

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 بوعريش »  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI  
BORDJ BOU ARRERIDJ

# Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE : Master  
**Filière : Génie Civil**  
**Option : Matériaux**

THÈME :

Elaboration d'un béton cellulaire bio-sourcier à base des déchets industriels.

**Préparé par :**

- Chemali Ramzi
- Khalfaoui Yasmina

Soutenu le :  
06/07/2019

**Devant le jury :**

<b>Encadreur :</b> Noui Ammar	MCB	université de B.B.A
<b>Co-Encadreur :</b> Bouglada. M Salah	MCB	université de B.B.A
<b>Président:</b> Achour Yacine	MCA	université de B.B.A
<b>Examineur :</b> Belagraa. Laarbi	MCA	université de Msila
<b>Examineur :</b> Kessal Oussama	MAB	université de B.B.A

Année Universitaire : 2018/2019

# Remerciements

- ✚ *Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*
- ✚ *Ainsi nous remercions tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*
- ✚ *C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadreur **Dr.Noui.A** et **Mr.Bougelada.M.Salah** pour leurs soutiens, leurs conseils judicieux et leurs grands bienveillances durant l'élaboration de ce projet.*
- ✚ *Nous saisissons également cette opportunité pour remercier les membres de laboratoire de génie civil et génie mécanique de l'université de Mohamed El Bachir El Ibrahimy de B.B.A, le laboratoire travaux publics de B.B.A qui nous ont beaucoup aidé pour élaborer Ce travail.*
- ✚ *Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de génie civil.*
- ✚ *Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

# *DÉDICACES*

« و ما توفيقى إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب »

- ✚ Je dédie ce travail à: Mes chers parents, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation.
- ✚ Toute ma famille.
- ✚ Mes amies.
- ✚ A toute la Promotion 2019.
- ✚ Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

## **Résumé :**

A cause de ces meilleures performances le bois est considéré comme un matériau noble; sa disponibilité sur la planète comme en Algérie lui confère une meilleure position dans le domaine des matériaux de construction, l'industrie liée au bois libère une quantité importante de déchet sous plusieurs formes, l'exploitation de ce déchet est minimal notamment dans le domaine de génie civil, pour cette raison nous avons pensé de le valoriser dans la production des bétons cellulaires, sa légèreté ainsi son aspect d'isolation lui confère une force technique, économique et écologique.

Nous avons utilisé lors de la réalisation de la partie expérimentale deux types de déchet de bois "neuf et recyclé" , le premier est riche en lignine et cellulose et le deuxième à faible teneur en lignine riche en cellulose plus dense que le premier matériau., le choix du taux d'incorporation est lié à la densité de chaque un, le deuxième facteur variable est le pourcentage de ciment " entre 10 et 30%", la quantité d'eau aussi peut être variable à cause de la différence des caractéristiques de chaque déchet ainsi pour la variation de la quantité de ciment.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la valorisation de ce type de déchet " déchet de bois" ou nous avons enregistré des performances thermiques très importantes ; le meilleur résultat obtenu est enregistré pour les mélanges qui contiennent le maximum de taux de ciment en présence des deux types de déchet de bois utilisés.

Mots clés : bio-sourcés, béton cellulaire, écologique, béton léger

## **Abstract**

Because of these better performances wood is considered as a noble material; for its availability on the planet, as in Algeria, it confers a better position in the field of building materials, the wood industry releases a large quantity of waste in several forms, the exploitation of waste is minimal especially in the field civil engineering, for this reason we thought of the value in the production of cellular concrete, its lightweight and its appearance of insulation gives it a technical, economic and ecological force.

When using the experimental part, we used two types of "new and recycled" wood waste, the first one being rich in cellulose lignin and the second with a lower content of cellulose-rich lignin more dense than the first material, the choice of the rate of incorporation is related to the density of each one, the second variable factor is the percentage of cement "between 10 and 30%", the quantity of water also can be variable because of the difference of the characteristics of each waste thus for the variation of the quantity of cement.

The results obtained show the value of the recovery of this type of waste "wood waste" or we recorded very significant thermal performance; the best result obtained is recorded for mixtures that contain the maximum cement content in the presence of the two types of wood waste used.

Key words :cellular concrete, ecological materials, cellulose lignin

## ملخص:

من أجل التنمية المستدامة، سلطت الدراسة الضوء على الحاجة إلى المواد البيئية والمتجددة في قطاع الهندسة المدنية ومن بين هذه المواد الحيوية، اخترنا بقايا الخشب في شكل مسحوق النوع الأول غني باللينين السليلوزي والنوع الثاني ناتج عن بقايا الخشب المدور، يحتوي على تركيز منخفض من اللينين السليلوزي وكتلته الحجمية أكبر من النوع الأول.

بقايا الخشب هي عازل جيد وخفيف الوزن لذلك يتم استغلالها في الهندسة المدنية كمواد فصل، من بين مواد الفصل الحالية، تعتبر الخرسانة الخلوية الخيار الأفضل لما تتميز به من خصائص.

تتضمن دراستنا دمج بقايا الخشب في الخرسانة الخلوية للحصول على مواد عزل عالية الجودة.

الكلمات المفتاحية الخرسانة الخلوية ، المواد الحيوية، اللينين السليلوزي

## Table des matières

Introduction générale :.....	5
Problématique :.....	5
Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation .....	7
I.1.Revue bibliographique sur les agro-bétons :.....	7
I.1.1. Introduction :.....	7
I.1.2. Béton de chanvre :.....	8
I.1.2.1. Le chanvre :.....	8
I.1.3. Propriété de la chènevotte :.....	9
I.1.3.1. Composition chimique de la chènevotte :.....	9
I.1.3.2. Masses volumiques et porosités :.....	10
I.1.3.3. Absorption d'eau :.....	12
I.1.3.4. Conductivité thermique :.....	13
I.1.3.5. Propriétés mécaniques des bétons de chanvre : .....	14
I.1.4. Choix d'un liant adéquat pour le béton de chanvre :.....	16
I.1.5. Différentes techniques de mise en œuvre du béton de chanvre : .....	17
I.1.5.a. Béton de chanvre banché :.....	17
I.1.5.b. Béton de chanvre projeté :.....	18
I.1.5.c. Béton de chanvre préfabriqué :.....	19
I.1.6. Conclusion : .....	19
I.2.Revue bibliographique sur les bétons légers .....	20
I.2.1. Introduction :.....	20
I.2.2. Les bétons légers :.....	20
I.2.3. Définition : .....	21
I.2.4. Type des bétons légers :.....	21
I.2.5. Propriétés des bétons légers :.....	23
I.2.5.1. Légèreté :.....	23
I.2.5.2. Porosité : .....	24
I.2.5.3. Comportement et performances mécaniques :.....	26
I.2.5.4. Propriétés thermiques :.....	29
I.2.6. CONCLUSION :.....	31
I.3.Revue bibliographique sur les bétons cellulaires .....	32
I.3.1. Introduction :.....	32
I.3.2. Définition : .....	32

I.3.3. Composition :	32
I.3.4. La structure :	34
I.3.5. Propriété de béton cellulaire :	37
I.3.5.1. La densité :	37
I.3.5.2. Résistance à la compression :	39
I.3.5.3. Conductivité thermique :	40
I.3.5.4. Coefficient de conductibilité thermique $\lambda$ pour murs en blocs de béton cellulaire :	40
I.3.5.5. Acoustique :	41
I.3.6. Utilisation :	42
I.3.7. Conclusion :	44
I.4.Revue bibliographie sur les matériaux bio sources :	45
I.4.1. Introduction :	45
I.4.2. Généralités :	46
I.4.3. Matériaux bio sources présentés :	47
I.4.3.1. Le bois :	47
I.4.3.1.a. Laine de bois et panneaux de fibres de bois :	47
I.4.3.1.b. Bois-en vrac :	48
I.4.3.2. Le liège :	49
I.4.3.2.1. Panneaux et rouleaux de liège :	49
I.4.3.2.2. Granulats :	50
I.4.3.3. La paille :	51
I.4.3.3.1. Bottes de paille :	51
I.4.3.3.2. Enduit terre/paille :	52
I.4.3.4. La ouate de cellulose :	53
I.4.3.4.1.Panneaux en ouate de cellulose :	54
I.4.3.4.2. La Ouate de cellulose en vrac :	54
Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :	57
II.1 Introduction :	57
II.2. Définition :	57
II.3. Le principe :	57
II.4 : Démarche méthodologique :	57
II.5. Analyse des résultats :	59
II.6. Terminologie :	59
II.6.1 : Les différents types de facteurs :	59
II.6.2. Notion d'espace expérimental :	60

.....	62
II.7. Intérêts des plans d'expériences : .....	62
II.8. Méthodologie des plans d'expériences.....	62
II.8.1. La recherche des facteurs influents.....	62
II.8.2. La modélisation : .....	63
II.8.3. L'optimisation .....	63
II.9. Présentation de logiciel « Design-Expert ».....	63
Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) : .....	64
III.1. Introduction : .....	64
III.2. Matériels utilisés : .....	64
III.2.1. Malaxeur de béton Utiliser pour homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion : .....	64
III.2.2. L'étuve : .....	65
III.2.3. La balance : .....	65
III.2.4. Plaque chauffante : .....	65
III.2.5. Résistance (source de chaleur) : .....	66
III.2.6. Thermomètre : .....	66
III.2.7. Eprouvette gradué :.....	66
III.2.8. Les moules 10*10*10 :.....	67
III.2.9. Presse hydraulique (NA EN 12390-3) :.....	67
III.2.10. Le CT METRE : .....	68
III.2.11. Broyeur a billet (Retsch PM100) :.....	68
III.2.12. Granulométrie laser (cillas 1090) : .....	69
III.3. Les caractéristiques des matériaux utilisent : .....	69
III.3.1. Sable d'oued Souf : .....	69
III.3.2. Ciment Matine 42.5 :.....	70
III.3.3. La poudre d'alumine : .....	72
III.3.4. Eau de gâchage :.....	73
III.3.5. La chaux vive : .....	73
III.3.6. La chaux éteinte de LINDE :.....	75
III.3.7. Déchet de bois (bois recyclée) :.....	76
III.3.8. Déchet de bois neuf (la ouate de cellulose) : .....	77
III.3.9. La formulation du béton cellulaire : .....	78
III.3.10. Confection et contrôler l'éprouvette.....	78
III.3.10.1. Malaxage de béton.....	78

IV -1-Introduction :	80
IV -2-Etude thermomécanique :	80
IV -3-Influence de la granulométrie de l'Alumine sur les performances du BBC :	80
IV -4-Résultat mécanique et thermique du béton cellulaire :	82
-Le 1er ajout biosource (bois recyclée) :	82
IV-CONCLUSION GENERALE.....	100
IV-1-Conclusion générale :	100
IV-2-Recommandations et perspectives de recherches :	101

## LISTE DES FIGURES

FIGURE I. 1(A) LA TIGE DU CHANVRE, (B) CHENEVOTTE DEFIBREE, (C) CHENEVOTTE FIBREE [4] .....	4
FIGURE I. 2 ABSORPTION D'EAU PAR DES CHENEVOTTES – 1ER ROUND ROBIN TEST RILEM, AVANT DEFINITION DU PROTOCOLE RILEM TC 236-BBM [7].....	8
FIGURE I. 3 ABSORPTION D'EAU PAR LES CHENEVOTTES (DEFIBREE= CP ET FIBREE = CF) [4].....	9
FIGURE I. 4 CONDUCTIVITE THERMIQUE DU CHANVRE EN VRAC EN FONCTION DE SA MASSE VOLUMIQUE [8].....	10
FIGURE I. 5 ALLURE TYPIQUE DE LA COURBE $\Sigma = F(E)$ EN COMPRESSION DE BETONS DE CHANVRE FAIBLEMENT COMPACTES [8] .....	12
FIGURE I. 6 PROCEDE DE MISE EN ŒUVRE PAR BANCHAGE .....	14
FIGURE I. 7 PROCEDE DE MISE EN ŒUVRE PAR PROJECTION .....	15
FIGURE I. 8 CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS [19].....	17
FIGURE I. 9 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE BETONS LEGERS .....	18
FIGURE I. 10 STRUCTURE DES BETONS LEGERS [20] .....	18
FIGURE I. 11 BETON NORMAL A GAUCHE ET BETON LEGER A DROITE AYANTS LE MEME POIDS [23]....	20
FIGURE I. 12 POROSITE DU BETON [24] .....	21
FIGURE I. 13 LA RESISTANCE SUR PRISME EN COMPRESSION A 28J (MPA) EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE [26] .....	22
FIGURE I. 14 REPARTITION DE LA POROSITE DE TROIS BETONS CELLULAIRES AUTOCLAVES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES [27] .....	23
FIGURE I. 15 CONDUCTIVITE THERMIQUE $\lambda$ EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE DU BETON CELLULAIRE [30] .....	26
FIGURE I. 16 COMPOSITION DE BETON CELLULAIRE [37].....	30
FIGURE I. 17 : STRUCTURE DU BETON CELLULAIRE (ECHELLE 1/1).....	30
FIGURE I. 18 STRUCTURE DU BETON CELLULAIRE VUE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE [35].....	31
FIGURE I. 19 REPARTITION DES CELLULES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE .....	32
FIGURE I. 20 CORRESPONDANCE ENTRE LE VOLUME DE LA MATIERE PREMIERE ET LE VOLUME DU BETON CELLULAIRE.....	33
FIGURE I. 21 TRANSFERT DES CONTRAINTES DANS LE BETON ORDINAIRE ET DANS LE BETON CELLULAIRE .....	35
FIGURE I. 22 ACOUSTIQUE.....	39
FIGURE I. 23 DETAIL DE LA JONCTION MUR-POTEAU METALLIQUE.....	39
FIGURE I. 24 AUTRE PHOTO DU MUR EN BETON CELLULAIRE.....	40
FIGURE I. 25 BETON CELLULAIRE ARME. ....	40
FIGURE I. 26 BETON CELLULAIRE UTILISE DANS LA CONSTRUCTION DU MUR.....	41
FIGURE I. 27 DALLES EN BETON CELLULAIRE PHOTOS AGRANDIES [31].....	41
FIGURE I. 28 LES MATERIAUX BIO SOURCES DANS LES BATIMENTS.....	42
FIGURE I. 29 PRODUITS DE CONSTRUCTION ET DOMAINES D'APPLICATION .....	44
FIGURE I. 30 LA LAINE DE BOIS ET LES PANNEAUX EN FIBRE DE BOIS SONT FABRIQUES GRACE AU DEFIBRAGE DU BOIS. ....	44
FIGURE I. 31 LE BOIS PEUT ETRE CONDITIONNE EN VRAC .....	45
FIGURE I. 32 PRODUITS DE CONSTRUCTION ET DOMAINES D'APPLICATION : .....	46
FIGURE I. 33 LES PANNEAUX ET ROULEAUX DE LIEGE SONT FABRIQUES A PARTIR DE L'ECORCE DE CHENE LIEGE OU DE BOUCHONS DE LIEGE.....	46
FIGURE I. 34 LES GRANULATS DE LIEGE SONT UTILISES EN REMPLISSAGE DE CAISSONS OU MELANGES A DU BETON AFIN D'OBTENIR UNE CHAPE LEGERE ET ISOLANTE. ....	47

<i>FIGURE I. 35</i> <i>PRODUITS DE CONSTRUCTION ET DOMAINES D'APPLICATION</i> .....	48
<i>FIGURE I. 36</i> <i>APRES FAUCHAGE, LA PAILLE EST EN GENERAL CONDITIONNEE SOUS FORME DE BOTTES. CELLES-CI PEUVENT ETRE UTILISEES TELLES QUELLES COMME ISOLANT DANS UNE OSSATURE BOIS.</i> .....	48
<i>FIGURE I. 37</i> <i>LA PAILLE EN VRAC EST MELANGEE A DE LA TERRE AFIN DE CREER UN ENDUIT.</i> .....	49
<i>FIGURE I. 38</i> <i>LES PANNEAUX DE PAILLE COMPRESSEE SONT OBTENUS GRACE A UN PROCEDE DE COMPRESSION DE LA PAILLE A CHAUD. UN REVETEMENT EN CARTON EST ENSUITE COLLE SUR LES DEUX FACES</i> .....	49
<i>FIGURE I. 39</i> <i>PRODUITS DE CONSTRUCTION ET DOMAINES D'APPLICATION</i> .....	51
<i>FIGURE I. 40</i> <i>LA OUATE DE CELLULOSE PEUT ETRE CONDITIONNEE SOUS FORME DE PANNEAUX</i> .....	51
<i>FIGURE I. 41</i> <i>LA OUATE DE CELLULOSE EN VRAC PEUT ETRE APPLIQUEE EN VOIE SECHE OU EN VOIE HUMIDE</i> .....	52
<i>FIGURE I. 42</i> <i>LE NIVEAU BAS, LE NIVEAU HAUT, ET LE DOMAINE D'UN FACTEUR</i> .....	57
<i>FIGURE I. 43</i> <i>L'ESPACE EXPERIMENTAL D'UN FACTEUR</i> .....	57
<i>FIGURE I. 44</i> <i>LES POINTS EXPERIMENTAUX DANS UN ESPACE.</i> .....	58
<i>FIGURE I. 45</i> <i>LES POINTS EXPERIMENTAUX DANS UN DOMAINE D'ETUDE.</i> .....	59
<i>FIGURE III. 1</i> <i>MALAXEUR DE BETON</i> .....	62
<i>FIGURE III. 2</i> <i>L'ETUVE</i> .....	63
<i>FIGURE III. 3</i> <i>LA BALANCE</i> .....	63
<i>FIGURE III. 4</i> <i>PLAQUE CHAUFFANTE</i> .....	63
<i>FIGURE III. 5</i> <i>RESISTANCE (SOURCE DE CHALEUR)</i> .....	64
<i>FIGURE III. 6</i> <i>THERMOMETRE</i> .....	64
<i>FIGURE III. 7</i> <i>EPROUVETTE GRADUE</i> .....	65
<i>FIGURE III. 8</i> <i>LES MOULES 10*10*10</i> .....	65
<i>FIGURE III. 9</i> <i>PRESSE HYDRAULIQUE (NA EN 12390-3</i> .....	66
<i>FIGURE III. 10</i> <i>LE CT METRE</i> .....	66
<i>FIGURE III. 11</i> <i>BROYEUR A BILLET (RETSCH PM100)</i> .....	67
<i>FIGURE III. 12</i> <i>GRANULOMETRIE LASER (CILLAS 1090)</i> .....	67
<i>FIGURE III. 13</i> <i>SABLE D'OUED SOUF</i> .....	68
<i>FIGURE III. 14</i> <i>CIMENT MATINE 42.5</i> .....	69
<i>FIGURE III. 15</i> <i>LA POUDRE D'ALUMINE</i> .....	70
<i>FIGURE III. 16</i> <i>LA CHAUX VIVE</i> .....	72
<i>FIGURE III. 17</i> <i>DECHET DE BOIS (BOIS RECYCLEE)</i> .....	75

<i>FIGURE III. 18 DECHET DE BOIS NEUF (LA OUATE DE CELLULOSE)</i> .....	76
<i>FIGURE III. 19 LA QUANTITE D'EAU NECESSAIRE EST DETERMINER APRES PLUSIEURS ESSAIS DE CONVENANCE QUI VISE LA PREPARATION D'UN BETON CELLULAIRE AVEC UN VOLUME CONTENANT ENVIRON 55% DE SOLIDE ET 45% DE VIDE.</i> .....	76
<i>FIGURE III. 20 COURBE GRANULOMETRIE LASER D'ALUMINE A L'ETAT INITIAL (DISTRIBUTION MONOMODALE OU HOMOGENE)</i> .....	79
<i>FIGURE III. 21: COURBE GRANULOMETRIE LASER D'ALUMINE PASSANTS DE TAMIS 80 <math>\mu</math>M</i> .....	79

### **Liste des tableaux**

<i>TABLEAU I. 1 MASSES VOLUMIQUES ET POROSITES MESUREES D'APRES LA LITTERATURE</i> .....	7
<i>TABLEAU I. 2 CONDUCTIVITE THERMIQUE DES CHENEVOTTES EN VRAC</i> .....	10
<i>TABLEAU I. 3 CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS SELON LA MASSE VOLUMIQUE [22]</i> .....	19
<i>TABLEAU I. 4 CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS SELON LA MASSE VOLUMIQUE [22]</i> .....	22
<i>TABLEAU I. 5 FORMULES EMPIRIQUES RELIANT LA RESISTANCE A LA COMPRESSION, LA COMPOSITION ET LA POROSITE [28]</i> .....	23
<i>TABLEAU I. 6 EQUATIONS PREDICTIVES DU MODULE D'ELASTICITE E DU BETON CELLULAIRE [28]</i> .....	23
<i>TABLEAU I. 7 CARACTERISTIQUES DE QUELQUES BETONS LEGERS [24]</i> .....	25
<i>TABLEAU I. 8 CLASSIFICATION DU BETON CELLULAIRE SELON LA MASSE VOLUMIQUE ET LA RESISTANCE A LA COMPRESSION</i> .....	34
<i>TABLEAU I. 9 CATEGORIES BLOCS</i> .....	35
<i>TABLEAU I. 10 RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON CELLULAIRE SELON LA DENSITE</i> .....	36
<i>TABLEAU I. 11 VALEURS DE BASE</i> .....	37
<i>TABLEAU I. 12 VALEURS UTILES DES MURS EN BETON CELLULAIRE COLLES</i> .....	38
<i>TABLEAU III. 1 LES CARACTERISATIONS DE SABLE D'OUED SOUF [16]</i> .....	68
<i>TABLEAU III. 2 LES CARACTERISATIONS DE CIMENT MATINE 42.5 [16]</i> .....	69
<i>TABLEAU III. 3 LES TENEURS DES ELEMENTS DE COMPOSITION LE CIMENT MATINE 42.5 [16]</i> .....	70

<i>TABLEAU III. 4 LES TENEURS DES ELEMENTS DE COMPOSITION DE L'ALUMINE DECHET DE MSILA [16]</i>	
.....	71
<i>TABLEAU III. 5 LES CARACTERISATIONS CHIMIQUES DE L'EAU DE GACHAGE D'UNV BBA [16]</i>	71
<i>TABLEAU III. 6 FICHE TECHNIQUE DE LA CHAUX VIVE (LA WILAYA DE SAIDA) [17]</i>	72
<i>TABLEAU III. 7 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES LAITS DE CHAUX DE LINDE [15]</i>	74
<i>TABLEAU III. 8 COMPOSITION CHIMIQUE DE LA CHAUX RESIDUAIRE DE LINDE [15]</i>	74
<i>TABLEAU III. 9 LA MASSE VOLUMIQUE DE DECHET DE BOIS (BOIS RECYCLEE)</i>	75
<i>TABLEAU III. 10 LA MASSE VOLUMIQUE DE DECHET DE BOIS (BOIS NEUF)</i>	76
<i>TABLEAU III. 11 PRESENTATION DES DIFFERENTS PARAMETRES VARIE DE LA MANIPULATION DE PROJET</i>	77
<i>TABLEAUX IV. 1DOSAGE DE 30% CIMENT</i>	80
<i>TABLEAUX IV. 2 DOSAGE DE 20% CIMENT</i>	80
<i>TABLEAUX IV. 3DOSAGE DE 10% CIMENT</i>	81
<i>TABLEAUX IV. 4DOSAGE DE 30% CIMENT</i>	82
<i>TABLEAUX IV. 5DOSAGE DE 20% CIMENT</i>	83
<i>TABLEAUX IV. 6DOSAGE DE 10% CIMENT</i>	83
<b>Liste histogramme :</b>	
<u><i>HISTOGRAMME. 1 VARIATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES BETONS CELLULAIRE A BASE DE BOIS RECYCLEE</i></u>	82
<i>HISTOGRAMME. 2 VARIATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES BETONS CELLULAIRE A BASE DE BOIS RECYCLEE</i>	83
<i>HISTOGRAMME. 3 VARIATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES BETONS CELLULAIRE A BASE DE BOIS NEUF</i>	85
<i>HISTOGRAMME. 4 VARIATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES BETONS CELLULAIRE A BASE DE BOIS NEUF</i>	85

## **Structure de mémoire :**

**Introduction générale :** introduire le phénomène étudié et montrer l'objectif et la problématique.

**Chapitre I :** Généralités sur les bétons de séparation.

- ❖ Revue bibliographique sur les agro-bétons.
- ❖ Revue bibliographique sur les bétons légers.
- ❖ Revue bibliographique sur les bétons cellulaires
- ❖ Revue bibliographique sur les matériaux bio sources

**Chapitre II :** Mode opératoire (matériels et matériaux).

- ❖ Matériels utilisés et leurs objectifs
- ❖ Les caractéristiques des matériaux utilisés
- ❖ La formulation du béton cellulaire
- ❖ Confection et contrôle de l'éprouvette

**Chapitre III :** Résultats et discussions.

**Chapitre IV :** Une conclusion générale clôturant notre travail avec quelques recommandations, suivi de références bibliographiques.

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

---

### **Introduction générale :**

Le développement durable de nos activités industrielles sera l'un des grands enjeux du 21-<sup>ème</sup> siècle. Nous aurons à faire simultanément à une raréfaction des ressources fossiles et aux risques écologiques, notamment l'effet de serre.

Cette préoccupation environnementale a donné naissance à diverses méthodes dans le but de répondre à deux exigences primordiales : diminuer les consommations énergétiques et les impacts sur l'environnement extérieur et assurer des ambiances intérieures saines et confortables sachant que nous passons 80 % de notre temps à l'intérieur du bâtiment.

Le choix préliminaire des matériaux utilisés pour la construction joue un rôle important pour la réussite d'un projet. L'impact environnemental du choix de matériau ne se réduit pas aux gains qu'il procure pendant son utilisation mais c'est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, à la fabrication, à l'utilisation et à la démolition qui doit être prise en compte. C'est ce qu'on appelle énergie grise. On utilisera pour cela les matériaux issus de matières premières renouvelables comme les matériaux végétaux. En fait, les matériaux à fibres végétales sont une réponse parfaite au problème de l'impact environnemental des matériaux (énergie grise et émissions polluantes) et la réduction des consommations énergétiques du bâtiment.

Ainsi que le béton cellulaire est une autre variété, il est constitué d'un mélange de sable, de ciment, de chaux, d'eau et de poudre d'aluminium. Cette dernière, par réaction chimique, crée dans le produit une multitude de petites bulles qui confèrent au béton cellulaire des propriétés isolantes élevées. De plus, ces microcellules allègent la masse volumique de ce béton (400 à 800 kg/m<sup>3</sup> contre 2400 kg/m<sup>3</sup> pour le béton ordinaire).

En étudiant ce thème, nous contribuons à la valorisation des déchets bio-sourcé {déchets de bois} ou {lignine de cellulose} dans un béton cellulaire pour améliorer certaines propriétés techniques et économiques.

### **Problématique :**

Nous savons que les matériaux bio-sourcés sont écologiques ce qui nous a incité à les utiliser dans le domaine de génie civil, nous savons aussi que la résistance mécanique diminue

## **Introduction générale**

---

grâce à sa faible densité, nous voulons que le béton cellulaire soit plus isolant et léger. Pour obtenir ce que nous voulons, les particules de déchets de bois doivent être réparties régulièrement sur la périphérie des cellules d'air, nous utilisons ce genre de déchets celluloses pour savoir ce qui nous donne come caractéristique de chaque ajout sur le béton cellulaire.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur les bétons de séparation**

### **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

#### **I.1.Revue bibliographique sur les agro-bétons :**

##### **I.1.1. Introduction :**

Face aux préoccupations environnementales, le choix du matériau de construction est un facteur clé pour le développement durable. Ce choix se base sur de nombreux critères techniques économiques, et environnementaux. L'analyse de cycle de vie (ACV) du matériau qui prend en compte toute la chaîne depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa démolition est un indicateur de qualité environnementale Les matériaux d'origine végétale comme le chanvre, la paille, le bois ou le lin semblent être une solution intéressante et offrent plusieurs avantages [1] :

- Faible énergie grise : les matériaux d'origine végétale possèdent une faible énergie grise par rapport à d'autres matériaux de construction. L'énergie grise est l'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie d'un matériau, soit la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, à la transformation, à la fabrication, au transport, à l'utilisation, à l'entretien et enfin au recyclage du matériau en fin de vie,
- Ressources renouvelables,
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre en constituant un puits de carbone.

Ces dernières années ont vu se développer plusieurs matériaux de construction bio-sourcés. Le plus abouti en France est le béton de chanvre qui a fait l'objet de nombreuses études, La bibliographie montre également l'intérêt d'autres ressources bio-sourcés couplées avec différents liants [2].

##### ➤ **Que désigne le terme Agro bétons ?**

Un béton au sens conventionnel du terme consiste en un mélange hétérogène entre un liant minéral et des granulats, également minéraux, de dimension graduée. Par analogie, ce que nous définirons comme **Agro béton** consistera donc en :

## **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

---

« Un mélange entre des granulats issus de végétaux lignine cellulosique provenant directement ou indirectement de l'agriculture ou de la foresterie, majoritaires en volume, et un liant minéral », Ne serons considérés dans cette définition les mélanges incluant :

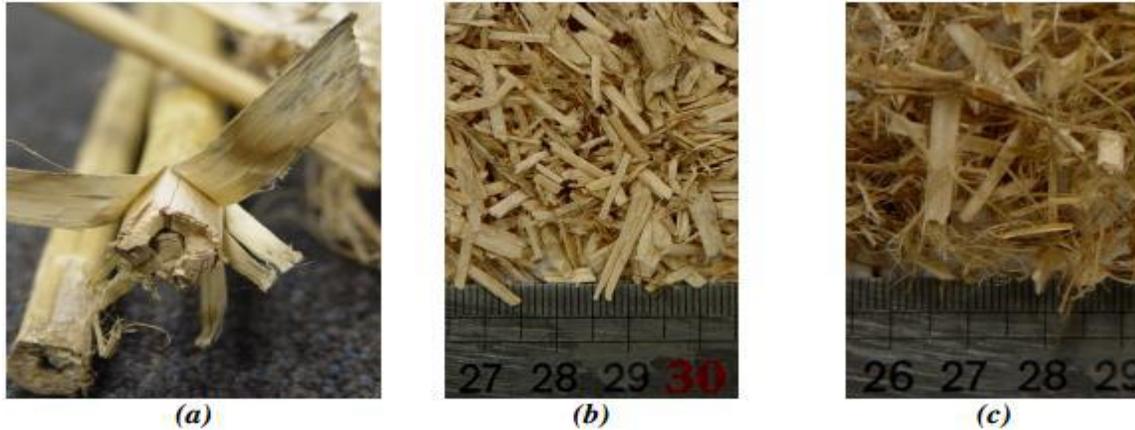
- Des granulats lignine cellulosiques en faible volume.
- Des fibres de végétale lignine cellulosique en renfort dans le béton.

### **I.1.2. Béton de chanvre :**

Le béton de chanvre est un mélange de chènevottes, de liant et d'eau. Les recherches effectuées ont permis de déterminer les propriétés physiques du matériau. La forte porosité du matériau lui confère des propriétés d'isolant thermique et d'absorbante acoustique. Grâce à sa capacité à stocker et déstocker la vapeur d'eau, le béton de chanvre présente des performances hygrothermiques intéressantes. En effet, les performances hygrothermiques du béton de chanvre contribuent au confort intérieur au sein d'un local et améliorent ainsi ses performances énergétiques. Ce matériau est utilisé en remplissage d'ossature, sa résistance mécanique ne lui permettant pas d'être utilisé comme matériau porteur [1].

#### **I.1.2.1. Le chanvre :**

Le chanvre ou « Cannabis Sativa » est une plante annuelle et herbacée de la famille des Cannabinacées, cultivée par l'homme depuis le néolithique pour la qualité de ses fibres, ses graines oléagineuses et ses vertus médicinales. Le chanvre présente des intérêts agronomiques non négligeables : bonne tête d'assolement, sa culture améliore la structure du sol et s'effectue sans traitement ni engrais Le chanvre fournit trois coproduits : la graine, les fibres et les chènevottes. Dans le domaine de la construction, les fibres peuvent être utilisées pour la fabrication de laine isolante et les chènevottes pour produire des bétons de chanvre et des enduits. En général, une tonne de paille donne 0.3 tonne de fibres et de 0.55 à 0.65 tonne de chènevotte [3].



*Figure I. 1 (a) La tige du chanvre, (b) Chènevotte défilbrée, (c) Chènevotte fibrée [4]*

### **I.1.3. Propriété de la chènevotte :**

#### **I.1.3.1. Composition chimique de la chènevotte :**

Les fibres végétales sont constituées de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de sa paroi. Dans le cas de fibre de chanvre, quatre composés majoritaires se distinguent : la cellulose, les hémicelluloses, les pectines et la lignine. Ces composants déterminent principalement les propriétés physiques des fibres[5].Le tableau ci-dessous ci-après synthétise les données bibliographiques sur la composition chimique de la chènevotte. Le pourcentage de chaque composant diffère selon l'étude. Cette variabilité est attribuée à la variation des conditions climatiques, à l'âge et au traitement subi par les fibres [6], l'espèce et la variété de la plante ainsi que la qualité du sol de culture peuvent également influencer la composition chimique de la fibre. Cette variabilité peut être également liée à la méthode de dosage utilisée.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Tableau I. 1 Composition chimique de la chènevotte

Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Lignine (%)	p
36-41	31-37	19-21	-	[Triolo, 1980]
74.4	17.9	0.9	3.7	[Dhakal et al., 2007]
56.1	10.9	20.1	6	[Sedan et al., 2008]
76.12	12.28	1.55	5.65	[Korte et Staiger, 2008]
48	12	6	28	[Arnaud, 2008]
68.9	8.7	-	4.1	[Magniont, 2010]
49.97	21.42		9.52	[Viel et al., 2017]

### I.1.3.2. Masses volumiques et porosités :

Généralement, la masse volumique en vrac d'un matériau est définie comme étant la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides inter-particulaires et intra-particulaires. Cette caractéristique physique varie selon la compacité et la porosité du granulat.

La synthèse des résultats obtenus dans la littérature est présentée dans le Tableau I. 1 Les résultats montrent que la masse volumique en vrac de la chènevotte est faible. En effet, elle varie entre 98 et 155 kg/m<sup>3</sup>. Cette variabilité peut être liée à l'origine du chanvre, à sa nature (fibrée ou défibrée) ou à la méthode de mesure. Nguyen montre ainsi que la masse volumique de la chènevotte fibrée est deux fois plus faible que celle de la chènevotte défibrée [4].

## **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

---

Les résultats mettent en évidence la forte porosité intra-particulaire qui est considérée comme majoritairement ouverte [4]. En effet, la porosité intra-particulaire est de l'ordre de 80% et la porosité totale de l'assemblage granulaire en vrac s'élève à plus de 90%. Ce taux de porosité permet d'expliquer la faible masse volumique apparente de ces particules, leur grande capacité de déformation, leur sensibilité à l'eau ainsi que leurs bonnes propriétés thermiques.

Pour pallier aux dispersions liées à la méthode de mesure, un protocole expérimental a été mis en place dans le cadre du comité technique Rilem TC 236- BBM [7].

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

*Tableau I. 1 Masses volumiques et porosités mesurées d'après la littérature*

Pvs [kg/m <sup>3</sup> ]	Pgs [kg/m <sup>3</sup> ]	Ps [kg/m <sup>3</sup> ]	nTotal [%]	Ninter [%]	nintra/T ot [%]	nintra- p [%]	Référence
110-155	-	-	-	-	-	-	[Cordier, 1999]
130	320	1455	91.2	59.4	31.8	78	[Cerezo, 2005]
98	-	-	-	-	-	-	[De Bruijn et al., 2009]
102.83	256	1465	93.0	59.9	33.1	82.5	[Nguyen, 2010]
134.8	320	1448	90.7	58.0	32.7	77.9	[Magniont, 2010]
114.2	256	1540	92.4	55.1	37.2	83.4	[Nozahic, 2012]
110	250	1384	92.1	56.0	36.1	81.9	[Chamoin, 2013]
110.9	-	-	-	-	-	-	[Dinh, 2014]
112	256	1448	92.3	56.3	36.0	82.3	[Tronet, 2013]

**$\rho_{vs}$**  : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (kg/m<sup>3</sup>)

**$\rho_{gs}$**  : Masse volumique apparente d'une particule de chènevotte à l'état sec (kg/m<sup>3</sup>)

**$\rho_s$**  : Masse volumique absolue de la matière végétale constituant la chènevotte (kg/m<sup>3</sup>)

**nTotal** : Porosité totale ( $n_{Total} = 1 - \rho_{vs} / \rho_s$ )

**ninter** : Porosité inter-granulaire ( $n_{inter} = 1 - \rho_{gs} / \rho_s$ )

**nintra-p** : Porosité intra-granulaire des particules isolées ( $n_{inter-p} = 1 - \rho_{gs} / \rho_s$ )

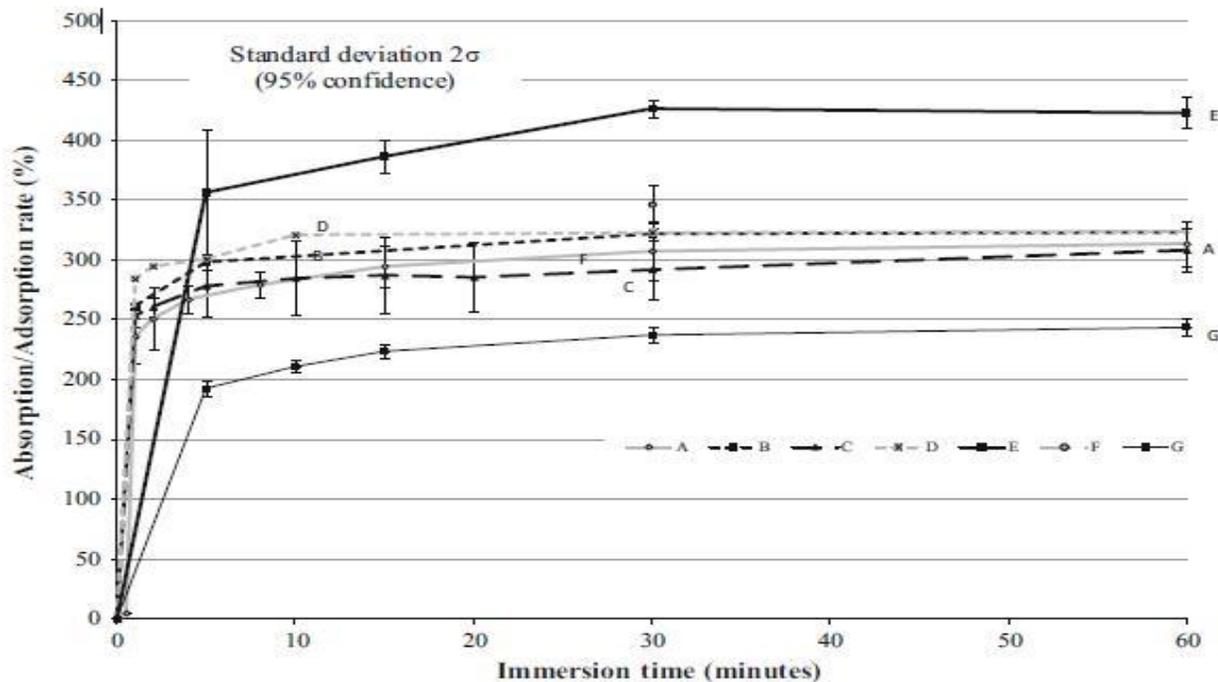
## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

**nintra/Tot:** Porosité intra-granulaire par rapport au mélange

$[(ninter/Tol = ninter-p (1- ninter) \text{ où } ninter/Tol = nTotal - nintra-p]$

### I.1.3.3. Absorption d'eau :

La capacité d'adsorption d'eau est une des caractéristiques importantes des granulats légers. Une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par ces granulats lors de la fabrication du fait de leur importante porosité. Pour cela, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude de la capacité d'absorption d'eau de la chènevotte [4].



**Figure I. 2** Absorption d'eau par des chènevottes – 1er Round Robin Test Rilem, avant définition du protocole Rilem TC 236-BBM [7]

peuvent atteindre 200 à 400 % Cela s'explique par sa structure capillaire et son caractère hydrophile. La cinétique d'adsorption peut se décomposer en deux étapes. Dès les premières secondes d'immersion, une quantité d'eau importante est absorbée par les particules. Ce phénomène rapide est certainement à associer au remplissage des pores les plus gros. Puis une cinétique plus lente prend place. Sur la figure une dispersion apparaît entre les résultats obtenus par les différents laboratoires. Ainsi, un protocole d'essai a été défini en vue de limiter cette dispersion [7].

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

D'autre part, Nguyen a montré que les capacités d'adsorption d'eau des chènevottes fibrées est plus faible que celle des chènevottes défibrées (respectivement 276% et 290%, après 30 minute d'immersion) , En effet, la capacité d'absorption d'eau des fibres est moindre.

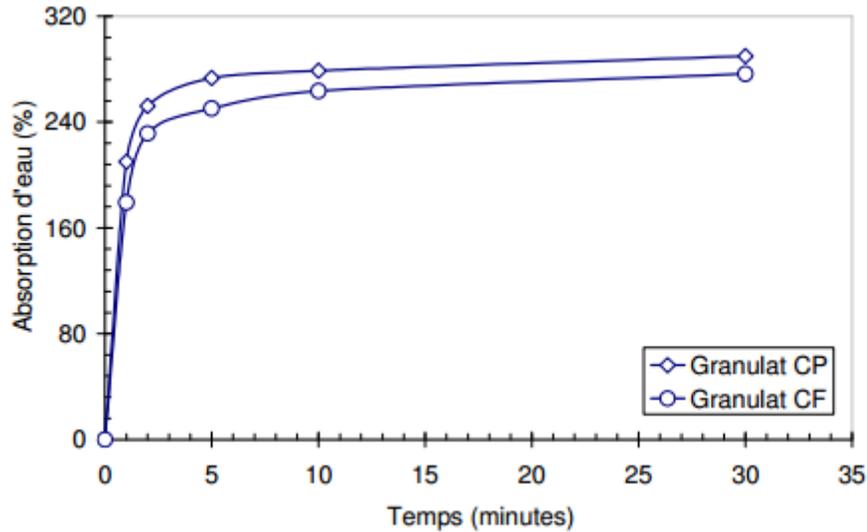


Figure I. 3 Absorption d'eau par les chènevottes (défibrée= CP et fibrée = CF) [4]

### I.1.3.4. Conductivité thermique :

La conductivité thermique des chènevottes en vrac a été évaluée dans de nombreuses études pour différentes masses volumiques , En lien avec leur faible masse volumique, la conductivité thermique des chènevottes en vrac est faible, elle est comprise entre 0.048 et 0.085 W/(m.K).

La conductivité thermique est impactée par la masse volumique des chènevottes. D'après Cordier [9], la conductivité thermique augmente avec la masse volumique. La Figure ci-dessous présente l'évolution modélisée par Cerezo (augmentation de 20 % de la conductivité thermique pour une augmentation de 41 % de la masse volumique). Magnions a mesuré la conductivité thermique du chanvre en vrac avec compactage et sans compactage [10].

La conductivité thermique des chènevottes en vrac est également impactée par leur état hygrique. Ainsi, lorsque l'humidité relative ambiante augmente, la conductivité thermique augmente

Les résultats montrent également une sensibilité à la méthode de mesure, un protocole d'essai a également été conseillé par le TC 236-BBM en fonction du dispositif expérimental choisi [7].

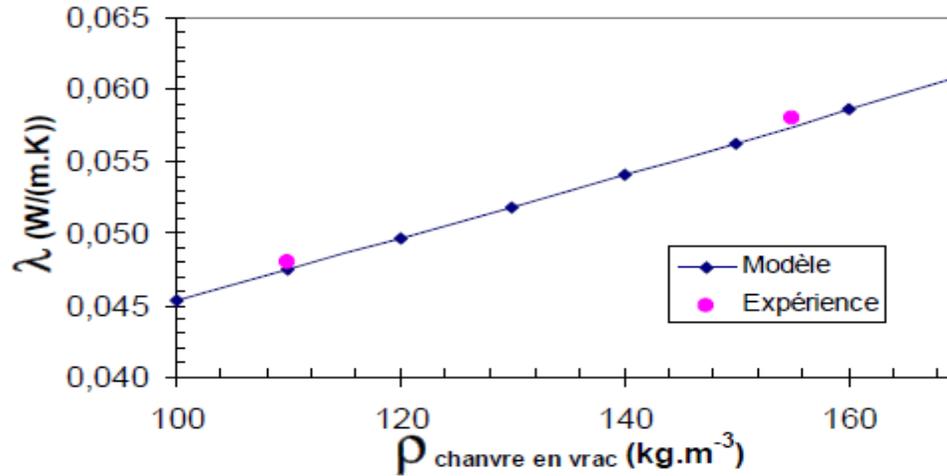


Figure I. 4 Conductivité thermique du chanvre en vrac en fonction de sa masse volumique [8]

Tableau I. 2 Conductivité thermique des chènevottes en vrac

Référence	Appareil de mesure	Masse volumique en vrac (kg/m <sup>3</sup> )	$\Lambda$ (W/(m.K))
[Cerezo, 2005]	Plaque chaude gardée	110	0.048
[Cerezo, 2005]	Plaque chaude gardée	155	0.058
[Magniont, 2010]	Plaque chaude gardée	134.8	0.0545
[Magniont, 2010]	Plaque chaude gardée	164.5	0.0542
[Nozahic, 2012]	Fil chaud	114.2	0.057
[Dinh, 2014]	Plaque chaude gardée	112	0.058

### I.1.3.5. Propriétés mécaniques des bétons de chanvre :

Les performances mécaniques des bétons de chanvre sont influencées par de nombreux paramètres : le dosage en liant, sa nature, le mode de mise en œuvre et notamment la contrainte de

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

compactage, l'échéance et les paramètres de l'essai conduisent à des résultats relativement variables.

Le béton de chanvre est un matériau qui possède un comportement élasto-plastique non fragile et une forte déformabilité sous contrainte et la possibilité de reprise des efforts même après avoir atteint la résistance mécanique maximale il possède une résistance et une rigidité modestes par rapport aux autres matériaux de construction du même type (béton de bois). Mais il peut supporter des niveaux de déformation élevés, ce qui lui permet de s'adapter aux contraintes extérieures [4].

La courbe contrainte-déformation obtenue par Cérézo pour des bétons de chanvre faiblement compactés est présentée sur la Figure ci-dessous distingue trois phases dans le comportement mécanique :

- au début de l'essai, le comportement est assimilable à un comportement élastique linéaire : le module d'élasticité du béton de chanvre est alors déterminé à l'origine. Durant cette phase, le liant supporte l'ensemble des contraintes de compression,
- Dans un deuxième temps, la courbe présente rapidement une inflexion, attribuée par l'auteur à la fissuration progressive de la matrice liante. Dans cette phase pré-pic, le liant reprend la majorité des efforts tandis que les particules de chènevotte, fortement compressibles, s'adaptent au comportement du liant. Des déformations résiduelles existent lors du déchargement, le matériau présente donc un comportement élastoplastique.
- Au-delà de la valeur maximale de contrainte, dans la phase post-pic, le liant est totalement dégradé. Le comportement mécanique des particules végétales devient prépondérant. Leur module élastique étant bien plus faible que celui de la matrice, la contrainte diminue. Le liant, qui lui est plutôt fragile, ne joue plus aucun rôle dans cette phase.

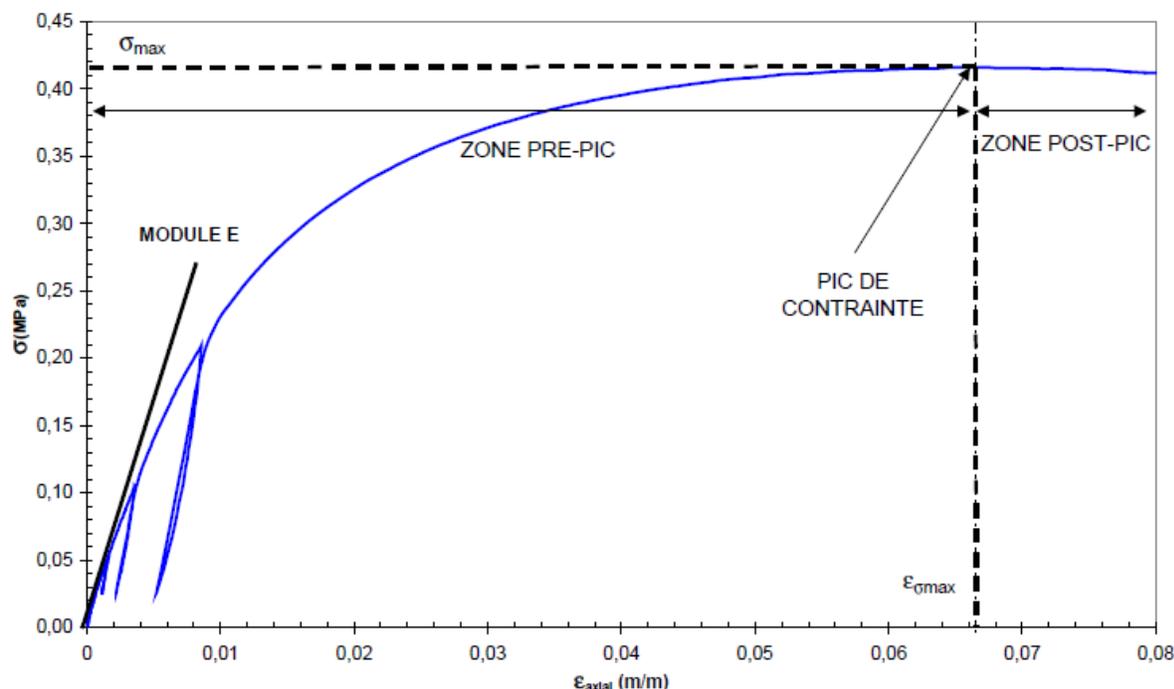


Figure I. 5 Allure typique de la courbe  $\sigma = f(\epsilon)$  en compression de bétons de chanvre faiblement compactés [8]

### I.1.4. Choix d'un liant adéquat pour le béton de chanvre :

Le choix du liant compatible avec la chènevotte prend une grande importance à cause de la propriété hydrophile de la chènevotte. Plusieurs travaux scientifiques ont été effectués précédemment dans le but de trouver le liant le plus compatible avec la chènevotte.

Dans ce contexte, la chaux aérienne qui ne se durcit qu'au contact du gaz carbonique ( $CO_2$ ) et ne nécessite que très peu d'eau pour sa carbonatation, semble être un liant 'idéal' pour ce type d'application. Malgré ces caractéristiques, l'utilisation de la chaux aérienne seule pour fabriquer du béton de chanvre est peu recommandée. En effet, ce liant se solidifie très lentement [11] et la carbonatation se produit très difficilement au cœur de l'échantillon. L'ajout des pouzzolanes et des liants hydrauliques (chaux hydrauliques, ciment...) permet d'activer la carbonatation et de favoriser le durcissement au cœur plus rapidement [12]. L'ajout de pouzzolane peut augmenter significativement la résistance mécanique de la chaux. Le même constat est établi par Bütschi sur l'ajout de la chaux hydraulique à la chaux aérienne [11].

D'autre part, certains auteurs ont montré que l'utilisation des liants hydrauliques pour produire des bétons de chanvre peut poser des problèmes de compatibilités avec les végétaux

## **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

---

(transferts hydriques, perturbation des mécanismes de formation des hydrates, liant trop rigide). Ainsi, Cerezo ont montré que, avec les mélanges chaux –ciment, une couche de fine épaisseur de béton de chanvre se solidifie en surface, l'intérieur de l'éprouvette restant à l'état de poudre. Cet effet de farinage est attribué au fort potentiel d'absorption d'eau de la plupart des granulats d'origine végétale qui se fait au détriment de l'hydratation du ciment pour lequel un manque d'eau peut se faire ressentir [8].

Par contre De Bruijn et al ont montré que la résistance en compression et le module d'élasticité sont plus élevés pour les mélanges plus riches en ciment [13]. Les mêmes constatations peuvent être établies pour les études de Bütschi En plus de ces avantages sur l'amélioration des propriétés mécaniques, le liant hydraulique est caractérisé par sa prise rapide. Cette propriété est souvent recherchée par l'utilisateur du béton de chanvre. Cette prise peut par exemple permettre un décoffrage rapide [11].

Ces dernières années, le liant le plus utilisé pour produire de béton de chanvre est la chaux hydraulique. L'utilisation de la chaux pour réaliser du béton de chanvre du fait que le processus de carbonatation est davantage compatible avec la forte capacité d'absorption d'eau de la chènevotte que le processus d'hydratation du ciment. De plus, la chaux constitue un milieu très alcalin qui protège la chènevotte des bactéries et des petits rongeurs

### **I.1.5. Différentes techniques de mise en œuvre du béton de chanvre :**

#### **I.1.5.a. Béton de chanvre banché :**

Cette technique consiste à mélanger tous les constituants (chènevotte, liant et eau) dans une bétonnière ou un malaxeur. Le mélange est alors mis en place manuellement, par couche successive à l'état frais, dans un coffrage ou entre deux banches (figure). Chaque couche est légèrement tassée afin que les surfaces des parois soient homogènes.

Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante pour permettre le remplissage aisé du coffrage par le mélange à l'état frais, il est nécessaire de surdimensionner le dosage en eau par rapport au besoin réel du liant car une partie importante d'eau de gâchage est absorbée par les chènevottes, pendant le malaxage, en raison de son fort pouvoir d'absorption d'eau. En effet, le rapport E/L recommandé par les Règles Professionnelles d'exécution varie entre 1.6 et 2. Le béton de chanvre fabriqué avec ce procédé est limité à des fonctions de remplissage et d'isolation et ne peut pas être utilisé à des

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

fonctions structurales. En plus, il nécessite un temps de séchage très long qui peut prendre plusieurs mois.



*Figure I. 6 Procédé de mise en œuvre par banchage*

### **I.1.5.b. Béton de chanvre projeté :**

Cette technique consiste à projeter le mélange directement sous pression sur les surfaces souhaitées. Deux procédés principaux existent. Soit, lors de la mise en œuvre le mélange de liant et de chènevottes est brassé à sec, l'apport d'eau se fait au niveau de la buse au moment de la projection. Soit, une pâte de liant est réalisée, le chanvre est mélangé à la pâte au moment de la projection. La projection permet de limiter les étapes de coffrage et de limiter la quantité d'eau nécessaire à la mise en place en limitant la compétition chanvre-liant par rapport à l'eau. Ainsi, la quantité d'eau introduite peut être proche de celle nécessaire à l'hydratation du liant. Ce procédé permet aussi de réduire le temps de séchage du béton de chanvre de plusieurs mois à une dizaine de jours [14].

Le béton de chanvre projeté présente une densité et des caractéristiques mécaniques supérieures à celle de béton de chanvre banché [15].



*Figure I. 7 Procède de mise en œuvre par projection*

### **I.1.5.c. Béton de chanvre préfabriqué :**

La production de blocs de béton de chanvre préfabriqués présente un fort potentiel de développement pour différentes raisons. Tout d'abord, ce procédé évite le recours au coffrage ou à d'autres techniques nécessitant des compétences particulières, il s'apparente à la mise en œuvre de blocs usuellement rencontrés.

En ce qui concerne la qualité et la fiabilité, ce procédé permet de maîtriser la formulation et facilite le contrôle des matières premières et le taux de compactage (contrairement aux bétons de chanvre projetés ou banchés manuellement), Ceci permet de garantir des caractéristiques techniques constantes [4].

### **I.1.6. Conclusion :**

d'après cette étude bibliographié nous constatons que les agro béton offre plusieurs avantages pour le secteur de génie civile par sa légèreté qui confère la réduction de section de béton armé du structure et la diminution aussi de sa rigidité en cas d'effet de séisme il assure des cloison souple que les murs classique ,et il offre aussi une isolation thermique et phonique grâce

## **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

---

a les matériaux bio-sourcés a été incorporé dans le béton qui possèdent une faible énergie grise par rapport à d'autres matériaux de construction.

### **I.2.Revue bibliographique sur les bétons légers**

#### **I.2.1. Introduction :**

Les entreprises manufacturières sont à la recherche constante de matériaux nouveaux pour fabriquer leurs produits. Parmi les nombreux matériaux utilisés, on retrouve le béton qui offre plusieurs caractéristiques intéressantes : durabilité, facilité de production, couleurs et formes variées, coût relativement faible. Malgré tous ces avantages. Le béton conventionnel ne recueille qu'une très faible part du marché de la confection d'éléments préfabriqués pour la vente au détail (pots de fleurs, roches décoratives, meubles, etc.).

En dépit de sa grande polyvalence, l'utilisation du béton pour la fabrication d'éléments destinés à la vente au détail demeure fortement limitée par le poids des éléments. Par contre, il est possible de réduire leur poids en utilisant un béton de faible masse volumique. Pour développer un tel béton, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux recyclés légers comme source de matières premières [16].

#### **I.2.2. Les bétons légers :**

Selon CIMEbeton (2000), le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments.

Les pièces de bétons légers sont donc plus légères, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations (Neville, 2000). De plus, on note une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau (Neville, 2000). Étant donné le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

Les auteurs (Hart 2001, Neville 2000 et Picon 1997) notent les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger, en raison, surtout de sa fabrication en usine. Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (CIMEbeton, 2000)

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Le béton léger, par la présence d'un réseau de bulles d'air dans sa formulation, a des propriétés d'isolation thermique et acoustique. Comme dans le cas des autres bétons légers, la conductivité thermique varie en fonction de la masse volumique [17].

### I.2.3. Définition :

La masse volumique apparente des bétons traditionnels fabriqués avec des granulats rigides est comprise entre 2200 et 2600 kg/m<sup>3</sup>. Et la masse volumique apparente sèche des bétons légers est inférieure à 1800 Kg/m<sup>3</sup> [RILEM (1970)]. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'American Concrete Institute (1970) limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m<sup>3</sup> après séchage à l'air pendant 28 jours. La norme DIN 1042 (1972), en Allemagne, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 Kg/m<sup>3</sup>.

La masse volumique du béton est généralement diminuée en remplaçant une partie du matériau solide par de l'air [18].

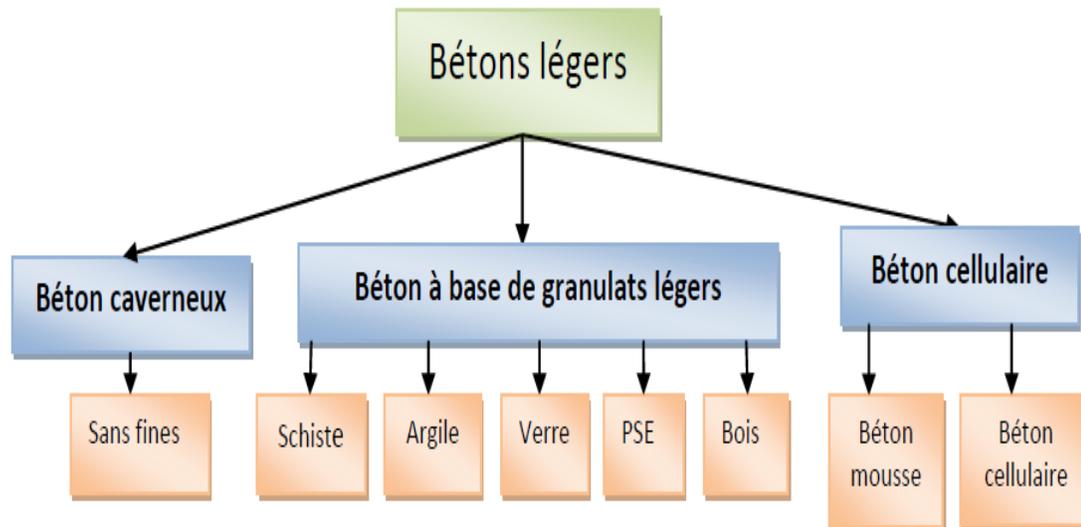


Figure I. 8 Classification des bétons légers [19]

### I.2.4. Type des bétons légers :

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

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

- 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 » [20].

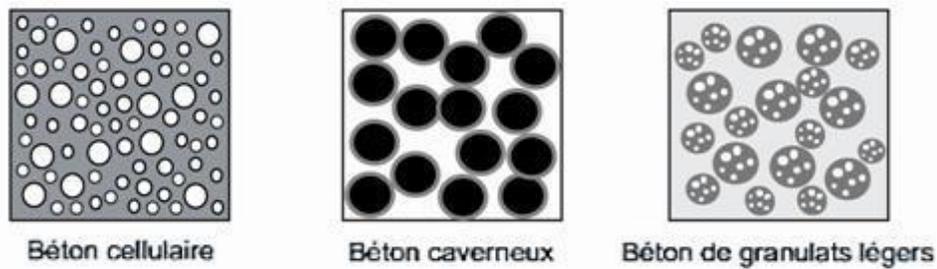


Figure I. 9 Représentation schématique des différents types de bétons légers

[M.SHINK, 2003] [21]

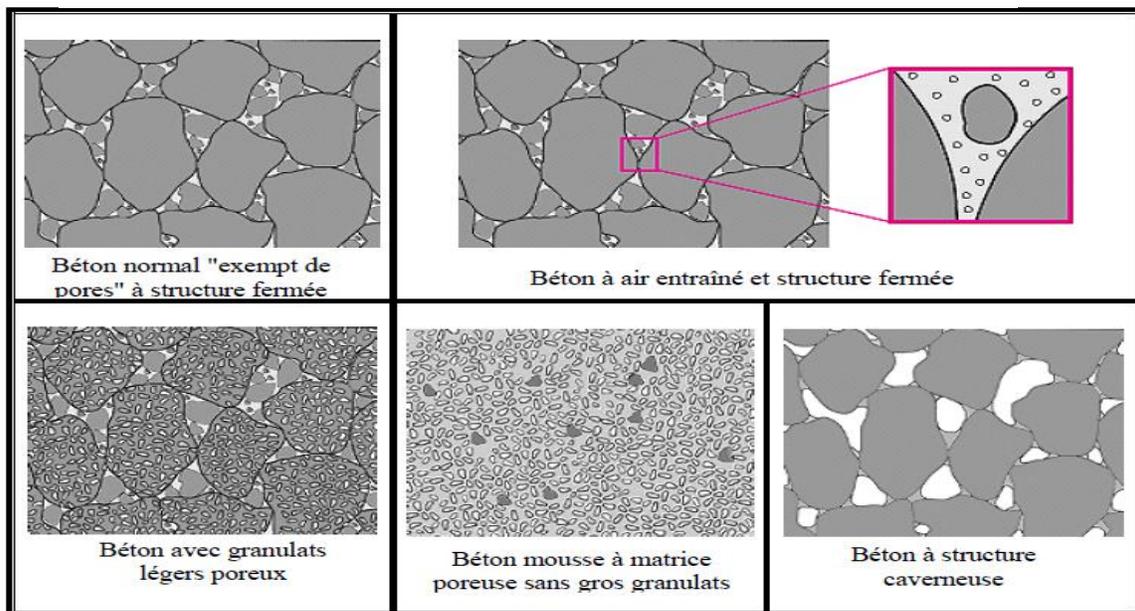


Figure I. 10 Structure des bétons légers [20]

L'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide **ACI 213R-87**[21] distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **Tableau I**.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Tableau I. 3 Classification des bétons légers selon la masse volumique [22]

Classification	$\rho(\text{kg/m}^3)$	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

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/m<sup>3</sup>**, 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/m<sup>3</sup>**, 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/m<sup>3</sup>**. 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.

### I.2.5. Propriétés des bétons légers :

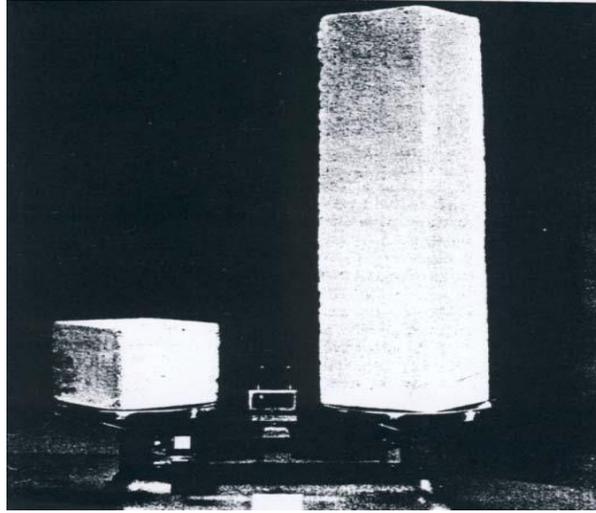
#### I.2.5.1. Légèreté :

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/ m<sup>3</sup> alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/ m<sup>3</sup> pour un béton d'argile expansée, entre 600 et

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

900 kg/m<sup>3</sup> pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m<sup>3</sup> 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.



*Figure I.11 Béton normal à gauche et béton léger à droite ayant le même poids [23]*

### I.2.5.2. Porosité :

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  $\phi_g$ , due à la présence de l'air intra particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de  $\mu\text{m}$ ), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique.

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  $\phi_l$ . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de  $\text{Ca(OH)}_2$  ou de C-S-H. varie entre 0.01  $\mu\text{m}$  et 5  $\mu\text{m}$  et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre 5  $\mu\text{m}$  et 1000  $\mu\text{m}$ . L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\Phi_1 = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}}$$

Avec :

**V<sub>vide</sub>** : volume des vides contenus dans la matrice de liant (m<sup>3</sup>)

**V<sub>liant</sub>** : volume total occupé par la pâte de liant (m<sup>3</sup>)

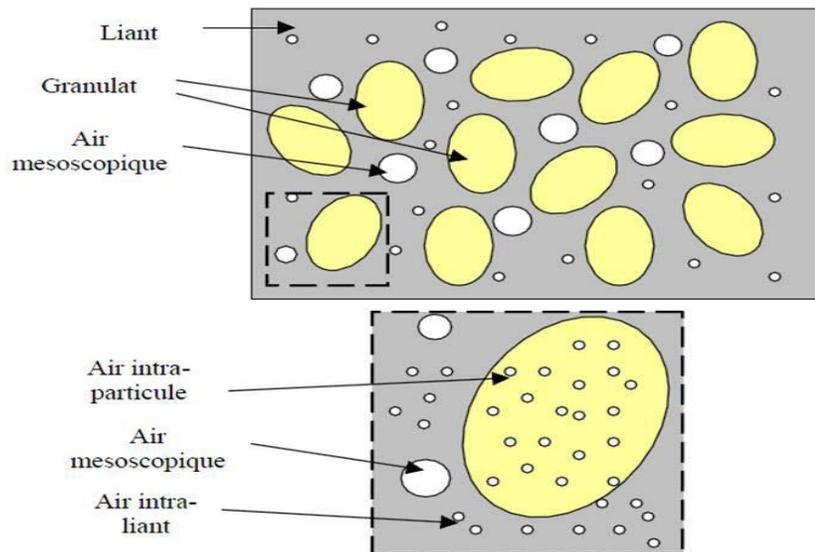
Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité méso-scopique du matériau.

$$\Phi_{\text{meso}} = \frac{V_{\text{vide}}}{V_t}$$

Avec :

**V<sub>vide</sub>** : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m<sup>3</sup>).

**V<sub>t</sub>** : volume total occupé par le matériau (m<sup>3</sup>).



*Figure I. 12 Porosité du béton [24]*

La porosité est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique, de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82% d'un béton cellulaire et de 52% d'un béton de bois [24].

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Selon la taille moyenne des pores et selon l'état physique de l'eau contenue dans le milieu poreux, la porosité peut être classée comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau I. 4 Classification des bétons légers selon la masse volumique [22]

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0.0001mm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0.0001 à 2.5mm	Porosité capillaire	Eau capillaire et eau gravitaire
>2.5mm	Macroporosité	eau gravitaire dominante

### I.2.5.3. Comportement et performances mécaniques :

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre  $\phi_g$ , 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  $\phi_g$  diminue. Des campagnes expérimentales ont mis en relation performances mécaniques et masse volumique  $\rho$  des bétons légers. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type Liapor, a obtenu une relation linéaire entre la résistance en compression et la masse volumique.

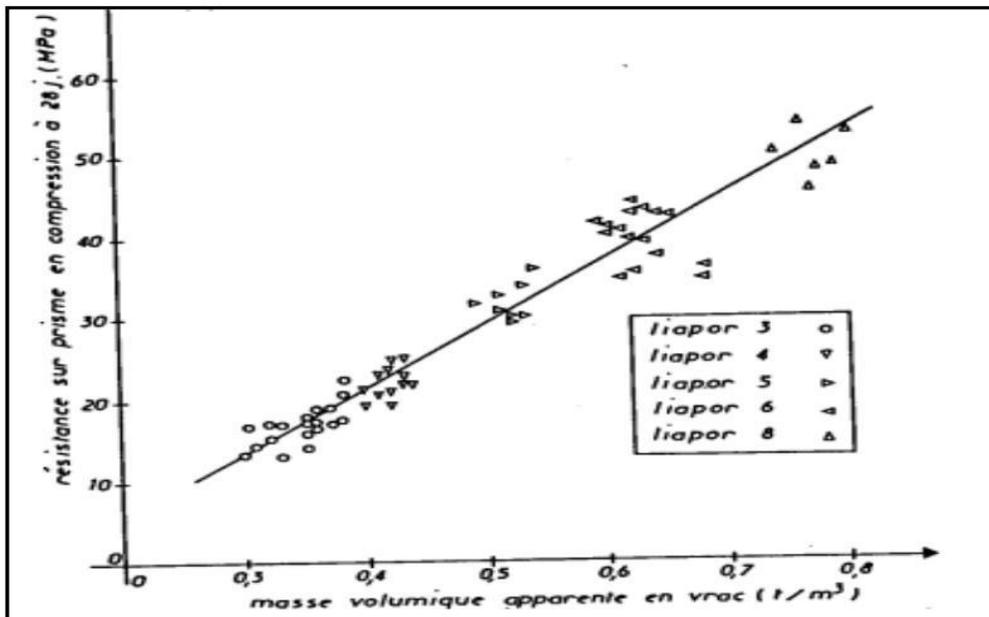


Figure I. 13 La résistance sur prisme en compression à 28j (MPa) en fonction de la masse volumique [26]

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

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  $\mu\text{m}$ ) et les micropores (diamètre < 60  $\mu\text{m}$ ) avec une répartition de  $\frac{3}{4}$  de macropores pour  $\frac{1}{4}$  de micropores [27].

Diverses formules empiriques ont été déterminées afin de prédire la résistance en compression  $R_c$  et le module d'élasticité  $E$  du béton cellulaire autoclave en fonction de la porosité.

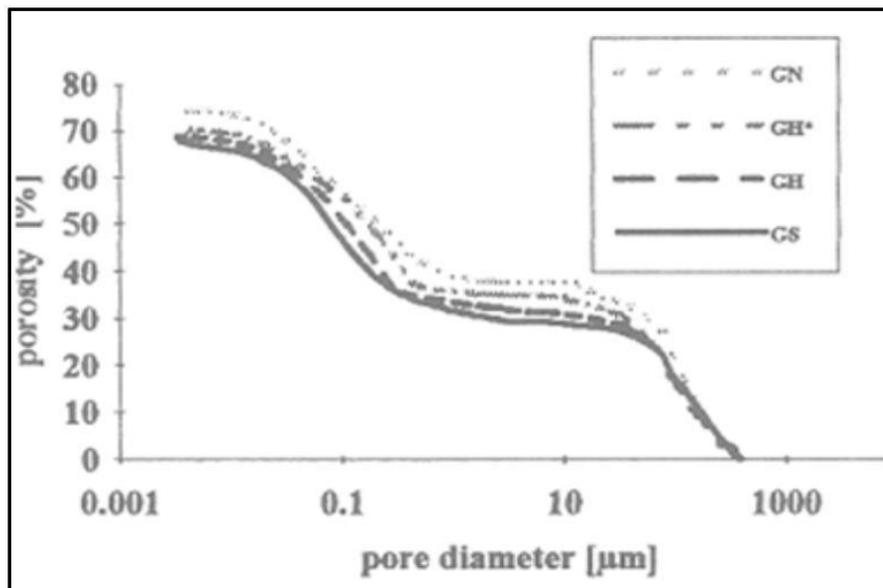


Figure I. 14 Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [27]

Tableau I. 5 Formules empiriques reliant la résistance à la compression, la composition et la porosité [28]

	$R_c$ (MPa)	constantes de calage	paramètres
Feret modifié (béton avec mousse)	$\sigma = K (1/(1+ w/c + a/c))^n$	$K, n$	$w/c$ : ratio eau/ciment , $a/c$ : ratio air/ciment
Schiller	$\sigma = K_s \cdot \ln(P_{cr} / p)$	$K_s, P_{cr}$ : porosité correspondant à $\sigma = 0$	$p$ : porosité du béton cellulaire
Balshin	$\sigma = \sigma_0 (1 - p)^n$	$\sigma_0$ : résistance à porosité 0	$p$ : porosité du béton cellulaire

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

Tableau I. 6 Equations prédictives du module d'élasticité E du béton cellulaire [28]

Module d'élasticité E	Notations
$6000 (\alpha)^{1,5} S$	$\alpha$ : masse volumique sèche ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) S: résistance à la compression sur cube en $\text{kg.cm}^{-3}$
$1555 S^{0,7}$	S: résistance à la compression sur cube en $\text{kg.cm}^{-3}$
$3000 S_p$	$S_p$ : résistance à la compression sur prisme en $\text{kg.cm}^{-3}$
$k \gamma_{\text{sec}} (f_c)^{0,5}$	k: constante variant entre 1,5 et 2 $\gamma_{\text{sec}}$ : masse volumique sèche ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) $f_c$ : résistance à la compression (MPa)
$c_1 (\rho - c_2)$	c1, c2: constantes $\rho$ : masse volumique sèche ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

Les principaux facteurs ayant une influence sur la résistance en compression des bétons de granulats légers sont des caractéristiques des granulats et la composition du béton.

Le module d'Young d'un béton léger est évidemment inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Une plus faible rigidité peut être parfois souhaitable pour les structures soumises à une sollicitation dynamique ou pour des structures en coques.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Tableau I. 7 Caractéristiques de quelques bétons légers [24]

	Constituants			$\rho(\text{kg/m}^3)$	Porosité $\epsilon$	$R_c(\text{MPa})$	$E(\text{GPa})$	$\epsilon(\text{m/m})$
	Nom	Masse(Kg)	Volume( $\text{m}^3$ )					
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*	-	-					

### I.2.5.4. Propriétés thermiques :

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique  $\lambda$ . Cette dernière est définie comme 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. Plus le matériau

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

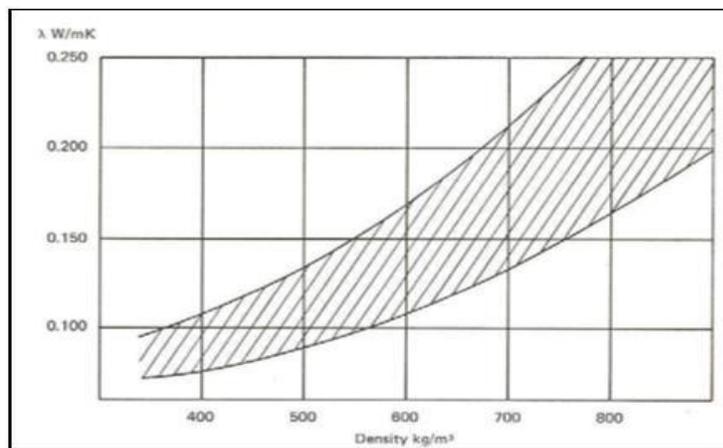
est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau[29].

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique  $\lambda$  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, du à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau, en ajoutant l'air intra-particule. A titre comparatif, un béton hydraulique ( $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ) a une conductivité thermique de  $2,0 \text{ W/(m.K)}$  tandis qu'un béton d'argile expansé ( $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ ) a une conductivité thermique de  $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [24].

Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'un autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement.

Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ( $\Phi 80 \%$ ) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible



*Figure I. 15 Conductivité thermique  $\lambda$  en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [30]*

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

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  $1^{\circ}C$ . 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 [24].

Enfin, à partir de la conductivité  $\lambda$  et de la chaleur massique  $C$ , on définit la diffusivité  $a$  ( $J/(m.K)$ ). Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de  $a$  est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

### I.2.6. CONCLUSION :

Nous avons également essayé de recueillir le maximum des études effectués par quelques auteurs sur les propriétés des bétons légers.

Le béton léger qui est un matériau ancien et en même temps nouveau, fait partie de la gamme des bétons spéciaux. Ces caractéristiques suggèrent de nouvelles applications.

Ce qui distingue le béton léger du béton ordinaire est sa faible masse volumique. La masse volumique du béton ordinaire varie de 2200 à 2600  $kg/m^3$  tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850  $kg/m^3$ . L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids des éléments construits avec ce béton et par la suite des dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations, et par conséquent les dimensions de cette dernière ; ce qui permet la construction sur des sols de faible capacité portante. La technologie de ces bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement.

## **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

---

Les bétons légers ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments. Ces bétons sont normalement réalisés par trois manières : en employant les granulats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

### **I.3.Revue bibliographique sur les bétons cellulaires**

#### **I.3.1. Introduction :**

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi Ces agents, la poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis ; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier [31].

#### **I.3.2. 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 :

- Poudre d'aluminium
- Agent moussant
- Entraîneur d'air [32].

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 [33].

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

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 [32].

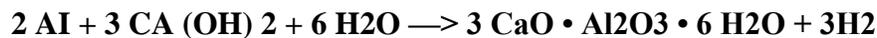
### I.3.3. Composition :

Les matières premières principales pour fabrication du béton cellulaire sont le sable, la chaux, le ciment et l'eau. Toutes ces matières premières sont présentes en abondance dans la nature [34].

Dans le béton cellulaire la chaux réagit en présence d'eau avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite). La chaux et le ciment servent de liants. La poudre d'aluminium extrêmement fine (env. 50µm), utilisée en très faible quantité (+/- 0,05%), sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer des cellules.

L'agent expansif sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer des cellules [35].

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



L'hydrogène libéré crée des cellules. En cours de durcissement de la pâte, celui-ci 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 +/- 20%
- Chaux +/- 15%
- Poudre d'aluminium +/- 0.05%
- Gypse 1 %

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### ➤ Eau

Les pourcentages varient légèrement, mais de façon précise, en fonction de la masse volumique souhaitée [36].

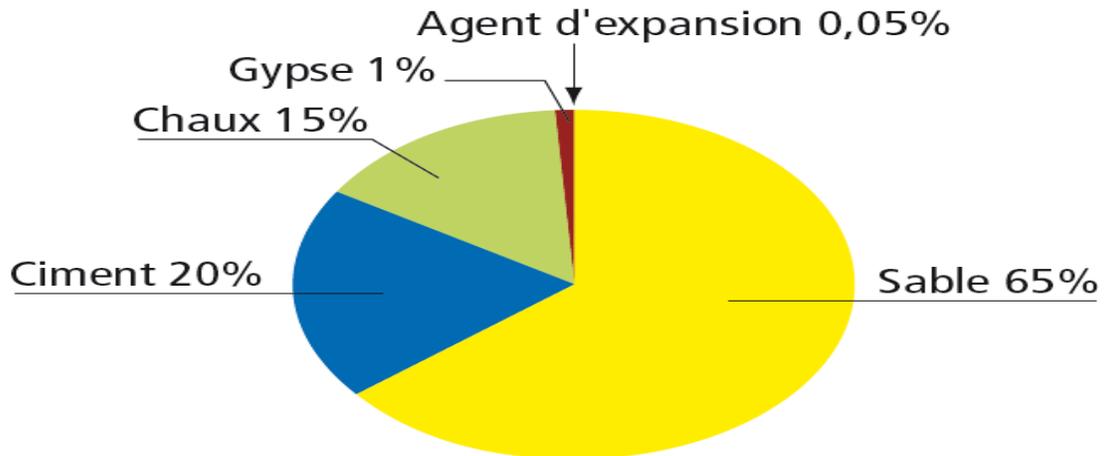
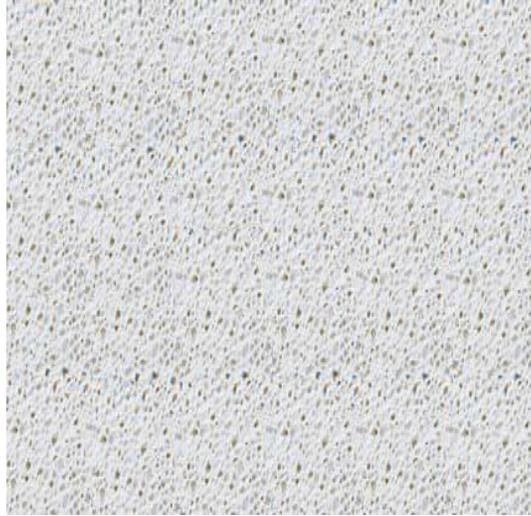


Figure I. 16 Composition de béton cellulaire [37]

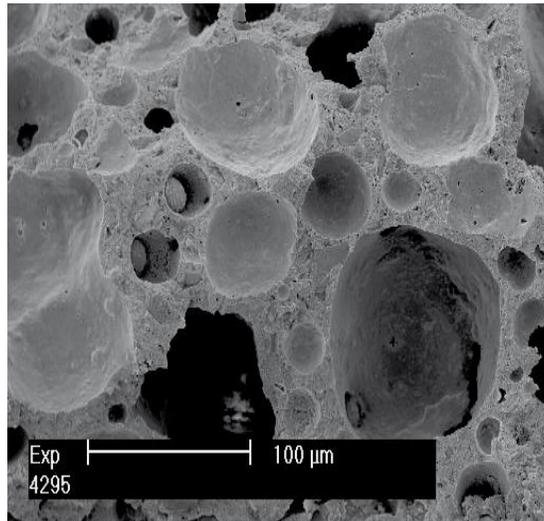
### I.3.4. La structure :

La structure du béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse solide et macroporeuse.

Les micropores 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 micropores. Les micropores sont des pores avec un diamètre de plus de 60 $\mu$ m [38] :



*Figure I. 17 Structure du béton cellulaire (échelle 1/1)*



*Figure I. 18 Structure du béton cellulaire vue au microscope électronique [35].*

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.

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 [38].

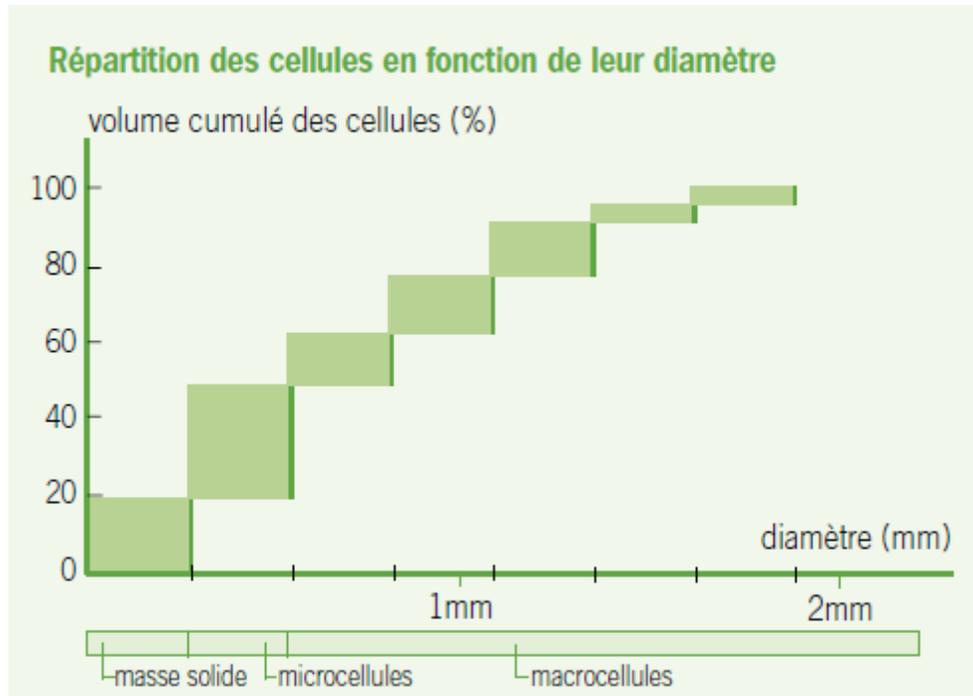


Figure I. 19 Répartition des cellules en fonction de leur diamètre

Exemple :

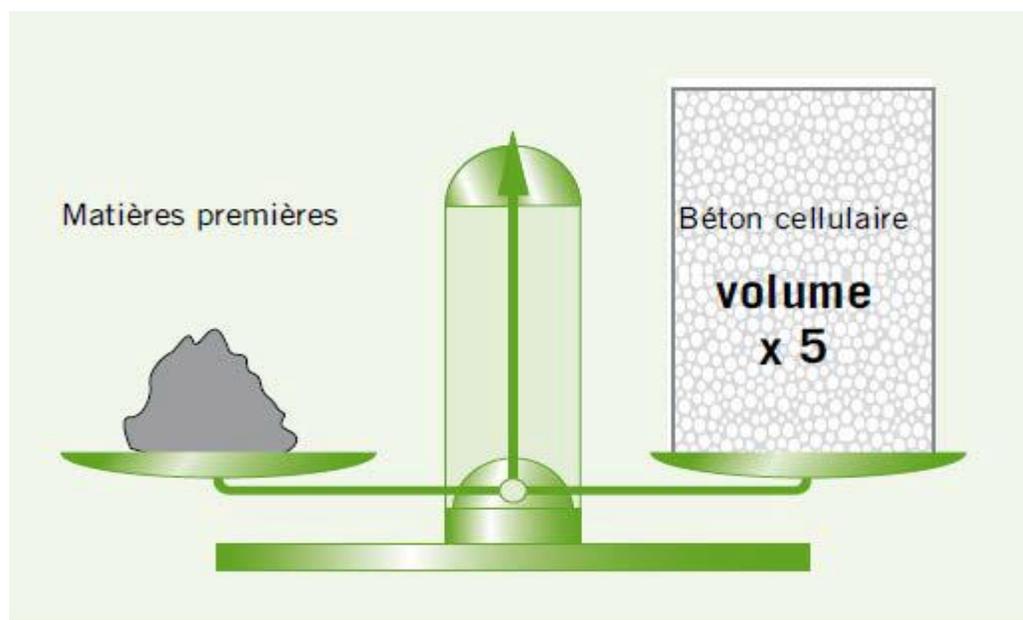
Pour un béton cellulaire de 450 kg/m<sup>3</sup>, la répartition en volume des cellules est de :

50 % de macro cellules.

30 % de microcellules capillaires réparties dans la masse solide.

1 m<sup>3</sup> de matières premières permet donc de produire 5 m<sup>3</sup> de matériau de maçonnerie en béton cellulaire.

Cette très grande économie de matières premières est l'un des aspects écologiques du béton cellulaire.



*Figure I. 20 Correspondance entre le volume de la matière première et le volume du béton cellulaire*

### I.3.5. Propriété de béton cellulaire :

#### I.3.5.1. La densité :

Le béton cellulaire dépend de sa densité (300-1800 kg/m<sup>3</sup>), 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 spécifique peut être fabriqué avec la variation de la composition qui à son tour influe sur la structure, la taille et la distribution des pores. Une structure cellulaire stable et de préférence sphérique est nécessaire pour des propriétés structurelles et fonctionnelles optimums. Aussi les pores doivent être distribués uniformément dans la masse pour obtenir des produits de densité uniforme. Le développement des macropores dans la matrice est influencé par la densité d'une façon significative. En terme conventionnels, la densité du béton cellulaire est liée à sa compacité et porosité [38].

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

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

apparente (classe  $\rho$ ) et de leur résistance à la compression (classe f) et la résistance caractéristique à la compression (RC).

### Les normes belges :

PTV 21-002 (blocs)

NBN B 21-004 (éléments armés)

Et

### Les normes européennes :

NBN EN 771-4 (blocs)

NBN EN 12602 (éléments armés),

*Tableau I. 8 Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression*

Classe $\rho$	Critères	Classe	RC (N/mm <sup>2</sup> )
P400	$350 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 400 \text{ kg/m}^3$	F2	$\text{RC} \geq 2$
P450	$400 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 450 \text{ kg/m}^3$	F3	$\text{RC} \geq 3$
P550	$500 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 550 \text{ kg/m}^3$	F4	$\text{RC} \geq 4$
P650	$600 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 650 \text{ kg/m}^3$	F5	$\text{RC} \geq 5$

Les différentes catégories sont désignées par la lettre C pour les blocs et CC pour les éléments armés, suivi d'indication de la classe de résistance à la compression [35].

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Tableau I. 9 Catégories blocs

Désignation	Classe f (N/mm <sup>2</sup> )	Classe ρ
C2/400	2	ρ 400
C3/450	3	ρ 450
C4/550	4	ρ 550
C5/650	5	ρ 650

### I.3.5.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression du béton cellulaire augmente avec une augmentation de la densité. La valeur moyenne des résistances mécaniques utilisant des éprouvettes cubiques de densité sèche de 400 kg/m<sup>3</sup> a été rapportée égale environ 2 MPa ; pour une densité sèche de 700 kg/m<sup>3</sup>, elle a été rapportée à environ 6 MPa. 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. 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.

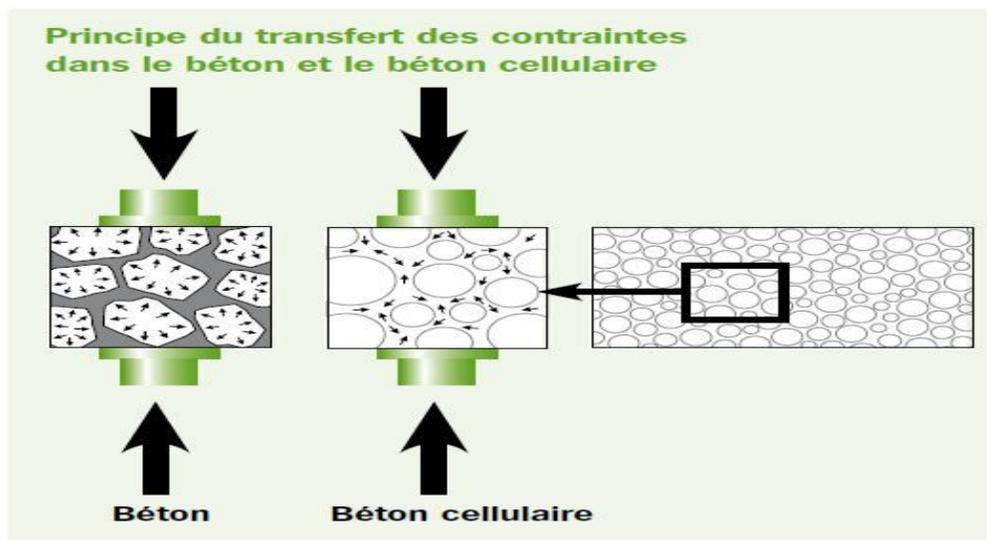


Figure I. 21 Transfert des contraintes dans le béton ordinaire et dans le béton cellulaire

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

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. 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 de la norme **EN 771-4** [38].

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

<b>P</b> <b>kg/m<sup>3</sup></b>	350	400	450	500	550	600	650	700	750
<b>RC</b> <b>Mpa</b>	3	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5

### I.3.5.3. Conductivité thermique :

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplis d'air [39].

La conductivité thermique, 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 [40].

La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique 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

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

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

### I.3.5.4. Coefficient de conductibilité thermique $\lambda$ pour murs en blocs de béton cellulaire : Valeurs de base des blocs de béton cellulaire :

Les valeurs de base à prendre en considération sont les valeurs de la norme EN 1745 (2002)

• **EN 1745 (2002) [35] :**

- Maçonnerie et produits de maçonnerie
- Détermination des valeurs thermiques de calcul.

*Tableau I. 11 Valeurs de base*

Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda_{10,dry}$ (W/mK)
400	0,110
500	0,130
600	0,160

### Valeurs utiles des murs en béton cellulaire collés (Design values) :

Les valeurs utiles  $\lambda_{Ui}$  et  $\lambda_{Ue}$  pour le calcul de la conductibilité thermique sont déterminées d'après les formules et les coefficients indiquent dans les normes EN 1745, EN 12524 et EN ISO 10456.

• **EN 12524 (2000):**

- Matériaux et produits pour le bâtiment
- Propriétés hygrothermiques
- Valeurs utiles tabulées.

• **EN ISO 10456 (2000):**

- Isolation thermique
- Matériaux et produits du bâtiment
- Détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

Tableau I. 12 Valeurs utiles des murs en béton cellulaire collés

Masse volumique (valeur de calcul) (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ valeurs utiles
	$\lambda_{U_i}$ (W/mK)
300	0,09
400	0,120
500	0,140
600	0,180

$\lambda_{U_i}$  : est utilisé pour les matériaux qui sont protégés contre la pénétration de la pluie, comme par ex. les murs intérieurs, la paroi intérieure d'un mur creux extérieur, les murs extérieurs protégés par un crépi, un bardage ou un autre revêtement étanche.

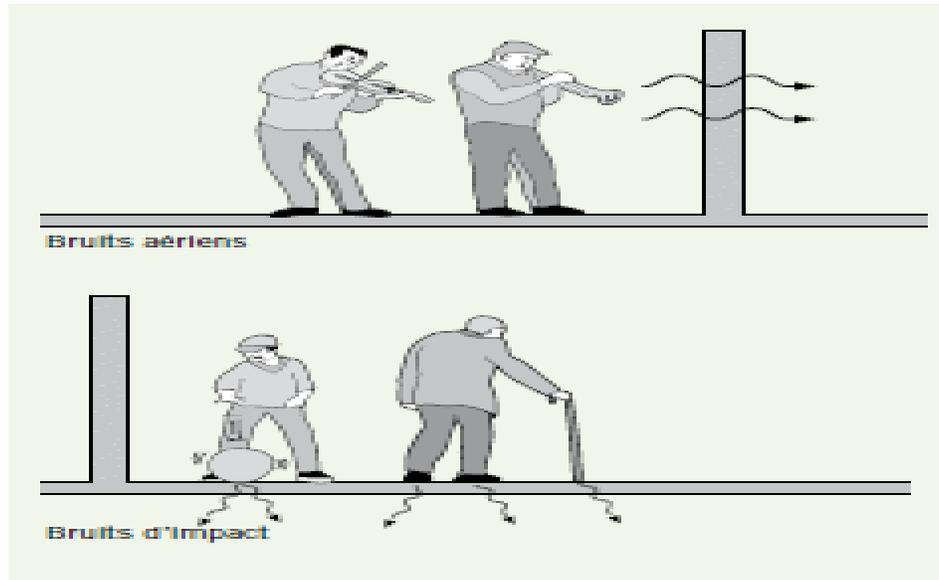
### I.3.5.5. Acoustique :

Une distinction doit être opérée entre les bruits aériens et les bruits d'impact pour l'isolation acoustique des éléments de construction. Pour assurer un bon confort acoustique aux habitants d'un bâtiment, les mesures nécessaires doivent être prises, tant contre le bruit aérien que contre le bruit d'impact.

- **Les bruits aériens** : la source émet directement les sons dans l'air, **ex** : radio, TV.
- **Les bruits d'impact** : la source occasionne des vibrations dans les éléments de construction (plancher ou paroi) qui se propagent dans la construction et qui diffusent le bruit dans un autre espace (par **ex** : les pas sur le plancher ou dans l'escalier).

La résistance contre la propagation des sons d'un espace à l'autre s'appelle l'isolation et s'exprime en décibels. Outre les problèmes d'isolation, il y a encore d'autres problèmes acoustiques, par **ex** : la résonance.

Les ondes sonores heurtant une paroi sont partiellement réfléchies, absorbées et la traversent également en partie [41].



*Figure I. 22 Acoustique*

### I.3.6. Utilisation :

#### Utilisation pratique en Algérie (Guelma) [31]:

L'usine de brique rouge Située dans la ville de bordj Sabath sur la rive de la vallée de Bouhamdane. Les murs de la construction sont du type mixte : béton cellulaire et charpente métallique.

Prises le 05/01/2018.



*Figure I. 23 Détail de la jonction mur-poteau métallique*



*Figure I. 24 Autre photo du mur en béton cellulaire*



*Figure I. 25 Béton cellulaire armé.*

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---



*Figure I. 26 Béton cellulaire utilisé dans la construction du mur*

Marché de 20 magasins de produits divers principalement la zalabia, situé dans le centre-ville d'Oued Zenati. La construction est du type mixte : béton armé et béton cellulaire.

Le béton cellulaire a été utilisé sous forme de dalles dans la construction des planchers (voir photos ci-après).



*Figure I. 27 Dalles en béton cellulaire photos agrandies [31].*

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### I.3.7. Conclusion :

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.

### I.4.Revue bibliographie sur les matériaux bio sources :



*Figure I. 28 Les matériaux bio sources dans les bâtiments*

#### I.4.1. Introduction :

Le secteur du bâtiment est au cœur des enjeux du développement durable. Construire ou rénover des bâtiments de manière écoresponsable nécessite de considérer l'ouvrage dans son ensemble, depuis la production des matériaux qui le composent jusqu'à sa déconstruction.

La filière des matériaux bio-sourcés a été identifiée par le ministère de l'Écologie comme l'une des filières vertes ayant un potentiel de développement économique élevé pour l'avenir. Cela notamment en raison de son rôle pour diminuer notre consommation de matières premières d'origine fossile, limiter les émissions de gaz à effet de serre et créer de nouvelles filières

## **Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation**

---

économiques. Le recours à des matériaux bio-sourcés s'inscrit donc parfaitement dans une démarche de développement durable.

C'est ainsi qu'en 2007, à l'issue du Grenelle de l'environnement, deux plans d'action ont été lancés, l'un sur les matériaux bio-sourcés, l'autre spécifique à la filière bois. Les objectifs étant de comprendre les freins de développement de ces filières et de produire un plan de développement.

À la suite à cela, le label « Bâtiment bio-sourcé 1 » a été mis en place, en 2012, par les pouvoirs publics afin de valoriser l'utilisation des matériaux et produits de construction bio-sourcés.

Plus récemment, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte encourage l'utilisation des matériaux bio-sourcés lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments 2. La FFB a contribué au développement de ces filières émergentes avec la construction de deux maisons expérimentales en paille et en chanvre à Montholier (25) au début des années 2000. Le présent guide a pour vocation d'accompagner les artisans et entreprises du bâtiment dans le choix et l'utilisation des matériaux bio-sourcés suivants : le bois, le liège, la paille, le chanvre, la ouate de cellulose, le textile recyclé et la laine de mouton.

### **I.4.2. Généralités :**

#### **➤ Qu'est-ce qu'un matériau bio-sourcés ?**

C'est un matériau issu du vivant, d'origine animale (ex. : laine de mouton) ou végétale (ex. : bois, paille).

#### **➤ Pourquoi utiliser les matériaux bio-sourcés ?**

L'utilisation de matériaux bio-sourcés concourt significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles. C'est pourquoi elle est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou de la rénovation des bâtiments.

Attention, toutefois, aux idées reçues : les matériaux bio-sourcés ne sont pas nécessairement 100 % naturels et sans impact pour l'environnement. Ils peuvent parfois être transformés, contenir des additifs chimiques en proportions variables ou avoir été transportés sur de longues distances.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

Dans une démarche de construction durable, il est donc préférable d'utiliser des matériaux bio-sourcés locaux et le moins transformé possible, sous réserve qu'ils répondent aux caractéristiques pour lesquelles ils sont mis en œuvre.

### I.4.3. Matériaux bio sources présentés :

#### I.4.3.1. Le bois :

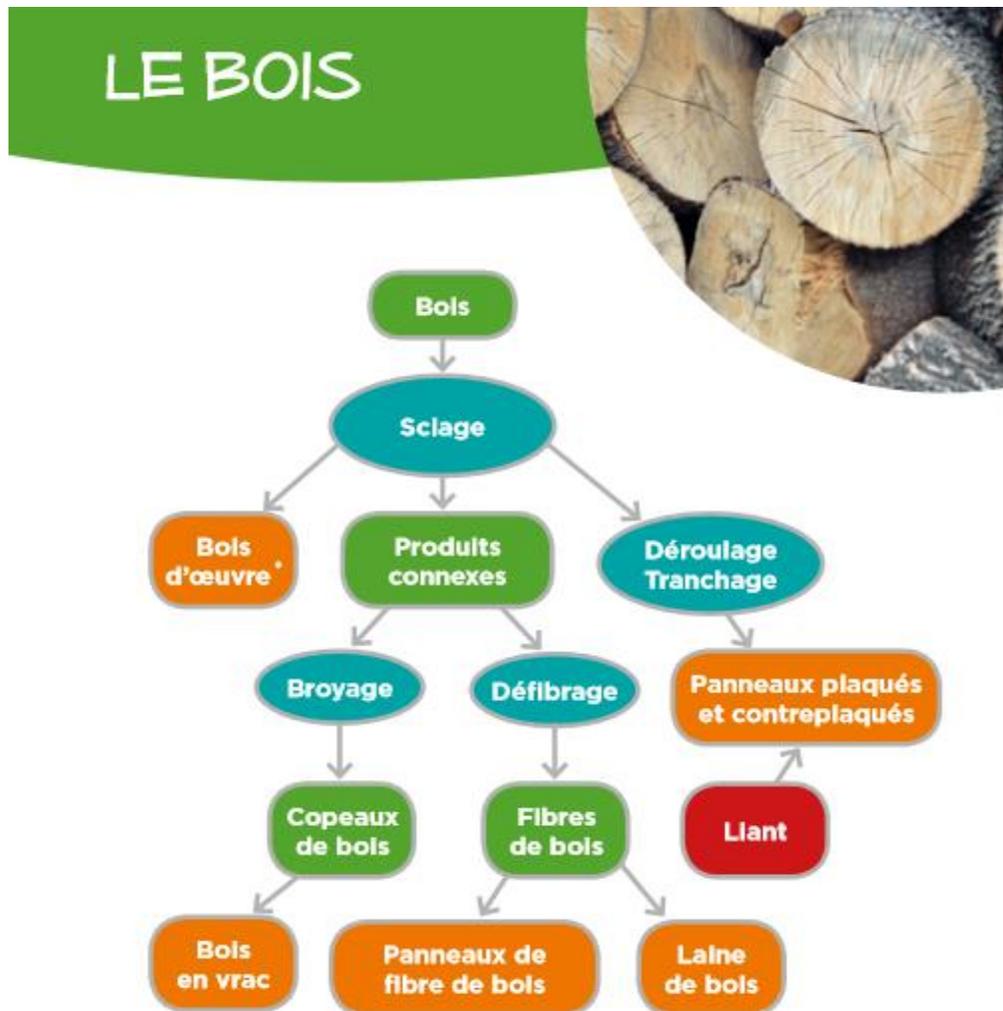


Figure I. 29 Produits de construction et domaines d'application

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### I.4.3.1.a. Laine de bois et panneaux de fibres de bois :



*Figure I. 30 La laine de bois et les panneaux en fibre de bois sont fabriqués grâce au défibrage du bois.*

#### Domaines d'application :

- Isolation des murs par l'intérieur et l'extérieur.
- Isolation des combles perdus.
- Isolation des rampants de toiture.

Certains de ces isolants possèdent une certification Acermi.

### I.4.3.1.b. Bois-en vrac :



*Figure I. 31 Le bois peut être conditionné en vrac*

#### Domaines d'application :

- Isolation des murs (caissons).
- Isolation des combles perdus.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### Avantage :

- Bonnes performances thermique et acoustique.
- Contribution au confort d'été.
- Matériau renouvelable.
- Laine de bois utilisable pour certaines techniques d'isolation par l'extérieur.

### Inconvénients :

- Laine de bois et bois en vrac peuvent nécessiter un traitement chimique contre les moisissures ou les attaques d'insectes.

### I.4.3.2. Le liège :



Figure I. 32 Produits de construction et domaines d'application :

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### I.4.3.2.1. Panneaux et rouleaux de liège :



*Figure I. 33* Les panneaux et rouleaux de liège sont fabriqués à partir de l'écorce de chêne liège ou de bouchons de liège.

#### Domaines d'application :

- Isolation des planchers.
- Isolation des murs par l'intérieur ou l'extérieur.
- Isolation des combles perdus.
- Isolation des rampants de toiture.

Des certifications Acermi ont été délivrées pour certains panneaux de liège.

### I.4.3.2.2. Granulats :



*Figure I. 34* Les granulats de liège sont utilisés en remplissage de caissons ou mélangés à du béton afin d'obtenir une chape légère et isolante.

#### Domaines d'application :

- Remplissage : combles, murs...
- Béton allégé : chape isolante.

#### Avantage :

- Bonne performance thermique.
- Très bon isolant acoustique.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

- Très bonne contribution au confort d'été.
- Très résistant et imputrescible.
- Peut être utilisé en soubassement et sous-chape.
- Matériau biodégradable.
- Bon comportement au feu.
- Pas d'additifs pour l'agglomération des panneaux.

### Inconvénient :

- Coût élevé.
- Le liège est généralement importé.

### I.4.3.3. La paille :

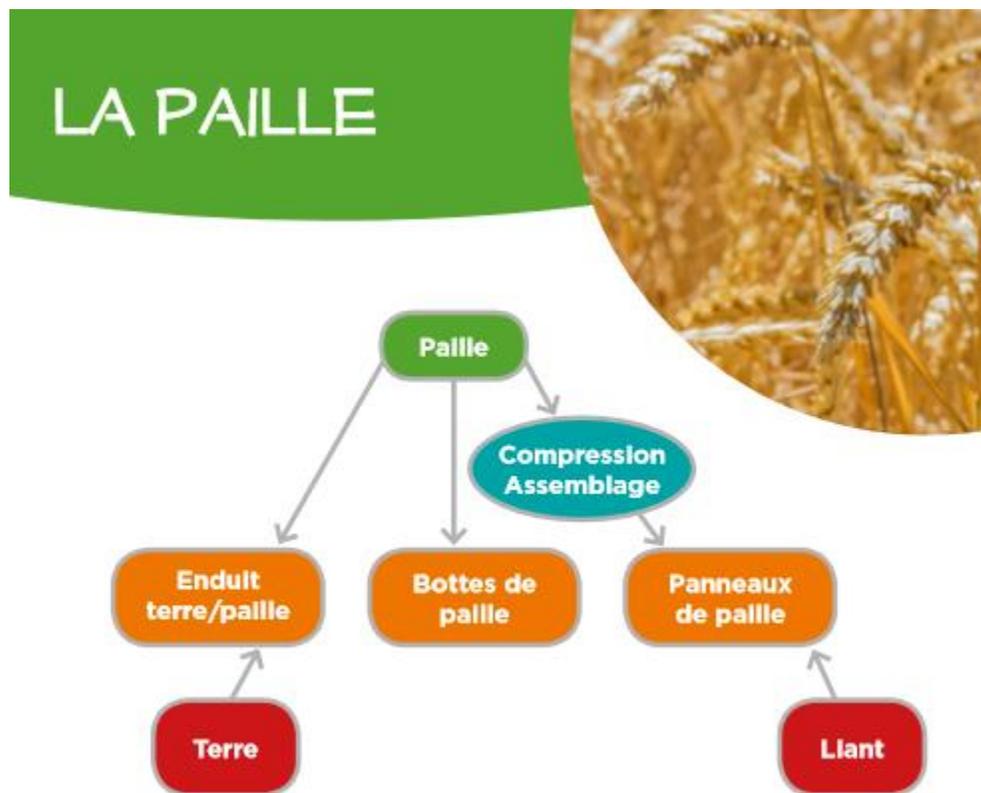


Figure I. 35 Produits de construction et domaines d'application

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### I.4.3.3.1. Bottes de paille :



*Figure I. 36* Après fauchage, la paille est en général conditionnée sous forme de bottes. Celles-ci peuvent être utilisées telles quelles comme isolant dans une ossature bois.

#### Domaines d'application :

- Remplissage des murs.
- Remplissage en toiture.
- Isolation thermique par l'extérieur.

### I.4.3.3.2. Enduit terre/paille :



*Figure I. 37* La paille en vrac est mélangée à de la terre afin de créer un enduit.

#### Domaine d'application :

- Revêtement de façade intérieur ou extérieur.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### I.4.3.3.3. Panneaux de paille :



*Figure I. 38 Les panneaux de paille compressée sont obtenus grâce à un procédé de compression de la paille à chaud. Un revêtement en carton est ensuite collé sur les deux faces*

### Domaines d'application (déconseillé en milieu trop humide) :

- Cloisons intérieures.
- Isolation des murs par l'intérieur.
- Isolation des plafonds.
- Isolation des rampants de toiture.

### Exemple de construction en bottes de paille :

1921 : construction de la maison Feuillette dans le Loiret (45), achetée et entretenue par le RFCP.

2013 : construction de l'école Louise-Michel à Issy-les-Moulineaux (92).

2014 : construction de la résidence Jules-Ferry, immeuble de 8 niveaux, à Saint-Dié-des-Vosges (88).

### Avantage :

- Bonnes performances thermique et acoustique.
- Très bonne contribution au confort d'été.
- Les constructions et rénovations en bottes de paille sont facilement assurables, car couvertes par des règles professionnelles.
- Ressource disponible en quantité et renouvelable.
- Ressource répartie uniformément sur le territoire français.

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

- Les bottes ne nécessitent aucune transformation, aucun traitement chimique et sont faciles à mettre en œuvre.
- Coût modéré.

### Inconvénient :

- Pour les panneaux de paille compressée, les colles peuvent avoir une forte teneur en formaldéhydes.
- Pour le remplissage en bottes de paille, épaisseur importante des murs pour atteindre une bonne performance thermique.
- Poids des bottes de paille.

### I.4.3.4. La ouate de cellulose :



Figure I. 39 Produits de construction et domaines d'application

#### I.4.3.4.1. Panneaux en ouate de cellulose :



Figure I. 40 La ouate de cellulose peut être conditionnée sous forme de panneaux

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

---

### Domaines d'application :

- Isolation des murs.
- Isolation des combles perdus.

### I.4.3.4.2. La Ouate de cellulose en vrac :



*Figure I. 41 La ouate de cellulose en vrac peut être appliquée en voie sèche ou en voie humide*

### Domaines d'application :

- Soufflage à sec en combles perdus.
- Insufflation à sec dans des caissons (murs, planchers).
- Projection humide sur les murs.
- Flocage (humide) en sous-face de planchers.

### Avantage :

- Bonne régulation de l'humidité (peut absorber jusqu'à 15 % de son poids en eau).
- Bonnes performances thermique et acoustique.
- Contribution au confort d'été.
- Provient de produits recyclés.
- Nécessite peu d'énergie lors de sa production.

### \*Inconvénient :

- Produit non résistant au feu naturellement, doit être traité chimiquement.
- Obligation du port d'un masque lors de la mise en place (poussières).

## Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation

- Peut dégager des odeurs et émettre des formaldéhydes dus aux résidus d'encre (en fonction de la qualité de la ouate).

Tableau I. 14 Tableau comparatif

ORIGINE	MATÉRIAU	CONDITIONNEMENT	DOMAINES D'APPLICATION				
			Isolation des murs	Isolation des planchers de combles	Isolation des rampants	Isolation des planchers	Autres
Isolant d'origine végétale	Chanvre	Chênevotte	X	X			
		Laine de chanvre	X	X	X		
		Béton préfabriqué	X				
		Béton projeté	X				
		Enduits					X
	Paille	Bottes	X	X	X		X
		Panneaux de paille					X
		Enduit terre / paille					X
	Liège	Panneaux / rouleaux	X	X	X	X	X
		Vrac	X	X		X	
	Ouate de cellulose	Panneaux / rouleaux	X	X	X		
		Vrac	X	X			
	Bois	Laine de bois	X	X	X		
		Bois en vrac	X	X			



# **Chapitre II**

## **Méthodes des plans d'expériences**

## **Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :**

---

### **Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :**

#### **II.1 Introduction :**

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles (Goupy, 2001)

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le nombre de mélanges à préparer, qui répondent correctement à nos attentes, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement.

#### **II.2. Définition :**

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique.

#### **II.3. Le principe :**

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

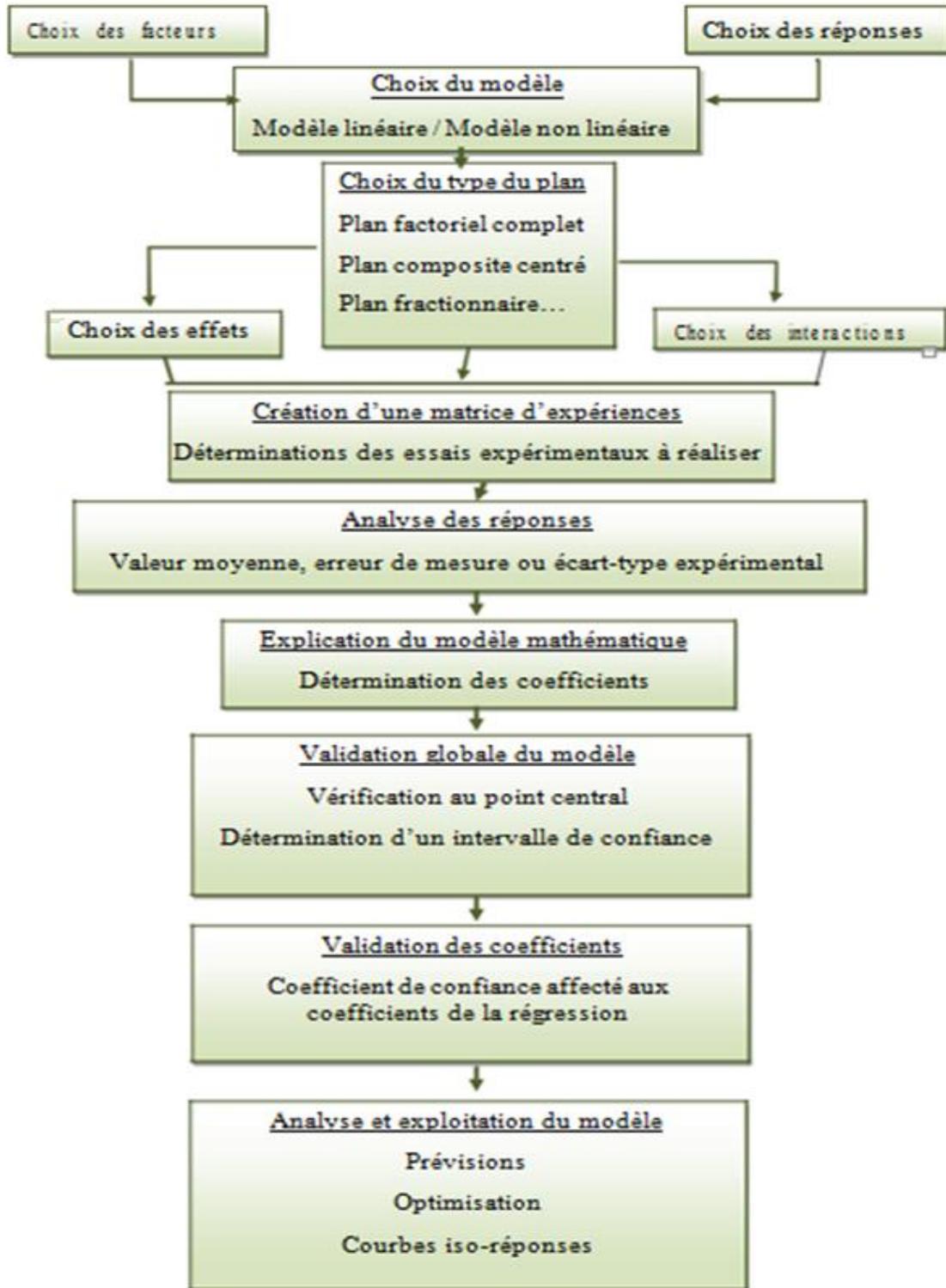
L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées.

#### **II.4 : Démarche méthodologique :**

Le schéma ci-dessous présente un organigramme général de traitement des plans d'expériences [22].

## Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :

---



### **II.5. Analyse des résultats :**

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

### **II.6. Terminologie :**

#### **II.6.1 : Les différents types de facteurs :**

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens. (Goupy 2013)

➤ **Facteurs continus :**

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

➤ **Facteurs discrets :**

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

➤ **Facteurs ordonnables :**

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand,

## Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :

---

Moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

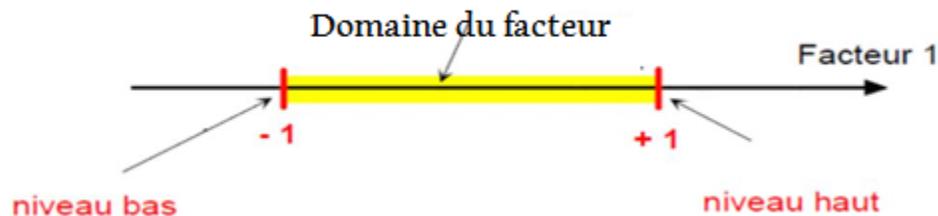
### ➤ Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs :

Haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

### II.6.2. Notion d'espace expérimental :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 06). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut. (Goupy 2013)



*Figure I. 1 le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur*

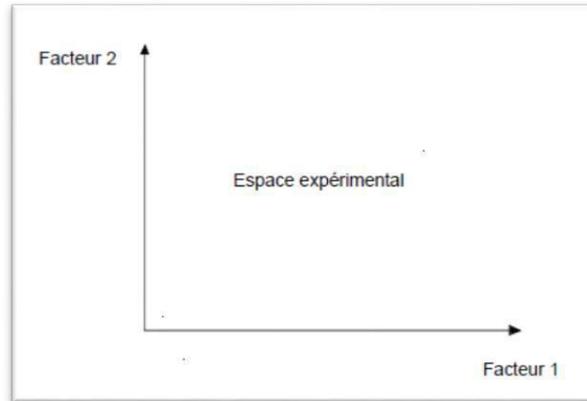
Le niveau bas du facteur est noté par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ . Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ .

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental.

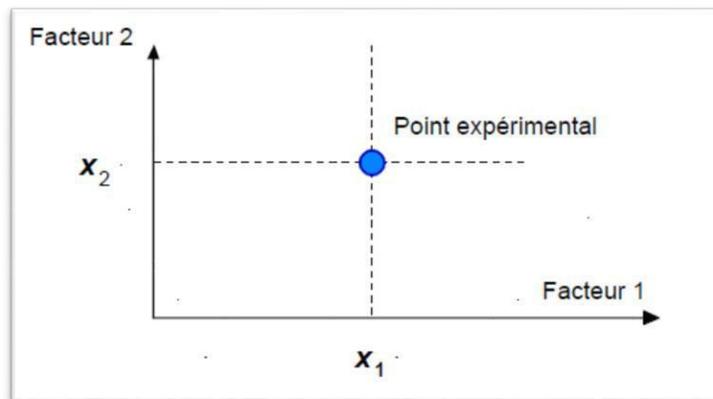
## Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :

---



*Figure I. 2 l'espace expérimental d'un facteur*

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.



*Figure I. 3 Les points expérimentaux dans un espace.*

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. Le regroupement des domaines des facteurs définit le « **domaine d'étude** ». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure 09).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

## Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :

---

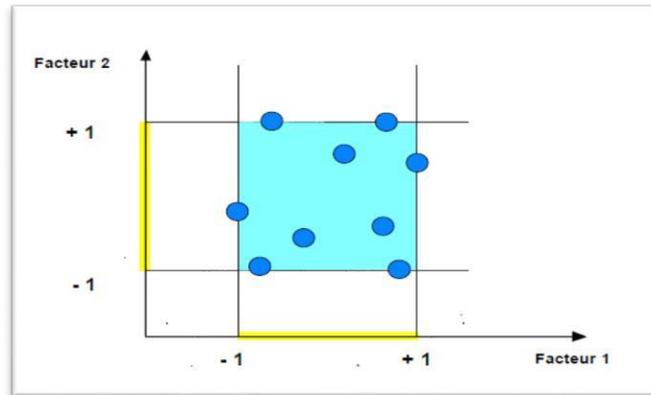


Figure I. 4 Les points expérimentaux dans un domaine d'étude.

### II.7. Intérêts des plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- ❖ Industries des matériaux.
- ❖ Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- ❖ Industries mécaniques et automobiles
- ❖ Industries métallurgiques

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- ❖ Diminution du nombre d'essais.
- ❖ Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- ❖ Détection des interactions entre facteurs.
- ❖ Modélisation des réponses étudiées.
- ❖ Une précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié (Frédéric. G, 1995).

### II.8. Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

## **Chapitre II : Méthodes des plans d'expériences :**

---

### **II.8.1. La recherche des facteurs influents**

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié ; la question est de savoir quels sont les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse :

- ❖ Lesquels a une influence significative ?
- ❖ Que vaut cette influence ?
- ❖ Et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées,

On passe à la seconde étape.

### **II.8.2. La modélisation :**

Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe.... Et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision

Donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de  $n$  lignes et  $k$  colonnes, où  $n$  est le nombre d'expériences et  $k$  est le nombre des effets (Frédéric. G, 1995).

### **II.8.3. L'optimisation**

Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié (Pillet .M, 1992).

### **II.9. Présentation de logiciel « Design-Expert »**

Le logiciel utilisé pour la réalisation de cette étude est le logiciel Design-Expert 8.0.7.1 version anglaise.

Le logiciel Design-Expert permet la conception de stratégies expérimentales optimales, ainsi que l'élaboration des plans d'expériences et l'analyse de leurs résultats. Il s'adapte à tous types de problèmes afin de répondre précisément aux objectifs tout en tenant compte des contraintes expérimentales.

# **Chapitre III**

**Mode opératoire  
(Matériel et Matériaux)**

## **Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :**

---

### **Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :**

#### **III.1. Introduction :**

Ce chapitre est consacré à la description des essais réalisés pour élaborer les matériaux objet de ce travail expérimental.

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

- Laboratoire de génie Civil de l'université de B.B.A.
- Laboratoire de chimie des matériaux de l'université de B.B.A.
- Laboratoire du centre de recherche CNERIB de Soudania d'Alger.
- Laboratoire travaux publique de B.B.A

#### **III.2. Matériels utilisés :**

**III.2.1. Malaxeur de béton Utiliser pour homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion :**



*Figure III. 1 Malaxeur de béton*

## **Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :**

---

### **III.2.2. L'étuve :**

En utilise pour sécher les matériaux ou produits humide.



*Figure III. 2 L'étuve*

### **III.2.3. La balance :**

En utilise pour mesurer les quantités des matériaux utilisés.



*Figure III. 3 La balance*

### **III.2.4. Plaque chauffante :**

Utiliser pour l'échauffement de l'eau de gâchage.



*Figure III. 4 Plaque chauffante*

## **Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :**

---

### **III.2.5. Résistance (source de chaleur) :**

Utiliser pour créer un environnement de température bien définie pour accélérer le gonflement de béton.



*Figure III. 5 Résistance (source de chaleur)*

### **III.2.6. Thermomètre :**

Utiliser pour fixer la température de l'eau de gâchage.



*Figure III. 6 Thermomètre*

### **III.2.7. Eprouvette gradué :**

En utilise pour la mesure de quantité d'eau utilisée dans le mélange.



*Figure III. 7 Eprouvette gradué*

### III.2.8. Les moules 10\*10\*10 :



*Figure III. 8 Les moules 10\*10\*10*

### III.2.9. 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, en utilise pour l'essai de la résistance à la compression.



*Figure III. 9 Presse hydraulique (NA EN 12390-3)*

### **III.2.10. Le CT METRE :**

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



*Figure III. 10 Le CT METRE*

### **III.2.11. Broyeur a billet (Retsch PM100) :**

Utiliser pour minimiser la taille des grains



*Figure III. 11 Broyeur a billet (Retsch PM100)*

### **III.2.12. Granulométrie laser (cillas 1090) :**

Utiliser pour étudier la répartition des différentes particules composant l'échantillon en fonction de leur taille par la voie humide.



*Figure III. 12 Granulométrie laser (cillas 1090)*

### **III.3. Les caractéristiques des matériaux utilisés :**

#### **III.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

Sous les normes [NF P 18-598], [NF P 18-304], [NA EN 1097-6].

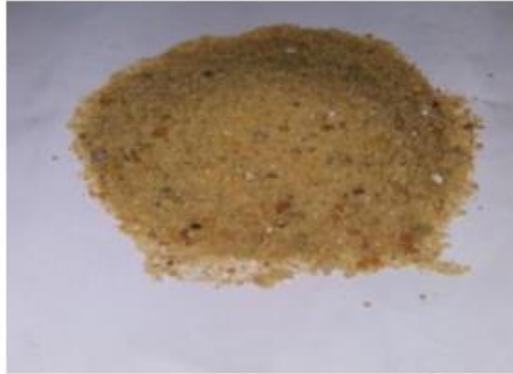


Figure III. 13 Sable d'oued Souf

Tableau III. 1les caractérisations de sable d'oued souf [16]

Caractérisation de sable d'oued souf		Résultats
<b>Module de finesse</b>	MF	2.36
<b>L'équivalent de sable</b>	$E_{sv}$ (%)	90.88
	$E_{sp}$ (%)	89.89
<b>La masse volumique</b>	$\gamma$ (kg/l)	1.642
	$\rho_{abs}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.56

### III.3.2. Ciment Matine 42.5 :

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 M'sila. 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.



*Figure III. 14* Ciment Matine 42.5

*Tableau III. 2* les caractérisations de ciment Matine 42.5 [16]

Caractérisation de ciment Matine 42.5		Résultats
<b>Module de finesse</b>	MF(cm <sup>2</sup> /g)	3488
<b>La masse volumique</b>	$\gamma$ (kg/l)	1.316
	$\rho_{abs}$ (g/cm <sup>3</sup> )	3

## Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :

Tableau III. 3les teneurs des éléments de composition le ciment Matine 42.5 [16]

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

### III.3.3. La poudre d'alumine :

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.



Figure III. 15 La poudre d'alumine

Fiche technique : La fiche technique de cette poudre est de société algérienne d'ALZINC - Spa – Filiale – ALGAL+.

### Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :

Contrôle Qualité M'sila, et l'analyse dans le tableau 04

*Tableau III. 4 les teneurs des éléments de composition de l'alumine déchet de Msila [16]*

Eléments	Teneur (%)
<b>Al</b>	97.66
<b>Zn</b>	1.16
<b>Fe</b>	1.08
<b>Pb</b>	0.066
<b>Cu</b>	0.026
<b>Cd</b>	0.0082
<b>Mn</b>	0.0078

#### III.3.4. Eau de gâchage :

Nous avons utilisé 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 5)

*Tableau III. 5 les caractérisations chimiques de l'eau de gâchage d'Unv BBA [16]*

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

## Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :

---

### III.3.5. La chaux vive :

Nous avons utilisé la chaux vive de la wilaya de Saida



Figure III. 16 La chaux vive

## Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :

Tableau III. 6fiche technique de la chaux vive (la wilaya de Saida) [17]

Caractéristique de base		La fiche technique de la chaux
Apparence physique		Poudre blanche sèche
oxyde de calcium CaO	(%)	>73.3
Oxyde de magnésium MgO	(%)	<0.5
Oxyde de fer Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	<2
Oxyde d'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	<1.5
Dioxyde de silicium SiO <sub>2</sub>	(%)	<2.5
Trioxyde de soufre SO <sub>3</sub>	(%)	<0.5
Oxyde de sodium Na <sub>2</sub> O	(%)	0.4-0.5
Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	(%)	<5
Carbonate de calcium CaCO <sub>3</sub>	(%)	<10
Densité spécifique	(g/cm <sup>3</sup> )	2
Plus de 90 µm	(%)	<10
Plus de 630 µm	(%)	0
Matériaux insoluble	(%)	<1
Densité apparente	(g/l)	600-900

### III.3.6. La chaux éteinte de LINDE :

Caractéristiques physico-chimiques des laits de chaux de LINDE :

## Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :

Tableau III. 7Caractéristiques physico-chimiques des laits de chaux de LINDE [15]

Paramètres	LINDE
Turbidité (NTU)	17600
pH	12,1
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	10390
Densité	1,043

### Composition de la chaux résiduaire de LINDE :

Tableau III. 8Composition chimique de la chaux résiduaire de LINDE [15]

CaO %	SiO <sub>2</sub> %	SO <sub>3</sub> %	MgO %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CO <sub>2</sub> résiduel %	C %	Perte au feu 1000°C %
67,03	2,06	0,12	0	2,14	2,40	1,28	0,65	24,32

### III.3.7. Déchet de bois (bois recyclée) :

Le bois est depuis très longtemps utilisé dans la construction. Il permet la création de produits de construction comme les structures porteuses, le bardage, les menuiseries, les panneaux de bois, la laine de bois ou encore le bois en vrac.



*Figure III. 17 Déchet de bois (bois recyclé)*

*Tableau III. 9 la masse volumique de déchet de bois (bois recyclé)*

N°d'essai	1	2	3
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	0,282	0,280	0,281
Moy(g/cm <sup>3</sup> )		0,282	

### III.3.8. Déchet de bois neuf (la ouate de cellulose) :

La ouate de cellulose est produite à partir de journaux recyclés. Elle permet la création de produits de construction comme des panneaux semi-rigides ou peut être utilisée directement en vrac. La ouate de cellulose pour la construction est fabriquée en usine. En France, il existe plusieurs fabricants de produits de construction à base de ouate de cellulose. À ce jour, seulement 50 % des déchets de journaux sont recyclés. La filière pourrait donc encore se développer.

## Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :



Figure III. 18 Déchet de bois neuf (la ouate de cellulose)

Tableau III. 10 la masse volumique de déchet de bois (bois neuf)

N°d'essai	1	2	3
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	0,141	0,142	0,140
Moy(g/cm <sup>3</sup> )	0,141		

### III.3.9. La formulation du béton cellulaire :

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

-Ciment	30%
-Alumine	05%
-Chaux	20%
-Sable	45%
-Eau	25%

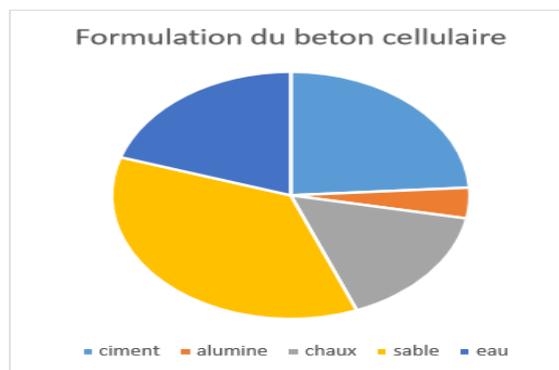


Figure III. 19 La quantité d'eau nécessaire est déterminé après plusieurs essais de convenance qui vise la préparation d'un béton cellulaire avec un volume contenant environ 55% de solide et 45% de vide.

## Chapitre III : Mode opératoire (Matériel et Matériaux) :

### III.3.10. Confection et contrôler l'éprouvette.

#### III.3.10.1. Malaxage de béton

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

- . Malaxer pendant 30s.
- . Verser les constituants dans la cuve : sable et les fines.
- . L'eau pendant 2 mn, le malaxeur en marche.
- . Mettre la patte dans les moules de 10\*10\*10.

Dans notre projet on a manipulé par deux qualités avec plusieurs pourcentages de la chaux (vive et éteinte).

Le tableau ci-dessus représente les différents paramètres de l'expérience :

*Tableau III. 11 présentation des différents paramètres varie de la manipulation de projet*

Paramètre	Chaux vive	Chaux éteinte	Alumine broyer 2h
<b>Le temps de malaxage (min)</b>	02	02	0.5
<b>Température d'eau(c°)</b>	[60~70]	[60~70]	[60~70]
<b>Température de l'environ(c°)</b>	25	40	25
<b>Temps de gonflement (min)</b>	[5~10]	[20~30]	2
<b>L'ajout d'eau pour 3 Kg en ml</b>			
<b>10%</b>	00	60	-
<b>20%</b>	60	120	-
<b>30%</b>	150	300	-

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

## **Chapitre IV : Résultats et discussion**

---

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

#### **IV -1-Introduction :**

L'objectif de ce chapitre est de présenter et d'expliquer les résultats du programme expérimental que nous avons effectué au laboratoire et qui nous a permis d'étudier l'influence des ajouts de bois par sa légèreté d'une part et d'autre part par la distribution des particules et l'homogénéité des composants sur le comportement de béton cellulaire

Une analyse et une discussion des résultats sera faite à la base des résultats obtenus.

#### **IV -2-Etude thermomécanique :**

L'une des caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction est évidemment la résistance mécanique. En termes de matériau isolant et non porteur, la qualité recherchée pour un matériau de construction est la conductivité thermique, à laquelle s'ajoute une résistance mécanique acceptable. Notre but est principalement l'amélioration des qualités thermiques du béton cellulaire formulé à base des matériaux naturels disponibles et des déchets industriels néfastes pour la nature (but environnemental), tout en conservant des performances mécaniques suffisantes à supporter une telle charge.

Il nous a paru par conséquent nécessaire de mener une étude thermomécanique. En se basant sur nos résultats expérimentaux concernant la résistance mécanique et la conductivité thermique des échantillons cellulaires cubiques préparés, l'ensemble de nos résultats présenté ci-dessous, nous donnons la variation de la résistance à la compression en fonction d'un dosage fixe en chaux et en poudre d'aluminium et faisons varier quelques paramètres tels que le taux de ciment, le type d'ajouts biosourcés et la quantité d'eau de gâchage (E/C), dans l'objectif est de caractériser un domaine où les valeurs de ces deux caractéristiques (réponse mécanique et conductivité thermique) sont acceptables.

#### **IV -3-Influence de la granulométrie de l'Alumine sur les performances du BBC :**

❖ La courbe obtenue par l'analyse granulométrique laser sur la taille des grains de poudre d'alumine utilisée avant le broyage de la poudre d'alumine présentée sur la Figure suivante :

## Chapitre IV : Résultats et discussion

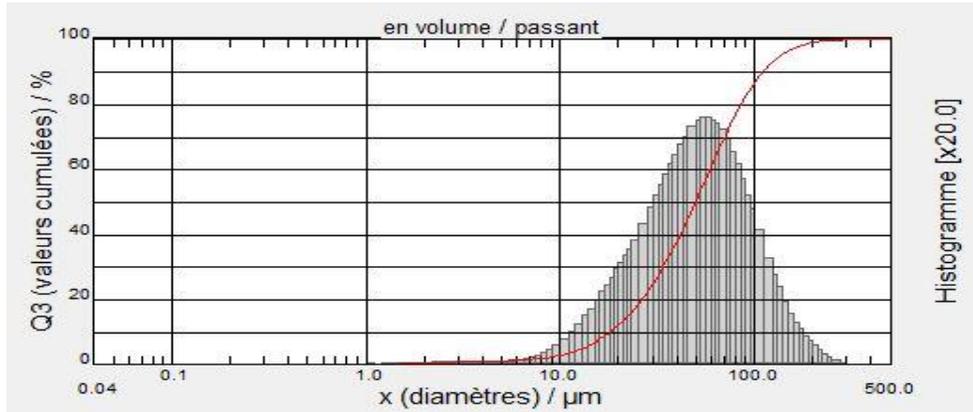


Figure IV. 1 Courbe granulométrie laser d'alumine à l'état initial (distribution monomodale ou homogène)

### Commentaire :

90% des particules de diamètres inférieurs ou égaux à 110.796  $\mu\text{m}$

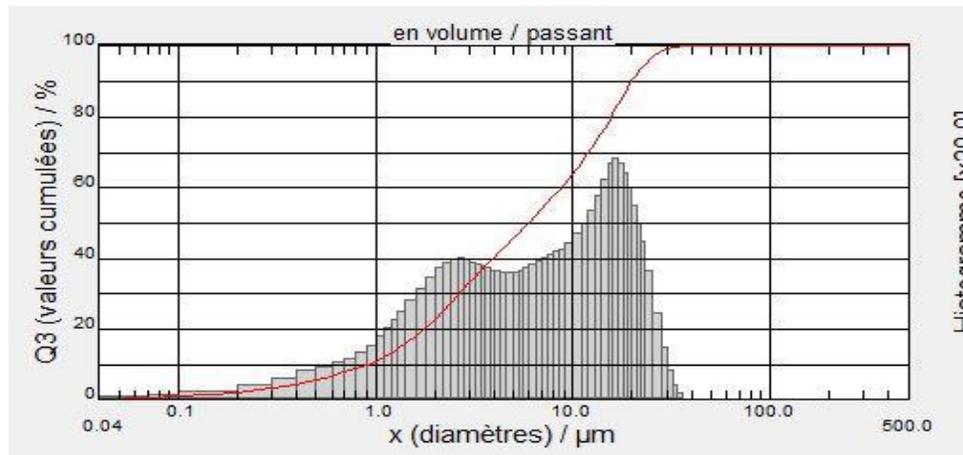


Figure IV . 2: courbe granulométrie laser d'alumine passants de tamis 80  $\mu\text{m}$

### IV -4-Résultat mécanique et thermique du béton cellulaire :

-Le 1er ajout biosource (bois recyclée)

## Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableaux IV. 1 dosage de 30% ciment

Pourcentage d'ajout biosource	Pourcentage d'ajout biosource	La résistance à la compression moyenne 28j (MP)	La densité (Kg/m <sup>3</sup> )	La conductivité thermique $\Lambda$ (w/m.k°)	La chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> .k)
	BT	2,175	770	0,275	889,3
	6%	0.9	730	0.201	742.1
	4%	1.05	760	0.207	764.3
	2%	1.2	790	0.243	765.7

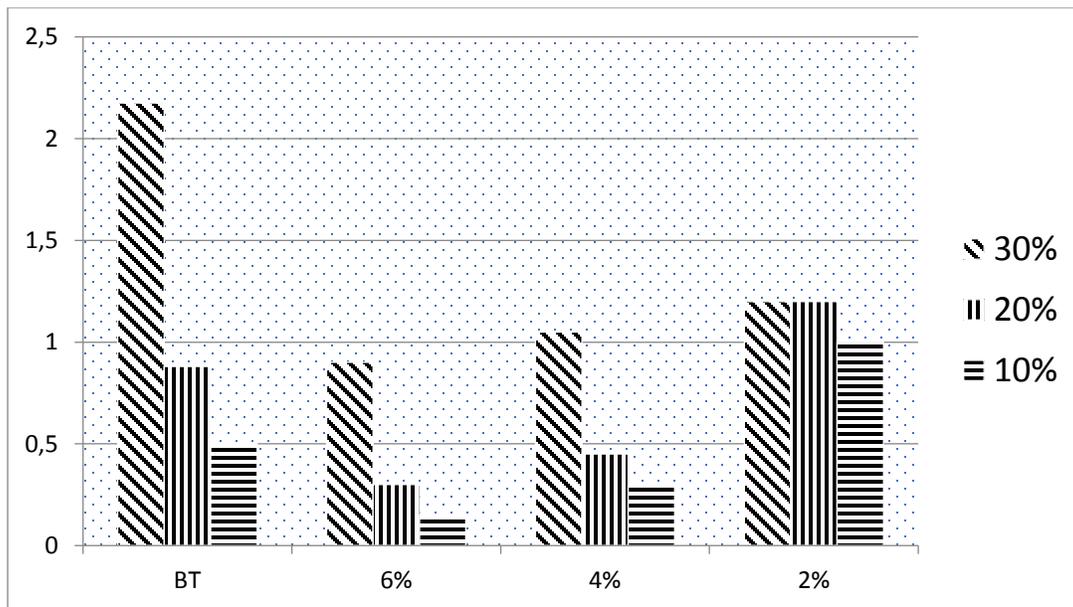
Tableaux IV. 2 dosage de 20% ciment

Pourcentage d'ajout biosource	Type de béton	La résistance à la compression moyenne 28j (MP)	La densité (Kg/m <sup>3</sup> )	La conductivité thermique $\Lambda$ (w/m.k°)	La chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> .k)
	BT	0,880	765	0,268	883,3
	6%	0.3	530	0.190	673.3
	4%	0.45	600	0.243	879.2
	2%	1.2	700	0.252	877.9

## Chapitre IV : Résultats et discussion

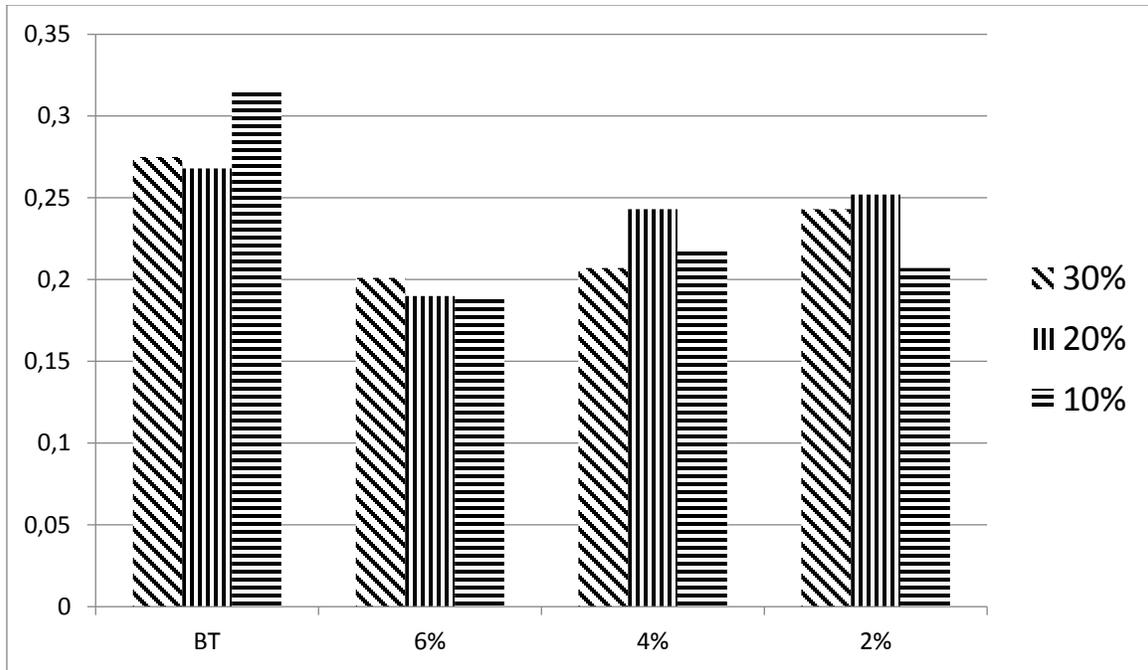
Tableaux IV. 3 dosage de 10% ciment

Pourcentage d'ajout biosource	Type de béton	La résistance à la compression moyenne 28j (MP)	La densité (Kg/m <sup>3</sup> )	La conductivité thermique $\Lambda$ (w/m.k <sup>o</sup> )	La chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> .k)
	BT	0,502	707	0,315	944,22
	6%	0.15	500	0.188	683
	4%	0.3	630	0.219	713.4
	2%	1	700	0.207	730



Histogramme. 1 : Variation de la résistance mécanique des bétons cellulaires à base de bois recyclée

## Chapitre IV : Résultats et discussion



*Histogramme. 2 : Variation de la conductivité thermique des bétons cellulaire à base de bois recyclée*

### Le 2ème ajouts biosource la ouate de cellulose (bois neuf) :

*Tableaux IV. 4 dosage de 30% ciment*

Pourcentage d'ajout biosource	Type de béton	La résistance à la compression moyenne 28j (MP)	La densité (Kg/m <sup>3</sup> )	La conductivité thermique $\Lambda$ (w/m.k°)	La chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> .k)
		<b>BT</b>	<b>0.880</b>	<b>765</b>	<b>0.268</b>
	<b>3%</b>	<b>0.3</b>	<b>650</b>	<b>0.253</b>	<b>964</b>
	<b>2%</b>	<b>0.39</b>	<b>670</b>	<b>0.271</b>	<b>887</b>
	<b>1%</b>	<b>0.86</b>	<b>700</b>	<b>0.238</b>	<b>850.5</b>

## Chapitre IV : Résultats et discussion

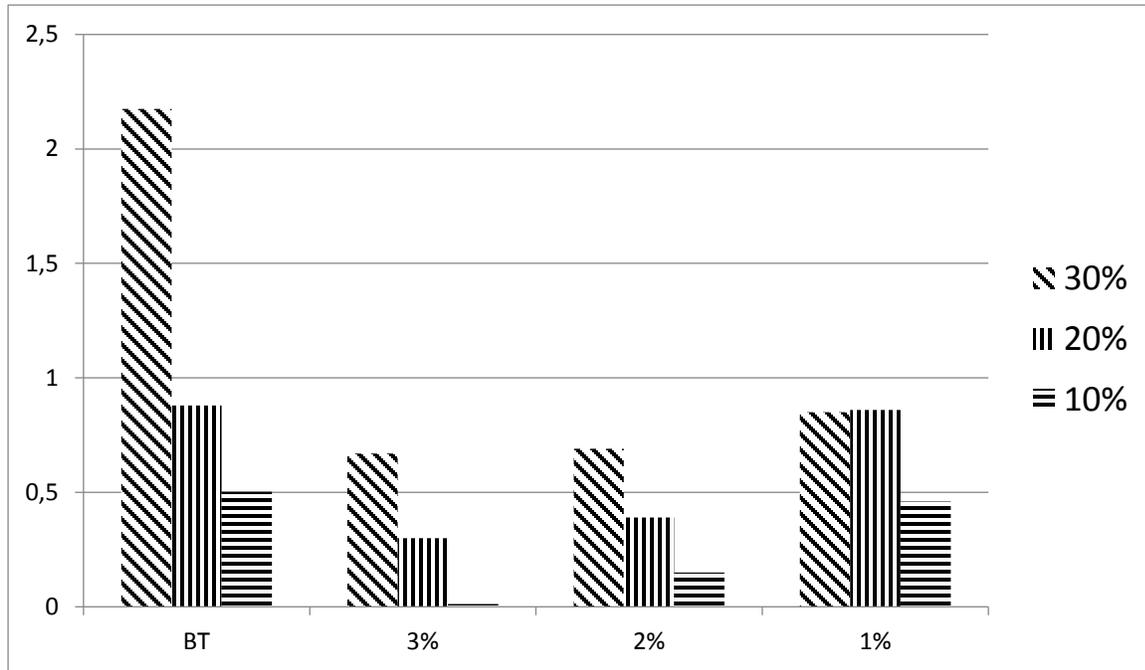
Tableaux IV. 5 dosage de 20% ciment

Pourcentage d'ajout biosourcé	Type de béton	La résistance à la compression moyenne 28j (MP)	La densité (Kg/m <sup>3</sup> )	La conductivité thermique $\lambda$ (w/m.k°)	La chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> .k)
	BT	0.502	707	0.315	944.22
	3%	0.012	650	0.22	799.2
	2%	0.15	670	0.214	751.9
	1%	0.46	680	0.229	811.5

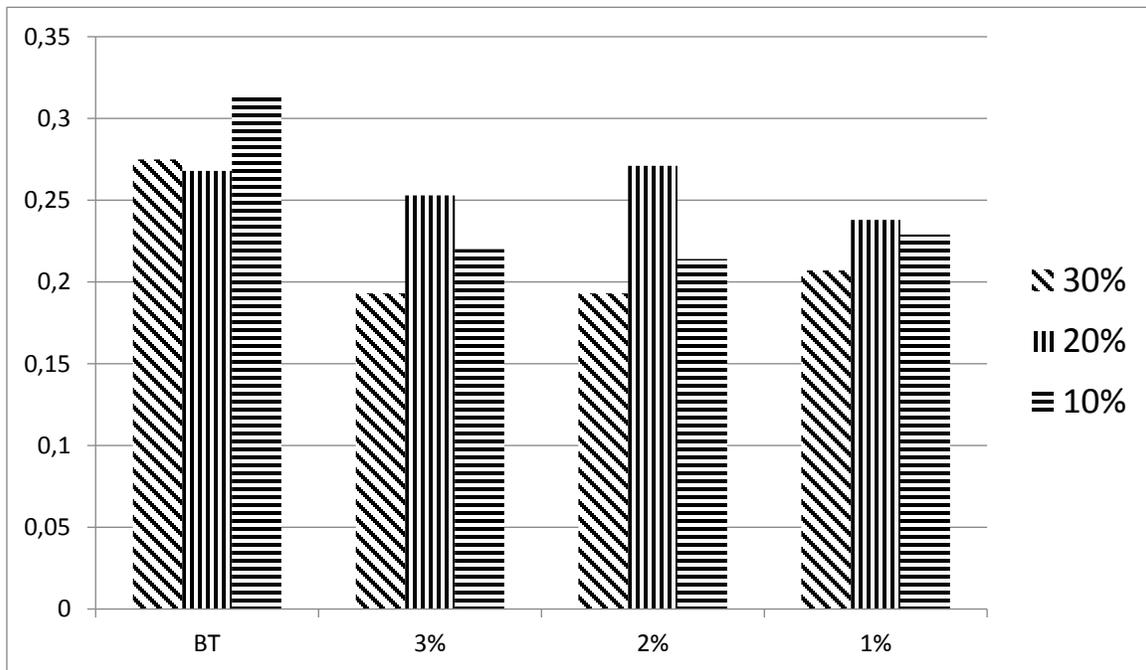
Tableaux IV. 6 dosage de 10% ciment

Pourcentage d'ajout biosourcé	Type de béton	La résistance à la compression moyenne 28j (MP)	La densité (Kg/m <sup>3</sup> )	La conductivité thermique $\Lambda$ (w/m.k°)	La chaleur spécifique (KJ/m <sup>3</sup> .k)
	BT	2.175	770	0.275	889.3
	3%	0.67	600	0.193	704
	2%	0.69	700	0.193	724
	1%	0.85	800	0.207	752

## Chapitre IV : Résultats et discussion



**Histogramme. 3 :** Variation de la résistance mécanique des bétons cellulaire à base de bois neuf



**Histogramme. 4 :** Variation de la conductivité thermique des bétons cellulaire à base de bois neuf

### Interprétation et Discussion :

Les résultats obtenus montrent que les réponses thermomécaniques (la résistance à la compression et la conductivité thermique) des bétons cellulaires élaborés sont en fonction de dosage en ciment et du type d'ajout bio- source utilisé.

D'après les résultats obtenus et représenter il est clair que la résistance à la compression a 28 jours confirment l'intérêt de l'utilisation d'un dosage en ciment équivalent de 30% ou nous avons enregistré une résistance proche à 1.2MPa avec une proportion de volume d'ajout bio-source faible, à cause de sa légèreté et sa faible cohésion son utilisation doit être limité.

Le dosage en ciment n'influe pas d'une manière directesur la conductivité thermique par contre ; la présence des matériaux bio-source influe d'une manière significative ou nous avons enregistré une valeur de 0.188 (w/m. k°) pour le premier ajout (bois recyclée) et 0.193 pour le deuxième ajout (bois neuf) cette léger différence est justifier par la différence des densités des déchets bio-source utilisées et la structure fibreuse de déchet de bois neuf ce dernier permettre de la formation des pores capillaires plus fine.

Nous remarquons quelque contradiction des résultats thermique de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs Propriétés mécaniques en liaison avec leur microstructure, Due à la connexion des pores (pores capillaires) qui facilite la diffusion et la propagation de flux thermique.

Et à partir de ces résultats les interprétations suivantes ont été postulées :

- ❖ La résistance mécanique diminue en fonction de la proportion volumique de l'ajout bio-source.
- ❖ La densité de béton cellulaire augmente en fonction de dosage en ciment et diminue en fonction de l'ajout bio-source
- ❖ La résistance mécanique augmente avec l'augmentation du dosage de ciment.

## Chapitre IV : Résultats et discussion

---

### Analyse des résultats du plan d'expérience :

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le nombre de mélanges à préparer, qui répondent correctement à nos attentes, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent nos objectifs visés au début de notre action expérimentale.

La méthodologie d'analyse des réponses étudier (résistance mécanique, conductivité thermique et densité) par la méthode des plans d'expériences se base sur le fait qu'une d'organisée et d'arrêté les paramètres fixes et variables au début, conduira fréquemment à une analyse et une interprétation statistique relativement simple des résultats obtenus afin d'atteindre un optimum dans un intervalle ou domaine bien définie dite « espace expérimental ».

Dans notre action expérimentale un nombre de point est choisis dans un domaine d'étude limité par les facteurs variable suivants (E/C, % chaux et % ciment), chaque un de ces paramètres est limité par deux niveau, un niveau minimal et un autre maximal, les facteurs variables, leurs niveaux ainsi leurs réponses obtenu (Rc28, Conductivité thermique, chaleur spécifique et densité) sont résumé sur le tableau ci-dessous :

### La résistance mécanique

#### L'analyse statistique des Modeles

Source	R2	
Linear	0.61	
2FI	0.79	Suggested
Quadratic	0.86	

## Chapitre IV : Résultats et discussion

---

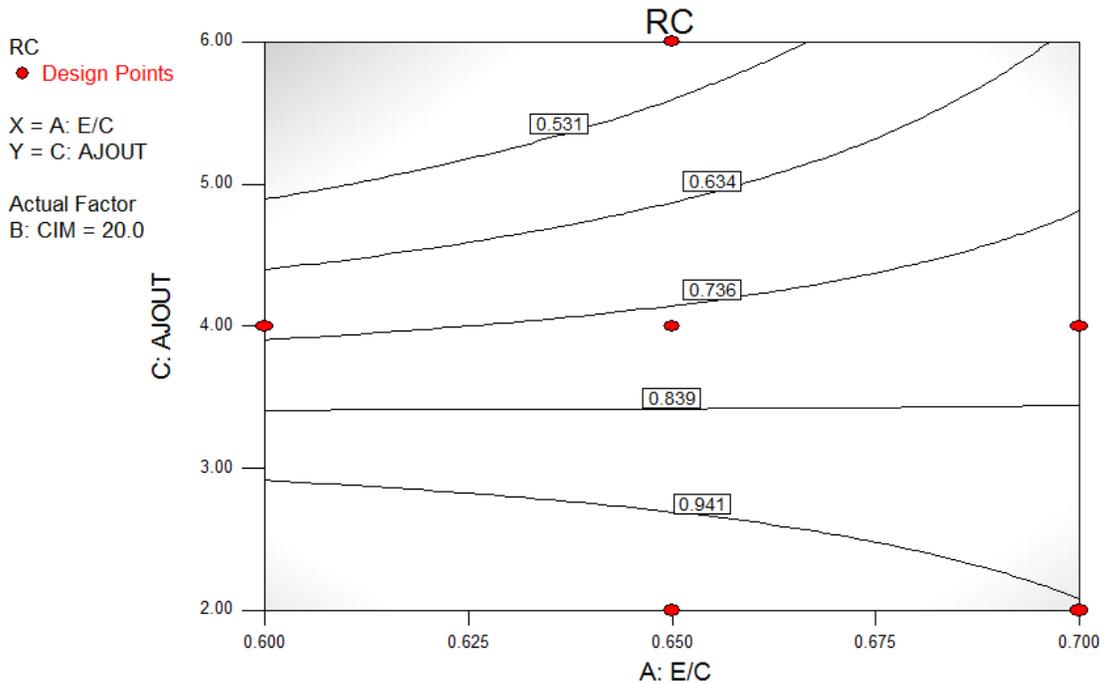
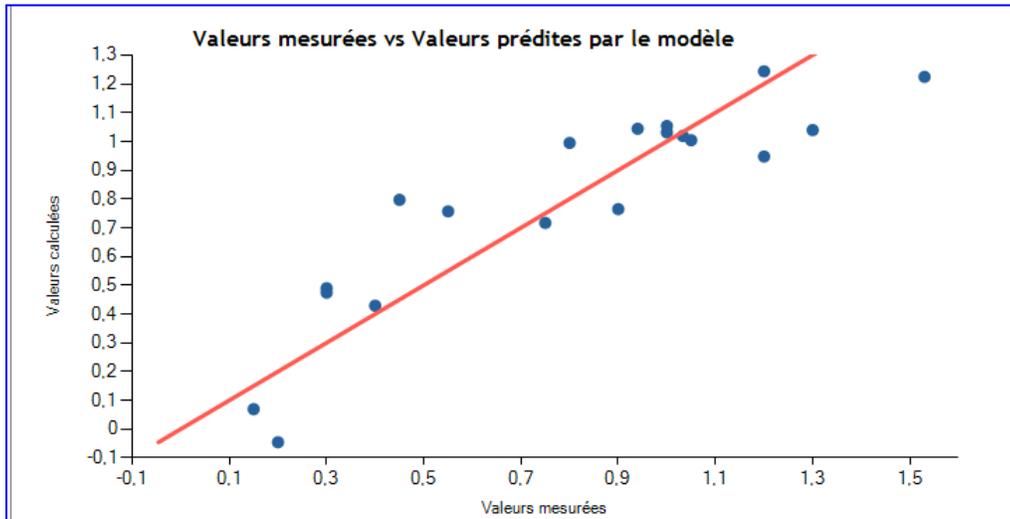
### Equation du modèle

RC	=
0.13662475	
2.55796547	* E/C
0.20498067	* CIM
-0.24223109	* AJOUT
-0.35208034	* E/C * CIM
-0.23384002	* E/C * AJOUT
-0.03793176	* CIM * AJOUT
0.07781591	* E/C * CIM * AJOUT

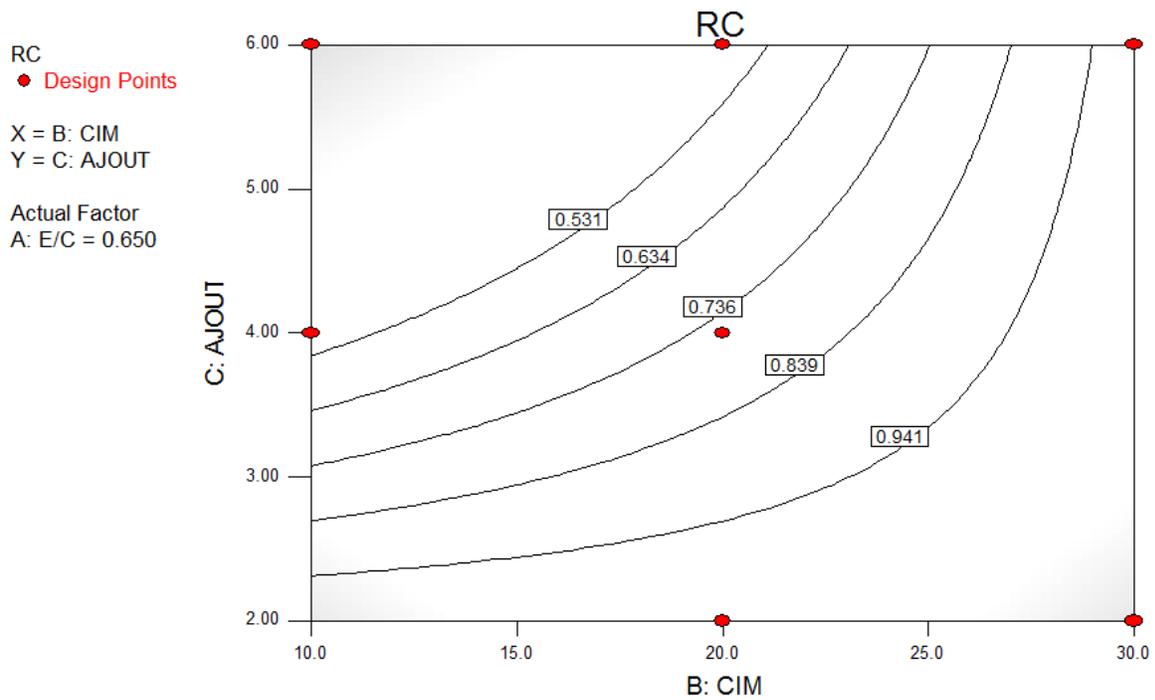
N°	Valeurs observées	Valeurs prévues	Résiduels
1	0.940	1.044	-0.104
2	1.000	1.054	-0.054
3	0.150	0.069	0.081
4	0.450	0.797	-0.347
5	0.900	0.765	0.135
6	1.050	1.004	0.046
7	0.200	-0.046	0.246
8	1.000	1.031	-0.031
9	0.300	0.490	-0.190
10	1.530	1.225	0.305
11	1.200	1.244	-0.044
12	1.200	0.947	0.253
13	1.033	1.019	0.014
14	1.300	1.039	0.261
15	0.800	0.995	-0.195
16	0.750	0.717	0.033

## Chapitre IV : Résultats et discussion

17	0.300	0.474	-0.174
18	0.400	0.429	-0.029
19	0.550	0.757	-0.207



## Chapitre IV : Résultats et discussion



Selon les figures 13, a,b,c, on remarque que la majorité des réponses mécanique sont jugé acceptable (entre 0,5 et 1,5MPa), la différence dans les résultats obtenus peut être justifiées par le dosage en ciment différent (10, 20 et 30%) ainsi le taux de déchet de bois introduit.

Les performances admissibles sont abouties pour les formulations optimisées qui contient plus de ciment en présence d'un taux minimal en déchet de bois.

## Chapitre IV : Résultats et discussion

---

### La conductivité

#### L'analyse statistique des Modeles

Source	R2	
Linear	0.39041025	
2FI	0.44129994	
Quadratic	0.77562566	Suggested

#### Equation du modèle

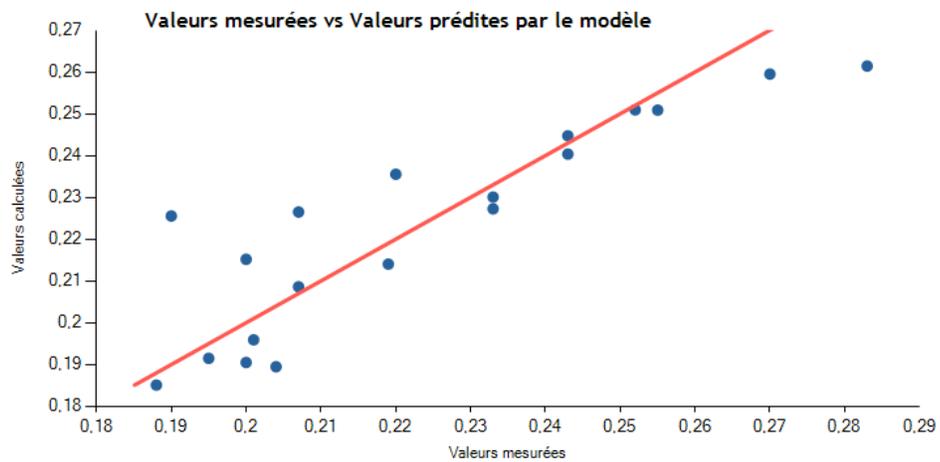
CONDUCTIVITE =  
0.761046044  
-1.663467086 \* E/C  
0.010503495 \* CIM  
-0.001405238 \* AJOUT  
0.98442004 \* E/C2  
-0.000344779 \* CIM2  
-0.002101112 \* AJOUT2  
0.006435326 \* E/C \* CIM  
0.020027477 \* E/C \* AJOUT  
-0.000165854 \* CIM \* AJOUT

N°	Valeurs observées	Valeurs prévues	Résiduels
1	0.200	0.216	-0.016
2	0.235	0.231	0.004
3	0.188	0.185	0.003
4	0.243	0.245	-0.002
5	0.201	0.196	0.005
6	0.207	0.227	-0.020
7	0.195	0.192	0.003
8	0.207	0.208	-0.001
9	0.219	0.214	0.005
10	0.204	0.189	0.015
11	0.243	0.241	0.002
12	0.252	0.251	0.001

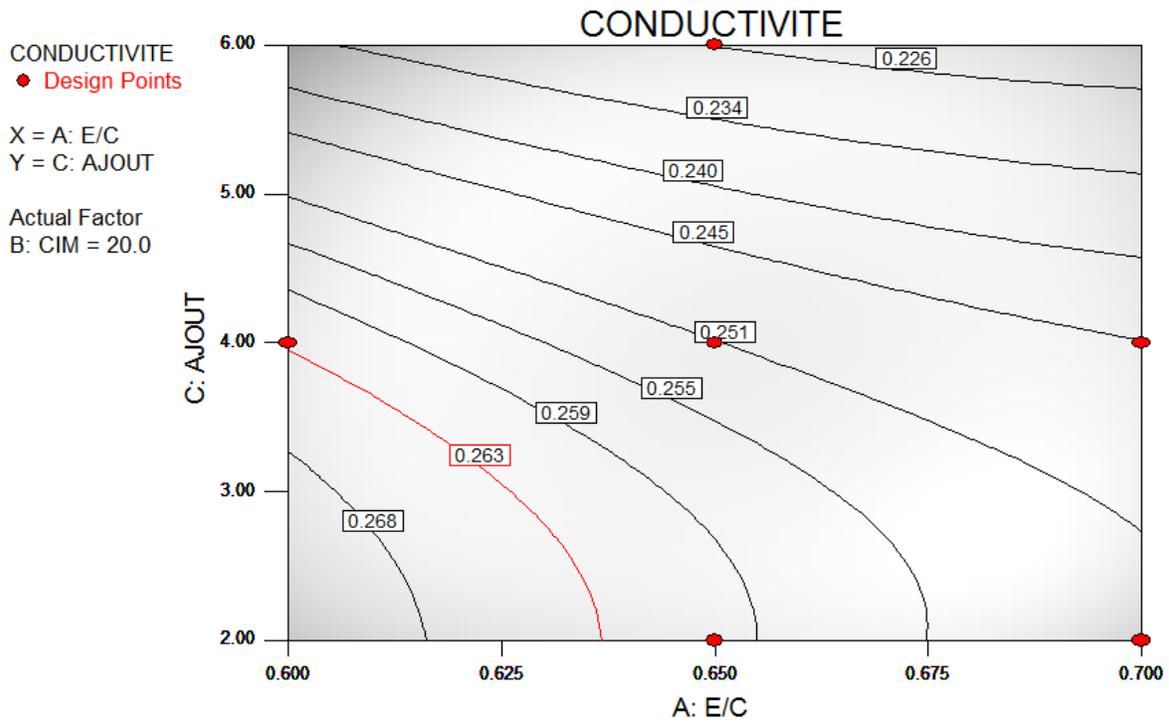
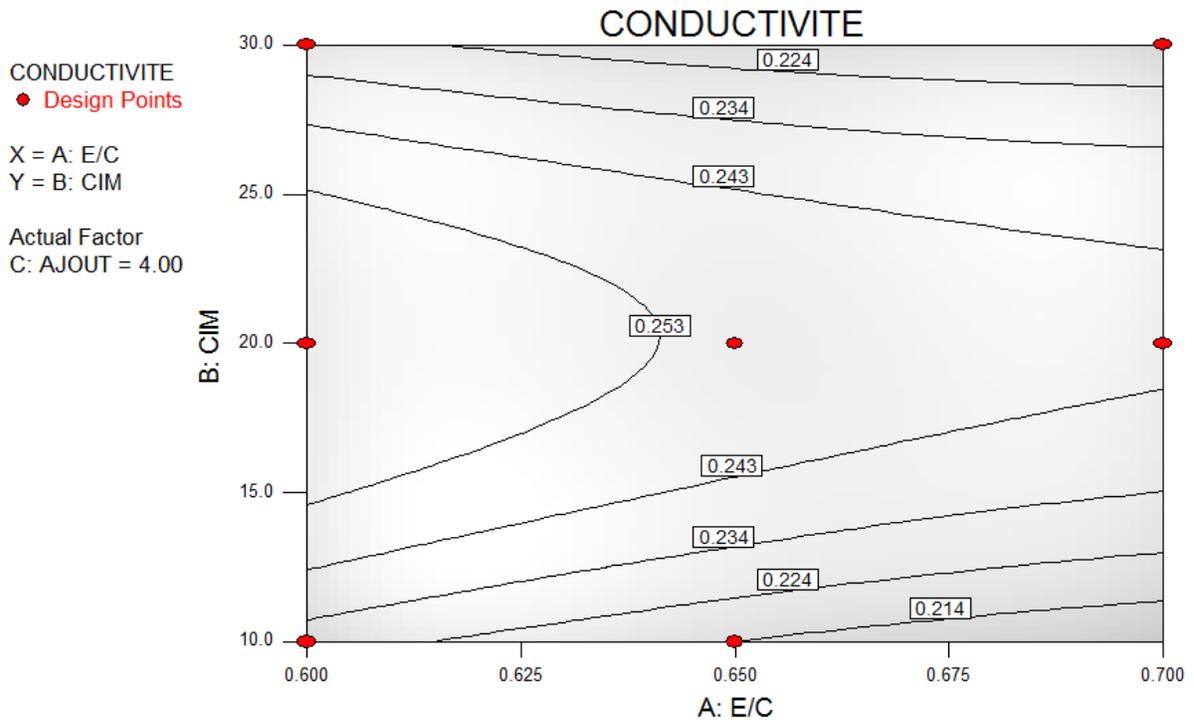
## Chapitre IV : Résultats et discussion

---

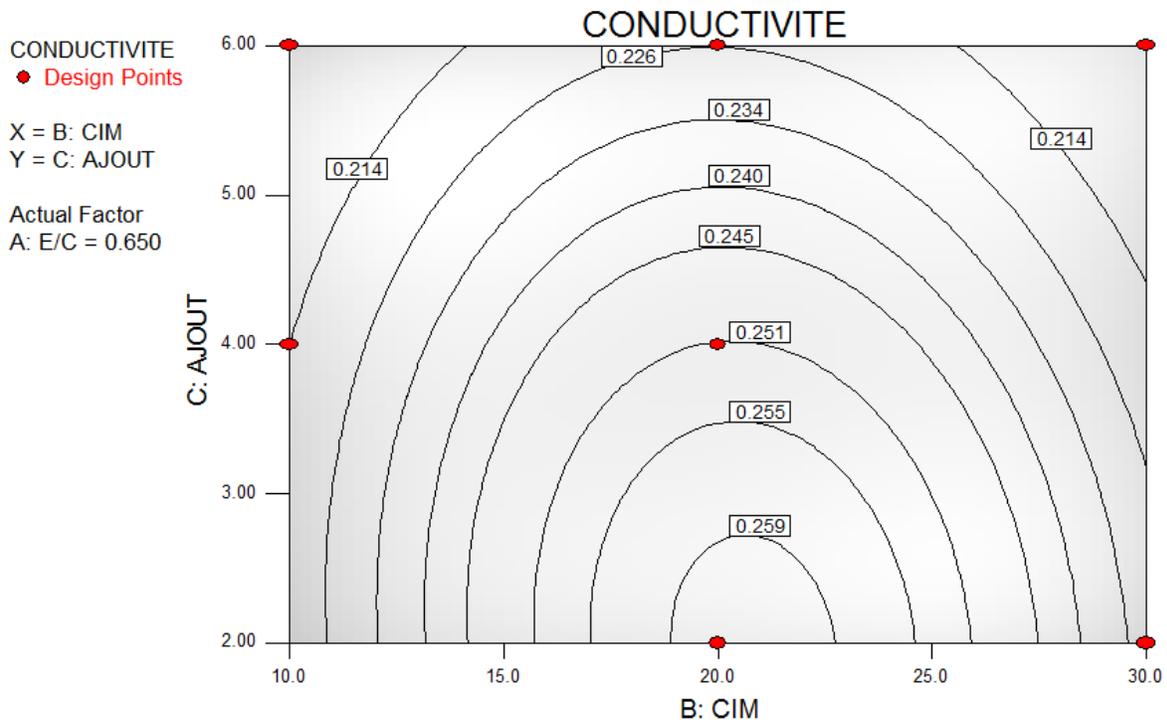
13	0.220	0.236	-0.016
14	0.270	0.260	0.010
15	0.200	0.190	0.010
16	0.285	0.262	0.023
17	0.190	0.226	-0.036
18	0.235	0.229	0.006
19	0.255	0.251	0.004



# Chapitre IV : Résultats et discussion



## Chapitre IV : Résultats et discussion



Selon les figures 18 a,b,c, on remarque que la majorité des réponses de conductivité thermique sont jugé très acceptable et dans l'intervalle normalisé (entre 0,2 et 0,3), le deuxième résultat important vue l'horizontalité des niveaux de réponses que le dosage en ciment n'influe pas sur la conductivité thermique d'une manière importante, par contre les deux facteurs qui influe d'une manière importante sont le dosage en eau et le taux de déchet de bois.

Les hautes performances thermiques sont abouties pour les formulations à base d'un taux élevé en déchet de bois sur tout l'espace d'expérience.

## Chapitre IV : Résultats et discussion

---

### La densité

#### L'analyse statistique des Modeles

Source	R-Squared	
Linear	0.80222938	
2FI	0.8968945	Suggested
Quadratic	0.9368161	
Cubic	0.99702337	Aliased

#### Equation du modèle

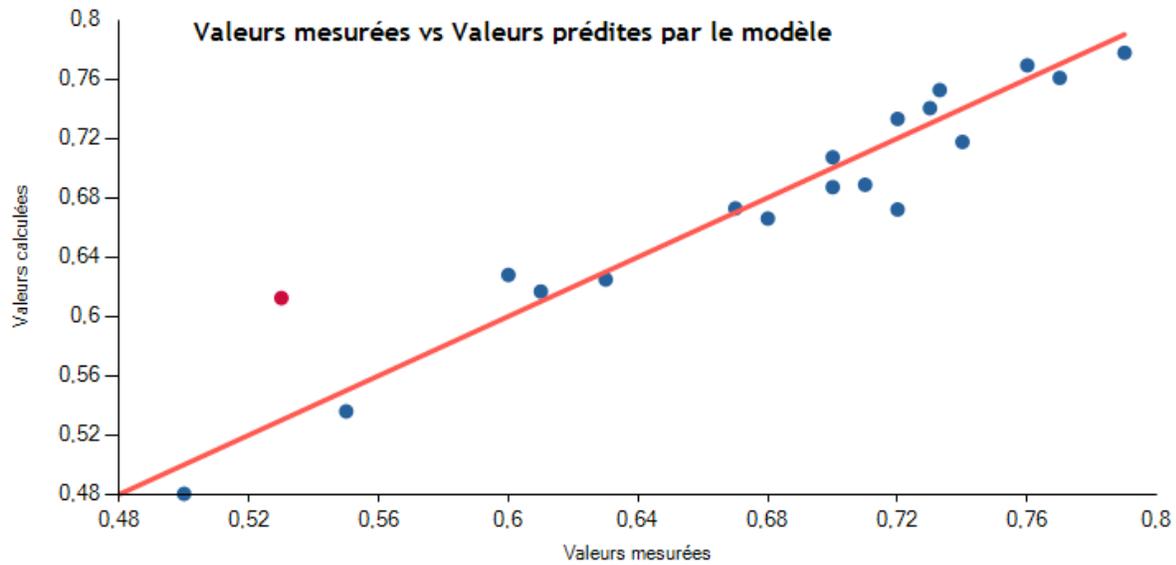
DENSITE	=
1.03711956	
-0.34694592	* E/C
-0.00769847	* CIM
0.00643573	* AJOUT
0.0104498	* E/C * CIM
-0.10015226	* E/C * AJOUT
0.00433367	* CIM * AJOUT
-0.00447678	* E/C * CIM * AJOUT

N°	Valeurs observées	Valeurs prévues	Résiduels
1	0.720	0.672	0.048
2	0.733	0.753	-0.020
3	0.500	0.480	0.020
4	0.600	0.628	-0.028
5	0.770	0.761	0.009
6	0.760	0.769	-0.009
7	0.550	0.536	0.014
8	0.700	0.687	0.013
9	0.630	0.625	0.005
10	0.610	0.617	-0.007
11	0.790	0.778	0.012
12	0.700	0.707	-0.007

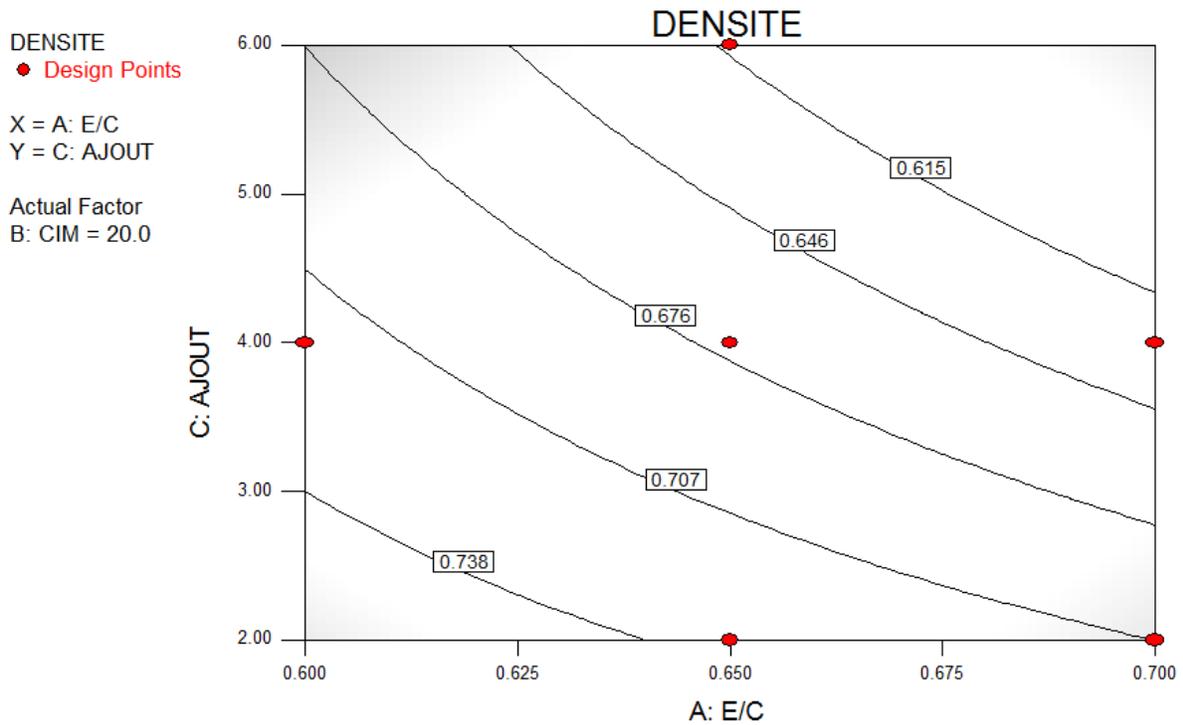
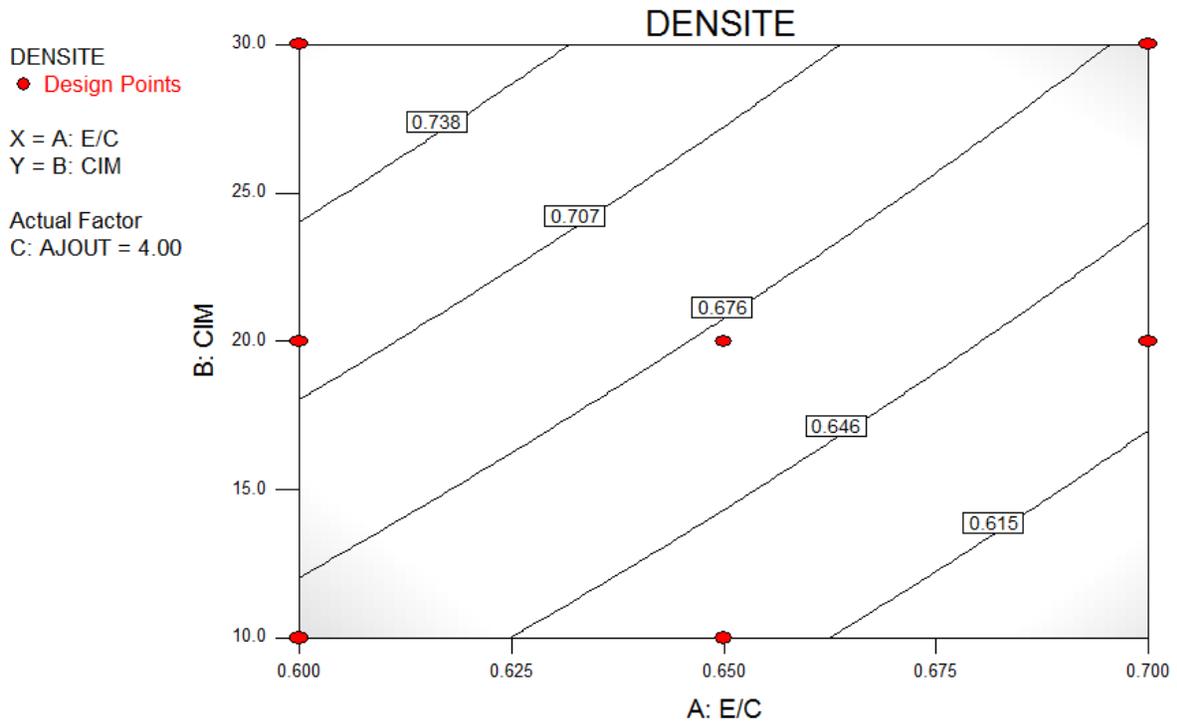
## Chapitre IV : Résultats et discussion

---

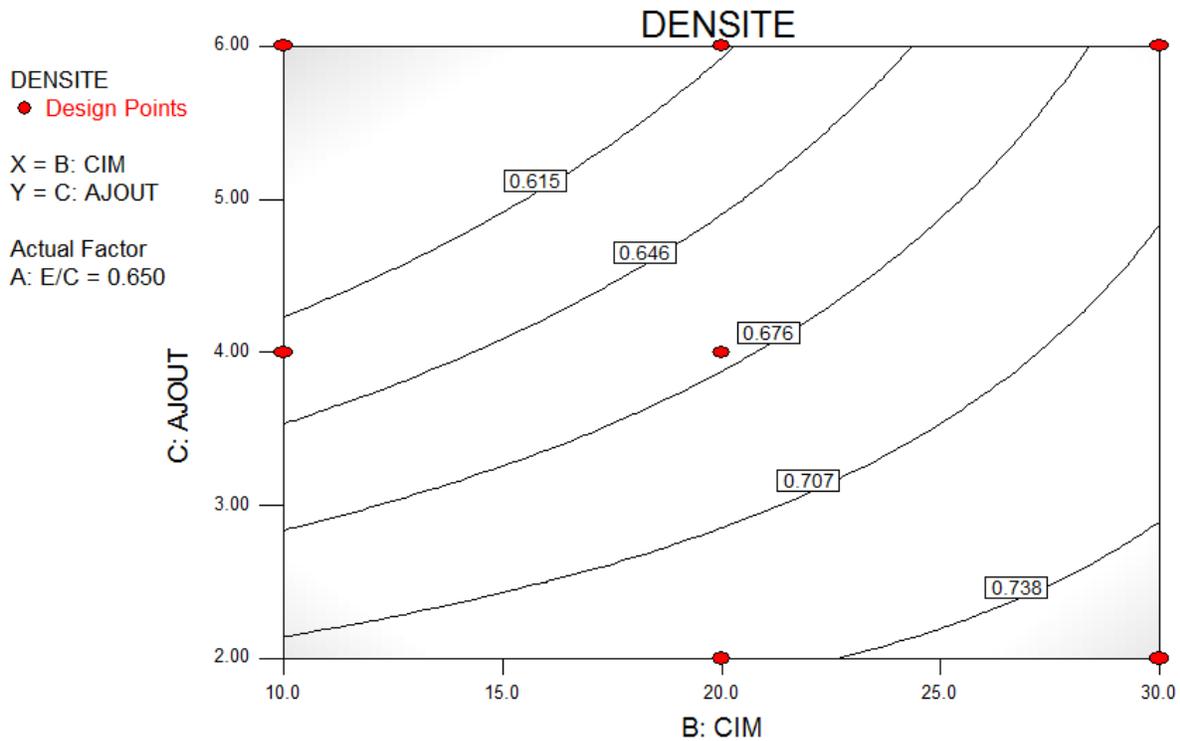
13	0.730	0.740	-0.010
14	0.720	0.733	-0.013
15	0.710	0.689	0.021
16	0.740	0.718	0.022
17	0.530	0.612	-0.082
18	0.680	0.666	0.014
19	0.670	0.673	-0.003



# Chapitre IV : Résultats et discussion



## Chapitre IV : Résultats et discussion



Faisons une comparaison entre les résultats des différents paramètres nous pouvons aisément remarquer que quel que soit la formulation des bétons étudiés, leur conductivité thermique, s'accroît proportionnellement avec la masse volumique apparente. En effet, d'une part la densification croissante des matériaux bouche les pores et élimine l'air qui s'y trouve, ce dernier possède une conductivité thermique inférieure aux conductivités thermiques des matrices solides, et d'autre part, plus le matériau est compact (dense) plus il comporte des particules élémentaires susceptibles de transporter de l'énergie thermique. Or, la conductivité thermique représente la somme algébrique de la contribution de chacune de ces particules, à la conduction au sein du matériau, finalement les bétons cellulaires les plus légers peuvent être attient avec un dosage en ciment le plus élevé en présence des quantités importante en déchet de bois, la quantité d'eau influe positivement sur la légèreté du matériau.

# **Conclusion générale**

# CONCLUSION GENERALE

---

## IV-CONCLUSION GENERALE

### IV-1-Conclusion générale :

Le bois est un matériau bio-source renouvelable qui n'entraîne pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de son exploitation, il présente des propriétés mécaniques et thermiques intéressantes dans le domaine de la construction. Toutefois, il est nécessaire de garantir ses performances en particulier lors des variations climatiques pouvant influencer sa stabilité tel que l'humidité et les conditions climatique cyclique.

L'objectif à travers cette étude est d'élaborer un béton cellulaire bio-sourcé à propriétés thermomécanique acceptable, en faisons valoriser des déchets de bois. Ce béton est préparé à base de deux types de déchets de bois le 1er bois recyclée (sans lignine) et le deuxième déchet est un bois neuf (la ouate de cellulose, riche en lignine), le choix du taux d'introduction des déchets est essentiellement basé sur leurs densités.

Deux autres paramètres à effet important sur les caractéristiques des bétons cellulaires ; la quantité de ciment et le rapport E/C, les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Ce travail a permis de comparer deux granulats innovants a base de bois utilisée en bâtiment pour formuler un béton cellulaire bio-sourcé.
- ❖ Les deux déchets végétaux a une isolation élevée sont très prometteuse en raison notamment de sa microstructure
- ❖ La masse volumique obtenue pour nos bétons élaborés se situe dans les normes et conforme aux résultats théoriques.
  
- ❖ L'ensemble des chaleurs spécifiques sont jugé acceptable relativement aux résultats des conductivités thermique.
- ❖ Par rapport aux performances mécaniques, le déchet de bois diminue la résistance à la compression du béton d'une manière sensible.

## CONCLUSION GENERALE

---

### IV-2-Recommandations et perspectives de recherches :

A l'issue de ces conclusions, nous recommandons la poursuite de ces travaux, notamment les points suivants : Développement des méthodes de formulation précises et générales.

- ❖ Compléter la caractérisation thermique des matériaux élaborés par la détermination de leurs diffusivités thermiques, afin de juger d'une manière rationnelle leur pouvoir isolant.
- ❖ L'effet de l'interface entre les particules de bois et le liant ce qu'on appelle la zone de transition.
- ❖ Formulation et caractérisation du béton cellulaire bio-sourcé haute performance.
- ❖ Étude de la durabilité et notamment dans un milieu agressif.

# **Bibliographie**

## Liste des références :

- [1] : **Brahim Mazhoud.** Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés. Submitted on 28 May 2018, Matériaux. INSA de Rennes, 2017. Français. NNT : 2017ISAR0024. tel-01801946.
- [2] : **Amziane, S., and Arnaud, L.** (2013). Les bétons de granulats d'origine végétale : Application au béton de chanvre (Paris: Hermes Science Publications).
- [3] : **Bouloc, P.** (2006). Le chanvre industriel: production et utilisations (France Agricole Editions).
- [4] : **Nguyen, T.-T.** (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Université de Bretagne-Sud.
- [5] : **Bledzki, A.K., and Gassan, J.** (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 24, 221–274.
- [6] : **Baley, C.** (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33, 939–948.
- [7] : **Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., and Sonebi, M.** (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures* 50.
- [8] : **Cerezo, V.** (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. . Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [9] : **Cordier, C.** (1999). Caractérisation thermique et mécanique des bétons de chanvre. Rapport de Stage de Fin D'études, ENTPE–École Doctorale MEGA.
- [10] : **Magniont, C.** (2010). **Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources. Toulouse 3.**
- [11] : **Bütschi, P.-Y., Deschenaux, C., Miao, B., and Srivastava, N.K.** (2004a). Caractérisation d'une maçonnerie composée d'éléments en aggloméré de chanvre. *Canadian Journal of Civil Engineering* 31, 526–529.
- [12] : **Evrard, A.** (2002). L'utilisation du chanvre dans la construction. Disponible En Ligne Sur [Http://www. Chanvre-Info. Ch/info](http://www.Chanvre-Info.Ch/info).
- [13] : **De Bruijn, P.B., Jeppsson, K.-H., Sandin, K., and Nilsson, C.** (2009). Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering* 103, 474–479.
- [14] : **DEV, L.** (2009). Développement Chanvre mécanise l'injection du béton vert. [usinouvelle.com/](http://usinouvelle.com/).

[15] : **Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., and Goudet, L.** (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials* 22, 2116–2123.

[16] : **MARC CONTANT** CONFECTION DE BÉTONS LEGERS POUR LA FABRICATION D'ELEMENTS ARCHITECTURAUX MONTRÉALA~ AVRTL 2000 PROJET D'APPLICATION PRESENTE A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE

[17] : Collection mémoires et thèses électroniques, "chapitre 3:technologie des bétons", Université Laval, [www.these.ulaval.ca/archimed/fichiers/23933/ch04.html](http://www.these.ulaval.ca/archimed/fichiers/23933/ch04.html).

[18] : **Madani BEDERINA**, " Caractérisation Mécanique Et Physique Des Bétons De Sables A Base De Déchets De Bois", Thèse De Doctorat En Génie Civil, De L'université De Laghouat, 25 Avril 2007.

[19] : **Mme MOHELLEBI Samira**.Thèse doctorat : «Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites» 29 Mai 2014.

[20] : [**Bederina .M**: Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. These de doctorat, l'ENP d'Alger (2007).]

[21] : [**M.SHINK** , 2003 ]

[22] : [**RILEM**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69]

[23] : **P. Pimienta ,J.Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, H. Nicole** (1994):Etude de faisabilité des procédés de construction à base de Béton de Bois, Cahier du CSTB, Livraison 346, N°2703.

[24] : **Arnould.M et Virlogeux .M** (1986):granulats de béton légers, Presses de l'écolenationale des ponts et chaussées ; Paris.

[25] : **Bederina .M** (2007): Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger.

[26] : **Gotteicha.M.**, (2005). Contribution à la Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités, Thèse de Magister, U.A.T de Laghouat.

[27] : **BederinaM.**, (octobre2000). Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux : effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau, Thèse de Magister, 110 p.Université de A.Tledji de Laghouat, Algérie.

[28] : **Abdelmajid EL BOUARDI, Hassan EZBAKHE, TaibAJZOUL,Volker WITTWER** (15 au 17 Novembre 2005) : propriétés thermophysiques lors de changement de Structure granulaire - compact. Mesures et identifications; application aux matériaux a matrice déformable et expansés à l'air : cas de la vermiculites et polystyrène ; 12èmes Journées Internationales de Thermique ; Tanger, Maroc.

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

[30] :**Goual M. S** (2001): Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation d'un co-produit argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : caractérisation et comportement thermique, thèse Doctorat d'Etat soutenue le 28 février à l'ENP d'Alger. 148p.

[31] :**Boulamar Djezira ,Koriche Meriem** :Construction en béton cellulaire. Avantages et inconvénients, Juin 2018, Mémoire de Master , Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de : Génie Civil & Hydraulique Spécialité : Génie Civil Option : STRUCTURES.

[32] : [SATTI ISSAM : Etude 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.]

[33] : [Jos Cox , Jacques Sizaire , Pascal Meulders , Elly Van Overmeire, Albert Ingelaere : FeBeCel. Bruxelles.]

[34] : **Collectif syndicat national des fabricants de béton cellulaire, construire en béton cellulaire, Editeur Eyrolles 2011, page 14-15.**

[35] : **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire** : Le béton cellulaire matériau d'avenir, Belgique, fédération Belge du béton cellulaire (FeBeCel). Année non notée sur le document.

[36] : **[http://www.ciment.wikibis.com/beton\\_cellulaire.php](http://www.ciment.wikibis.com/beton_cellulaire.php), dernière visite le 21/01/2018.**

[37] : **UNTEC**, Mémento technico-économique du béton cellulaire 2012, syndicat national des fabricants de béton cellulaire, page 6.

[38] : **SAITI Issam** Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable d'une de la région de GHARDAIA, Mémoire de magister, université d'Ouargla 2014, 90 pages.

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

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

[41] : **B2 Caractéristiques physiques et mécaniques - Xella 2014 pages 68-80.**