

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civile

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Réalisé en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Option : matériaux de construction

Thème

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

Présenté par :

- Delalldja khaoula
- Boudrouaz khaoula

Encadré par :

- Noui Ammar
- Bouglada. M Salah

Soutenu le 16 / 11 / 2020

devant le jury :

- Président Y.ACHOUR
- Examineur A. BELKADI
- Examineur O.KESSAL

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Allah le tous puissant et le miséricordieux, tenons à remercier :

- ✚ Dr.Nouí.A , notre encadreur , pour sa confiance , sa patience , sa disponibilité et ses conseil.*
- ✚ Les jurés qui nous font honneur d'examiner ce travail*
- ✚ l'ensemble des enseignants du département de génie civil*
- ✚ Spécialement ,Mr .CHEMALI ,R pour ça générosité et son aide .*
- ✚ Les familles « BOUDEROUAZ » et « DELALLDJA » qui nous ont été d'un énorme soutient durant toute la période de la recherche.*
- ✚ Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de prés ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude*

DÉDICACES

j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

- ✚ A ma très chère mère , qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessés de prier pour moi .*
- ✚ A mon très chère père , pour ses encouragements son soutien, surtout par son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études .*
- ✚ A Mes frères Abdou , Yousef et sifou*
- ✚ A mes grand parent (que dieu prolonge leur vie)*
- ✚ A tous les membres de ma famille « Delalldja et Zehar »*
- ✚ A mon binôme ,mon bras droit , ma sœur « KHAOULA » et sa familles , qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail .*
- ✚ A tous mes ami (es) son exception , tous ceux qui j'ai passé des meilleurs moments et gardé de très bon souvenirs. et spécialement pour les étudiants du groupe matériaux*

Delalldja khaoula

Résumé

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus consommateur d'énergie. La rationalisation de la consommation énergétique conduit à la préservation de l'environnement contre le dégagement progressif des gaz carboniques dans l'atmosphère

Dans le domaine de la construction l'enveloppe du bâtiment est film protecteur soit vis-à-vis l'isolation thermique ou phonique pour cela les chercheurs visent toujours à innover un matériaux qui peut assurer une protection et un bon confort à l'intérieur du bâtiment par l'élimination des ponts thermiques avec le minimum possible de consommation énergétique, c'est dans ce cadre que notre investigation qui a un aspect purement expérimentale -si les conditions sanitaires ont été favorable- est proposé ; cherchons à développer une nouvelle méthode de formulation et de réalisation d'un béton cellulaire non autoclave à base de déchets industriels. De ce fait une recherche et une synthèse et coordination entre deux ouvrages scientifiques réalisés au laboratoire de L'Université El Bachir El Ibrahim est effectuée.

Les résultats obtenus à travers ces deux études sélectionnées ont été très encourageants permettant de recommander l'utilisation des matériaux locaux dans la formulation de ce type de béton innovant tout en respectant les normes et les valeurs normalisées notamment de la conductivité thermique et la résistance mécanique à la compression.

Mot clés : biosourcés , écologique, béton cellulaire , non autoclave

Abstract

The construction sector is one of the most energy-consuming sectors. The rationalization of energy consumption leads to the preservation of the environment against the gradual release of carbon dioxide into the atmosphere, in the field of construction the building envelope is protective film either vis-à-vis thermal insulation or phonics for this the researchers always aim to innovate a material that can ensure a protection and a pleasant atmosphere inside the building by eliminating thermal bridges with the minimum possible energy consumption. It is in this context that our investigation, which has a purely experimental aspect - if the sanitary conditions have been favourable - is proposed; seek to develop a new method of formulating and making a non-autoclave cellular concrete based on industrial waste. Of this fact a research and a synthesis and

coordination between two scientific works accomplished in the laboratory of L Université El Bachir El Ibrahim is to perform.

The results obtained through these two selected studies were very encouraging in recommending the use of local materials in the formulation of this type of innovative concrete while respecting standards and standardized values including thermal conductivity and mechanical resistance to compression.

KEYWORDS Biobased, aerated concrete, ecological, not autoclaved

ملخص

يعد قطاع البناء من أكثر القطاعات استهلاكًا للطاقة ، يؤدي ترشيد استهلاك الطاقة إلى الحفاظ على البيئة ضد الإطلاق التدريجي لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي . في مجال البناء ، يعتبر غلاف المبنى عبارة عن فيلم واقى إما تجاه العزل الحراري أو الصوت لذلك ، يهدف الباحثون دائمًا إلى ابتكار مادة يمكن أن تضمن الحماية والجو اللطيف داخل المبنى. عن طريق التخلص من الجسور الحرارية بأقل استهلاك ممكن للطاقة ، في هذا السياق ، يُقترح تحقيقنا ، الذي له جانب تجريبي بحت - إذا كانت الظروف الصحية مواتية إلى جانب تجريبي بحت - إذا كانت الظروف الصحية مواتية - يُقترح ؛ تتطلع إلى تطوير طريقة جديدة لصياغة وإنتاج الخرسانة الخلوية غير الأوتوكلاف المصنوعة من النفايات الصناعية نتيجة لذلك ، يتم إجراء البحث والتركيب والتنسيق بين عمليين علميين تم إجراؤهما في مختبر جامعة البشير الإبراهيمي.

كانت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هاتين الدراستين المختارتين مشجعة للغاية ، مما سمح لنا بالتوصية باستخدام المواد المحلية في صياغة هذا النوع من الخرسانة المبتكرة مع مراعاة المعايير والقيم الموحدة على وجه الخصوص التوصيل الحراري والمقاومة الميكانيكية.

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
- ❖ Revue bibliographique sur les méthodes des plans d'expérience

Chapitre II : Mode opératoire (matériels et matériaux de chaque étude).

- ❖ 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, suivies de références bibliographiques.

Sommaire

Résumé

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les bétons de séparation.....	2
I.1.Revue bibliographique sur les agro-bétons :	2
I.1.1. Introduction :.....	2
I.1.2. Béton de chanvre :	2
I.1.2.1. Le chanvre :.....	3
I.1.2.2 La chènevotte :	3
I.1.3. Propriété de la chènevotte :.....	4
I.1.3.1. Composition chimique de la chènevotte :	4
I.1.3.2. Hydrophile des granulats :.....	5
I.1.3.3. Microstructure de la chènevotte	6
I.1.3.4. Masses volumiques et porosité :.....	6
I.1.3.5. Absorption d'eau :.....	7
I.1.3.6. Conductivité thermique :.....	8
I.1.3.7. Propriétés mécaniques des bétons de chanvre :	9
I.1.4. Différentes techniques de mise en œuvre du béton de chanvre :	10
I.2.Revue bibliographique sur les bétons légers	11
I.2.1. Introduction :.....	11
I.2.2. Définition et types :.....	11
I.2.3. Classification du béton léger :.....	13
I.2.4. Propriétés des bétons légers :.....	14
I.2.4.1. Légèreté :.....	14
I.2.4.2. Porosité :.....	15
I.2.4.3. Comportement et performances mécaniques :	17
I.2.4.4. Propriétés thermiques :.....	20
I.2.5. Domaine d'utilisation :	22
I.2.6.les avantages des bétons légers	23
I.2.7. Conclusion	24

Recherche bibliographique sur les bétons cellulaires	25
I.3.1. Introduction :	25
I.3.2. Définition	25
I.3.3. Composition :	25
I.3.4. La structure :	26
I.3.5. Propriété de béton cellulaire :	29
I.3.5.1. La densité :	29
I.3.5.2. Résistance à la compression :	31
I.3.5.3. La résistance à la traction :	32
I.3.5.4. Résistance aux agents chimiques	33
I.3.5.5. Résistance au gel et dégel.....	33
I.3.5.6. Conductivité thermique :	33
I.3.5.9. Résistance au feu :	36
I.3.5.9..Légèreté.....	36
I.3.5.10. conductivité Acoustique :	37
I.3.6. Utilisation :	38
I.3.7. Conclusion :	38
I.4.Revue bibliographie sur les matériaux bio sources	40
I.4.1. Introduction :	40
I.4.2. Généralités :	41
I.4.3. Pourquoi le biosourcé ?.....	41
I.4.4. Quels sont les matériaux biosourcés utilisés dans le bâtiment ?.....	42
I.4.5.1. Exemples de produits de construction issus du bois et leurs caractéristiques.....	43
I.4.5.3. Exemples de produits de construction issus du lin et leurs caractéristiques :	45
I.4.5.4. Exemples de produits de construction issus de la paille et leurs caractéristiques : ...	46
I.4.5.5. Exemples de produits de construction issus de la ouate de cellulose :	47
I.5.Méthodes des plans d'expériences	50
I.5 .1.Introduction.....	50
I.5 .2. Définition	51
I.5 .3. Le principe	51
I.5 .4 : Démarche méthodologique	51

I.5 .5. Analyse des résultats.....	53
I.5 .6. Terminologie.....	53
I.5 .6.1 : Les différents types de facteurs.....	53
I.5 .6.2. Notion d'espace expérimental	54
I.5 .7. Intérêts des plans d'expériences	56
I.5 .8. Méthodologie des plans d'expériences.....	57
I.5 .8.1. La recherche des facteurs influents	57
I.5 .8.2. La modélisation	57
I.5 .8.3. L'optimisation.....	57
I.5 .9. Présentation de logiciel « Design-Expert ».....	57
Chapitre II : Mode opératoire (Matériel et Matériaux).....	58
II.1. Introduction	58
Partie 1 :Béton cellulaires a base d'un sable préparé.....	58
II.2. Matériels utilisés.....	58
II.3. Les caractéristiques des matériaux utilisent	58
II.3.1. Sable d'Oued Souf	58
II.3.2. Sable concassé	59
II.3.3. Ciment Matine 42.5	60
II.3.4. La poudre d'alumine.....	62
II.3.5. Eau de gâchage	63
II.3.6. La chaux éteinte	64
II.3.7. Les ajouts minéraux	65
II.3.8. Superplastifiants.....	66
II.3.9. La formulation du béton cellulaire.....	67
II.4. Types de béton formulés.....	67
II.5. Confection et contrôler l'éprouvette.....	67
II.5.1. Malaxage de béton	67
II.5.2. conservation dans l'étuve.....	68
Partie 2 : béton cellulaires biosourcées a base de déchet industrielles	68
II.6 . les matériels utilisés.....	68
II.7. Les caractéristiques des matériaux utilisent	68

□ Sable d'oued Souf	68
□ Ciment Matine 42.5.....	68
□ Déchet de bois (bois recyclée) :	69
□ Déchet de bois neuf (la ouate de cellulose).....	69
Chapitre III: présentation et analyses les résultats	70
III.1 Introduction	70
III.2 résultats et discussion Du béton cellulaire a base de sable préparé	70
III.2.1 résistance à la compression (sable oued souf)	70
III .2.1.1.Discussion et interprétation	70
III.2.2 résistance à la compression (sable concasse)	71
III.2.2.1 Discussion et interprétation	71
III.2.3. masse volumique	71
III.2.3.1. Discussion et interprétation	72
III.2.4 conductivité thermique.....	72
III.2.4.1. Discussion et interprétation	74
III. 3. résultats et discussion du béton cellulaire biosourcés	74
III.3.3.Interprétation et Discussion.....	86
Chapitre IV :Conclusion générale.....	87
IV.1.conclusion	87
IV.2.Recommandations et perspectives de recherches	89
Liste des références.....	83

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: (A) PLANT DE CHANVRE (B) PHOTOGRAPHIE D'UNE TIGE DE CHANVRE	3
FIGURE 2: ABSORPTION D'EAU DE 13 TYPES CHENEVOTTES PENDANT 48 H [9] – B) ABSORPTION D'EAU D'UNE PARTICULE DE CHENEVOTTE AU COURS DU TEMPS OBSERVEE PAR IRM [10]....	5
FIGURE 3: COUPE TRANSVERSALE A) ET LONGITUDINALE B) D'UNE CHENEVOTTE AVEC DIFFERENTES TAILLES DE PORES VISIBLES (1 ET 2) [11]	6
FIGURE 4: EAU ABSORBEE PAR LES GRANULATS DE CHENEVOTTE INITIALEMENT SECS EN FONCTION DU TEMPS [14], [15]	7
FIGURE 5: COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION D'EPROUVETTES DE BETON DE CHANVRE CONSERVEES ENTRE 28 ET 90 JOURS A 50 % HR ET 20°C [21].	9
FIGURE 6: DIFFERENTES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE [28]	10
FIGURE 7: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE BETONS LEGERS [35]	13
FIGURE 8: BETON NORMAL A GAUCHE ET BETON LEGER A DROITE AYANTS LE MEME POIDS [38]	15
FIGURE 9: POROSITE DU BETON [39]	16
FIGURE 10: LA RESISTANCE SUR PRISME EN COMPRESSION A 28J (MPA) EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE [41]	17
FIGURE 11: REPARTITION DE LA POROSITE DE TROIS BETONS CELLULAIRES AUTOCLAVES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES [42]	18
FIGURE 12: CONDUCTIVITE THERMIQUE λ EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE DU BETON CELLULAIRE [45]	21
FIGURE 13: COMPOSITION DE BETON CELLULAIRE [49]	26
FIGURE 14: STRUCTURE DU BETON CELLULAIRE (ECHELLE 1/1)	27
FIGURE 15: STRUCTURE DU BETON CELLULAIRE VUE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE [47]	27
FIGURE 16: REPARTITION DES CELLULES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE	28
FIGURE 17: CORRESPONDANCE ENTRE LE VOLUME DE LA MATIERE PREMIERE ET LE VOLUME DU BETON CELLULAIRE	29
FIGURE 18: TRANSFERT DES CONTRAINTES DANS LE BETON ORDINAIRE ET DANS LE BETON CELLULAIRE	31
FIGURE 19: RESISTANCE AU FEU	36
FIGURE 20: LA LEGERETE D'UN BETON CELLULAIRE	36
FIGURE 21: ACOUSTIQUE	37
FIGURE 22: QUELQUES BIORESSOURCES POUVANT TROUVER LEUR PLACE DANS LE BATIMENT. [57]	43
FIGURE 23: FAMILLES DE PRODUITS BIOSOURCES UTILISES DANS LA CONSTRUCTION POUR CHAQUE TYPE D'APPLICATION	50
FIGURE 24: LE NIVEAU BAS, LE NIVEAU HAUT, ET LE DOMAINE D'UN FACTEUR	54
FIGURE 25: L'ESPACE EXPERIMENTAL D'UN FACTEUR	55
FIGURE 26: LES POINTS EXPERIMENTAUX DANS UN ESPACE	55
FIGURE 27: LES POINTS EXPERIMENTAUX DANS UN DOMAINE D'ETUDE	56
FIGURE 28: COURBE GRANULOMETRIQUE DU SABLE CONCASSE	59
FIGURE 29: CIMENT MATINE 42.5	60
FIGURE 30: LA CHAUX VIVE	64
FIGURE 31: DECHET DE BOIS (BOIS RECYCLEE)	69
FIGURE 32: LA OUATE DE CELLULOSE	70
FIGURE 33: EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE SABLE PREPARE (OUED SOUF) A 28 JOURS	70

FIGURE 34: EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE SABLE PREPARE (CONCASSE) A 28 JOURS.....	71
FIGURE 35:DENSITES DES TOUS TYPES DE BETON CELLULAIRE	72
FIGURE 36: LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BETON CELLULAIRE A BASE DES DEUX SABLES PREPARES SANS ADJUVANT	73
FIGURE 37:LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BETON CELLULAIRE A BASE DES DEUX SABLES PREPARES AVEC ADJUVANT	74

LISTE DES TABLEAUX :

TABLEAU 1: COMPOSITION DE DIFFERENTES CHENEVOTTES [7]	5
TABLEAU 2:MASSES VOLUMIQUES ET POROSITES DU GRANULAT DE CHENEVOTTE [13].....	7
TABLEAU 3:TAUX D'ABSORPTION EN EAU DE DIFFERENTS GRANULATS DE CHENEVOTTE APRES 5 MINUTES D'IMMERSION (SELON LES AUTEURS).....	8
TABLEAU 4: CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS EN FONCTION DE LA DENSITE [37].....	13
TABLEAU 5:TABLEAU I. 4CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS SELON LA MASSE VOLUMIQUE [40].....	16
TABLEAU 6:FORMULES EMPIRIQUES RELIANT LA RESISTANCE A LA COMPRESSION, LA COMPOSITION ET LA POROSITE [43].....	18
TABLEAU 7: EQUATIONS PREDICTIVES DU MODULE D'ELASTICITE E DU BETON CELLULAIRE [43]	19
TABLEAU 8:TABLEAU I. 7CARACTERISTIQUES DE QUELQUES BETONS LEGERS [39]	20
TABLEAU 9:CLASSIFICATION DU BETON CELLULAIRE SELON LA MASSE VOLUMIQUE ET LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	30
TABLEAU 10:CATEGORIES BLOCS.....	31
TABLEAU 11:RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON CELLULAIRE SELON LA DENSITE.....	32
TABLEAU 12: VALEURS CARACTERISTIQUES DE LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION .	33
TABLEAU 13: VALEURS DE BASE	34
TABLEAU 15: COMPARAISON ENTRE LE BETON CELLULAIRE ET LES AUTRES MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....	35
TABLEAU 14:VALEURS UTILES DES MURS EN BETON CELLULAIRE COLLES	35
TABLEAU 16: TABLEAU COMPARATIF	49
TABLEAU 17:LES CARACTERISATIONS DE SABLE D'OUED SOUF	59
TABLEAU 18:LES CARACTERISATIONS DE CIMENT MATINE 42.5.....	60
TABLEAU 19: COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT UTILISE.....	61
TABLEAU 20: : COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CIMENT UTILISE.....	61
TABLEAU 21:LA POUDRE D'ALUMINE.....	62
TABLEAU 22: L'ANALYSE CHIMIQUE DE LA POUDRE FINE ALUMINIUM	62
TABLEAU 23:LES CARACTERISATIONS CHIMIQUES DE L'EAU DE GACHAGE D'UNVBBA.....	63
TABLEAU 24:COMPOSITION CHIMIQUE DE LA CHAUX RESIDUAIRE DE LINDE	64
TABLEAU 25: ANALYSE CHIMIQUE DES AJOUTS	65
TABLEAU 26: : LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES AJOUTS UTILISES.	66
TABLEAU 27: PRESENTE QUELQUES CARACTERISTIQUES DE CE PRODUIT.	66

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Durant des siècles, le monde souffre d'un problème très important : l'altération de l'écologie. La pollution, la destruction d'une couche d'ozone, les décharges nombreuses et les autres actions humaines ont des effets néfastes pour l'environnement et de cette façon tuent notre planète chaque jour. Aujourd'hui, nos maisons consomment 40 % de l'énergie mondiale et ils sont à l'origine de 36 % des émissions de CO₂.

Et comme solution on propose des constructions intelligentes, combinant une technologie respectueuse de l'environnement et une approche attentive aux besoins des habitants.

Le secteur du bâtiment génère des déchets et des émissions de polluants qui affectent fortement l'environnement. Dans ce contexte, l'utilisation de granulats issus de plantes végétales dans la fabrication des matériaux de construction peut contribuer à réduire efficacement les émissions de gaz à effet de serre grâce à leurs capacités à capter le CO₂.

Les éco matériaux se présentent alors comme une alternative écologique aux matériaux de construction usuels qui font souvent appel à des procédés d'extraction et de fabrication très énergivores. Bien qu'ils ne soient pas définis par des critères précis à l'heure actuelle, les éco matériaux de construction se caractérisent par leur qualité environnementale (impact carbone global), leurs performances hygrothermiques (confort intérieur, inertie thermique, perméabilité à la vapeur d'eau) ou encore le caractère local des matières premières qu'ils incorporent. Cela soulève la réflexion des chercheurs pour se tourner vers les matériaux biosources, qui aide fortement dans l'isolation et la conforté thermique.

Ainsi que le béton cellulaire, les techniques de production de béton cellulaire sont maîtrisées depuis plusieurs décennies et l'utilisation de tels bétons pour réaliser l'enveloppe de bâtiments est commune la fabrication du béton cellulaire repose sur une synthèse hydrothermale d'un liant de type silicate de calcium obtenu à partir d'un mélange de chaux et de silice. L'aspect alvéolaire est induit par l'ajout de poudre d'aluminium dans le mélange basique, ce qui conduit à la libération d'hydrogène

Chapitre 1

Revue bibliographique 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 :

Afin de limiter son impact environnemental, le secteur du bâtiment gros consommateur de matériaux de construction, doit réduire l'utilisation de matières premières d'origines fossiles . parmi les diverses solutions envisagées, on trouve l'utilisation de matériaux agro-sourcés ces derniers présentent un intérêt par les enjeux environnementaux liés à l'optimisation des ressources naturelles mais aussi pour leur performances en tant qu'éléments constitutif de l'enveloppe du bâtiment [1]

Depuis quelques décennies, le retour à des modes de construction plus anciens associant des matières d'origine végétale avec un liant minéral suscite un intérêt grandissant. Le label « bâtiment biosourcé » vise à promouvoir l'utilisation de ressources renouvelables et locales (paille de chanvre, lin, ouate de cellulose) possèdent une faible énergie grise par rapport à d'autres matériaux de construction, qui permettant d'isoler les bâtiments en contribuant également à un stockage temporaire de carbone durant le cycle de vie.

➤ 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 :

« 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 obtenu par le mélange d'un liant à base de chaux (souvent chaux hydraulique + chaux aérienne) de granulats chènevotte et d'eau

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Le béton de chanvre est un matériau composite léger et à faible conductivité thermique. C'est la très faible masse volumique apparente de la chènevotte associée à sa structure alvéolaire qui lui confère cette qualité. Ce composite présente, en outre, une faible empreinte écologique. La résistance mécanique de ce matériau, du fait de la nature de son granulat, reste faible (< 2 MPa), il ne peut donc être employé comme élément de structure [2]

I.1.2.1. Le chanvre :

Le chanvre (« Cannabis Sativa ») est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 mètres (Figure 1). Cette espèce est dédiée à la culture du chanvre industriel et se trouve en Asie Centrale et en Europe. La croissance du chanvre dure environ 4 mois [3], [4]. Lorsque la plante est mature, la tige est fauchée puis conservée sur place quelques semaines (rouissage). Lorsque le taux d'humidité de la tige est proche de 15%, celle-ci est récoltée et conduite vers un défibreur mécanique qui permet de séparer la matière ligneuse de la fibre libérienne.

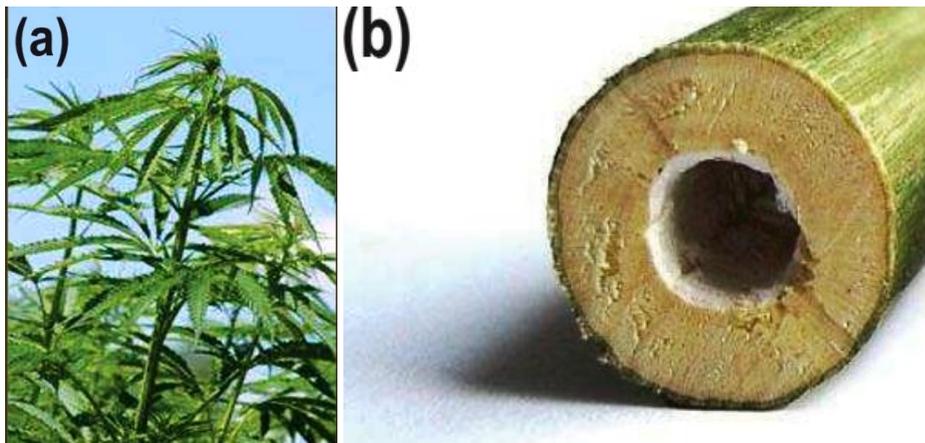


Figure 1: (a) Plant de chanvre (b) Photographie d'une tige de chanvre

I.1.2.2 La chènevotte :

Est la partie ligneuse de la tige de chanvre, représentant 40% à 60% de sa masse. La taille de la chènevotte commercialisée est généralement comprise entre 0,5 mm à 3cm de long. Il existe deux types de chènevottes :

- La chènevotte défibrée : issue des usines de défibrage, d'un beige très clair, représentant 55% de la paille.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

- La chènevotte fibrée : issue du massicotage des pailles, d'un beige ocre, contenant encore les fibres corticales, représentant 85 à 90% de la paille de chanvre. [5]

I.1.3. Propriété de la chènevotte :

I.1.3.1. Composition chimique de la chènevotte :

La paroi végétale de la chènevotte est composée principalement de cellulose, d'hémicellulose, et de lignine.

La cellulose est le composé le plus présent dans la chènevotte. Il s'agit d'un polysaccharide composé de monomère de glucose. Les chaînes de cellulose s'arrangent en zone cristalline et forment des micro fibrilles. Elles sont insolubles dans l'eau mais hydrophiles grâce aux nombreuses fonctions hydroxyles présentes sur la chaîne

L'hémicellulose est aussi un polysaccharide mais composé de plusieurs monosaccharides, comme le fructose, le mannose ou le glucose, mais aussi d'acides uroniques. L'hémicellulose entoure les micro fibrilles et les lie entre elles. Elle est insoluble dans l'eau à pH neutre mais soluble à pH basique. La cellulose et l'hémicellulose sont majoritairement présentes dans les parois primaires et secondaires pour former une cellule

La lignine est un polymère amorphe composé de monomères phénoliques. La lignine sert à faire le lien entre les différentes cellules, comme le montre la concentration en lignine. Elle aussi est insoluble dans l'eau mais hydrophobe.

La pectine est un autre composé pariétal. Elle est composée d'acides uroniques. On la retrouve principalement autour des fibres, mais peut aussi être présente dans la chènevotte. Elle est soluble dans l'eau.

Enfin, en plus de la pectine, des molécules non pariétales contenues dans la chènevotte peuvent être extraites dans l'eau. On trouve des composés aromatiques comme les tannins, des composés aliphatiques comme les terpènes, des protéines, des cires, ainsi que des oligomères ou des monomères des composés pariétaux [6]

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

La composition chimique de la chènevotte est donc complexe au vu de la quantité de molécules en présence. Elle peut varier en fonction des conditions climatiques ou du sol lors de la croissance de la plante, mais aussi du temps ou de la qualité du rouissage (procédé industriel se servant de l'action de microorganismes pour faciliter le défibrage). La composition chimique du chanvre est donnée dans le Tableau I-1, basée sur les résultats de 9 chènevottes différentes [7] provenant de France et d'Italie

Tableau 1: Composition de différentes chènevottes [7]

Méthode	Cellulose (%)	Hémicellulose(%)	Lignine(%)	Cendre(%)	Autres(%)
Van Soes	50,2 ± 1,8	24,1 ± 1,8	12,4 ± 1,0	5,9 ± 0,6	13,2 ± 1,4

I.1.3.2. Hydrophile des granulats :

Les granulats sont très hydrophiles, ils sont capables d'absorber en quelques minutes près de 200 % de leur masse en eau (Figure I-6.a) [8]. Après 48 h, leur teneur en eau peut dépasser 400 %. La Figure I-6.b montre que l'eau pénètre d'abord dans les vaisseaux et dans la partie centrale de la tige, puis après quelques heures, dans les trachéides de la chènevotte.

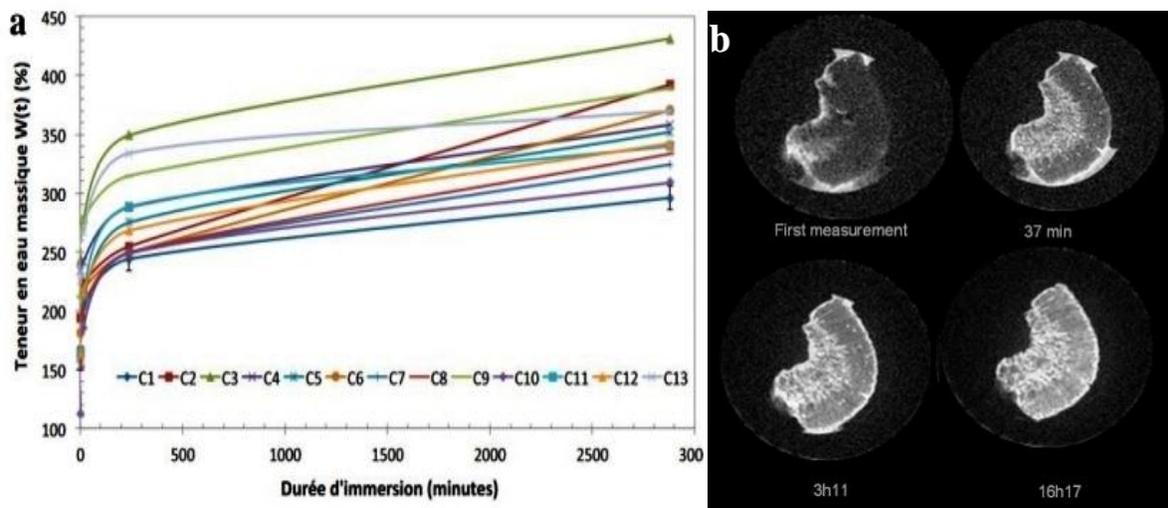


Figure 2: Absorption d'eau de 13 types chènevottes pendant 48 h [9] – b) absorption d'eau d'une particule de chènevotte au cours du temps observée par IRM [10]

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

I.1.3.3. Microstructure de la chènevotte

Le bois de la plante permet à la sève de s'écouler durant la vie de la plante. Il est donc composé de multiples cellules qui sont remplies d'air après le séchage du chanvre. Cette porosité de la chènevotte est visible sur les images obtenues au microscope électronique à balayage (Figure I-4). Deux tailles de cellules sont visibles. Les plus grandes cellules sont appelées vaisseaux (1) et ont une taille de 45 à 85 μm . Les trachéides (2) sont les plus nombreuses et les plus petites cellules, avec un diamètre de 10 à 30 μm [11]. Il est aussi possible d'observer la microstructure par tomographie des rayons X, microscopie optique, et microscopie à fluorescence [12]

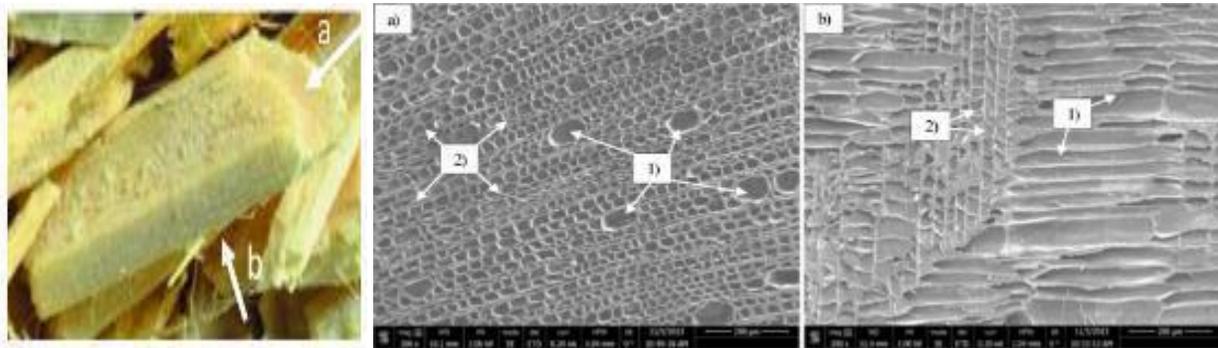


Figure 3: Coupe transversale a) et longitudinale b) d'une chènevotte avec différentes tailles de pores visibles (1 et 2) [11]

I.1.3.4. Masses volumiques et porosité :

Les masses volumiques d'un granulat de chènevotte pure provenant de la Chanvrière de l'Aube ont été déterminées par Nguyen [13] et sont reportées dans le Tableau 2.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Tableau 2: Masses volumiques et porosités du granulat de chènevette [13]

ρ_B : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (kg.m^{-3})	103
ρ_T : Masse volumique apparente (vraie) des particules sèches (kg.m^{-3})	256
ρ_S : Masse volumique absolue ^a (kg.m^{-3})	1465
Porosité totale : $\eta_{\text{Tot-Gr}} = 1 - \rho_B/\rho_S$	93%
Porosité inter-granulaire : $\eta_{\text{Inter}} = 1 - \rho_B/\rho_T$	60%
Porosité intra-granulaire des particules isolées : $\eta_{\text{Intra-P}} = 1 - \rho_T/\rho_S$	82%
Porosité intra-granulaire par rapport au mélange : $\eta_{\text{Intra/Tot}} = \eta_{\text{Intra-P}}(1 - \eta_{\text{inter}})$	33%

^aMasse volumique de la phase solide

La masse volumique en vrac du granulat de chènevette est de l'ordre de 100 kg.m^{-3} . La masse volumique apparente d'une particule a été mesurée à partir d'une section de tige de chanvre défibrée et la masse volumique absolue par pycnomètre. Ces valeurs mettent en évidence la forte porosité intra-particule qui est considérée comme majoritairement ouverte [14], [13]. La porosité totale de l'assemblage granulaire en vrac s'élève à plus de 90% selon Nguyen [13].

I.1.3.5. Absorption d'eau :

Les résultats des essais d'absorption en eau mènes par Cerezo [14] et Couedel [15] sur des granulats de chènevette sont reportés en Figure 4 .

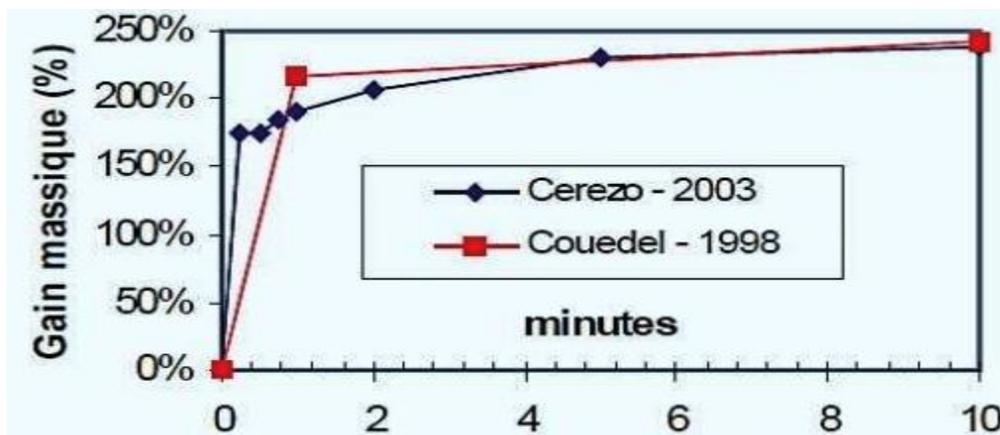


Figure 4:: Eau absorbée par les granulats de chènevette initialement secs en fonction du temps [14], [15]

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

La cinétique d'absorption d'eau se montre très rapide durant les premières minutes. Le pourcentage d'absorption en eau après 5 minutes d'immersion a été déterminé par plusieurs auteurs (Tableau 3). Il se situe entre 200% et 300% [16]–[17], [18]. Au-delà de 2 à 5 minutes, la cinétique d'absorption chute très fortement. Toutefois, le granulat de chènevotte peut absorber jusqu'à 4 fois sa masse en eau (400%) avant d'arriver à saturation complète après 48 heures d'immersion. Ce constat laisse présager une compétition importante pour la mobilisation de l'eau entre la chènevotte et l'hydratation du liant minéral. Par conséquent, la gestion des transferts hydriques entre liant minéral et granulat végétal est un paramètre qui influence largement les performances mécaniques finales des bétons de chanvre.

Tableau 3: Taux d'absorption en eau de différents granulats de chènevotte après 5 minutes d'immersion (selon les auteurs)

Taux d'absorption	
260	Nguyen [17]
280	Nozahic et al. [18]
225	Cerezo [14] et Couedel [15]
225	Arnaud et Gourlay [16]

I.1.3.6. Conductivité thermique

Des mesures de conductivité thermique ont été réalisées par Cerezo [14] sur un granulat de chènevotte en vrac à l'état sec. Les valeurs obtenues se situent entre 0,048 W.m-1.K-1 et 0,058 W.m-1.K-1. Elles dépendent de la porosité totale de l'empilement granulaire. Nozahic [19] a mesuré la conductivité thermique d'un granulat de chènevotte conservé dans une ambiance à 20°C et 35%HR. Il a obtenu une conductivité thermique de 0,072 W.m-1.K-1. Il a comparé cette valeur à celle obtenue après étuvage à 60°C pendant 48 heures (état sec) égale à 0,057 W.m-1.K-1. Ce résultat permet de mettre en évidence l'influence de la présence d'eau liquide dans les pores sur la conductivité thermique de matériaux hygroscopiques.

Cette tendance sera d'autant plus importante à l'échelle de l'agro béton.

On note que la conductivité thermique du granulat de chènevotte est à peine plus élevée que celle de matériaux isolants comme les laines minérales qui est généralement comprise

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

entre 0,03 et 0,045 W. m-1.K-1 [20].

I.1.3.7. Propriétés mécaniques des bétons de chanvre

De nombreuses recherches sont consacrées à l'étude des propriétés mécaniques du béton de chanvre, en mesurant notamment leur résistance à la compression. Les courbes de contrainte-déformation d'un béton de chanvre mesurées après différents temps de séchage à différentes échéances sont présentées Figure I-22 [21].

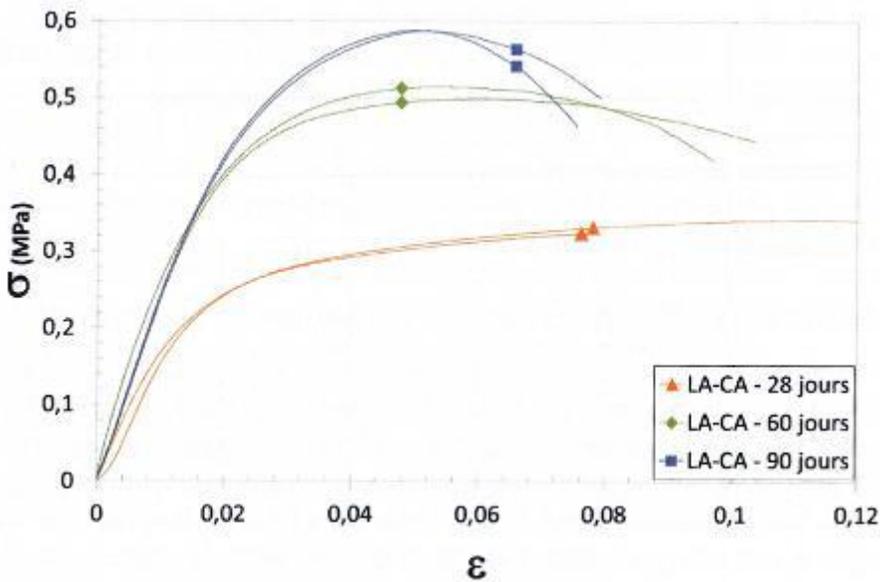


Figure 5: Courbes contrainte-déformation d'éprouvettes de béton de chanvre conservées entre 28 et 90 jours à 50 % HR et 20°C [21].

Aux faibles déformations, le béton de chanvre a un comportement élastique linéaire. La déformation est faible alors que la contrainte augmente rapidement. C'est le liant qui subit l'effort. Dans un second temps, la pente diminue petit à petit, il n'y a plus de linéarité. Le matériau a alors un comportement élastoplastique. Le liant se fissure, une décohésion des particules de chanvre est possible. Cette zone se termine au maximum de contrainte σ_{max} , qui correspond à la résistance maximale à la compression.

On observe que la résistance en compression augmente quand le temps de séchage augmente, car les réactions d'hydratation et de carbonatation se poursuivent pendant plusieurs mois après la fabrication des bétons de chanvre.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Différents paramètres influencent les propriétés mécaniques de béton de chanvre, comme le comportement des granulats (propriétés physiques [21].ou chimiques[22].), le choix du liant [23] , [24], le compactage des éprouvettes [25][26] ou les conditions de cure [27].

I.1.4. Différentes techniques de mise en œuvre du béton de chanvre

Différentes techniques sont utilisées pour fabriquer le béton de chanvre (*Figure 6*).



Figure 6: Différentes techniques de mise en œuvre [28]

Pour la fabrication du béton de chanvre banché, les différents constituants sont mélangés dans une bétonnière ou un malaxeur sur site [29]. Le béton frais est ensuite mis en place et compacté manuellement dans un coffrage ou des banches. Pour cette technique, une quantité d'eau importante est nécessaire pour éviter que la chènevotte n'absorbe l'eau utilisée pour l'hydratation du liant. Un séchage est ensuite nécessaire avant de mettre un enduit. Celui-ci peut prendre plusieurs mois.

Le béton de chanvre projeté utilise moins d'eau, le séchage est donc plus rapide [30]. La technique consiste dans un premier temps à mélanger la chènevotte et le liant. Dans un second temps, ce mélange et l'eau sont pulvérisés. Le compactage se fait par la puissance de la projection.

Des blocs de bétons de chanvre préfabriqués sont aussi disponibles [31]. Les blocs ne nécessitent pas de séchage et les enduits peuvent être directement appliqués après la mise en place des parois. De plus la préfabrication permet de garantir une qualité et une constance des propriétés grâce à un contrôle qualité des blocs.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

En fonction de l'application, différentes étapes de mise en œuvre doivent être respectées d'après les règles de construction, notamment afin de limiter la quantité d'eau dans le matériau. Ainsi par exemple, un mur de soubassement doit être présent dans le cas d'une isolation d'un mur par l'extérieur, un système d'évacuation d'eau doit être installé pour une formulation sol en contact avec de la terre, aucun matériau imperméable à la vapeur ne doit être utilisé et une période de séchage doit précéder l'application de l'enduit.

I.2.Revue bibliographique sur les bétons légers

I.2.1. Introduction

Les bétons légers connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, dans cette période connaissent un regain d'intérêt, qui semble tout a fait mérité en raison de leurs propriétés. Il est très important de bien définir dès le départ, ce qu'est un béton léger, La commission R.I.L.E.M des bétons légers propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 Kg/m³. Cependant d'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes, CORMON appelle béton léger un béton dont la masse volumique apparente à 28j inférieure à 1800 Kg/m³ (1973) dans les conditions normales de conservation (température de 20° et 65% d'humidité relative). De même L'American concrete Institute limite la masse volumique apparente des bétons à 1800 Kg/m³ après séchage à l'air pendant 28 jours. Par contre SHORT et KINNIBURG considèrent que la masse volumique apparente sèche d'un béton léger doit être inférieurs à 1775 Kg/m³. Ainsi en Allemagne fédérale la norme DIN1042. Parue en 1972, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 Kg/m³. En fin la masse volumique après séchage comprise entre 800 et 2100 Kg/m³ entièrement ou partiellement réalisés avec des granulats légers. Il est donc bien difficile de donner une définition précise des bétons en se basant sur une limite supérieure de la masse volumique apparente. Cependant la définition avancée par CORMON semble la plus intéressante, car elle est proche des valeurs limites de masse volumique généralement admises et surtout car elle est la plus précise quant aux conditions de conservation du béton et à la date de mesure[32]

I.2 2. Définition et types

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m³ [33].

D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m³.

Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ [34].

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs **masses volumiques** et **ces résistances variées**. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction.

En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction.

Pour développer un béton léger, ont doit prendre en considération deux aspects :

- 1) les particularités en matière de formulation des bétons légers,
- 2) la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplacent une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- soit dans les granulats ;
- soit dans la pâte de ciment ;

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :

- les bétons cellulaires ;
- les bétons sans fines (caverneux) ;
- les bétons de granulats légers (argile expansé)

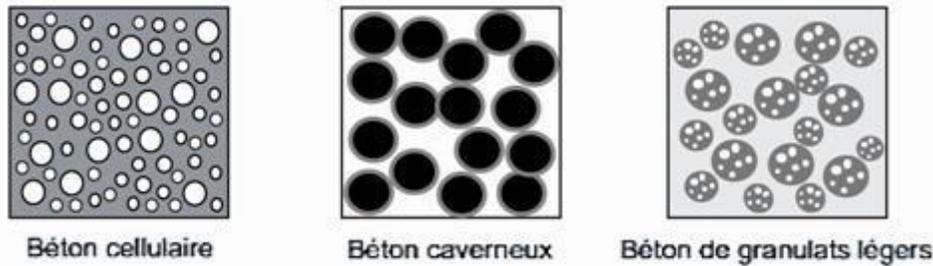


Figure 7: Représentation schématique des différents types de bétons légers [35]

1.2.3. Classification du béton léger

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. il s'agit :

- de la masse volumique sèche, désignée par γ_{bs} ;
- de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en Kg/m³. [36]

Tableau 4: Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [37]

Classe de densité	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Kg/m ³	901 à 1000	1001 à 1200	1201 à 1400	1400 à 1600	1601 à 1800	1801 à 2000

La nouvelle version de la norme EN 206 classe les bétons suivant les fourchettes de masse volumiques indiquées dans le tableau ci-dessous :

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Tableau : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [36]

Classe du masse volumique	LC 1,0	LC1,2	LC1,4	LC1,6	LC1,8	LC2,0
Kg/m ³	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

Une autre classification pour béton léger basée sur la masse volumique est logique, puisque la Masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R -87^{13.141} classifie les béton en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m³) en trois catégories :

- **le béton léger de structure** : 1350 – 1900 kg/m³

Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

- **le béton léger de faible masse volumique** : 300 – 800 kg/m³

A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m³ n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, $R_c < 7$ MPa

- **le béton de résistance moyenne se situe entre les deux** :

Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa

I.2.4. Propriétés des bétons légers :

I.2.4.1. Légèreté :

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/ m³ alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/ m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire. L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturer sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction.

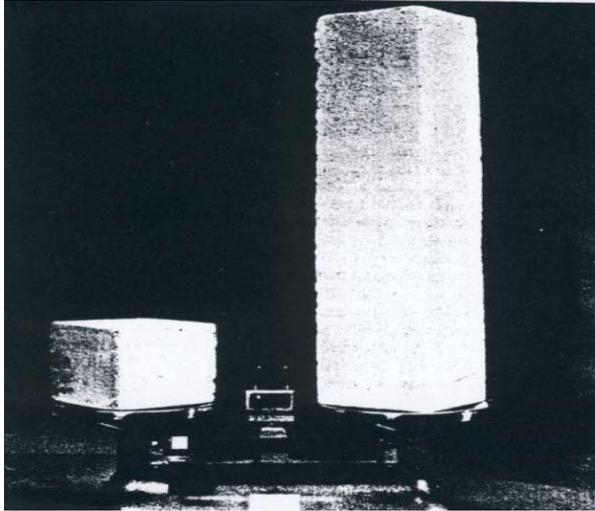


Figure 8: Béton normal à gauche et béton léger à droite ayant le même poids [38]

I.2.4.2. 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 (\AA) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

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

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 ϕ_l . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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.

$$\phi_l = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}} \quad \text{Avec :}$$

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

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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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.

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

Vvide : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m³).

Vt : volume total occupé par le matériau (m³).

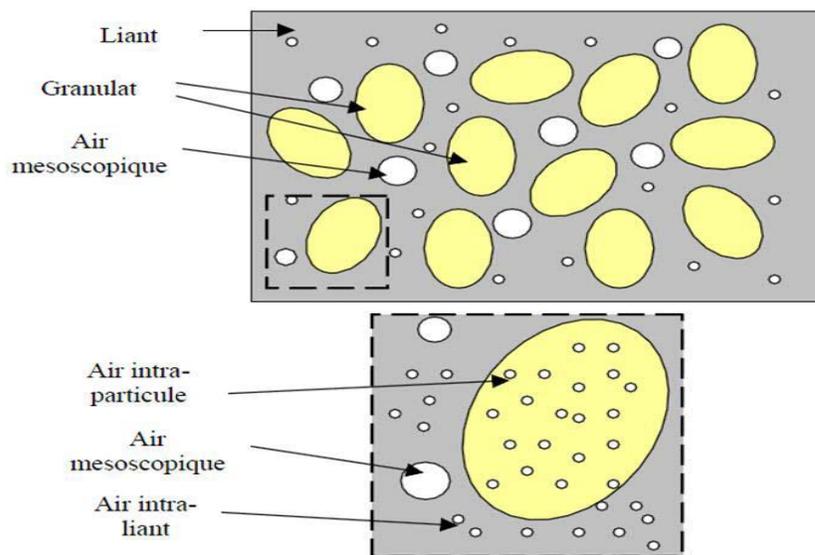


Figure 9: Porosité du béton [39]

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 [39].

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 5: Tableau I. 4 Classification des bétons légers selon la masse volumique [40]

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0.0001mm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

0.0001 à 2.5mm	Porosité capillaire	Eau capillaire et eau gravitaire
>2.5mm	Macroporosité	eau gravitaire dominante

I.2.4.3. 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 ϕ_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 ϕ_g diminue. Des campagnes expérimentales ont mis en relation performances mécaniques et masse volumique ρ 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.

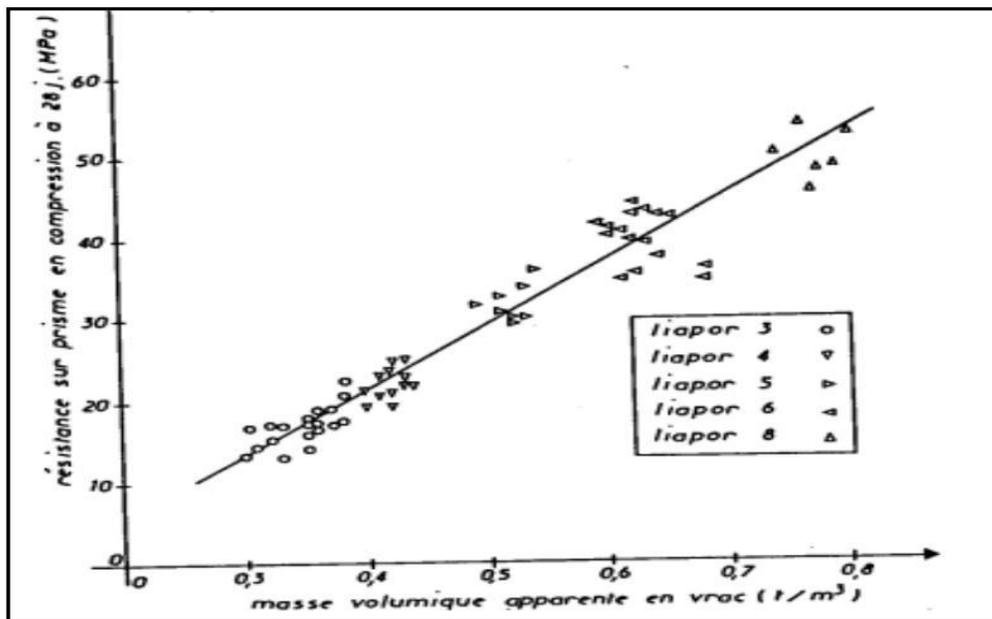


Figure 10 : La résistance sur prisme en compression à 28j (MPa) en fonction de la masse volumique [41]

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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

macrospores (diamètre supérieur à 60 μm) et les micropores (diamètre < 60 μm) avec une répartition de $\frac{3}{4}$ de macrospores pour $\frac{1}{4}$ de micropores [42].

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.

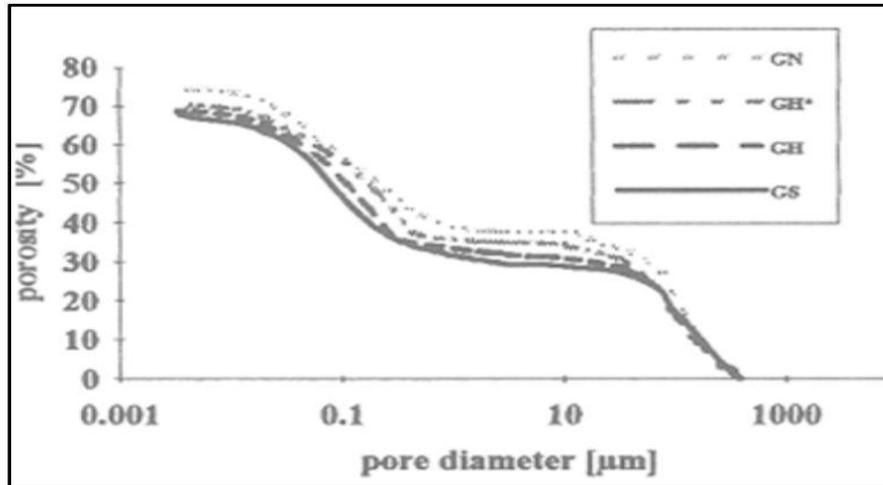


Figure 11: Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [42]

Tableau 6: Formules empiriques reliant la résistance à la compression, la composition et la porosité [43]

	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	$\sigma = \sigma_0 (1 - p)^n$	σ_0 : résistance à porosité 0	p : porosité du béton cellulaire

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Tableau 7: Equations prédictives du module d'élasticité E du béton cellulaire [43]

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

Tableau 8:Tableau I. 7Caractéristiques de quelques bétons légers [39]

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

I.2.4.4. Propriétés thermiques :

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ . 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 est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau[44].

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, 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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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 $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [39].

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.

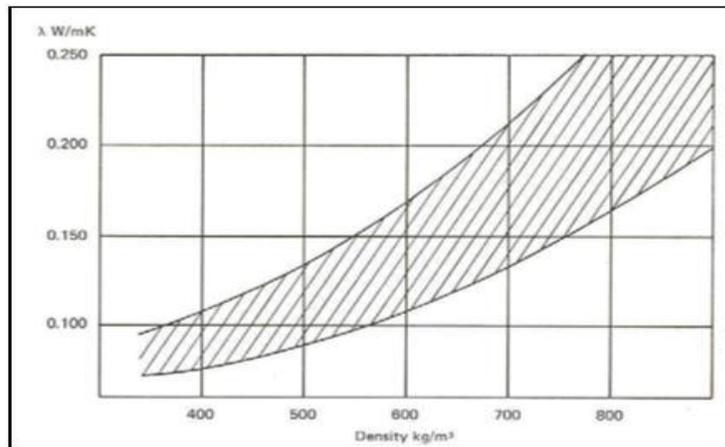


Figure 12 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [45]

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/(kg.K) . Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C . Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure [39].

Enfin, à partir de la conductivité λ 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.2.5. Domaine d'utilisation :

Les domaines d'utilisation préférentiels des bétons légers sont divers, on peut les diviser en trois domaines d'utilisation :

1) **des bétons d'isolation pure, non porteurs** : leur masse volumique est faible (600 kg/m³) de même que leur résistance à la compression (de 1,5 à 5 MPa). Ces bétons sont utilisés principalement :

- ✓ en forme de pente isolante pour toiture-terrasse ;
- ✓ en isolation de sols sur terre plein ;
- ✓ La préfabrication des éléments architecturaux ;
- ✓ La protection d'étanchéité sur terrasse ;
- ✓ chapes, plancher, dalles d'isolation ;
- ✓ Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisations ;

2) **des bétons porteurs et isolants**: leur masse volumique varie de 1 000 à 1 300 kg/m³ et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- ✓ Des murs banchés ou préfabriqués ;
- ✓ Des blocs à maçonner ;
- ✓ Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage
- ✓ Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces ;
- ✓ La protection incendie ;.....

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

3) des bétons légers de structure, ils ont une masse volumique de 1 700 à 1 800 kg/m³ et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité.

Ces bétons sont utilisés pour :

- ✓ Ouvrage où le poids mort est important par rapport au poids total
- ✓ (chargement compris) ;
- ✓ Immeuble de grande hauteur ;
- ✓ Portées importantes (poutres, voiles) ;
- ✓ Structures marines immeubles ;
- ✓ Surélévation d'immeubles existants ;
- ✓ Restauration d'anciens immeubles ;

I.2.6.les avantages des bétons légers

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classer en trois catégories qui sont :

Avantages techniques

- ✓ Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1,2 en comparaison de 2,2 à 2,5 pour un béton classique.
- ✓ Isolant : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- ✓ Non inflammable : La chape en béton léger est classée M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- ✓ Imputrescible : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- ✓ L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- ✓ les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

Avantages de Mises En Œuvre :

- ✓ Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après
- ✓ coulage, selon l'épaisseur.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

- ✓ Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est
- ✓ facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- ✓ Coffrages plus légers ;
- ✓ Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en
- ✓ raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes);

Avantages Economiques :

- ✓ une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du
- ✓ matériau (Neville, 2000).
- ✓ le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit
- ✓ considérablement la dimension, donc le poids, des fondations (Neville, 2000).
- ✓ économie sur le ferrailage des éléments ;
- ✓ le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les
- ✓ quantités de ciment par rapport au béton ordinaire ;

I.2.7. Conclusion

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord des problèmes liés aux

- ❖ choix du matériau utilisés et aux méthodes d'allégier le béton. Nous précisons que: Sous l'appellation "Béton léger" il existe une grande famille de matériaux très différents.
- ❖ D'un point de vue générale et simple, le béton léger est réalisé on diminue la masse volumique par le remplace d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :
 - Dans les granulats
 - Dans la pâte de ciment
 - Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.
- ❖ Il convient de compléter notre bibliographie centrée sur le béton de granulats légers en notant l'importance des propriétés et les caractéristiques de chaque type de granulats.
- ❖ Les caractéristiques des granulats et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.
- ❖ On remarque que le béton léger est très utile et son application est très large.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Recherche bibliographique sur les bétons cellulaires

I.3.1. Introduction :

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

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

I.3.2. Définition

Le béton cellulaire (aéré) est un béton ultra léger caractérisé par une très forte porosité dépassant généralement 80% de volume du béton . Il contiennent en effet une multitude de petites cavités sphériques, ne communiquant pas entre elles, dont la taille est de l'ordre du millimètre , il est composé de matières minérales : sable fin, ciment, la chaux et d'un agent expansif (Poudre d'aluminium , Agent moussant , Entraîneur d'aire) pour lui donner ses propriétés aérées .

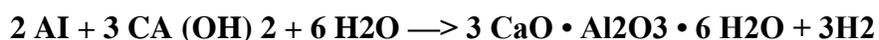
I.3.3. Composition :

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 [46].

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 cellules.

L'agent expansif sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer les cellules [47].

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



Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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 %
- Eau

Les pourcentages varient légèrement, mais de façon précise, en fonction de la masse volumique souhaitée [48].

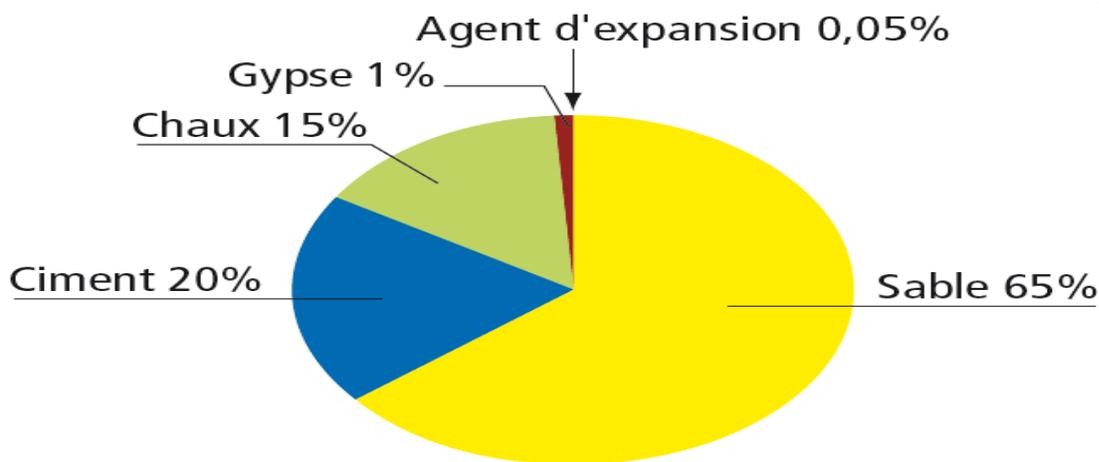


Figure 13:Composition de béton cellulaire [49]

I.3.4. La structure :

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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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 $60\mu\text{m}$ [50]



Figure 14: Structure du béton cellulaire (échelle 1/1)

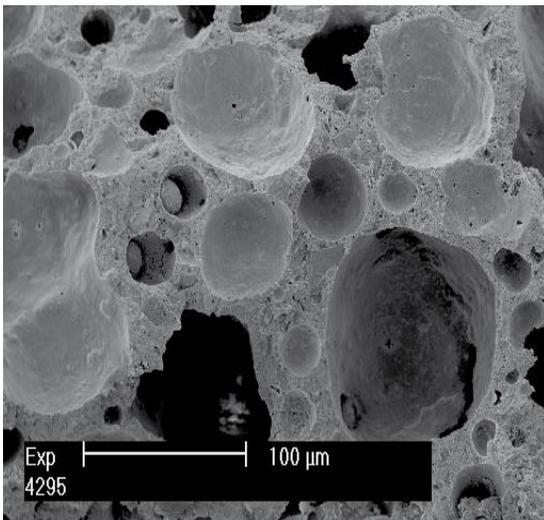


Figure 15: Structure du béton cellulaire vue au microscope électronique [47]

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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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 ou 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 [50].

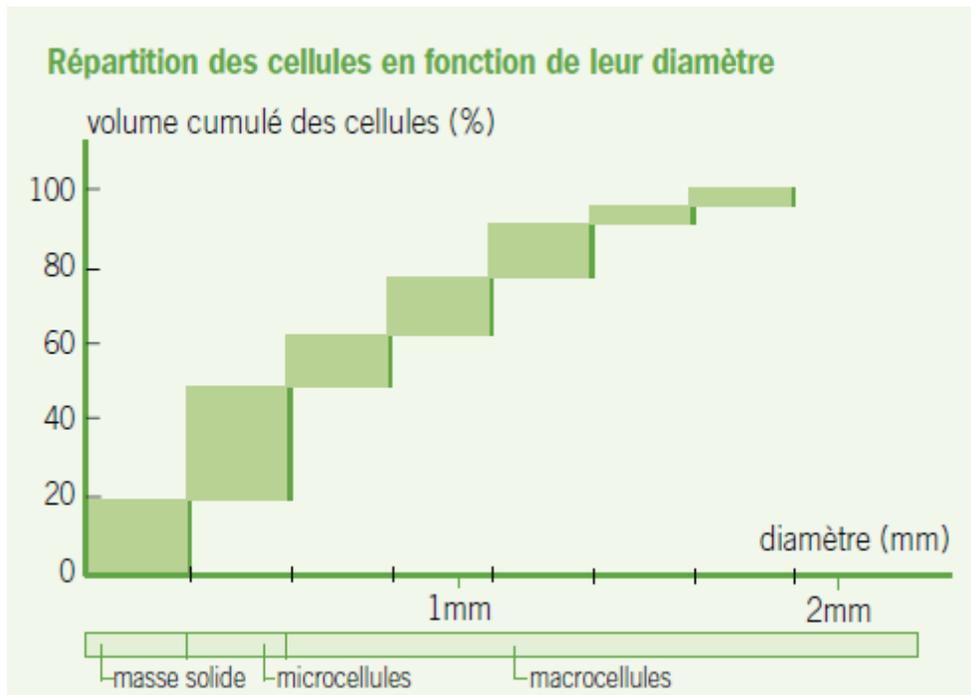


Figure 16: Répartition des cellules en fonction de leur diamètre

Exemple :

Pour un béton cellulaire de 450 kg/m³, la répartition en volume des cellules est de :

50 % de macro cellules.

30 % de microcellules capillaires réparties dans la masse solide.

1 m³ de matières premières permet donc de produire 5 m³ de matériau de maçonnerie en béton cellulaire.

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

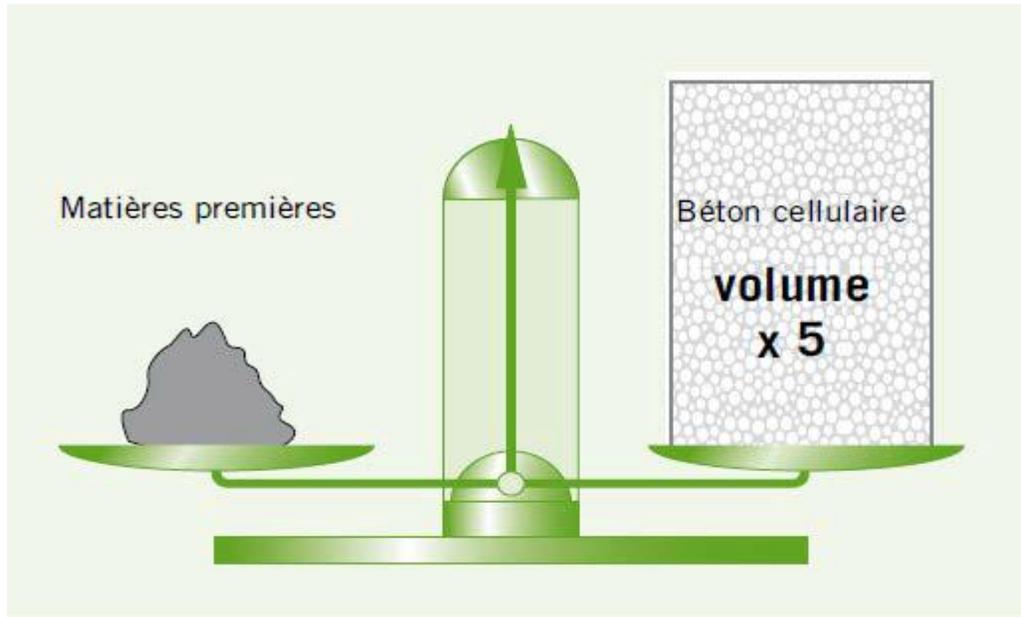


Figure 17:Correspondance entre le volume de la matière première et le volume du béton cellulaire

I.3.5. Propriété de béton cellulaire :

I.3.5.1. La densité :

Le béton cellulaire dépend de sa densité (300-1800 kg/m³), il est essentiel que ses propriétés soient qualifiées avec la densité.

En spécifiant la densité, les conditions d'humidité, (c'est-à-dire, séchage à l'étuve ou à l'air libre) doivent être indiqués. Le béton cellulaire avec une vaste gamme de densité pour des applications 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 [50].

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 1 : généralité sur les béton de séparation

apparente (classe ρ) 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 9: Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression

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

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 [47].

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Tableau 10: Catégories blocs

Désignation	Classe f (N/mm ²)	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/m³ a été rapportée égale environ 2 MPa ; pour une densité sèche de 700 kg/m³, 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.

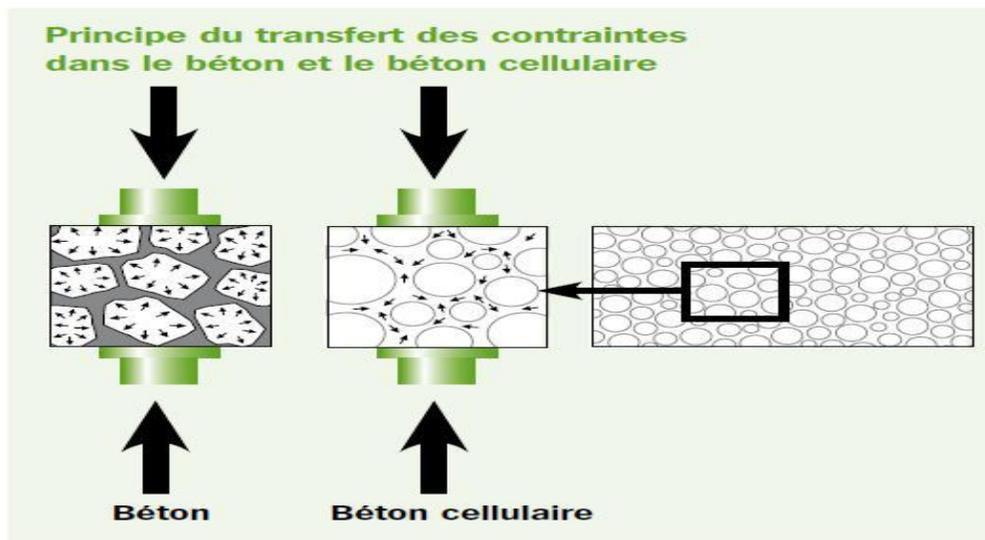


Figure 18: Transfert des contraintes dans le béton ordinaire et dans le béton cellulaire

Chapitre 1 : généralité sur les béton 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 [50]**.

Tableau 11: Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité

P kg/m³	350	400	450	500	550	600	650	700	750
RC Mpa	3	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5

I.3.5.3. La résistance à la traction :

La résistance à la traction du béton cellulaire est normalement égale 1/6 à 1/4 de la résistance à la compression. Un gradient d'humidité dans l'échantillon de test a un grand effet sur le résultat de test de la résistance à la traction. La mesure de cette propriété est encore plus sensible pour les conditions de test que la mesure de la résistance à la compression [51]

Pour le béton cellulaire, la résistance caractéristique à la traction pure représente 12% de la résistance en compression. ($R_t = 0,12 R_c$). La résistance caractéristique à la traction par flexion est de 22% de la résistance en compression : $R_t = 0,22 R_c$ (**prEN 12602**), les valeurs de la résistance à la traction par flexion sont montrées dans le **Tableau 12**

Tableau 12: Valeurs caractéristiques de la résistance à la traction par flexion

classe	Rt (Mpa)
f2	0.44
f3	0.66
f4	0.88
f5	0.10
f6	0.32

I.3.5.4. Resistance aux agents chimiques

La résistance aux agents chimiques du béton cellulaire est similaire à celle du béton lourd. L'un et l'autre résistent toutefois moins bien aux acides puissants que l'on ne trouve habituellement pas en habitation ou en construction industrielle. Grace à son alcalinité élevée, le béton cellulaire peu résiste aux pluies acides. Seuls quelques mm peuvent être légèrement altères[52]

I.3.5.5. Résistance au gel et dégel

En général, les cycles gel et dégel ne causent pas de dégâts au béton cellulaire. Uniquement pour quelques constructions spéciales, des précautions doivent être prises, par exemple, la construction de chambres froides .En général, les matériaux poreux ne résistent pas au gel au-dessus d'une teneur en humidité critique .Ceci est le cas tant pour le béton lourd que pour le béton cellulaire. Le seuil d'humidité critique pour un béton cellulaire, type C4 n'est atteint qu'au taux de45% du volume [52].

I.3.5.6. Conductivité thermique :

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplie d'air [53]

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 [54].

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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 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.3.5.8. Coefficient de conductibilité thermique λ 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) [52] :

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

Tableau 13: Valeurs de base

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

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

Les valeurs utiles λ_{Ui} et λ_{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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

- Valeurs utiles tabulées.
- **EN ISO 10456 (2000):**
- Isolation thermique
- Matériaux et produits du bâtiment
- Détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles.

Tableau 14: Valeurs utiles des murs en béton cellulaire collés

Masse volumique (valeur de calcul) (kg/m ³)	λ valeurs utiles
	λ_{Ui} (W/mK)
300	0,09
400	0,120
500	0,140
600	0,180

λ_{Ui} : 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.

Tableau 15: comparaison entre le béton cellulaire et les autres matériaux de construction

Désignations	Épaisseur (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (en W/m .K)	Résistance thermique R (m ² .K/W)	Affaiblissement acoustique R_w (db) > norme* = 30 db
Béton cellulaire	20	400	0,12	1,54	47
Brique creuse	20	700-1000	0,35	0,57	47
Parpaing creux	20	1000	1,10	0,18	54

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

I.3.5.9. Résistance au feu :

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

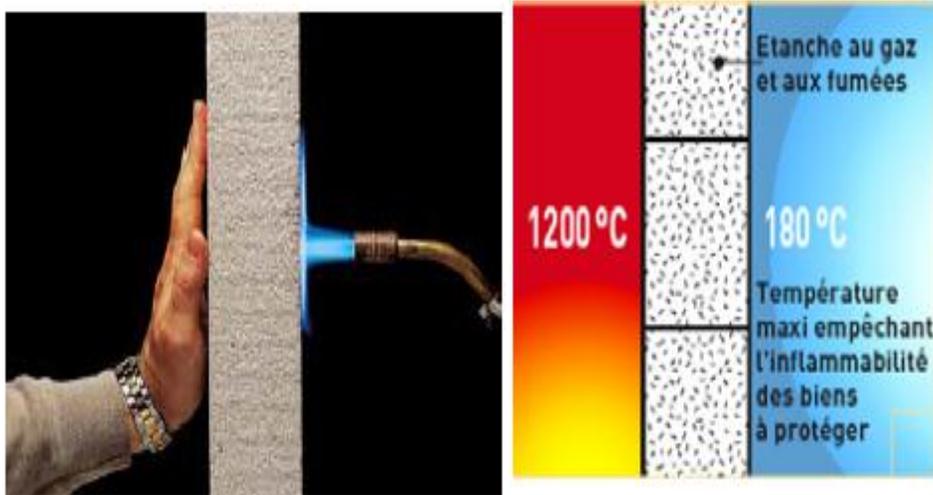


Figure 19:: résistance au feu

I.3.5.9..Légèreté

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



Figure 20: la légèreté d'un béton cellulaire

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

I.3.5.10. conductivité 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 [40]

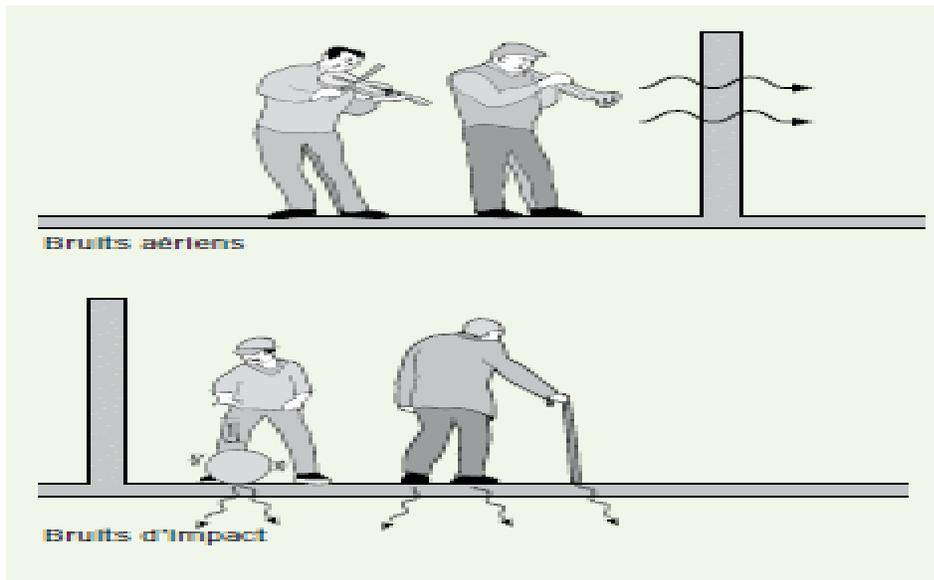


Figure 21:Acoustique

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

I.3.6. Utilisation :

Le béton cellulaire, sous forme de bloc, sert notamment à la construction de bâtiments, en particulier de maisons individuelles. Il est préconisé pour tous types de constructions à savoir les maisons individuelles, les immeubles d'appartements ou de bureaux, les garages, les magasins, les écoles ainsi que les hôpitaux et les bâtiments industriels. Les blocs de béton cellulaire sont également utilisés aussi bien en murs intérieurs qu'extérieurs, portants ou non portants. Vous pouvez également les utiliser pour vos poutres de ceinture, vos linteaux de grande longueur, vos linteaux à surcharge plus importante ainsi que celle admise par les linteaux standards, vos linteaux porteurs et non-porteurs ainsi que pour les dalles de plancher et les dalles de mur.

Disponible en plusieurs formats et dans des dimensions diverses, ce matériau permet une installation facile et rapide, accessible à tous, même les bricoleurs débutants. Hydrofuge, le béton cellulaire est préconisé pour les pièces humides comme la cuisine et la salle de bain. Puisque le béton cellulaire est très isolant, il est aussi généralement apprécié pour conserver la fraîcheur des bâtiments en été en tant que matériau d'isolation.

Disponible en carreau, le béton cellulaire vous permet d'inventer un meuble à la fois pratique et original. Vous pouvez également aménager, avec une extrême facilité, une cave à vin avec ce matériel. Il peut également être utilisé en tant que matériau pour votre décoration car il permet de réaliser des cloisons et des meubles pour personnaliser votre intérieur. Vous pouvez ainsi vous permettre de créer un meuble en béton cellulaire design et moderne comme une bibliothèque, un canapé ou encore des étagères. Vous pouvez également créer votre propre meuble de TV ou votre table basse avec le béton cellulaire. Vous pouvez également imaginer bon nombre de possibilités de rangement comme des comptoirs de rangement ou encore des plateaux de différentes sortes[55]

I.3.7. Conclusion :

- C'est un matériau non polluant : la fabrication du béton cellulaire ne libère aucun produit polluant, que ce soit dans l'air, dans l'eau ou dans la terre. De plus, grâce à un recyclage à chaque phase de la fabrication, il n'y a pas de gaspillage de ressources (matières premières, eau, énergie).

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

- C'est un matériau moderne : la fabrication du béton cellulaire est industrialisée et permet la production d'un matériau de construction fini aux dimensions précises, aisé à mettre en œuvre.
- C'est un matériau léger, solide et isolant : le béton cellulaire est rempli d'une multitude de bulles d'air emprisonnées dans des cellules qui lui confèrent légèreté, pouvoir d'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une solidité permettant la réalisation de constructions d'une grande diversité.
- C'est un matériau isotrope : les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont conservées quelles que soient l'orientation ou les découpes faites sur le produit. Ainsi l'homogénéité de la structure est parfaite.
- Ce matériau, à la fois traditionnel et moderne, est adapté à la majorité des constructions, aussi bien pour l'habitat individuel ou collectif que pour les bâtiments industriels.
- Risque de fissures : comparativement au parpaings ou brique, qui sont également utilisés, pour la construction des murs d'une maison, les fissures apparaissent, plus facilement, dans un mur en béton cellulaire
- Friable : si vous devez faire des scellement ou fixer des objets dans un mur en béton cellulaire, vous devrez utiliser des chevilles de fixation et des scellement renforcés, spécial béton cellulaire car, en raison, de sa relative friabilité, les systèmes de fixation « classique » ne résisteraient pas.
- Soupçon sanitaire : sans vraiment de conclusions définitives sur le sujet, plusieurs études montrent que les personnes exposées régulièrement à ce matériaux seraient susceptibles de déclencher des cancers, ou même de cas de maladie d'Alzheimer seraient directement provoquées par l'inhalation des poussières du béton cellulaires [56].

I.4.Revue bibliographie sur les matériaux bio sources

24



I.4.1. Introduction :

La réflexion actuelle sur le bâtiment de demain, à la suite du Grenelle de l'environnement et à travers la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, met l'accent sur une approche globale de la construction qui ne se limite pas à sa consommation énergétique d'usage mais prend en compte la totalité du cycle de vie du bâtiment depuis la production et le transport des matériaux utilisés jusqu'à la déconstruction. Le cycle de vie des bâtiments révèle les autres effets environnementaux de la construction : énergie grise, impact carbone, toxicité, impact sur le cycle de l'eau, effets sur la biodiversité... Dans cette approche globale, la performance environnementale des matériaux de construction, qui représentent plus de 50% des émissions de gaz à effet de serre, prend toute son importance et favorise le recours aux matériaux biosourcés

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Bois, paille, chanvre, lin, liège, laine de mouton, ouate de cellulose (issue du recyclage de papiers)... Les matériaux biosourcés sont nombreux, se déclinent aujourd'hui en une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le bâtiment.

I.4.2. Généralités :

✓ « Biosourcé » : qu'est-ce que c'est ?

La définition normalisée au niveau européen précise que **les matériaux bio sources sont des matériaux intégrant une part de biomasse dans leur composition**, c'est-à-dire des matières premières issues du végétal ou de l'animal, à l'exclusion des matériaux fossiles tels que le pétrole.

Mais cette définition ne prévoit pas de quantité minimum de produits intégrés biosourcés. Cela signifie qu'il est possible de trouver des matériaux ne contenant que 1 % de biosourcé, et affirmer qu'il s'agit d'un matériau biosourcé. C'est la raison pour laquelle nous travaillons à la mise en place d'un label définissant des seuils minima de biosourcés.

Par ailleurs, il convient de préciser que cette définition ne s'applique pas aux écomatériaux, et que la terre crue n'est pas considérée comme un matériau biosourcé. Enfin, les matériaux biosourcés sont issus de la sylviculture, de l'agriculture et du recyclage (il en va ainsi du papier ou des textiles recyclés).[57]

I.4.3. Pourquoi le biosourcé ?

Les matériaux biosourcés répondent de manière fiable et concrète à certains enjeux environnementaux et sociétaux forts.

✓ Une réponse à l'enjeu climatique

Fabriqués à partir d'une ressource végétale issue de la photosynthèse, les matériaux biosourcés permettent de capter le CO₂ atmosphérique responsable de l'effet de serre, et de le stocker dans un produit à durée de vie longue, tels que ceux mis en œuvre dans le bâtiment. Ainsi, la charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris stocke du CO₂ depuis 600 ans.

A cet égard, les problématiques actuelles de réchauffement nécessitent à court terme des réponses pérennes à l'impératif de stockage du carbone, problématiques auxquelles répondent, dans la durée, les caractéristiques de durabilité et de quantité des matériaux du bâtiment

✓ Une réponse à l'enjeu de l'épuisement des ressources naturelles

Ressource fondée sur l'énergie solaire, le biosourcé est un matériau renouvelable s'il s'inscrit dans une

démarche durable de renouvellement de la ressource. Ainsi, une telle démarche implique une gestion

durable de la forêt pour le bois, par exemple.

Hors bois d'œuvre, 230 000 tonnes de matériaux biosourcés sont mises en œuvre dans la construction, ce

qui représente moins de 1 % de la biomasse produite sur le territoire français

✓ Une réponse à l'enjeu énergétique

Contrairement aux procédés nécessitant des cuissons à haute température, les biosourcés sont peu énergivores. Ainsi, l'emploi de matériaux biosourcés permet actuellement d'économiser environ 347 GW/h d'énergie, soit la production annuelle d'une centrale à charbon

✓ Une réponse à l'enjeu sanitaire

Les produits biosourcés se révèlent généralement bien classés en matière d'émissions ayant un impact

sur la qualité de l'air intérieur.

✓ Une réponse à l'enjeu de la rénovation de l'existant

Les matériaux biosourcés présentent des caractéristiques semblables à celles des matériaux employés

dans les bâtiments d'avant 1945 : porosité, perméabilité à la vapeur d'eau, *etc.* Ils peuvent donc être mis en œuvre dans la rénovation de ce type de bâtiments et améliorer leur performance thermique sans créer de sinistralité.[58]

I.4.4. Quels sont les matériaux biosourcés utilisés dans le bâtiment ?

❖ Quelques bio ressources :

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Potentiellement, toutes les ressources biosourcées pourraient être utilisées dans le bâtiment et dans la construction, à condition de subir quelques transformations qui leur permettront de respecter les cadres réglementaires et normatifs du secteur (fig.4). Il en va ainsi, par exemple, des fanes de carottes, des carapaces de crevette, en cours d'évaluation.[58]



Figure 22: Quelques bioressources pouvant trouver leur place dans le bâtiment.[57]

❖ Les matières premières utilisées

Les transformations de bioressources permettent d'obtenir différentes catégories de matières Premières : granulats végétaux pouvant par la suite être utilisés dans la fabrication de béton ; fibres, Pailles, matières végétales recyclées, balles³ utilisées comme isolants ; huiles végétales[58].

I.4.5.1. Exemples de produits de construction issus du bois et leurs caractéristiques

Le bois présente différentes formes de valorisation dans le domaine de la construction. Parmi ces formes, on compte les matériaux suivants[58]

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Propriétés	
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisations : structure, agencement intérieur ,ameublement✓ Masse volumique : 600 kg/m³✓ Conductivité thermique : 0,13 W/m.K✓ Epaisseurs courantes : de 6 à 22 mm✓ Norme, certification : norme spécifique NF EN 300 et certification propre du FCBA✓ Bonnes propriétés mécaniques, mise en œuvre « conventionnelle »✓ Peu d'apports en termes d'isolation, colles utilisées dans la fabrication	<p>Panneaux à lamelles minces orientées (Oriented Strand Board OSB)</p> 
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisations : isolation rapportée, intérieure ou extérieure✓ Masse volumique : de 30 à 55 kg/m³ (panneaux souples) et de 110 à 270 kg/m³ (panneaux rigides)✓ Conductivité thermique : de 0,038 W/m.K (souples) à 0,049 W/m.K (rigides)✓ Epaisseurs courantes : de 100 à 300 mm, pour la✓ mise en oeuvre, 240 mm pour les panneaux souples et 300 mm pour les panneaux rigides✓ Norme, certification : norme spécifique NF EN 622✓ Bonnes performances thermiques,	<p>Panneaux isolants en fibres de bois</p> 

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

recyclabilité (compostage ou brûlage) ✓ Fibres de polyester utilisées dans la fabrication	
--	--

I.4.5.3. Exemples de produits de construction issus du lin et leurs caractéristiques :

Propriétés	
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisations : isolation rapportée, intérieure ou extérieure✓ Masse volumique : 20 à 30 kg/m³ (rouleaux)✓ Conductivité thermique : 0,041 W/m.K✓ Epaisseurs courantes : 30 à 220 mm✓ Norme, certification : certains produits possèdent un avis technique ou un agrément technique européen✓ Facile à mettre en œuvre, bonnes performances thermiques et acoustiques, recyclable✓ Fibres de polyester utilisées dans la fabrication	<p>Laine de lin</p> 
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisations : agencement intérieur, portes coupe-feu, toitures✓ Masse volumique : 350 à 550 kg/m³✓ Conductivité thermique : 0,065 à 0,09 W/m.K✓ Epaisseurs courantes : 18 à 50 mm✓ Norme, certification : certains produits disposent d'un avis technique	<p>Panneaux d'anas de lin</p> 

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

<ul style="list-style-type: none">✓ Facile à mettre en œuvre, bonnes performances acoustiques Colles utilisées dans la fabrication	
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisation : sous-couche acoustique pour parquet✓ Masse surfacique : 300 à 600 g/m²✓ Performances acoustiques : - 20 dB✓ Epaisseurs courantes : 4,5 mm✓ Norme, certification : aucune mais des essais sur les performances acoustiques✓ Facile à mettre en œuvre, entièrement en fibres végétales, recyclable✓ Absence d'évaluation technique	<p>Sous-couche de sol en fibre de lin</p> 

I.4.5.4. Exemples de produits de construction issus de la paille et leurs caractéristiques :

Propriétés	
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisations : remplissage d'ossature (bois généralement), murs autoporteurs, remplissage de caissons dans des murs préfabriqués.✓ Masse volumique : dépend de la presse, en général environ 80 kg/m³.✓ Conductivité thermique : environ 0,065 W/m.K.✓ Epaisseurs courantes : environ 36 cm pour des bottes « standards ».✓ Réaction au feu : difficilement inflammable avec peu de fumée et aucun débris.✓ Norme, certification : règles	<p>Bottes de paille</p> 

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

<p>professionnelles de la construction paille, essais de tenue au feu.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Prix faible, produit en circuit court, assurabilité (garantie décennale), recyclable. ✓ Mise en œuvre spécifique. 	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisations : agencement intérieur, planchers et plafonds. ✓ Masse volumique : 379 kg/m³ ✓ Conductivité thermique : environ 0,102 W/m.K. ✓ Epaisseurs courantes : 58 mm. ✓ Résistance au feu : 30 minutes. ✓ Norme, certification : classement au feu M3 (moyennement inflammable). ✓ Bonnes performances thermiques et acoustiques, produit entièrement végétal, recyclable. ✓ Poids des panneaux pour la mise en œuvre. 	<p>Panneaux de paille compressée</p> 

I.4.5.5. Exemples de produits de construction issus de la ouate de cellulose :

<p>Propriétés</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisations : isolation rapportée des planchers, des toitures, des combles ou des murs en projection humide ou en soufflage / injection à sec. ✓ Masse volumique : 30 à 70 kg/m³ ✓ Conductivité thermique : environ 0,042 W/m.K. ✓ Epaisseurs courantes : environ 10 à 20 	<p>Isolant en vrac</p>

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

<p>cm pour une isolation performante.</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Norme, certification : certains produits possèdent un avis technique ou un agrément technique européen.✓ Prix faible, bonnes performances thermiques et acoustiques.✓ Mise en œuvre spécifique.	
<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisations : isolation rapportée. intérieure ou extérieure.✓ Masse volumique : environ 45 kg/m³✓ Conductivité thermique : de 0,039 à 0,042 W/m.K.✓ Epaisseurs courantes : 45 à 140 mm.✓ Norme, certification : certains produits possèdent un avis technique ou un agrément technique européen.✓ Facile à mettre en œuvre, bonnes performances thermiques et acoustiques, recyclable.✓ Fibres de polyester utilisées dans la fabrication.	<p>Panneaux semi-rigides / rouleaux</p> 

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

Tableau 16: 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	Chènevotte	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			

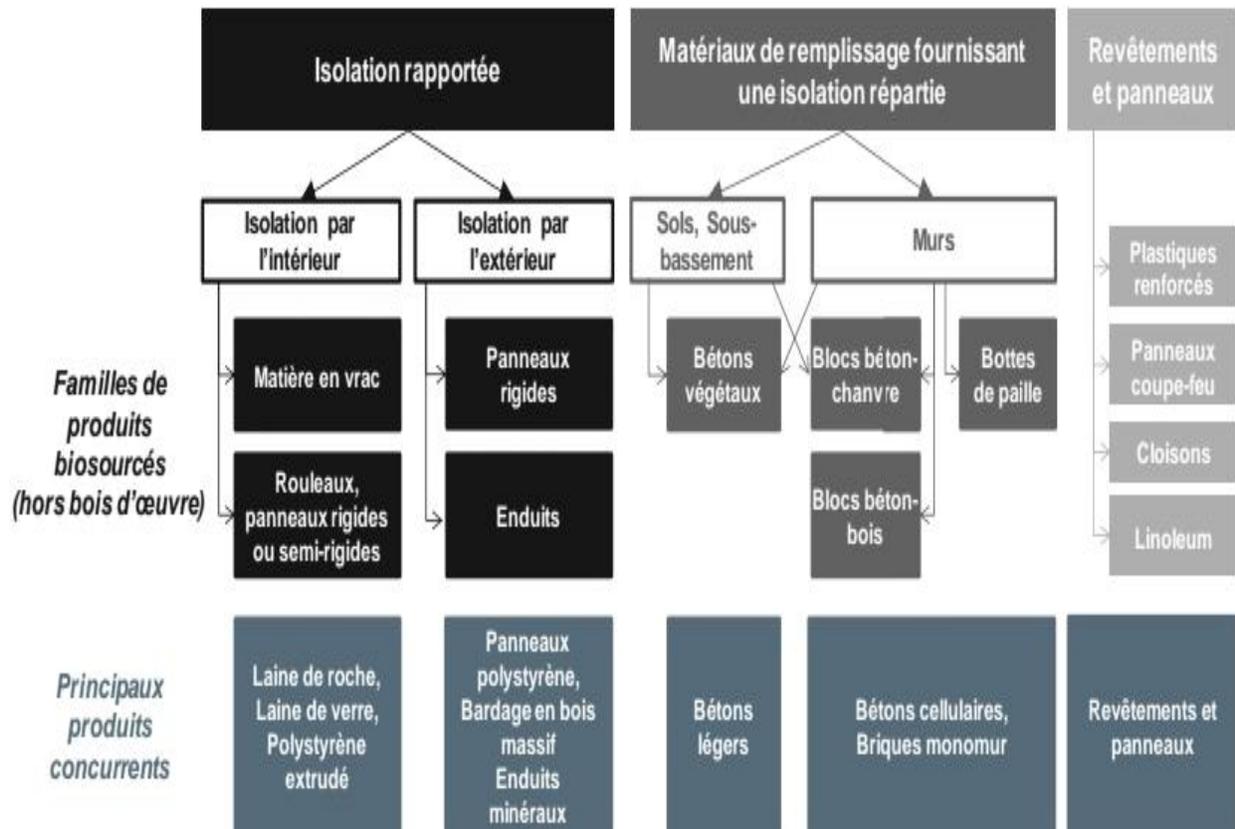


Figure 23: Familles de produits biosourcés utilisés dans la construction pour chaque type d'application

I.5. Méthodes des plans d'expériences

I.5.1. 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.

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

I.5 .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.

I.5 .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 :

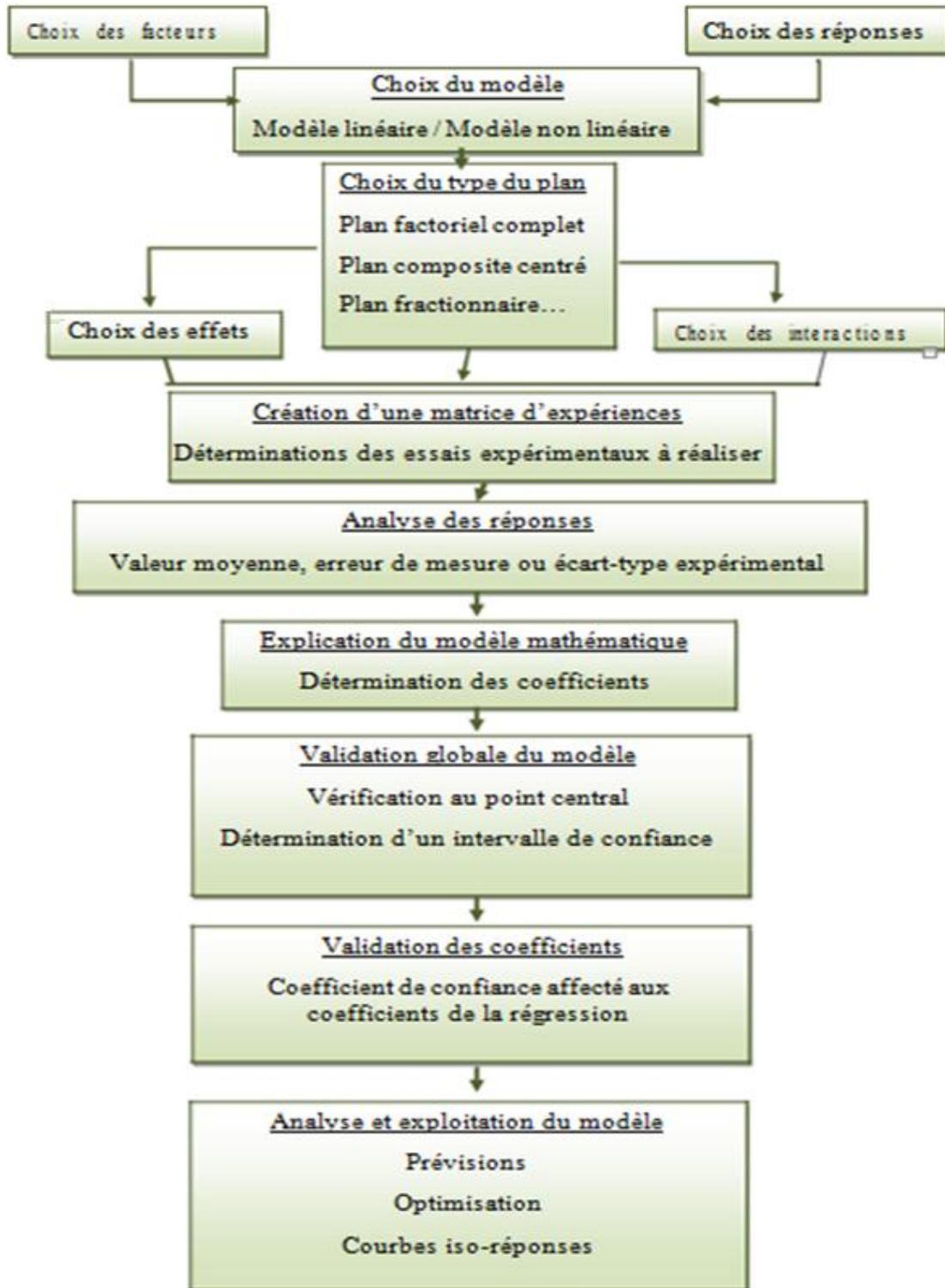
- les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

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.

I.5 .4 : Démarche méthodologique

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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation



I.5 .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.

I.5 .6. Terminologie

I.5 .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.

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

➤ **Facteurs booléens**

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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

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

I.5 .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 . 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.

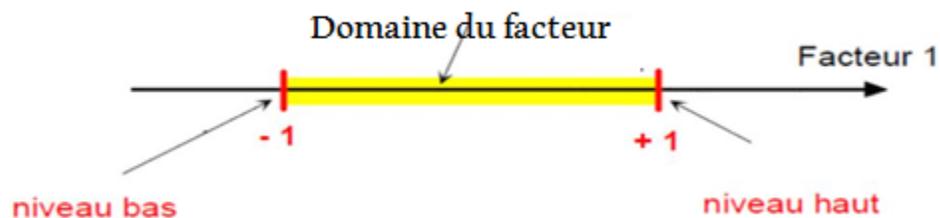


Figure 24:le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur

La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

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.

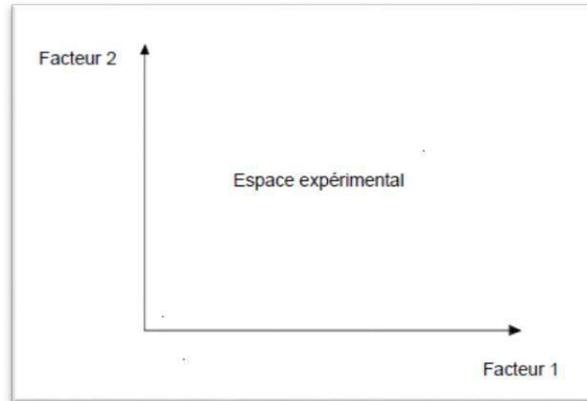


Figure 25: l'espace expérimental d'un facteur

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.

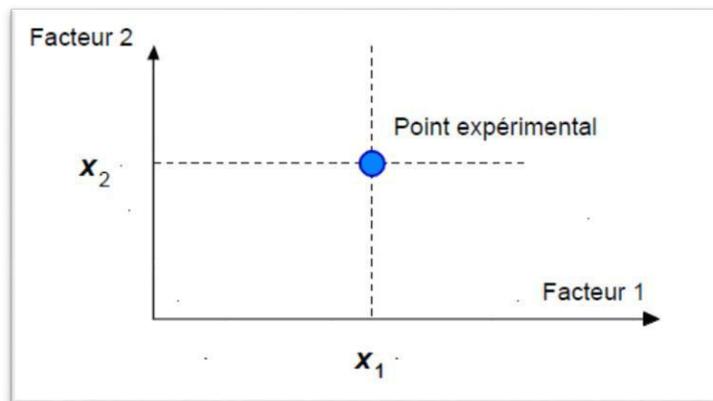


Figure 26: Les points expérimentaux dans un espace

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 .

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

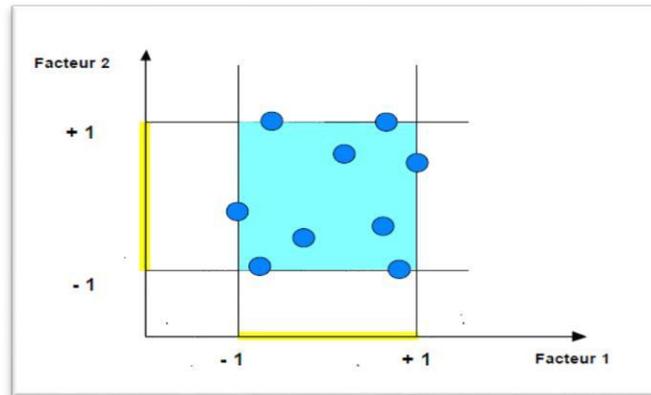


Figure 27: Les points expérimentaux dans un domaine d'étude.

I.5 .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).

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

I.5 .8. Méthodologie des plans d'expériences

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

I.5 .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.

I.5 .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).

I.5 .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).

I.5 .9. Présentation de logiciel « Design-Expert »

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

Chapitre 1 : généralité sur les béton de séparation

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 expérimental.

Chapitre II

Mode opératoire

Chapitre II : mode opératoire

Chapitre II : Mode opératoire (Matériel et Matériaux)

II.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

Partie 1 : Béton cellulaires a base d'un sable préparé

II.2. Matériels utilisés

- Malaxeur de béton
- Etuve
- Balance
- Eprouvette gradué
- Les moules 10*10*10
- L'appareil de blaine
- Le densitomètre lechatelier
- Presse hydraulique (NA EN 12390-3)
- Le CT METRE

II.3. Les caractéristiques des matériaux utilisés

II.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

Tableau 17: les caractérisations de sable d'oued souf

Caractérisation de sable résultats d'Oued Souf		
Module de finesse	MF	2,36
L'équivalent de sable	E_{sv} (%)	90,88
	E_{sp} (%)	89,89
La masse volumique	γ_{app} (kg/l)	1,642
	γ_{abs} (kg/l)	2,56

II.3.2. Sable concassé

L'autre sable utilisé aussi est le sable concassé, ce sable a été prélevé de la région d'EL AUCHE

- Les résultats de l'analyse granulométrique du sable grossier sont représentés dans la courbe granulométrique

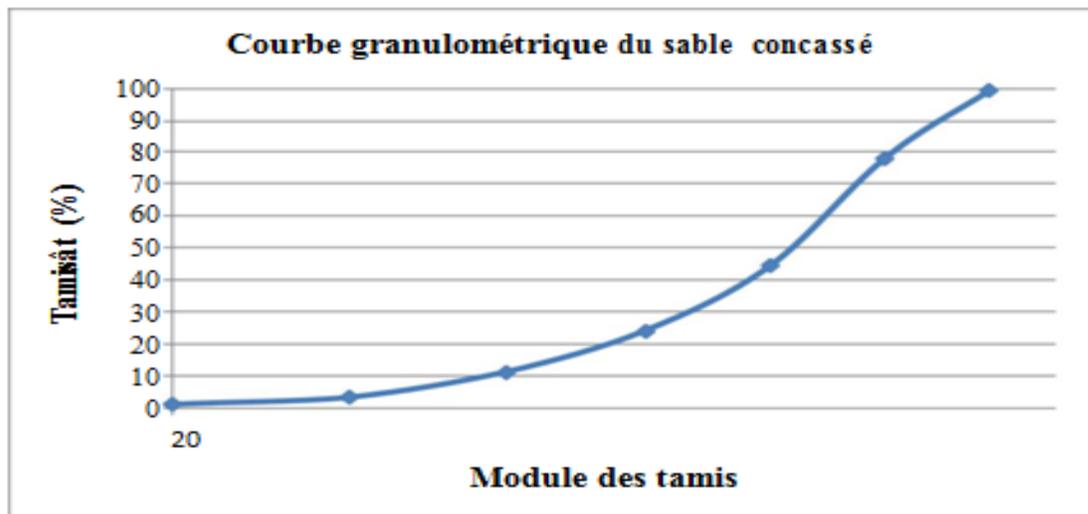


Figure 28: Courbe granulométrique du sable concassé.

Chapitre II : mode opératoire

II.3.3. 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.

- **Désignation**

Ciment portland composé.

- **Identification**

CPJ-CEM II/A 42, 5.

- **Composition**

Clinker : 80% - 94%

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



Figure 29:Ciment Matine 42.5

Tableau 18:les caractérisations de ciment Matine 42.5

Caractérisation de résultats ciment Matine 42,5		
Module de finesse	MF(cm ² /g)	3488

Chapitre II : mode opératoire

La masse volumique	γ_{app} (kg/l)	1,316
	γ_{abs} (kg/l)	3

II.3.3.1. Caractéristiques chimiques

Tableau 19: Composition chimique du ciment utilisé

Eléments	Teneur (%)
SiO ₂	17.35
Al ₂ O ₃	4.51
Fe ₂ O ₃	2.92
CaO	59.87
MgO	1.62
SO ₃	3.08
K ₂ O	0.617
Na ₂ O	-
Cao libre	-
Cl ⁻	0.014
In	-
Perte au Feu	10.02

Tableau 20: : Composition minéralogique du ciment utilisé.

Eléments	Teneur (%)
-----------------	-------------------

Chapitre II : mode opératoire

C ₃ S	68,33
C ₂ S	-2
C ₃ A	7,01
C ₄ AF	8,789
CaO Libre	-
Gypse	-
Laitier(S)	-
Pouzzolane (Z)	/

II.3.4. La
La poudre
utilisée
pour

poudre d'alumine
d'aluminium
comme agent réactif
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.



Tableau 21: La poudre d'alumine

II.3.4.1. Fiche technique

La fiche technique de cette poudre est de société algérienne **d'ALZINC - Spa – Filiale - METANOF Service Contrôle Qualité M'sila**, et l'analyse dans le tableau 22

Tableau 22: L'analyse chimique de la poudre fine aluminium

Chapitre II : mode opératoire

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

II.3.5. 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 23)

Tableau 23:les caractérisations chimiques de l'eau de gâchage d'UnvBBA

Paramètre	Quantité	Commentaire
PH	8.18	Acceptable pour le gâchage
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	-
Taux de (Cl)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO₂)	0,15 mg/l	> à la concentration max(0.1)
Taux de (NO₃)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	-
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	-

II.3.6. La chaux éteinte

Nous avons utilisé la chaux vive de la wilaya de Saida



Figure 30:La chaux vive

II.3.6.1. Fiche technique de la chaux éteinte

- La chaux qu'en a utilisé constitue essentiellement de 85% de CaO.
- Densité : 0.9 t/m³.
- Produit cuit d'une finesse de : 0 à 4 mm.
- PH : 12.4

II.3.6.2 .Composition de la chaux résiduaire de LINDE

Tableau 24:Composition chimique de la chaux résiduaire de LINDE

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

Chapitre II : mode opératoire

II.3.7. Les ajouts minéraux

II.3.7.1. La pouzzolane

La pouzzolane naturelle utilisée dans ce travail a été ramené de la carrière BeniSaf, qui a été broyé aux finesses de $3700 \text{ cm}^2/\text{g}$

II.3.7.2. Le laitier

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

II.3.7.3. Les caractéristiques chimiques

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

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 25: Analyse chimique des ajouts

Composition	Laitier %	Pouzzolane %
SiO ₂	35.52	37.26
Al ₂ O ₃	8.88	15.37
Fe ₂ O ₃	2.92	10.55
CaO	26.11	17.01
MgO	2.58	3.06
SO ₃	1.50	0.38
K ₂ O	1.26	1.33
Cl ⁻	0.002	0.009
LSF	23.35	13.15

Chapitre II : mode opératoire

A/F	3.04	1.46
MS	3.01	1.44
PaF	21.20	15.02

II.3.7.4. Les caractéristiques physiques

Tableau 26: : Les caractéristiques physiques des ajouts utilisés.

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

II.3.8. Superplastifiants

Lors de cette étude nous avons utilisé les adjuvants provenant de GRANITEX Oued Smar. (Wilaya d'Alger).Le superplastifiants est : **Medaflow 30**, il est conforme aux exigences des normes NFP 18333 et NFP 18336.Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité .En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable, **Medaflow 30** est un superplastifiant de la troisième génération de type polycarboxylate, sa caractéristiques sont données par le **Tableau (27)**

Tableau 27: Présente quelques caractéristiques de ce produit.

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

II.3.9. La formulation du béton cellulaire

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

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

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

II.4. Types de béton formulés

Béton témoin

Béton avec 10% pouzzolane

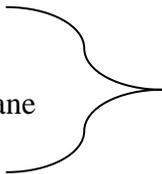
Béton avec 15% laitier

Béton témoin

Béton avec 10% pouzzolane

Béton avec 15% laitier

avec 1.5% adjuvant



II.5. Confection et contrôler l'éprouvette

II.5.1. Malaxage de béton

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

- Verser les constituants dans la cuve : le sable et les fines.
- Malaxer à sec pendant 30s.
- Ajouter l'eau pendant 1 min 30s, le malaxeur en marche.

Chapitre II : mode opératoire

- le super plastifiant est mélangé dans un tiers d'eau après l'introduction du premier tiers d'eau au cours du malaxage, ensuite on à introduire la quantité d'eau restante.
- Malaxer pendant 2 min

II.5.2. conservation dans l'étuve

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

Partie 2 : béton cellulaires biosourcées a base de déchet industrielles

II.6 . les matériels utilisés

- Malaxeur
- Etuve
- Balance
- Eprouvette gradué
- Les moules 10*10*10
- Presse hydraulique (NA EN 12390-3)
- Le CT METRE
- Plaque chauffante
- Résistance (source de chaleur)
- Thermomètre
- Broyeur a billet (Retsch PM100)
- Granulométrie laser(cillasPM100)

II.7. Les caractéristiques des matériaux utilisent

- Sable d'oued Souf
- Ciment Matine 42.5
- La poudre d'alumine
- Eau de gâchage
- La chaux vive

Chapitre II : mode opératoire

- **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.

La masse volumique de déchet de bois recyclé égale $0,282 \text{ g/cm}^3$



Figure 31: Déchet de bois (bois recyclée)

- **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.

La masse volumique de déchet de bois neuf égale $0,141 \text{ g/cm}^3$



Figure 32:la ouate de cellulose

Chapitre III

Présentation et analyses les résultats

Chapitre III: présentation et analyses les résultats

III.1 Introduction

Dans le présent chapitre, on présente les différents résultats expérimentaux de chaque type de béton relatifs aux essais effectués sur le béton cellulaire (béton cellulaire bio sourcier a base des déchet industrielles et béton cellulaire a base de sable préparé) conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats sera faite à la base des résultats obtenus

III.2 résultats et discussion Du béton cellulaire a base de sable préparé

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

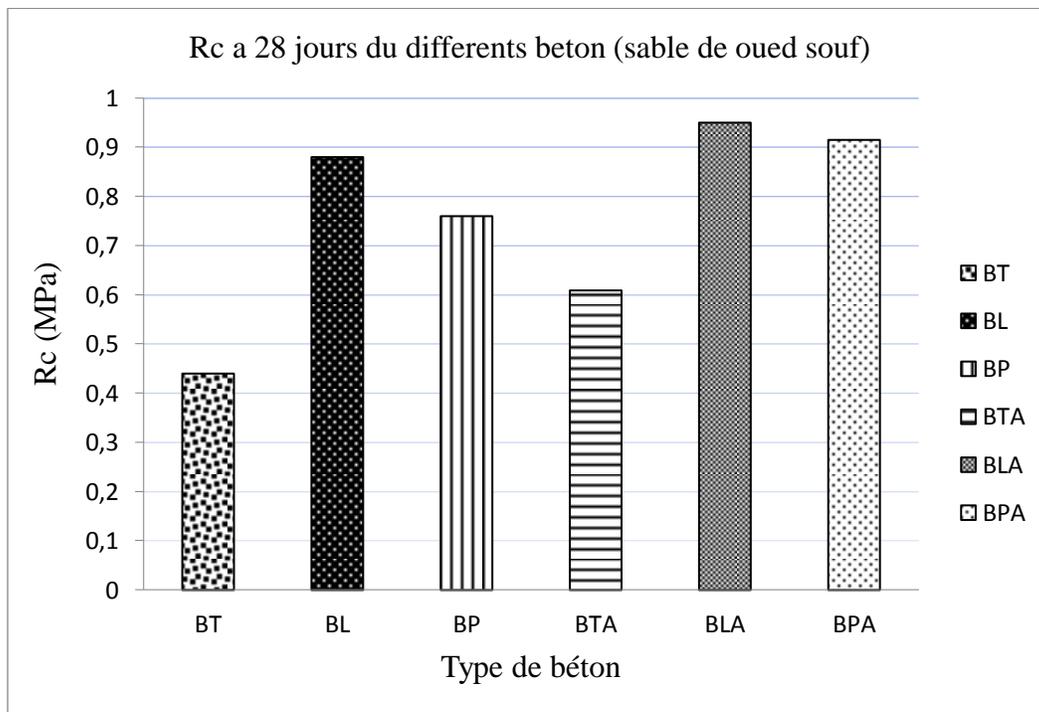


Figure 33: Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (oued souf) a 28 jours.

III .2.1.1. Discussion et interprétation

Les résultats représentés par la **figure 33** montre clairement l'effet de l'adjuvant sur la résistance mécanique ainsi le rôle positif des ajouts incorpores dans le sable qui contribuent à l'amélioration de la résistance

Chapitre III : présentation et analyses les résultats

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

III.2.2 résistance à la compression (sable concasse)

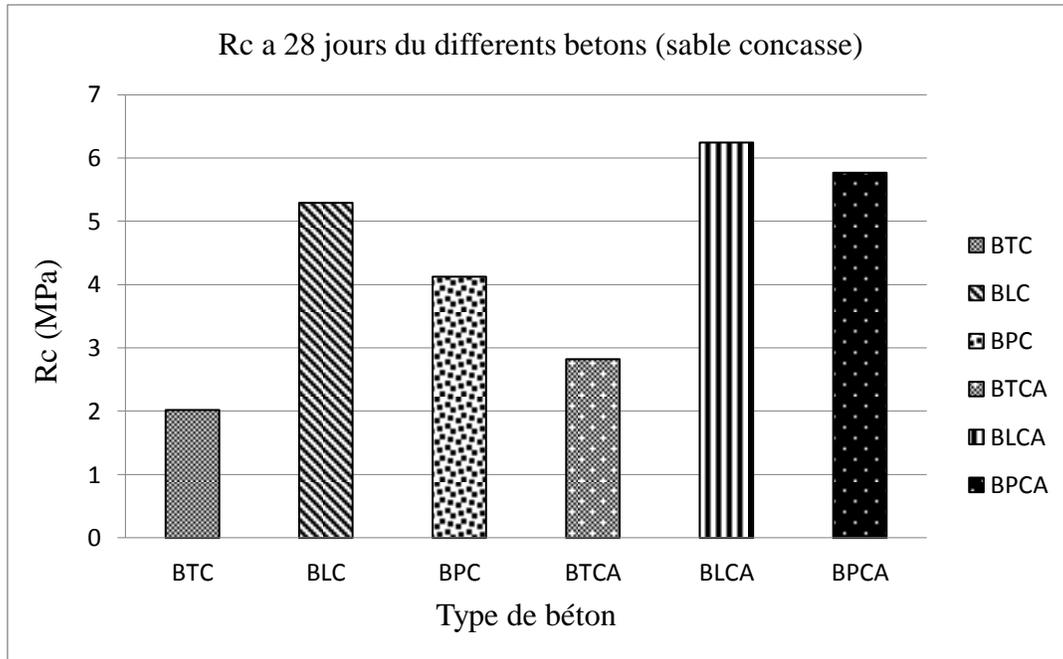


Figure 34: Evolution de la résistance à la compression en fonction de sable préparé (concassé) a 28 jours.

III.2.2.1 Discussion et interprétation

les résultats obtenus et représenter dans la **figure 34**, pour la résistance à la compression a 28 jours confirment que l'utilisation de l'adjuvant (superplastifiant) augmente la résistance mécanique en comparaison aux béton sans adjuvant ,d'autre part ils confirment le bénéfice des ajouts incorpores dans le sable pour l'amélioration des résistance mécanique par rapport aux sable témoin et en fin en remarque bien que le sable concassé développe des résistances meilleures que celles d'un sable de oued souf

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

III.2.3. masse volumique

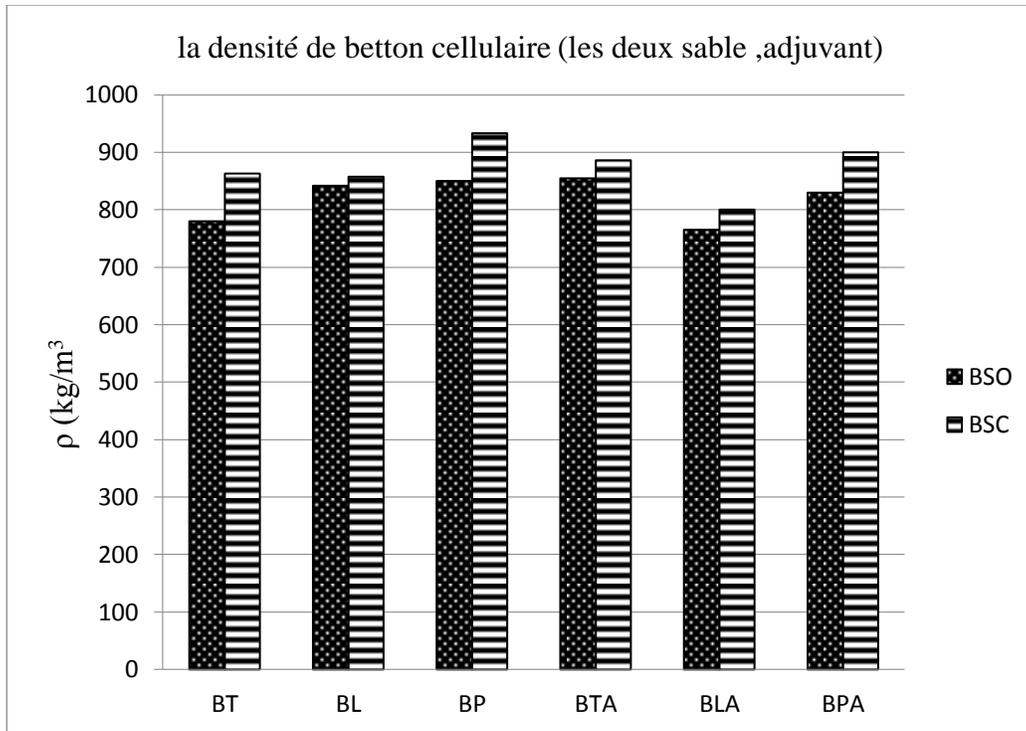


Figure 35:densités des tous types de béton cellulaire

III.2.3.1. Discussion et interprétation

D'après les résultats obtenus et représentés sous forme d'historgramme dans **Figure 35**, on remarque que les densités des bétons cellulaires à base de sable concassé sont supérieures aux celles des bétons à base de sable d'OUED SOUF on peut montrer ça par la masse volumique du premier sable qui est élevé par rapport au deuxième.

d'autre part , l'utilisation de l'adjuvant (superplastifiant) suivi par une diminution de la densité du béton cellulaire dans les deux cas (les deux sables), ce qui peut être expliqué par la diminution du rapport E/C

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

III.2.4 conductivité thermique

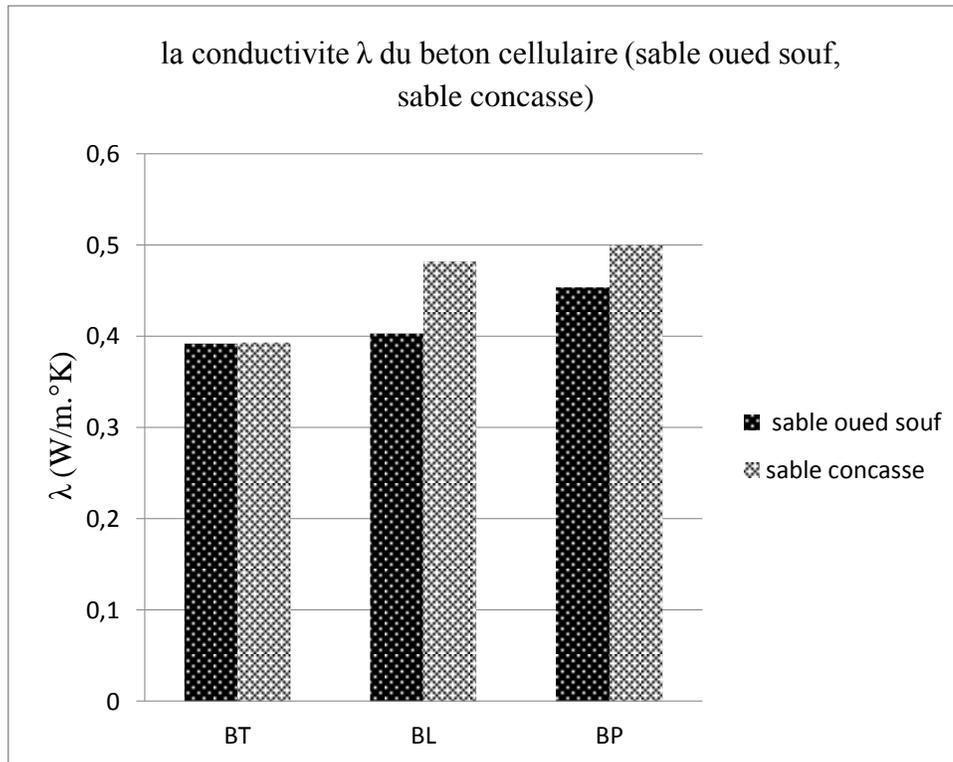


Figure 36: la conductivité thermique du béton cellulaire a base des deux sables préparés sans adjuvant

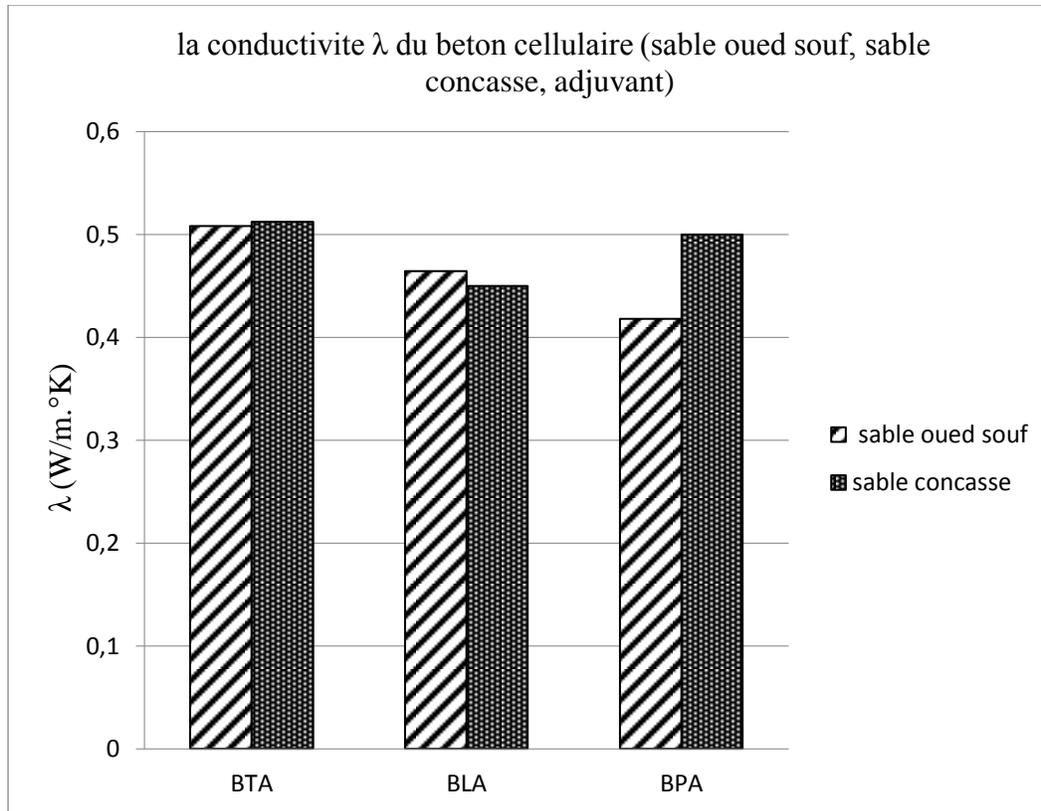


Figure 37: la conductivité thermique du béton cellulaire a base des deux sables préparés avec adjuvant

III.2.4.1. Discussion et interprétation

les résultats obtenus et représentés sous forme d'histogramme dans la **figure 36** et la **figure 37**, montrent que la conductivité thermique du béton cellulaire à base de sable oued souf (surtout qui contient des ajouts actifs) est faible à celle de sable concassé même après l'utilisation de l'adjuvant, ce qui est lié proportionnellement à la masse volumique d'où la conductivité diminue à chaque fois que la masse volumique est faible.

III. 3. résultats et discussion du béton cellulaire biosourcés

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.

Chapitre III : présentation et analyses les résultats

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent nos objectifs visés au début de notre action expérimentale.

La résistance mécanique

L'analyse statistique des Modeles

Source	R2	
Linear	0.61	
2FI	0.79	Suggested
Quadratic	0.86	

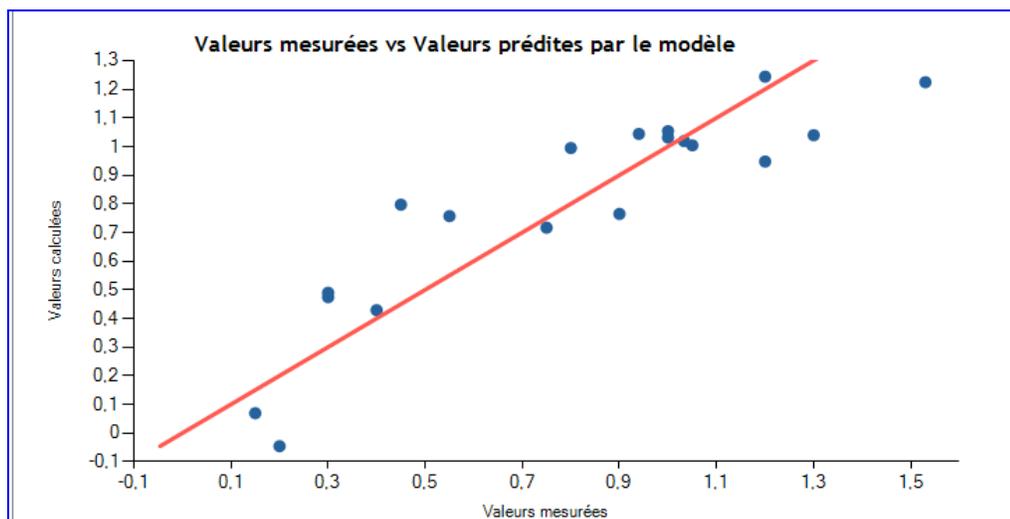
Equation du modèle

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

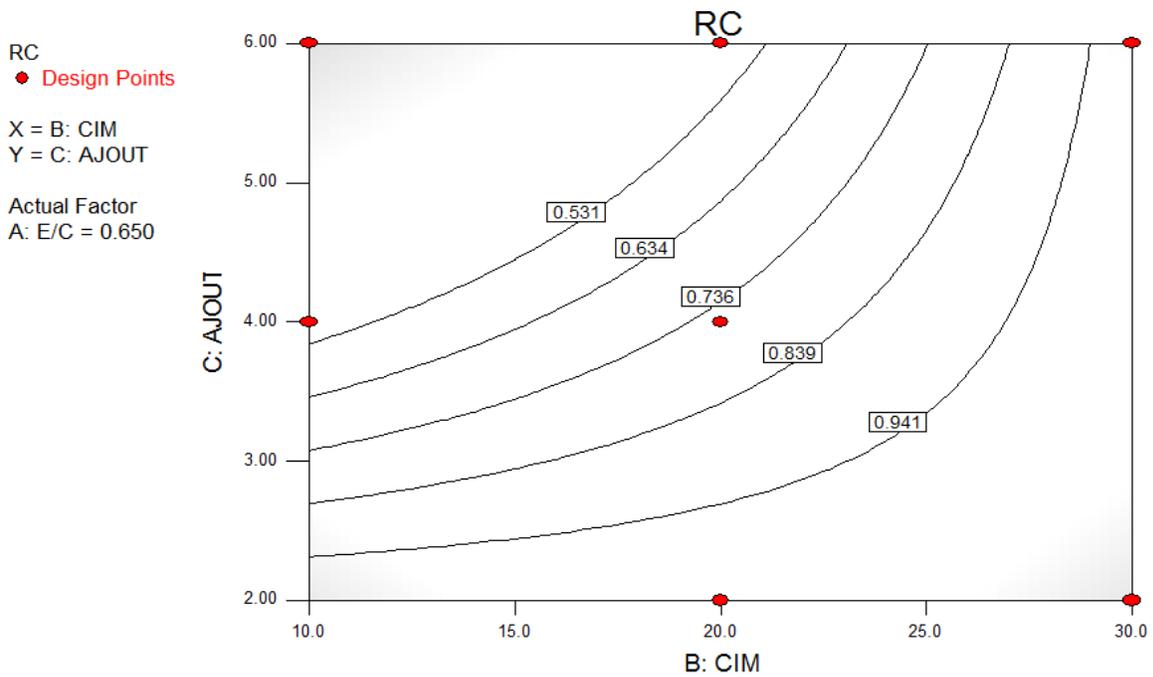
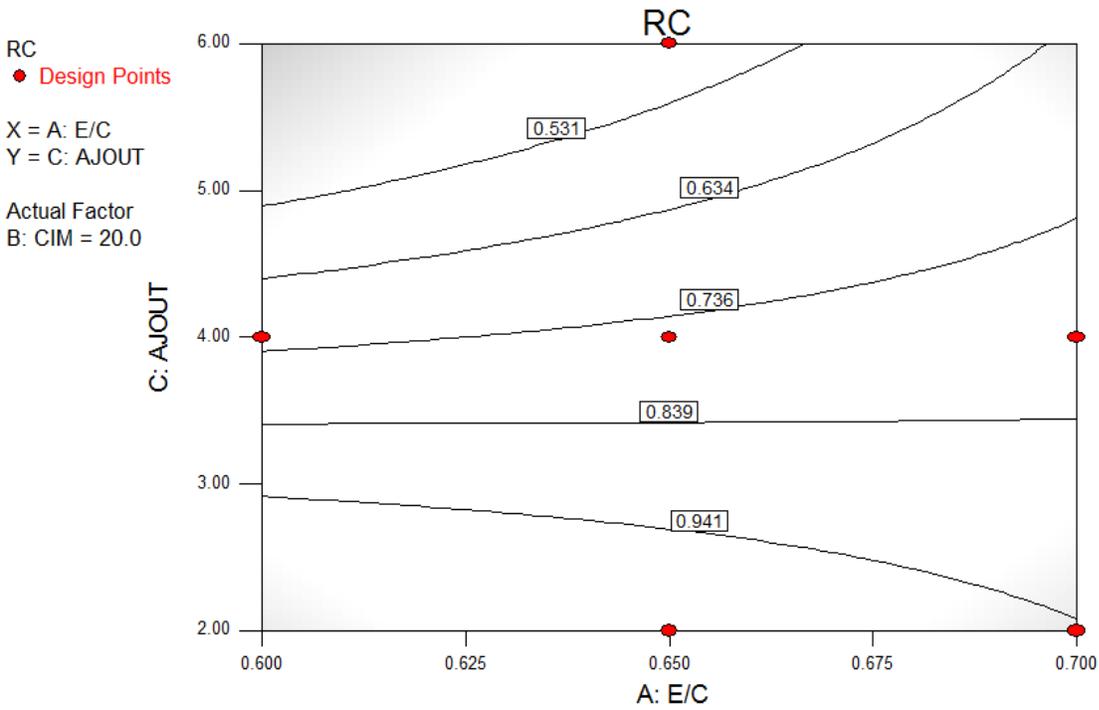
N°	Valeurs observées	Valeurs prévues	Résiduels
1	0.940	1.044	-0.104
2	1.000	1.054	-0.054
3	0.150	0.069	0.081
4	0.450	0.797	-0.347
5	0.900	0.765	0.135

Chapitre III : présentation et analyses les résultats

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



Chapitre III : présentation et analyses les résultats



Selon les figures 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.

Chapitre III : présentation et analyses les résultats

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

La conductivité

L'analyse statistique des Modeles

Source	R2	
Linear	0.39041025	
2FI	0.44129994	
Quadratic	0.77562566	Suggested

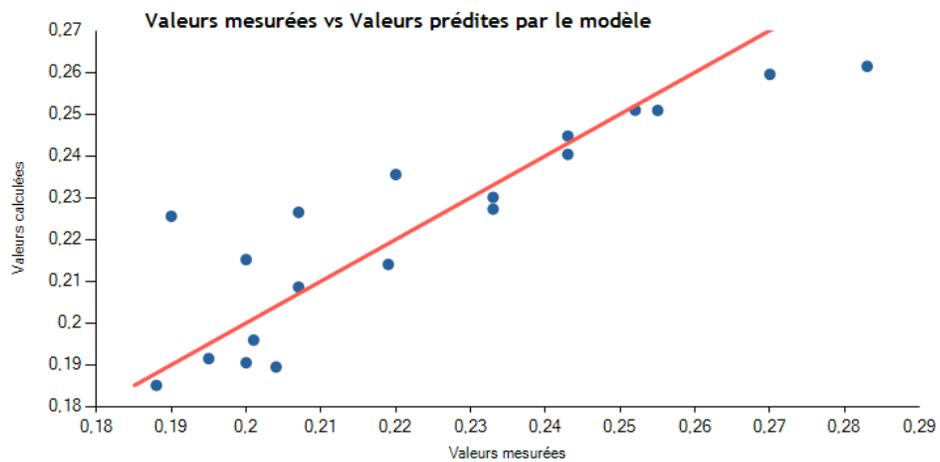
Equation du modèle

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

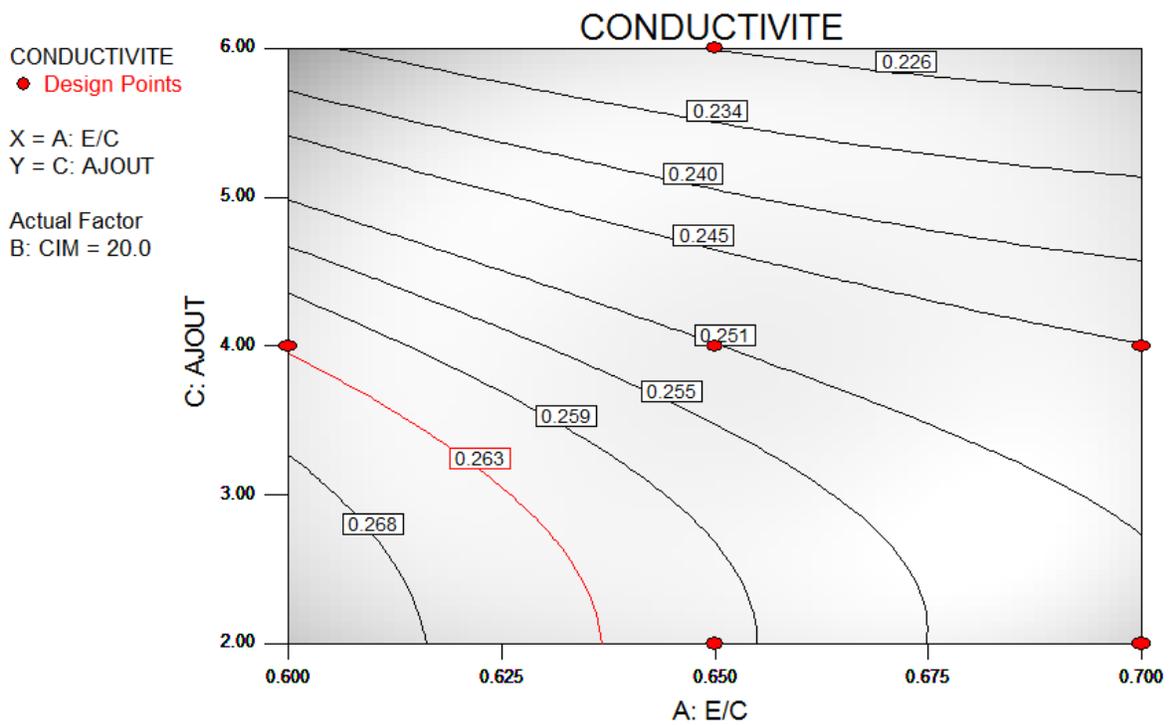
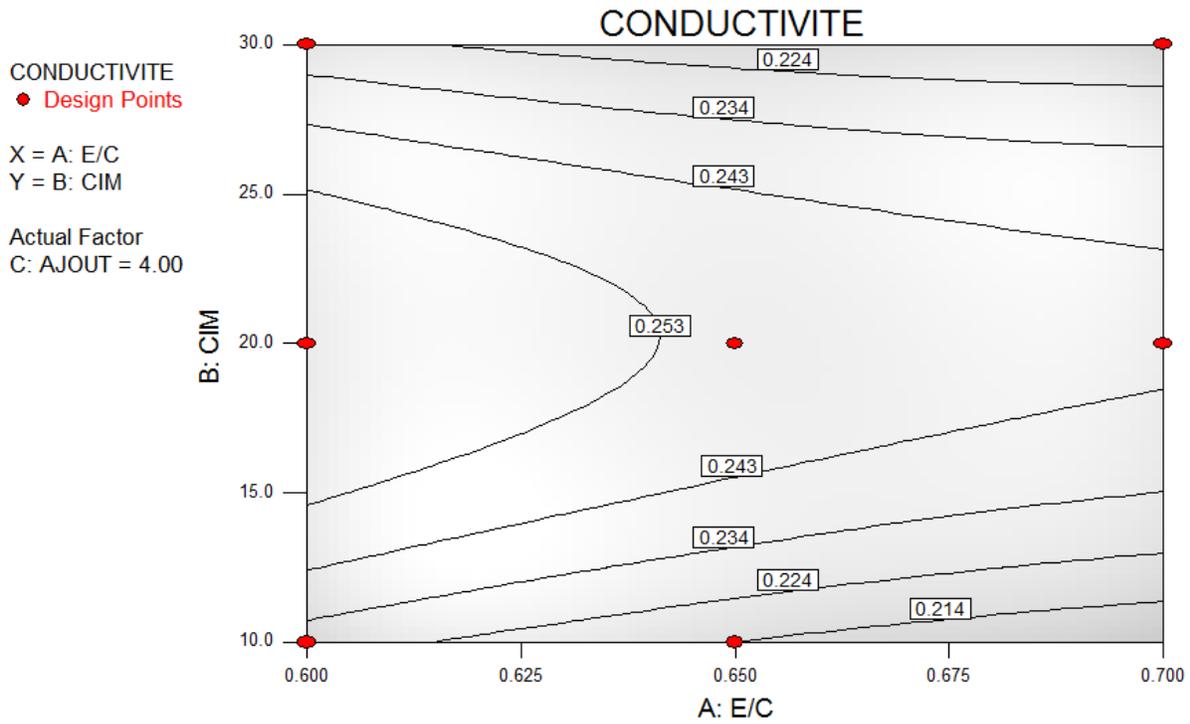
N°	Valeurs observées	Valeurs prévues	Résiduels
1	0.200	0.216	-0.016
2	0.235	0.231	0.004
3	0.188	0.185	0.003
4	0.243	0.245	-0.002
5	0.201	0.196	0.005
6	0.207	0.227	-0.020
7	0.195	0.192	0.003
8	0.207	0.208	-0.001
9	0.219	0.214	0.005
10	0.204	0.189	0.015

Chapitre III : présentation et analyses les résultats

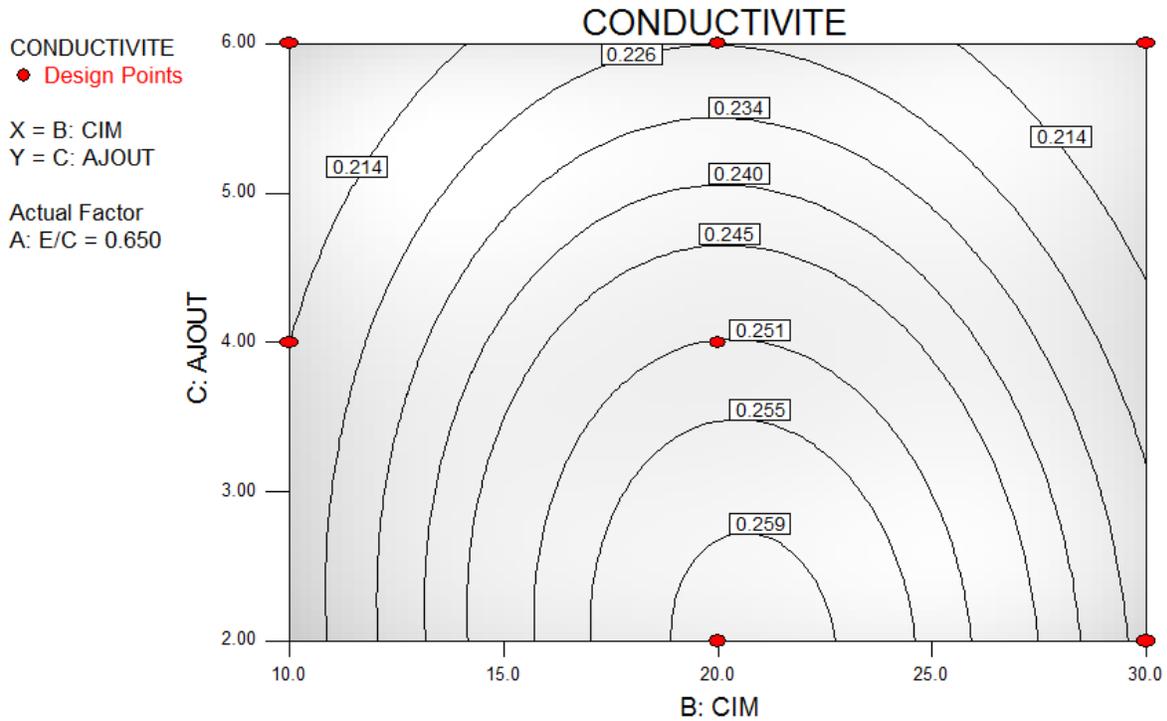
11	0.243	0.241	0.002
12	0.252	0.251	0.001
13	0.220	0.236	-0.016
14	0.270	0.260	0.010
15	0.200	0.190	0.010
16	0.285	0.262	0.023
17	0.190	0.226	-0.036
18	0.235	0.229	0.006
19	0.255	0.251	0.004



Chapitre III : présentation et analyses les résultats



Chapitre III : présentation et analyses les résultats



Selon les figures 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.

La densité

L'analyse statistique des Modeles

Source	R-Squared	
Linear	0.8022938	
2FI	0.8968945	Suggested
Quadratic	0.9368161	
Cubic	0.99702337	Aliased

Equation du modèle

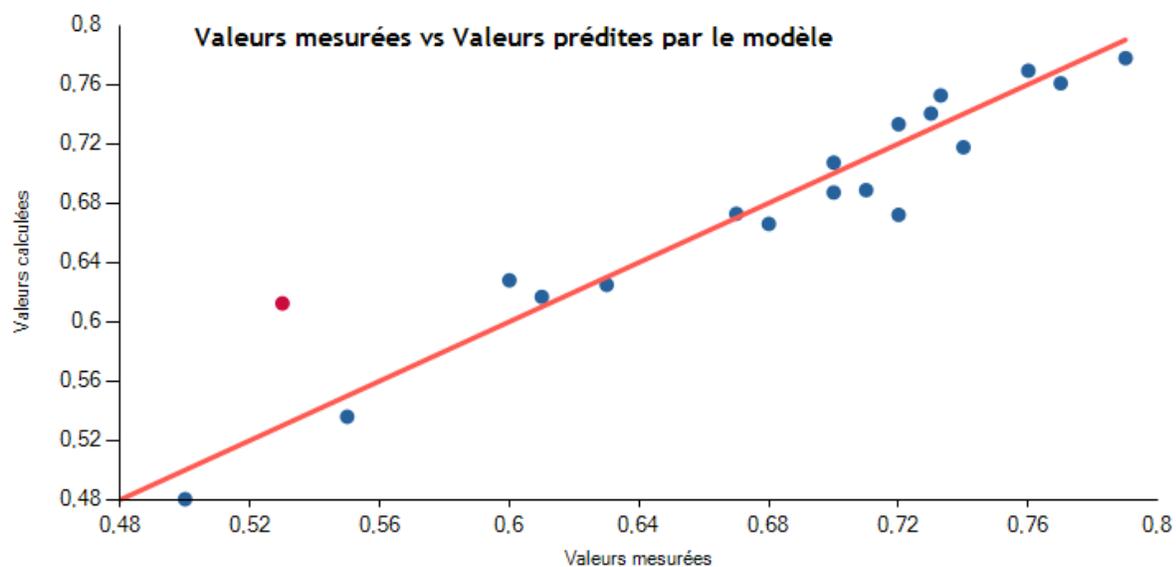
Chapitre III : présentation et analyses les résultats

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

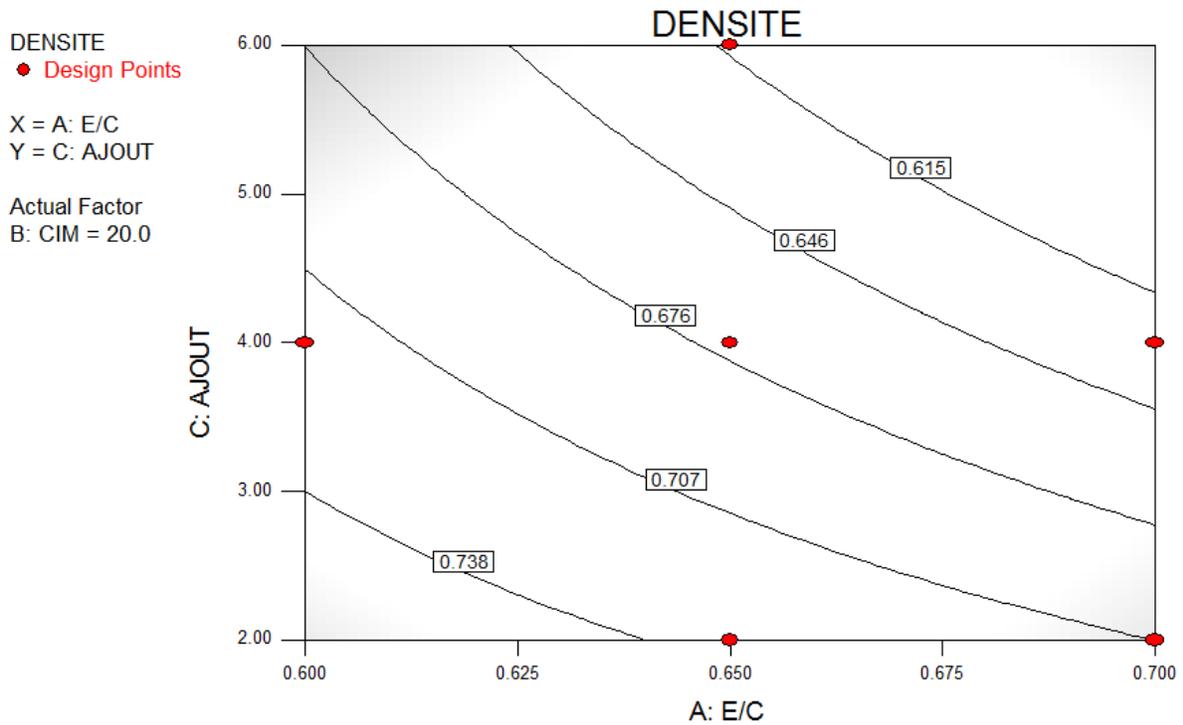
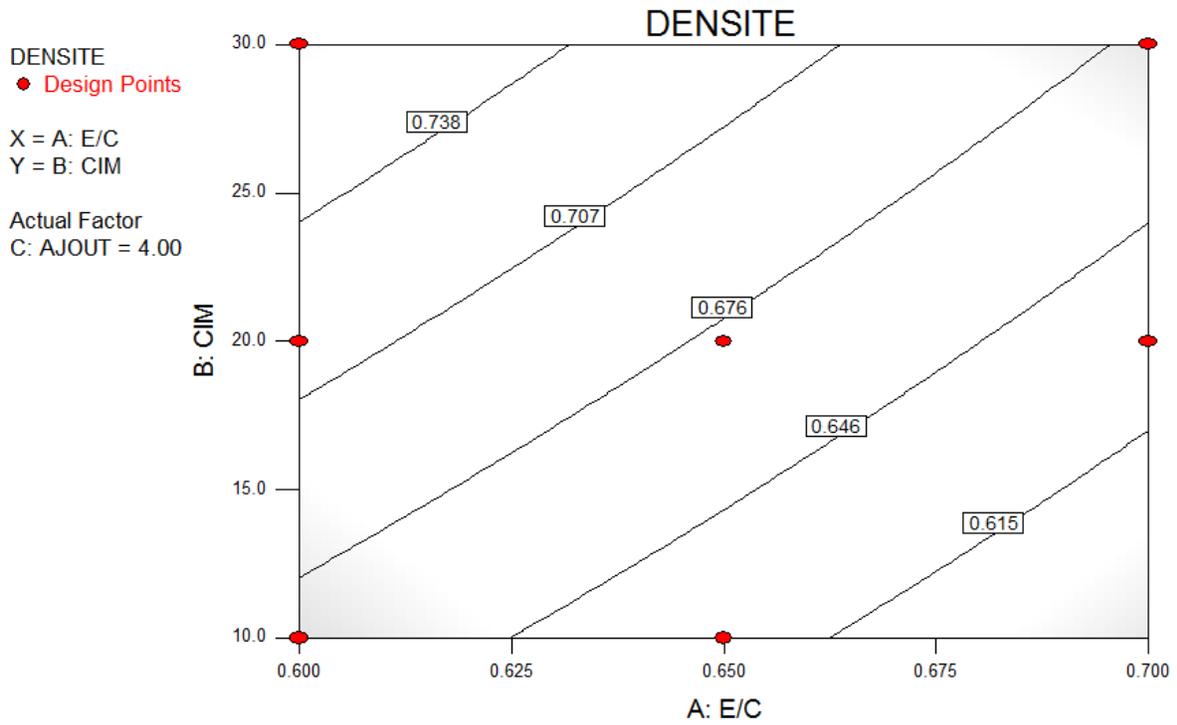
N°	Valeurs observées	Valeurs prévues	Résiduels
1	0.720	0.672	0.048
2	0.733	0.753	-0.020
3	0.500	0.480	0.020
4	0.600	0.628	-0.028
5	0.770	0.761	0.009
6	0.760	0.769	-0.009
7	0.550	0.536	0.014
8	0.700	0.687	0.013
9	0.630	0.625	0.005
10	0.610	0.617	-0.007
11	0.790	0.778	0.012
12	0.700	0.707	-0.007
13	0.730	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

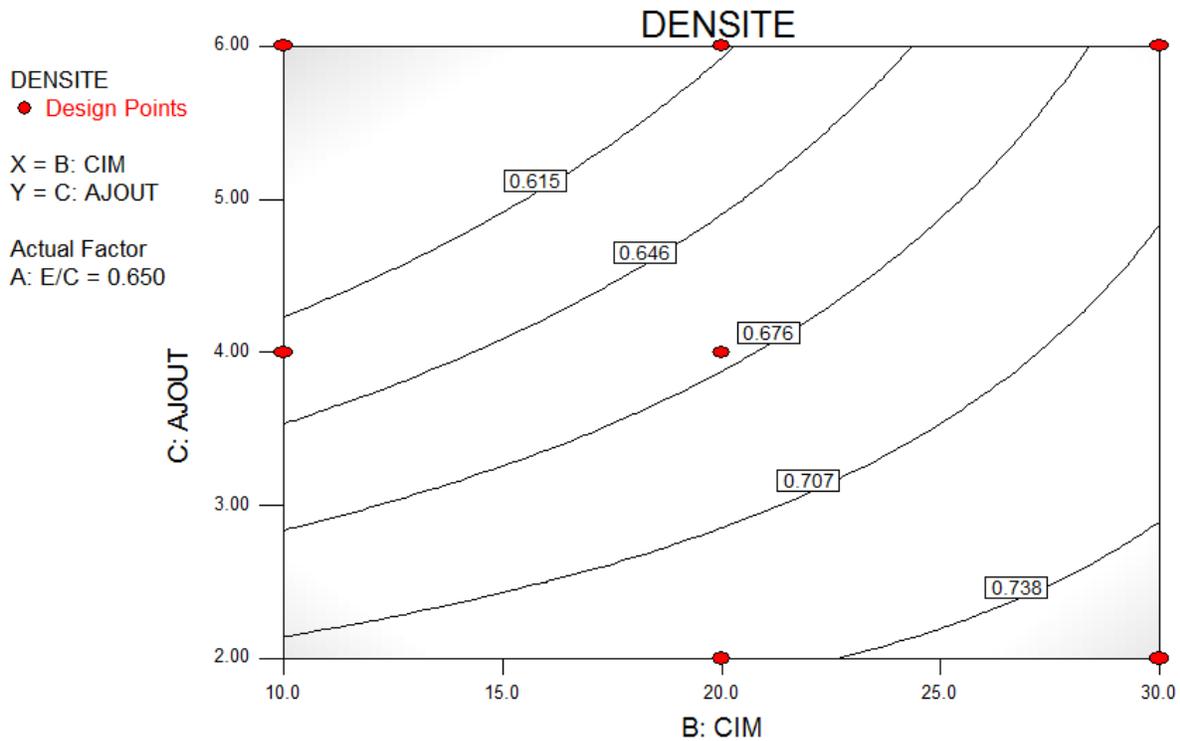
Chapitre III : présentation et analyses les résultats

19	0.670	0.673	-0.003
----	-------	-------	--------



Chapitre III : présentation et analyses les résultats





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.

III.3.3. 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 directe sur 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
- ❖ La conductivité thermique diminuer en fonction de pourcentage d'ajout bio-sourcier.

Conclusion générale

Chapitre IV :Conclusion générale

IV.1.conclusion

L'objectif à travers cette étude est faire une comparaison entre deux type de béton cellulaire tel que **béton cellulaire bio-sourcier a base des déchet industrielle** et **béton cellulaire a base d'un sable préparé.**

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

A travers cette étude on vise deux objectifs, à savoir la faisabilité d'utilisation des matériaux locaux pour produire des bétons cellulaire, le deuxième se résume dans l'influence du sable préparer à base d'ajouts minéraux actif sur les différents propriétés thermique , physique et mécanique des bétons cellulaire élaborés.

La deuxième étude est basé sur l'élaboration d'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) el 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.

L'objectif de cette étude est remplacé les matériaux fossile a partir la valorisation des matériaux végétaux issus renouvelable qui n'entraîne pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de son exploitation, et savoir leur influence sur les propriétés thermomécanique.

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Chapitre IV: Conclusion générale

	Béton cellulaire bio-sourcier à base des déchets industriels	Béton cellulaire a base d'un sable préparé
Résistance a la compression	<p>-le dosage en ciment est influe positivement sur la résistance a la compression.</p> <p>-le taux d'ajout bio-sources est influe négativement à cause de sa légèreté et sa faible cohésion son utilisation doit être limité.</p>	<p>-La substitution des ajouts minéraux et adjuvant dans les sables préparés conduit à une augmentation considérable de la résistance mécanique de béton cellulaire, notamment le laitier des hautes Fournaux, et (SP)</p> <p>- le sable concassé développe des résistances mécaniques meilleures comparativement à celles d'un sable d'oued souf.</p>
Densité	<p>-- la différence des densités des déchets bio-source utilisées due à sa légèreté et sa structure fibreuse notamment la ouate de cellulose.</p> <p>Augmente les alvéoles au sein de béton.</p>	<p>- -La présence des ajouts actif influe d'une manière significative sur la densité</p> <p>-L'utilisation de l'adjuvant (SP) diminue le rapport E/C qui influe directement sur la masse volumique quel que soit le sable utilisé</p>
Conductivité thermique	<p>- - Le dosage en ciment n'influe pas d'une manière directe sur la conductivité thermique par contre ; la présence des matériaux bio-</p>	<p>- L'utilisation de l'adjuvant (SP) conduit à une diminution de l'isolation thermique quel que soit le type de sable.</p> <p>- La présence des ajouts actifs</p>

Chapitre IV: Conclusion générale

	source influe d'une manière significative.	influe D'une manière négative sur la conductivité thermique
--	--	---

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.

- ❖ Formulation et caractérisation du béton cellulaire bio-sourcé a base de sable préparé.

Liste des références

Liste des références

[1] : https://www.researchgate.net/publication/280087011_CHARACTERISATIONS_MECHANIQUE_ET_THERMIQUE_DE_BETONS_AGRO-SOURCES

[2] : <http://doc.lerm.fr/le-beton-de-chanvre/>

[3] : **D. Sedan**, “Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite,” Groupe d’étude des Matériaux Hétérogènes - Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, 2007.

[4] : **T. T. Nguyen**, “Contribution à l’étude de la formulation et du procédé de fabrication d’éléments de construction en béton de chanvre,” Thèse de Doctorat de l’Université de Bretagne-Sud, 2010.

[5] : <http://www.chanvrewallon.be/la-chenevotte>

[6] : **Gandolfi S., Ottolina G., Riva S.**, “Complete Chemical Analysis of Carmagnola hemp hurds and structural features of its components”. *Bioresources*, 8 (2), 2641-2656, 2013.

[7] : **Cappelletto P., Brizzi M., Mongardini F., Barberi B., Sannibale M., Nenci G., Poli M., Corsi G., Grassi G., Pasini P.**, "Italy grown hemp yield, composition and cannabinoid content". *Industrial Crops and Products*, 13 (2), 101-113, 2001.

[8] : **Niyigena C., Amziane S., Chateauneuf A., Arnaud L., Bessette L., Collet F., Lanos C., Escadeillas G., Lawrence M., Magniont C., Marceau S., Pavia S., Peter U., Picandet V., Sonebi M., Walker P.**, “Variability of the mechanical properties of hemp concrete”. *Materials Today Communications*, 7, 122-133, 2016

[9] : **Niyigena C.**, Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne. Thèse de doctorat, Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne, 2016.

[10] : **Fourmentin M.**, Impact de la répartition et des transferts d’eau sur les propriétés des matériaux de construction à base de chaux formulées. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, 2015.

[11] : **Balciunas G., Pundiene I., Lekunaite-Lukosiune L., Vejelis S., Korjakins A.**, “Impact of hemp shives aggregates mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material”. *Industrial Crops and Products*, 77, 724-734, 2015.

[12] : **Jiang Y., Lawrence M., Ansell M., Hussain A.**, “Cell wall microstructure, pore size distribution and absolute density of hemp shiv”. *Royal Society Open Science*, 5, 1-15, 2018..

[13] : **T. T. Nguyen**, “Contribution a l’étude de la formulation et du procédé de fabrication d’éléments de construction en béton de chanvre,” Thèse de Doctorat de l’Université de Bretagne-Sud, 2010.

[14] : **V. Cerezo**, “Propriétés mécaniques , thermiques et acoustiques d’un matériau a base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique,” Thèse de Doctorat de l’ENTPE de Lyon, 2005.

[15] : **I. Couedel**, “Le béton de chanvre comme matériau de construction, première approche mécanique du béton de chanvre,” ENTPE, Vaulx-en-Velin, 1998.

[16] : **L. Arnaud and E. Gourlay**, “Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 50–56, Mar. 2012.

[17] : : **T. T. Nguyen**, “Contribution a l’étude de la formulation et du procédé de fabrication d’éléments de construction en béton de chanvre,” Thèse de Doctorat de l’Université de Bretagne-Sud, 2010.

[18] : **V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saidi, and H. De Baynast**, “Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 2, pp. 231–241, Feb. 2012.

[19] : **V. Nozahic**, “Vers une nouvelle démarche de conception des bétons végétaux Lignocellulosiques base sur la compréhension et l’amélioration de l’interface Liant/Végétal. Application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol

associés à un liant ponce/chaux,” Thèse de Doctorat de l’Université Blaise Pascal, 2012.

[20] : **M. Chabannes, V. Nozahic, and S. Amziane**, “Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders,” *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 6, pp. 1815–1829, Mar. 2014.

[21] : : **Gourlay E.**, *Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques hygrothermiques du béton de chanvre : détermination de l’impact des matières premières et de la mise en oeuvre*. Thèse de doctorat, MEGA ENTPE, Vaulx-en-Velin, 2014.

[22] : **Diquelou Y., Gourlay E., Arnaud L., Kurek B.**, “Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with inorganic matrix”. *Cement and Concrete Composites*, 55, 112-121, 2015.

[23] : **Gourlay E.**, *Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques hygrothermiques du béton de chanvre : détermination de l’impact des matières premières et de la mise en œuvre*. Thèse de doctorat, MEGA ENTPE, Vaulx-en-Velin, 2014.

[24] : **Diquelou Y., Gourlay E., Arnaud L., Kurek B.**, "Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete”. *Construction and Building Materials*, 112, 506-517, 2016.

[25] : **Tronet P., Lecompte T., Picandet V., Baley C.**, "Study of lime hemp concrete (LHC) – Mix design, casting process and mechanical behavior”. *Cement and Concrete Composites*, 67, 60-72, 2016.

[26] : **Nguyen T.T.**, *Contribution à l’étude de la formulation et du procédé de fabrication d’éléments de construction en béton de chanvre*. Thèse de doctorat : Université de Bretagne-Sud, Lorient, 2010.

[27] : **Chabannes M.**, *Formulation et étude des propriétés mécaniques d’agro bétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l’éco-construction*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines d’Alès, Alès, 2015.

[28] : **Thonier G., Tostivint C., Bono P., ONRB : enjeux de la valorisation de la biomasse en matériaux bio sources.** Bio by Deloitte et FRD, 2015.

[29] : Construire en chanvre. *Construire en chanvre – Règles professionnelles d'exécution*, SEBTP, Paris, 2012

[30] : **Colinart T., Glouannec P., Chauvelon P.**, "Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete". *Construction and Building Materials*, 30, 372-380, 2012..

[31] : **Picandet V.**, "Bulk density and compressibility". *Bio-aggregates Based Building Materials*, RILEM State-of-the-Art reports 23, 167-187, Springer, Dordrecht, 2017.

[32] : **B. BENKHALFA** «*contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués*». Thèse de magistère. Université d'Annaba. 1988.

[33] : **A. NEVILLE** : «*Propriétés des bétons*». Eyrolles. Paris, 2000.

[34] : **M. CONTANT**: «*Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux*». Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000.

[35] : **M.SHINK** «*Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers*». Université Laval Québec Avril 2003.

[36] : **G. DREUX & J. FESTA** : «*Nouveau guide du béton et de ses constituants*». 8ème Édition. Eyrolles. Mai 1998.

[37] : **A. NEVILLE** : «*Propriétés des bétons*». Eyrolles. Paris, 2000.

[38] : **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.

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

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

[41] : **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.**

[42] : **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.

[43] : **Abdelmajid EL BOUARDI, Hassan EZBAKHE, TaibAJZOUL,Volker WITWTER** (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.

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

[45] : **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.

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

[47] : **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.

[48] : http://www.ciment.wikibis.com/beton_cellulaire.php, dernière visite le 21/01/2018.

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

[50] : **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.

[51] : **christian Guegan , philippe legras, jean françois mazzoleni, christian Colin, thomas Breiner et Nicolas Foussier** : <Mémonto du béton cellulaire >(2005).

[52] : **Jos Cox ,Jacques Sizaire, Pascal Meulders , Elly Van Overmiere, Albert Ilbert Ingeleare** : FeBeCel.Bruxelles .

[53] : [**Christian Guegan, Philippe Legras, JeanFrancoisMazzoleni, ChristianColin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier**: «Mémento du béton cellulaire» (2005).].

[54] : Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials. Wittmann FH Amesterdam (1992) pp53-63].

[55] : <https://www.lemagdestravaux.com/dossier-39-beton-cellulaire.html>

[56] : <https://www.brico.fr/actualites/beton-cellulaire-avantages-inc>

[57] : <http://cneaf.fr/wp-content/uploads/2018/12/CR-163eTRNTJ-du-25-octobre-2018.pdf>

[58] : https://www.arecidf.fr/fileadmin/DataStorageKit/AREC/Etudes/pdf/les_filières_franciliennes_des_materiaux_et_produits_bio_sources_pour_la_construction.pdf.