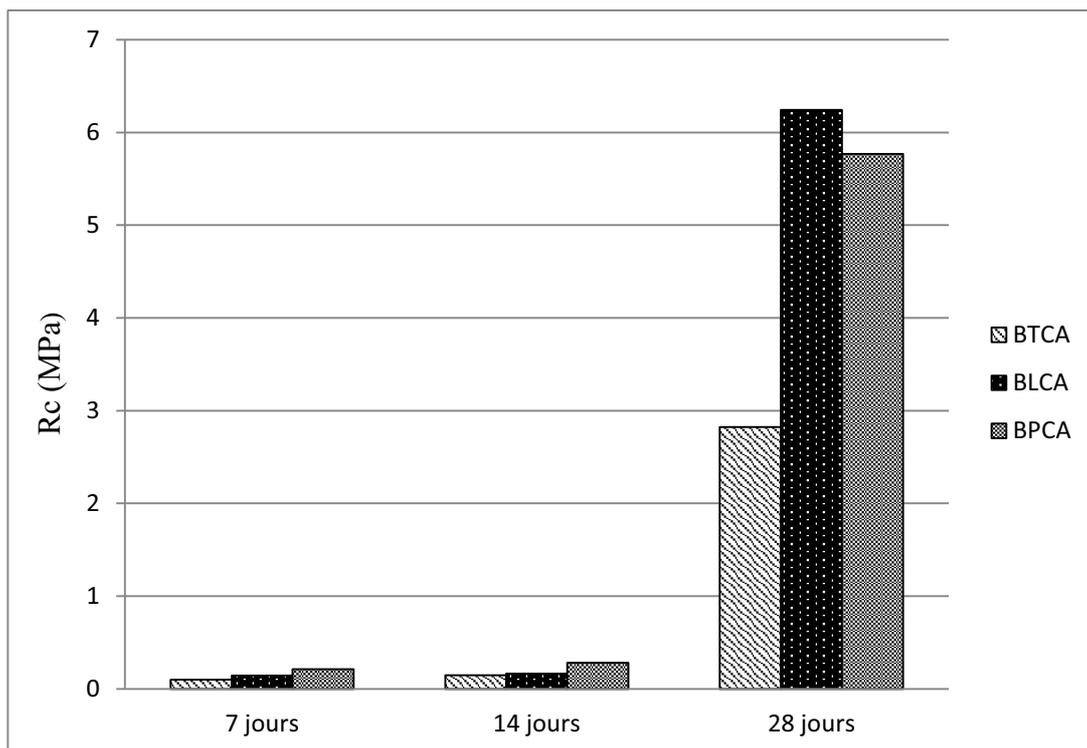


Figure V.5 : Evolution de la résistance à la compression des bétons adjuvantes en fonction de sable préparé (sable concassé) au cours du temps.

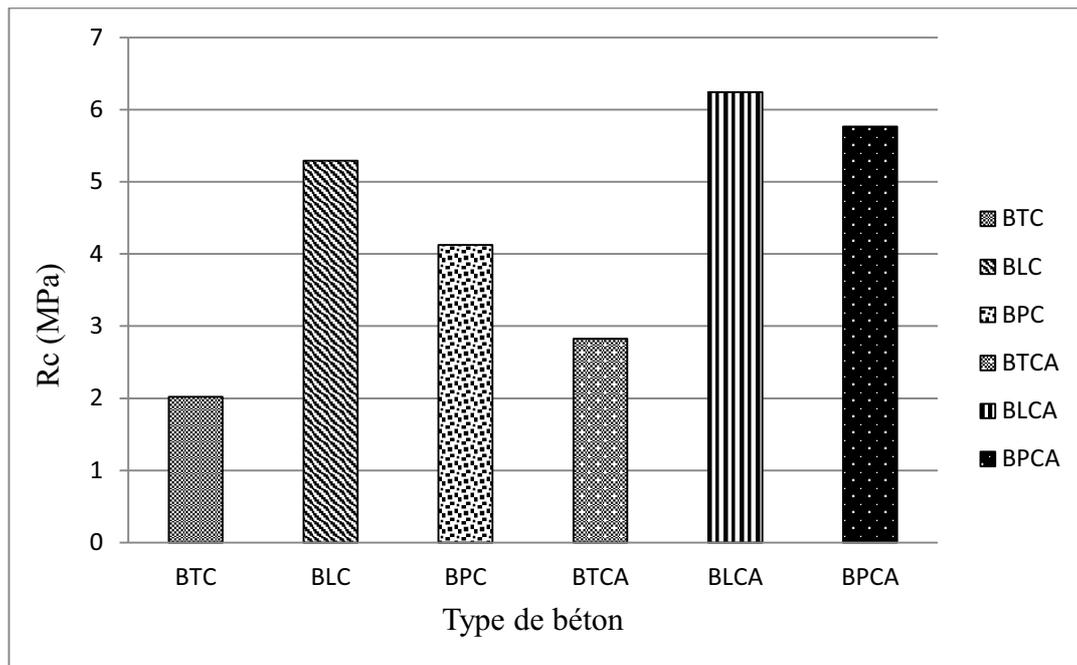


Figure V.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (sable concassé) a 28 jours.

Discussion et interprétation

les résultats obtenus et représentés dans la **figure V.4** et la **figure V.5**, pour la résistance à la compression a 28 jours confirment que l'utilisation de l'adjuvant (superplastifiant) augmente la résistance mécanique en comparaison aux béton sans adjuvant, d'autre part ils confirment le bénéfice des ajouts incorporés dans le sable pour l'amélioration des résistances mécaniques par rapport aux sable témoin et en fin en remarque bien que le sable concassé développe des résistances meilleures que celles d'un sable de oued souf

En revanche les résultats obtenus et représentés dans la **figure V.4** et la **figure V.5**, on remarque que la résistance à la compression a 7 jours et 14 jours est très faible ce qui est dû à la mauvaise conservation des éprouvettes (la faute de conservation au bac d'eau).

Les réponses obtenues à 28 jours sont acceptable en comparant avec le béton cellulaire obtenu par voie industriel.

V.2.2. la masse volumique

Tableau V.3 : les résultats des masses volumiques des bétons à base des deux types des sables utilisés

Type de béton	Masse volumique (sable oued souf) (Kg/m ³)	Masse volumique (sable concasse) (Kg/m ³)
BT	780	865
BL	842	841
BP	850	795
BTA	855	785
BLA	765	870
BPA	830	892

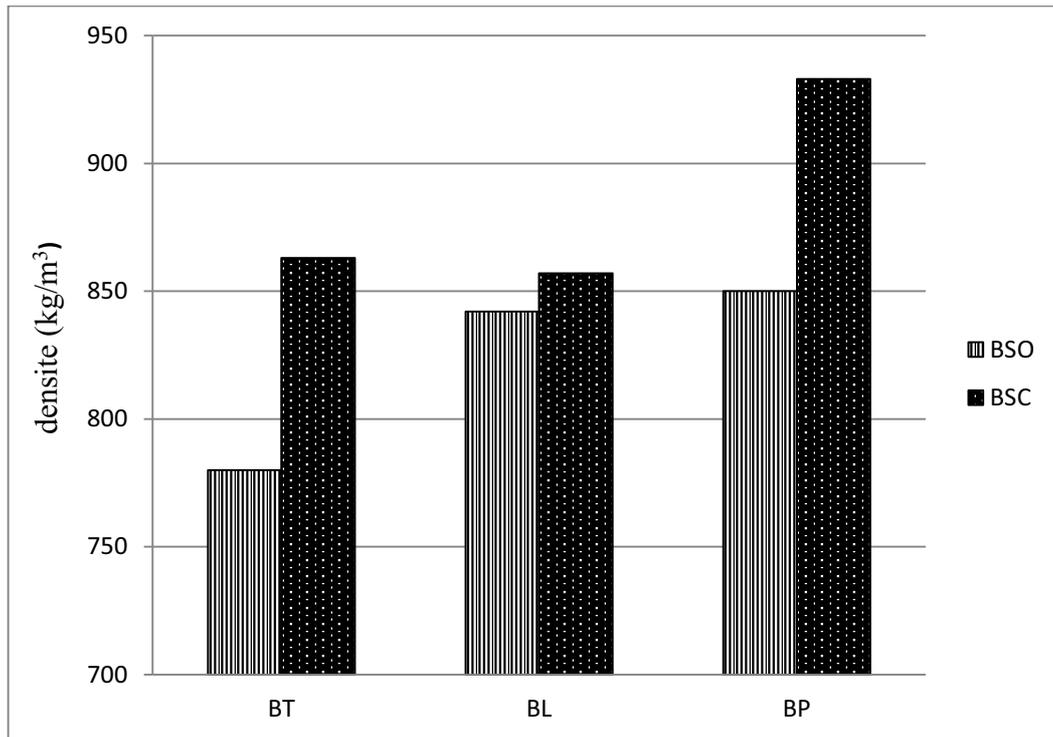


Figure V.7 : les densités des bétons cellulaires à base des deux sables préparés sans adjuvant

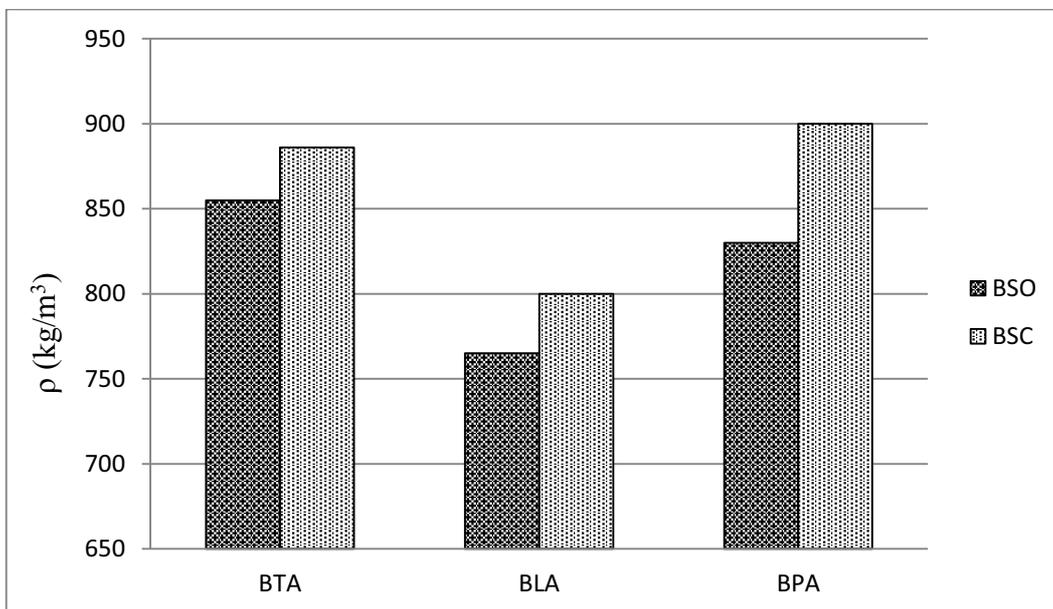


Figure V.8 : les densités des bétons cellulaires adjuvanés à base des deux sables préparés

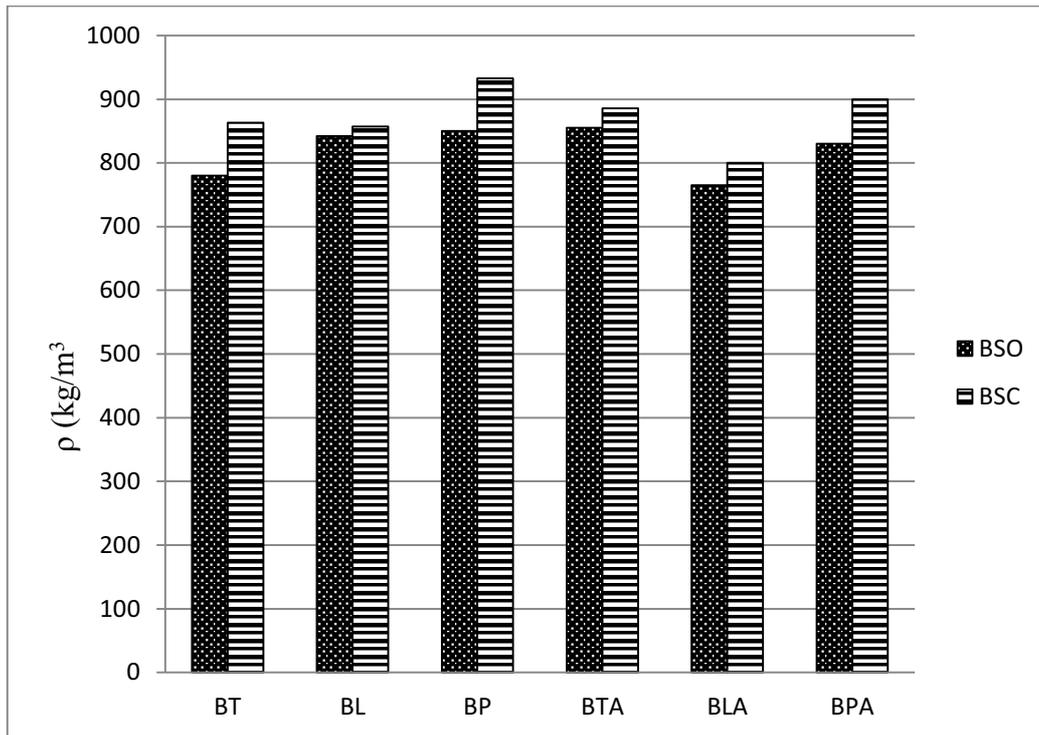


Figure V.9 : les densités de tous types de béton cellulaire formulé

Discussion et interprétation

D'après les résultats obtenus et représentés sous forme d'histogramme dans la **figure V.7** et la **figure V.8**, on remarque que les densités des bétons cellulaires à base de sable concassé sont supérieures aux celles des bétons à base de sable d'oued, ce qui peut être expliqué par la masse volumique du premier sable qui est élevée par rapport au deuxième.

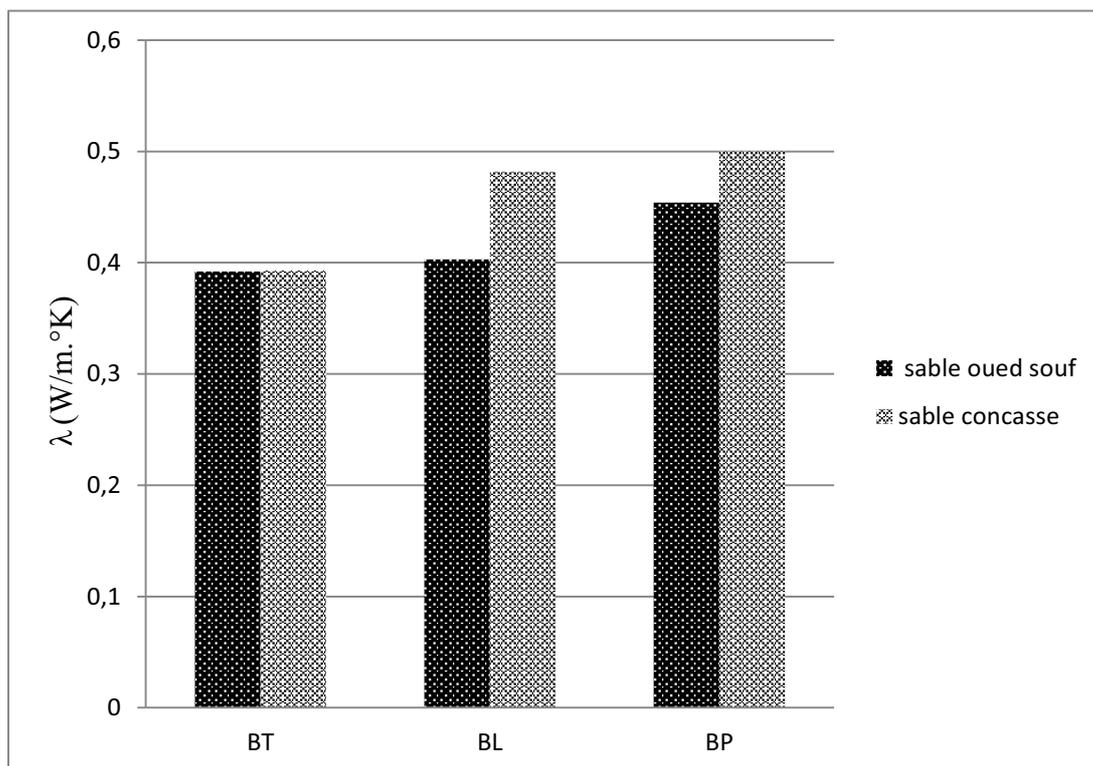
La figure V.9 montre que l'utilisation de l'adjuvant (superplastifiant) suivi par une diminution de la densité du béton cellulaire dans les deux cas (les deux sables), ce qui peut être expliqué par la diminution du rapport E/C.

Les densités des bétons cellulaires élaborés sont acceptables en comparant avec le béton cellulaire obtenu par voie industrielle.

V.2.3. la conductivité thermique

Tableau V.4 : les résultats des conductivités thermiques des bétons à base des deux types de sable

Type de béton	Conductivité thermique (sable oued souf) λ en (W/m.°K)	Conductivité thermique (sable concasse) λ en (W/m.°K)
BT	0.392	0.393
BL	0.403	0.482
BP	0.454	0.500
BTA	0.508	0.512
BLA	0.464	0.450
BPA	0.418	0.500

**Figure V.10** : la conductivité thermique λ du béton cellulaire a base des deux sables préparés sans adjuvant

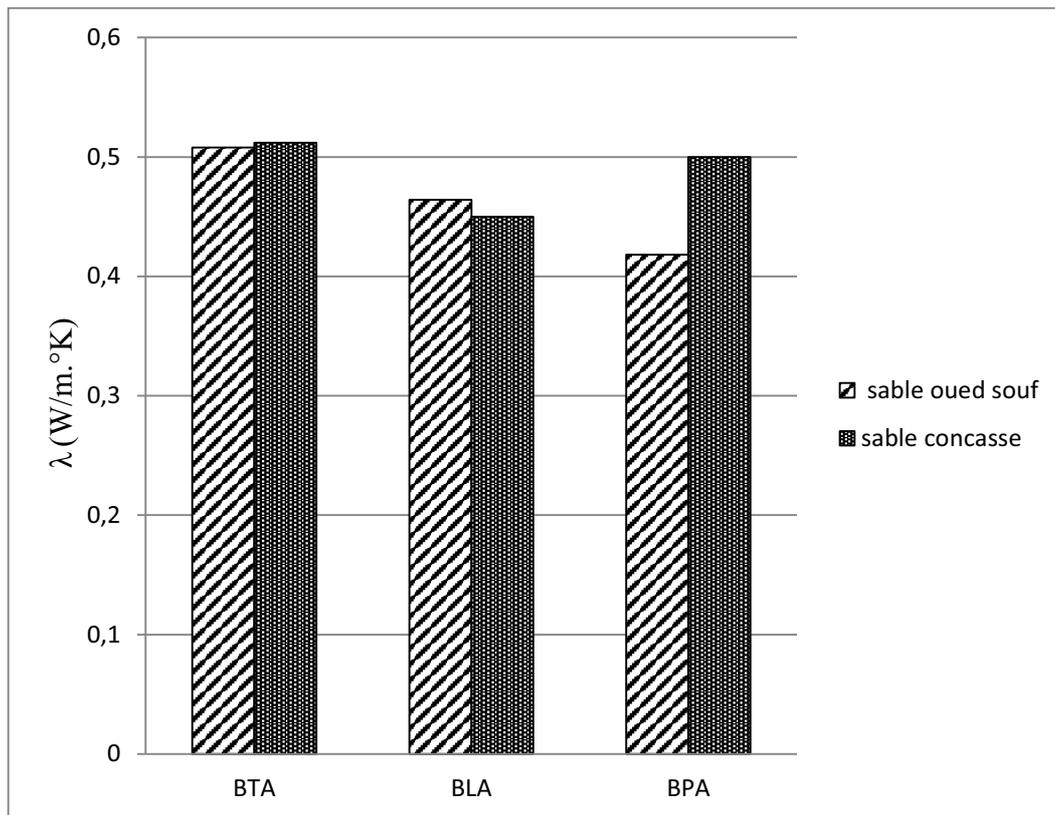


Figure V.11 : la conductivité thermique λ du béton cellulaire adjuvante a base des deux sables préparés

Discussion et interprétation

les résultats obtenus et représenter sous forme d'histogramme dans la **figureV.10** et la **figureV.11**, montrent que la conductivité thermique du béton cellulaire à base de sable concasse (surtout qui contient des ajouts actifs) est supérieur à celle de sable d'OUED SOUF même après l'utilisation de l'adjuvant, ce qui est lie proportionnellement à la masse volumique d'où la conductivité diminue à chaque fois que la masse volumique est faible .

VI.1. Conclusion générale

Cette étude est basée sur l'élaboration d'un béton cellulaire ainsi l'exploration et l'examen de ces propriétés thermiques, physiques et mécaniques. Ce béton est préparé à base de deux types de sables (sable oued souf et sable concassé) séparément avec l'incorporation des ajouts minéraux actifs par substitution dans ces sables

A travers cette étude on vise deux objectifs, à savoir la faisabilité d'utilisation des matériaux locaux pour produire des bétons cellulaire, le deuxième se résume dans l'influence du sable préparé à base d'ajouts minéraux actif sur les différents propriétés thermique, physique et mécanique des bétons cellulaire élaborés, les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivante :

- La substitution des ajouts minéraux dans les sables préparés conduit à une augmentation considérable de la résistance mécanique de béton cellulaire, notamment le laitier des hautes Fournaux.
- les mixtes qui contiennent un adjuvant assurent une augmentation importante de la résistance mécanique par rapport aux témoins.
- le sable concassé développe des résistances mécaniques meilleures comparativement à celles d'un sable d'oued souf.
- La mode conservation des bétons cellulaire influe d'une manière significative sur les réponses mécanique.
- La présence des ajouts actifs influe :
 - D'une manière positive sur les résistances mécaniques par le fait d'augmenter la compacité.
 - D'une manière négative sur la densité et la conductivité thermique par le fait de diminuer la porosité.
- Le sable oued souf permet de produire des bétons cellulaires avec des masses volumiques inférieures comparativement au sable concassé, par conséquent des conductivités thermiques meilleures.
- L'utilisation de l'adjuvant diminue le rapport E/C qui influe directement sur la masse volumique quel que soit le sable utilisé ce qui conduit à une diminution de la conductivité thermique.

VI. Perspective

Sur la base des résultats obtenus et conclusions tirées de cette étude ;

En perspectives

Le béton cellulaire sans l'autoclavage à l'air libre est un béton mousse qui présente de très faibles résistances mécaniques ce qui limite son utilisation.

Cette insuffisance ouvre une fenêtre de recherche pour améliorer la résistance d'un béton mousse sans recours à l'autoclavage tel que l'utilisation de fibres dans le béton cellulaire.

Référence bibliographique

- [1] **Baux C., Lanos C., Phelipot-Mardelé A.:** Mineral Foams with improved performances. Annales du BTP, n°1, p. 53-57, février 2011
- [2].http://www.cotemaison.fr/plan-interieur/quels-materiaux-pour-des-cloisons_5362.html : les matériaux de séparation dans les bâtiments.
- [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 du granulats légers. Traduction du CATED, SDT BTP (1970).
- [6] **Bederina .M:** Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger (2007).
- [7] **Tasserie M :** Optimisation physico-chimique d'un verre expansé. Thèse de Doctorat, Université de Rennes ; Juin 1991
- [8] **Carrel. P, Louvigne. M, Malaval R:** Le polystyrène expansé. Le bâtiment bâtir, (Avril 1982) pp28-34.
- [9] **Ferrer M:** Bétons légers isolants à base de billes de polystyrène. Thèse de doctorat. Université de Clermont Ferrand(1985)
- [10] **Ouadi R:** Conception d'un panneau sandwich isolant-porteur. Thèse de doctorat de l'INSA. (1991)
- [11] **Morog D:** Chronique technologique : du béton à partir de granulats de bois minéralisés : Procédés Agresta, comportement mécanique et principales utilisations.CII, Paris, Bull. Bétons 89, N°16, Janvier 1989, pp4-5.
- [12] **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).
- [13] **Kass J.L et Compbell D:** Functional classification of lightweight concrete, Matériaux et Constructions, (1972) Vol.5 N°27, pp171-172
-

Référence bibliographique

- [14] **JACOBS & MAYER**: Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16 1992.
- [15] **ARNOULD 86** : granulats de béton légers, Paris (1986).
- [16] **Véronique Cerozo** : Propriétés mécaniques thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales ; approche expérimental et modalisation. Thèse de doctorat (2005).
- [17] **AAC, 78**: Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology; Lancaster England, The construction Press Ltd (1978).
- [18] **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.
- [19] **Jos Cox , Jacques Sizaire , Pascal Meulders , Elly Van Overmeire, Albert Ingelaere** : FeBeCel. Bruxelles.
- [20] **SATTI 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 master , UNIVERSITE KASDI MERBAH -OUARGLA , 2014.
- [21] **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.
- [22] **DJOBO YANKWA Jean Noël** : effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les Propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique.
- [23] **Romilliat A** : Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker. Thèse de Doctorat Université Jean Monnet de Saint-Etienne (2006) 136p.
- [24] **G. Dreux** : "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998, P 29-41 WEAST R.C., ASTEL M.J., BEYER W.H., CRC handbook of chemistry and Physices, 67 Edition, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1986.
- [25] **PIERRE CHAUFOUR**, La Chaux (histoire-fabrication propriétés), disponible sur site web <la-chaux.net > (consulte le 30/11/2004).
-

Référence bibliographique

[26] **Rev. Future. Sciences**, matériaux de construction, disponible sur site <http://www.futuraciencies.com/fr/comprendre/glossaire/definitio/t/terre>(Consulte06/09/2006.

[27] **Info Ciment** disponible sur, « www.infociment.fr », consulter le 14/03/2014.

[28] **Dreux. G, Festa. J**, « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles, 1998.

[29] **Normes AFNOR :**

o Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers (1981-1997).

o NF P 18-541: Granulats pour béton hydraulique. Juin 1995.

o NF P 15-301: Ciment courant. Juin 1994.

o NFP 18-303 : Eau de gâchage pour béton. Aout 1999.

o NFP 18-340 : Adjuvant spéciaux pour béton. Décembre 1998.

o EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments.

[30] **Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées:** Béton de sable, Caractéristiques et Pratique d'utilisation ; Projet " SABLOCRETE ", mémoire de présentation (1994).

[31] **Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées:** Béton de sable, Caractéristiques et Pratique d'utilisation ; Projet " SABLOCRETE "(1994).

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

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

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

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

[36] **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.

Référence bibliographique

- [37] **C.Boutin** : Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé :modélisation par méthode auto cohérente. Matériaux et constructions 29 (1996) pp609-615
- [38] **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire** : Le béton cellulaire. Structure and proprieties of aerated concrete; a review: cement and concrete research (2000).
- [39] **Xiao-yan Huang et al:** Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. Construction and building materials 27 (2012) 1-5.
- [40] **E.K Kunhanandan Namibar, K. Ramamurthy:** Influence of filler type on the properties of foam concrete. Cement and concrete composites 28 (2006) 475-480.
- [41] **Christian Guegan, Philippe Legras, Jean Francois Mazzoleni, Christian Colin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier** : «Mémento du béton cellulaire» (2005).
- [42] **K.Ramamurthy, N.Narayanan** : Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete. Matériaux et constructions 33 (2000) pp243-250
- [43] **S.Tada** : Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials. Wittmann FH Amesterdam (1992) pp53-63
- [44] **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 thermohydrique; Thèse Doctorat d'état. L'ENP d'Alger (2001). Références Bibliographiques 97
- [45] **TAFRAOUI Ahmed** : Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat à l'INSA de TOULOUSE, 2009.
- [46] **J.P.Laurent** : La conductivité thermique 'à sec' des bétons cellulaires autoclavés : un modèle conceptuel. Matériaux et constructions 24 (1991) pp221-226.
- [47] **KHELIF SALAH EDDIN** : Etude de l'effet des additions minérales sur les propriétés d'un béton recyclé local avec application de la méthode des plans d'expériences « Design-Expert » ,M2MOIER MASTER , université de bba.2014.
-

Référence bibliographique

[48] **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.

[49] **Venuat. M**, La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1, « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers », édition 2, Collection Moniteur. – 277p-1989.

[50] **Meukam. P**, « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.

[51] **Meatf**, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, « les pouzzolanes et les basalts », bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 p 61-69.

[52] **Vernet. C, Cadoret. G**, (1991), Compte- rendus du Colloque «Voies Nouvelles du Béton», Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours, Cachan, France,pp.p. 17.

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

[54] These an overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, Canadian Journal of Civil Engineering. / Caijun Shi / Rev. can. Génie civ. 28(5) : 778-786 (2001).

[55] **Macleod. F**, « l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglçage », Cement Association of Canada, ing. Mars 2005 page 10-12.

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

[57] **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.

[58] **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.

Référence bibliographique

[59] Gegout. P, Hornain. H, Thuret. B, Mortureux. B, Volant. J, et Regourd. M,
« Texture et performance des ciments fillérisés ». Ciment, Bétons, Plâtres et Chaux, 1986, 4,
197-203.

[60] Gegout. P, Hornain. H, Thuret. B, et Regourd. M, « Résistance au gel des ciments
fillerisés calcaires ». 8th Congrès Int, de Chimie des Ciments, RIO DE JANEIRO. Sept.
1986, V, p. 47-51.
