

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER** en **Génie Civil**

Spécialité : Efficacité Energétique dans les bâtiments de constructions

Par : M. Selmane TOULEB

Sujet

Bloc de béton avec isolant intégré

Soutenu, le **02/10/2021**, devant le jury composé de :

Fouad GHOMARI

Zakia KHELIFI

Omar TALEB

Pr

MCB

MCA

UAB. Tlemcen

UAB. Tlemcen

UAB. Tlemcen

Président

Examinatrice

Encadrant

Année Universitaire 2020 - 2021

REMERCIEMENTS

Tous mes remerciements à Allah le Tout-Puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadrant, qui sans lui, ce projet de recherche n'aurait pas été possible. Il s'agit de M. TALEB Omar, Maître de conférences au département génie civil de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen.

Mes sincères remerciements vont également à M. GHOMARI Fouad, Professeur à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, qui a accepté de présider le jury.

Je remercie aussi Dr. KHELIFI Zakia, Maître de conférences au département de Génie Civil à l'université de Tlemcen qui a bien voulu accepter d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du laboratoire SEROR, spécialement M. BOUTERFAS Mustapha qui m'ont autorisé à travailler et aider au niveau du laboratoire de l'entreprise.

Je tiens aussi à remercier l'équipe du laboratoire EOLE et de la faculté pour leurs précieuses aides spécialement Dr. HENAOUI Mustapha.

Enfin je tiens à adresser mes sincères remerciements à mes enseignants du département de génie civil qui ont été toujours présents pour nous former, nous encourager et nous soutenir.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail
en premier lieu à mes chers parents
qui m'ont toujours soutenu
pour me permettre de réaliser tous mes objectifs ;
qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

A mes chers frères,

Aux deux familles TOUILEB et HABI

A toute la promotion EEBC,

A tous mes enseignants du primaire, moyen, lycée et université,

A tous mes camarades et mes amis

TOUILEB SELMANE

RESUMÉ

Le béton de bois est un matériau relativement récent qui s'inscrit dans la tendance actuelle de l'utilisation des matériaux biosourcés pour la construction. Ce composite, formé d'un mélange de ciment, sable, eau et de copeaux de bois, peut présenter des propriétés intéressantes.

Dans ce travail, l'objectif principal est de concevoir plusieurs parpaings à base de différents taux de copeaux de bois pour mettre en évidence l'effet de leur intégration dans la masse du bloc de béton sur ses propriétés thermiques, acoustiques et mécaniques afin de juger des performances acquises par rapport à celles du bloc de béton conventionnel.

Dans ce cadre, une série d'essais expérimentaux ont été réalisés au niveau du laboratoire qui ont pu montrer l'effet bénéfique des copeaux de bois pour réduire les déperditions thermiques et phoniques. Toutefois, l'ajout de ces copeaux de bois ne sera pas sans incidence sur les performances mécaniques ; mais restent au-dessus de celles des parpaings commercialisés.

Mots-clés : béton biosourcé, copeaux de bois, parpaing, isolation thermique, isolation acoustique, résistance mécanique.

SUMMARY

Wood concrete is a relatively new material that is part of the current trend in the use of bio-based materials for construction. This composite, formed by a mixture of cement, sand, water and wood chips, can present interesting properties.

In this work, the main objective is to design several cinder blocks based on different rates of wood chips to highlight the effect of their integration into the mass of the concrete block on its thermal, acoustic and mechanical properties in order to judge the performance acquired compared to those of the conventional concrete block.

Within this framework, a series of experimental tests were carried out at the laboratory level which were able to show the beneficial effect of the wood chips to reduce the thermal and phonic losses. However, the addition of these wood chips will not be without impact on the mechanical performances; but remain above those of the commercialized cinder blocks.

Keywords: biosourced concrete, wood chips, cinder block, thermal insulation, acoustic insulation, mechanical resistance.

ملخص

الخرسانة الخشبية هي مادة جديدة نسبيًا وهي تنتمي إلى الاستعمالات الجديدة الذي تؤيد على استخدام المواد الحيوية في البناء. يتكون هذا المركب من خليط من الأسمنت والرمل والماء ورقائق الخشب، ويمكن أن يظهر خصائص مثيرة للاهتمام. الهدف الرئيسي في هذا العمل هو تصميم العديد من الكتل الخرسانية بناءً على معدلات مختلفة من رقائق الخشب لإبراز تأثير اندماجها في الكتلة الخرسانية خاصة على خواصها الحرارية والصوتية والميكانيكية وذلك من أجل الحكم على الأداء المكتسب مقارنةً بتلك الخواص في الكتل الخرسانية التقليدية.

في هذا السياق، تم إجراء سلسلة من الاختبارات التجريبية على مستوى المخبر والتي أظهرت التأثير النافع لرقائق الخشب في تقليل فقد الحرارة والصوت. ولكن إضافة هذه الرقائق الخشبية قد تؤثر سلباً على الأداء الميكانيكي ومع ذلك تبقى خاصيتها الميكانيكية أعلى من خاصية الكتل الخرسانية المسوقة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الحيوية، رقائق الخشب، الطوب الخرساني، العزل الحراري، عزل الصوت، المقاومة الميكانيكية.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
RESUMÉ	III
SUMMARY	IV
ملخص.....	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES ABREVIATIONS	XII
LISTE DES SYMBOLES.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
1. CHAPITRE 1 : ISOLATION DANS LE BETON	2
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 ISOLATION DES MURS DANS UN BATIMENT	3
1.3 NOTIONS FONDAMENTALES RELATIVES A L'ISOLATION.....	5
1.4 LES EXIGENCES PERFORMANCE ÉNERGETIQUE DES BATIMENTS (PEB).....	8
1.5 LES MATERIAUX ISOLANTS DANS LE BATIMENT.....	11
1.6 BETON A BASE DE BOIS	18
1.7 CONCLUSION	19
2. CHAPITRE 2 : LE BOIS DANS LE BETON.....	20
2.1 INTRODUCTION	21
2.2 LE BOIS.....	21
2.3 LA MACROSTRUCTURE DU BOIS	21
2.4 LA MICROSTRUCTURE.....	22
2.5 ULTRASTRUCTURE ET COMPOSITION CHIMIQUE.....	22
2.6 COUPLE BOIS-BETON	23
2.7 CARACTERISTIQUES DU MATERIAU HYBRIDE BETON - BOIS	24
2.7.1 <i>Masse volumique</i>	24
2.7.2 <i>Porosité</i>	26
2.7.3 <i>Coefficient d'absorption d'eau des copeaux de bois</i>	27
2.7.4 <i>Comportement hygrométrique</i>	28
2.7.5 <i>Résistance mécanique à la compression</i>	30
2.7.6 <i>Propriétés thermiques</i>	33

2.8	CONCLUSION	34
3.	CHAPITRE 3 : PARTIE EXPERIMENTALE.....	35
3.1	INTRODUCTION	36
3.2	CARACTERISATION DES COPEAUX DE BOIS	36
3.3	FABRICATION DES BLOCS A BASE DE COPEAUX DE BOIS.....	36
3.3.1	<i>Le moule utilisé</i>	36
3.3.2	<i>Formulation des blocs</i>	37
3.3.3	<i>Mode de malaxage et confection</i>	37
3.4	MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	40
3.5	ESSAI THERMIQUE	42
3.6	ESSAI PHONIQUE.....	45
3.7	ESSAI DE COMPRESSION.....	47
3.8	CONCLUSION	50
	CONCLUSION GENERALE	51
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53
	ANNEXE.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Rôle de séparation des parois (Lamalle, 2015-2016)	3
Figure 1-2: Modes de déperdition de chaleur dans le bâtiment (Lamalle, 2015-2016)	5
Figure 1-3: Schéma de la conductivité thermique (web, conductivité thermique d'un matériau, 2007)	6
Figure 1-4: Le mur en pierre ayant une forte inertie, il emmagasine le froid extérieur	7
Figure 1-5: Le mur en pierre ayant une forte inertie, il emmagasine la chaleur intérieure et la restitue	7
Figure 1-6: Schéma de l'objectif PEB (web, objectif PEB, 2019).....	9
Figure 1-7: Niveau k (web, performance énergétique des bâtiments (PEB) industriels en région wallonne, 2016).....	11
Figure 1-8: Laine de verre (web, Ooreka maison, s.d.).....	12
Figure 1-9: Laine de roche (web, avantage de la laine de roche, s.d.)	13
Figure 1-10: L'argile expansée (web, laterlite. Comment utiliser l'argile expansée, s.d.).....	14
Figure 1-12: Polystyrène extrudé (web, durable, le bloc de l'habitat, s.d.)	15
Figure 1-11: Polystyrène expansé (web, thermiques, conseils, s.d.).....	15
Figure 1-14: Mousse de polyuréthane (web, mousse polyuréthane, s.d.)	15
Figure 1-13: isolant en polyuréthane (web, panneau isolant polyuréthane, s.d.)	15
Figure 1-15: Panneaux de liège (web, maison_eco_distribution, s.d.)	16
Figure 1-16: Laine de bois (web, h2o-isolation, s.d.)	17
Figure 1-17: Copeaux de bois (web, litière copeaux de bois, s.d.).....	18
Figure 1-18: Béton de bois (web, Vicat mélange bois et ciment dans un béton aux performances thermiques améliorées, 2021)	18
Figure 2-1: Le bois à l'échelle macroscopique (CLAIR, 2001).....	21
Figure 2-2: Représentation des axes principaux d'orthotropie (R, T, L) d'un bois résineux, aux échelles macro et microstructurelle, d'après Norimoto et Gril (1989). (Bousaid, 2003)	22
Figure 2-3 : Schématisation de la paroi cellulaire de trachéide, d'après Dinwoodie1981. (Bousaid, 2003)	23
Figure 2-4: Variation de la masse volumique sèche avec la fraction d'allègement en résidus de bois. (Taoukil et al., 2011).....	24
Figure 2-5: La masse volumique à l'état durci de béton ordinaire avec copeaux de bois (Ayache et al., 2019).....	25
Figure 2-6: La masse volumique à l'état durci de béton autoplaçant avec copeaux de bois (Ayache et al., 2019).....	25
Figure 2-7: La masse volumique à l'état durci de béton à haute performance avec copeaux de bois (Ayache et al., 2019).....	26
Figure 2-8: Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau (Belhadj et al., 2012).....	27
Figure 2-9: Essai d'absorption de l'eau pour le béton allégé avec la sciure de bois. (Taoukil et al., 2011).	28
Figure 2-10: Essai d'absorption de l'eau pour le béton allégé avec les copeaux de bois. (Taoukil et al., 2011).....	28

Figure 2-11: Capacité d'absorption d'eau de béton ordinaire à base des copeaux de bois (Ayache et al., 2019).....	29
Figure 2-12: Capacité d'absorption d'eau de béton autoplaçant à base des copeaux de bois (Ayache et al., 2019).....	29
Figure 2-13: Capacité d'absorption d'eau de béton à haute performance à base des copeaux de bois (Ayache et al., 2019).....	30
Figure 2-14: Variation de la résistance à la compression en fonction de la fraction d'allègement en résidus de bois. (Taoukil et al., 2011)	30
Figure 2-15: Variation de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique. (Taoukil et al., 2011).....	31
Figure 2-16: Béton de bois léger (Bouabdallah et al., 2007)	31
Figure 2-17: Evolution de la contrainte de compression en fonction des déformations à 7 jours (Bouabdallah et al., 2007).....	32
Figure 2-18: Evolution de la contrainte de compression en fonction des déformations à 14 jours (Bouabdallah et al., 2007).....	32
Figure 2-19 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de déformation à 21 jours (Bouabdallah et al., 2007).....	32
Figure 2-20 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de déformation à 28 jours (Bouabdallah et al., 2007).....	32
Figure 2-21: Conductivité thermique des composites (Lahouioui et al., 2016)	33
Figure 2-22: Diffusivité thermique des composites (Lahouioui et al., 2016)	34
Figure 3-1: Copeaux de bois utilisés	36
Figure 3-2: Dimensions du bloc	37
Figure 3-3: Bétonnière	37
Figure 3-4: La pesée du ciment	38
Figure 3-5: La pesée du sable.....	38
Figure 3-6: La pesée des copeaux de bois.....	38
Figure 3-7: Introduction des ingrédients	38
Figure 3-8: Bloc de béton de bois confectionné avec le moule manuel	39
Figure 3-9: Bloc béton de bois.....	39
Figure 3-10: Relevé de la valeur de la masse	40
Figure 3-11 : Forme du bloc	41
Figure 3-12: La pose des blocs	42
Figure 3-13: Intégration de la lampe.....	42
Figure 3-14: La pose des capteurs	43
Figure 3-15: Essai thermique	43
Figure 3-16: Amplificateur de son	45
Figure 3-17: L'appareil de mesure	45
Figure 3-18: Banc d'essai de compression.....	47
Figure 3-19: Blocs après l'essai de compression	48

Figure 3-20: Fissure de rupture du bloc..... 50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Valeurs Umax/Rmin : réglementation PEB depuis le 1er janvier 2014 (web, Guide des exigences et procédures Travaux PEB en Région de Bruxelles-Capitale, 2015)	10
Tableau 1-2: Caractéristiques du béton de liège (web, FICHE TECHNIQUE - GRANULE DE LIEGE NATUREL, 2007)	16
Tableau 1-3: Résistance thermique en fonction de l'épaisseur (web, FICHE TECHNIQUE - GRANULE DE LIEGE NATUREL, 2007)	16
Tableau 1-4: Caractéristiques des panneaux en laine de bois (CNERIB Algérie, 1994)	17
Tableau 2-1 : Masse volumiques et porosité des bétons étudiés (Belhadj et al., 2012)	26
Tableau 2-2: Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau (Belhadj et al., 2012)	27
Tableau 2-3: Propriétés thermiques des bétons étudiés (Belhadj et al., 2012)	33
Tableau 3-1: Composition du béton de bois	37
Tableau 3-2 : Masse des blocs	40
Tableau 3-3 : Masse volumique	41
Tableau 3-4: Résultat d'essai thermique	44
Tableau 3-5: Résultat essai phonique	46
Tableau 3-6: Résultat essai de compression	47
Tableau 3-7: Résultat essai de flexion	49

LISTE DES ABREVIATIONS

Rb/B : résidu de bois intégré dans le béton.

BSB : béton sciure de bois.

BCB : béton copeaux de bois.

S-TR : sans traitement.

TR : traitement.

BSC : béton de sable sans sciure.

BCNT : béton de sable avec sciure non traité.

BCT : CF : béton de sable traité avec : 85% ciment + 15% filler de calcaire.

BCT : CH : béton de sable traité avec : 80% ciment + 20% chaux.

BO : béton ordinaire.

BAP : béton auto plaçant.

BHP : béton haute performance.

BBL : béton de bois léger.

CB : Copeaux de bois

LISTE DES SYMBOLES

λ : coefficient de conductivité thermique [W.m⁻¹.K⁻¹]

R : résistance thermique [m².K.W⁻¹]

U : transmission thermique [W.m⁻².K⁻¹]

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux utilisés dans l'industrie de la construction continuent d'évoluer avec la technologie. Au fil des années, la compréhension collective de l'impact de la pollution sur notre planète a entraîné un changement progressif et radical dans le choix de certains matériaux utilisés dans la construction des bâtiments.

De plus, les exigences de la réglementation sur l'isolation thermique sont de plus en plus élevées. Ces obligations, couplées aux exigences de confort, de coût et de respect de l'environnement des habitants, favorisent le développement de matériaux plus performants et respectueux de l'environnement.

Dans le monde de la construction, on assiste de plus en plus à l'utilisation de matériaux dans les parois tels que les feuilles de liège ou de polystyrène expansé et qui peuvent améliorer le confort thermique des bâtiments. Ces feuilles sont généralement utilisées en combinaison avec les briques ou les parpaings.

Pour les parpaings commercialisés, ils sont principalement formulés avec du gravier, ciment et sable mais ne répondent pas souvent aux exigences du DTR C3-2 vu que le volet qui concerne leurs caractéristiques thermiques et acoustiques est négligé. Ce travail rentre dans cette thématique et a pour but de fabriquer des parpaings avec isolant intégré. Pour ce faire, les copeaux de bois sont choisis pour jouer le rôle d'isolant.

Afin d'avoir les atouts nécessaires pour commercialiser ces parpaings, nous avons aussi procédé à leur caractérisation thermique, acoustique et mécanique.

Le projet est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, des notions principales de l'efficacité énergétique sont abordés tout en présentant quelques matériaux qui sont largement utilisés pour l'isolation thermique ou acoustique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'utilisation des déchets dans le béton. A travers quelques résultats de la littérature, nous retraçons ce qui a été déjà accompli dans ce domaine.

Le troisième chapitre est réservé au travail expérimental que nous avons mené au niveau du laboratoire EOLE et de la SEROR. Ce chapitre regroupe les principaux résultats obtenus non seulement sur le plan de la formulation mais aussi sur la caractérisation des parpaings à base de copeaux de bois.

Chapitre 1 : Isolation dans le béton

1.1 Introduction

Les matériaux primitifs, naturels et écologiques dits « d'origine biologique » sont issus de ressources renouvelables, et sont principalement plus isolants et plus respectueux de l'environnement que la plupart des matériaux actuellement utilisés. Ils sont peu polluants et ont l'avantage d'offrir aux utilisateurs un habitat sain et une bonne qualité de l'air.

Les avantages économiques des entreprises vendant de tels matériaux innovants sont énormes. Les matériaux "verts" ne sont pas qu'une mode, cela semble être un choix judicieux, raisonnable et respectueux de l'environnement. Ces avantages sont largement utilisés comme arguments de vente.

L'utilisation de matériaux naturels prônée par certains designers bouscule les habitudes traditionnelles et conservatrices dans le domaine architectural.

Le rôle de l'architecte consiste à aider les clients à choisir les matériaux appropriés pour sa conception architecturale. Cette nouvelle approche écologique doit être intégrée dans sa réflexion (Lamalle, 2015-2016).

Cette recherche s'inscrit dans les tendances et les besoins actuels relatifs au confort. L'objet de ce travail est de concevoir des blocs de béton à base de copeaux de bois, un matériau composite qui semble répondre aux exigences suscitées. Ce travail tente de montrer que les blocs de béton en bois se positionnent comme un choix intéressant et peuvent remplacer les parpaings traditionnels.

1.2 Isolation des murs dans un bâtiment

Le mur extérieur constitue la limite de l'espace que l'on ne peut traverser a priori. Dans le cadre de l'habitat, les murs constituent une protection pour l'environnement extérieur qui peut être considéré comme dangereux. La force de la division de l'espace est directement liée à la hauteur, la transparence et l'épaisseur du mur (**Figure 1-1**). Du point de vue de la vision, de l'odorat ou du son, le mur fournit également une isolation de l'extérieur (ou d'autres espaces internes) (Lamalle, 2015-2016)

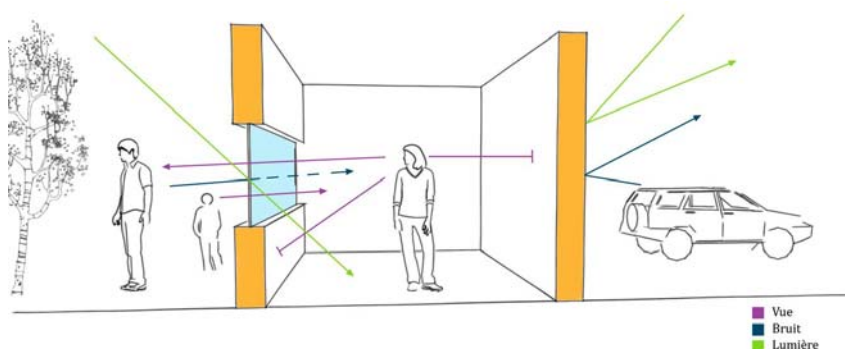


Figure 1-1: Rôle de séparation des parois (Lamalle, 2015-2016)

Il faut aussi lier le mur de séparation à la notion de stabilité. En effet, dans les bâtiments, le mot mur est un terme général qui peut désigner aussi bien les murs porteurs que les cloisons. Dans ce travail, les conventions suivantes s'appliqueront :

- ✓ Le terme mur sera utilisé pour désigner les éléments porteurs, qui sont généralement épais et contribuent à la stabilité du bâtiment.
- ✓ Le terme cloison sera utilisé pour désigner des cloisons légères et non porteuses, utilisées pour diviser l'intérieur d'un bâtiment en plusieurs zones.

Les matériaux de construction utilisés pour ériger les murs sont sélectionnés selon plusieurs critères selon les souhaits du maître d'ouvrage, architecte ou constructeur. Les critères de sélection sont nombreux, mais les principaux critères peuvent être listés : résistance mécanique à l'abrasion, protection contre les incendies et les intempéries... De plus l'aspect visuel, le coût et le pouvoir d'isolation sont des critères à ne pas négliger. En effet, la notion de murs est souvent associée à la notion d'isolation, notamment dans le cas du chauffage des bâtiments.

Il y a deux raisons principales à la nécessité d'isoler les bâtiments : d'abord pour le confort thermique des occupants, mais aussi pour limiter la consommation énergétique. En effet, il est nécessaire de limiter les déperditions thermiques du chauffage et de limiter la consommation électrique induite par le dispositif de refroidissement.

L'isolation a pour fonction de supprimer au mieux les déperditions de chaleur en hiver et d'empêcher la chaleur de pénétrer dans le bâtiment en été.

Il existe trois modes de pertes (**Figure 1-2**) : les pertes surfaciques (à travers les murs), les pertes linéaires (à travers les ponts thermiques aux nœuds de construction) et les pertes par infiltration ou ventilation.

Rappelons également les trois modes de transfert de chaleur : la conduction (par contact direct), la convection (par l'intermédiaire d'un fluide) et le rayonnement (sans milieu intermédiaire). L'isolant est donc un matériau qui possède une capacité de conduction la plus faible possible.

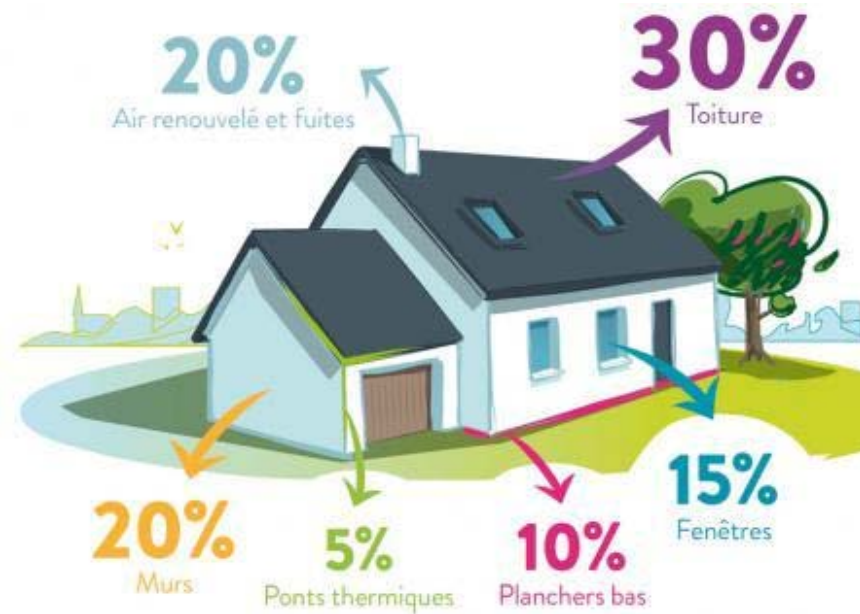


Figure 1-2: Modes de déperdition de chaleur dans le bâtiment (Lamalle, 2015-2016)

Afin de résister au flux de chaleur qui essaie de la traverser, la couche isolante est constituée avec autant de cellules d'air que possible pour empêcher le transfert de chaleur. Cet air immobile est un meilleur isolant que le matériau lui-même et fournira l'isolation thermique nécessaire. Pour cette raison, il existe une variété de matériaux isolants disponibles sur le marché. Les matériaux isolants les plus couramment utilisés sont les matériaux en fibres inorganiques (laine de verre et laine de roche) et les matériaux organiques cellulaires (polystyrènes expansé et extrudé et polyuréthane), ainsi que les isolants naturels qui peuvent être issus de la végétation (chanvre, fibre de bois,...) ou d'origine animale (laine de mouton, plumes de canard, etc.) et de matières organiques fibreuses (cellulose, coton, fibres synthétiques...). (web, Isolation thermique du bâtiment les points à connaître, 2020).

1.3 Notions fondamentales relatives à l'isolation

1.3.1 La conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction (**Figure 1-3**). Le coefficient λ [W/m.K] exprime la quantité de chaleur qui traverse en 1 seconde, 1 m² d'un matériau, épais d'un mètre, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 degré (K ou °C).

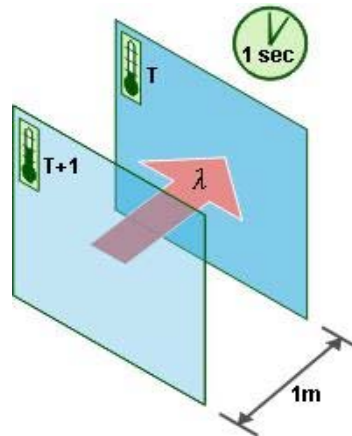


Figure 1-3: Schéma de la conductivité thermique (web, conductivité thermique d'un matériau, 2007)

Plus le λ sera faible, plus le matériau sera isolant. La conductivité thermique est influencée par l'humidité : étant donné que l'eau est un meilleur conducteur que l'air, l'humidité va diminuer les performances thermiques d'un isolant. Le coefficient λ va donc augmenter avec l'humidité. Par la suite, on utilisera ce coefficient pour comparer les matériaux entre eux. (web, conductivité thermique d'un matériau, 2007)

1.3.2 La résistance thermique (R)

La résistance thermique exprime la résistance d'un matériau au passage de la chaleur. Elle va alors dépendre de l'épaisseur de la paroi mise en œuvre et se calcule comme suit :

$$R = e / \lambda \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}]$$

Plus le R sera élevé, plus le matériau sera isolant. (web, résistance thermique, s.d.)

1.3.3 La transmission thermique (U)

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi (anciennement appelé K) est le flux de chaleur qui la traverse en 1 seconde, sur une surface d'1 m² et lorsque la différence de température entre les deux faces de la paroi est de 1 degré (K ou °C).

Il s'agit en fait de l'inverse de la résistance et se calcule comme suit :

$$U = 1/R \quad [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad \text{ou encore,} \quad U = \lambda / e$$

Plus le U sera faible, plus la paroi sera isolante. (web, Coefficient de transmission thermique (U), s.d.)

1.3.4 L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker la chaleur et à la restituer progressivement par la suite. Par la loi de la masse, plus le matériau sera lourd (masse volumique élevée), meilleure sera son inertie. Il faudra donc plus de temps pour réchauffer ou refroidir un matériau à grande inertie. L'inertie thermique permet d'offrir un confort en été comme en hiver. (web, Inertie thermique d'une maison, s.d.)

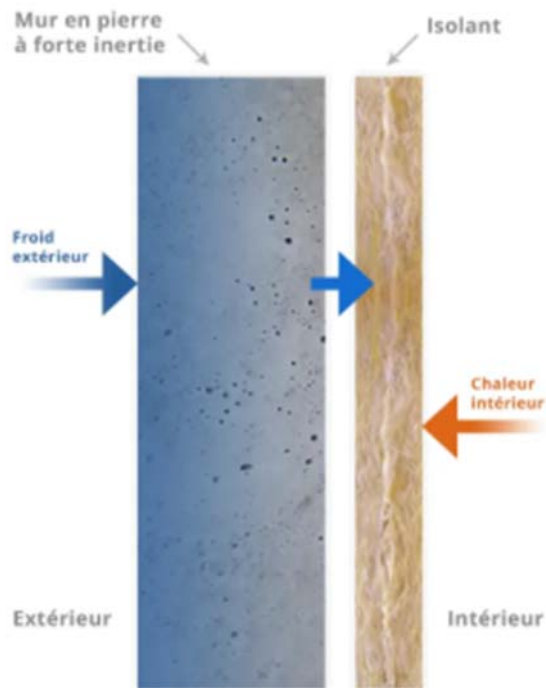


Figure 1-4: Le mur en pierre ayant une forte inertie, il emmagasine le froid extérieur

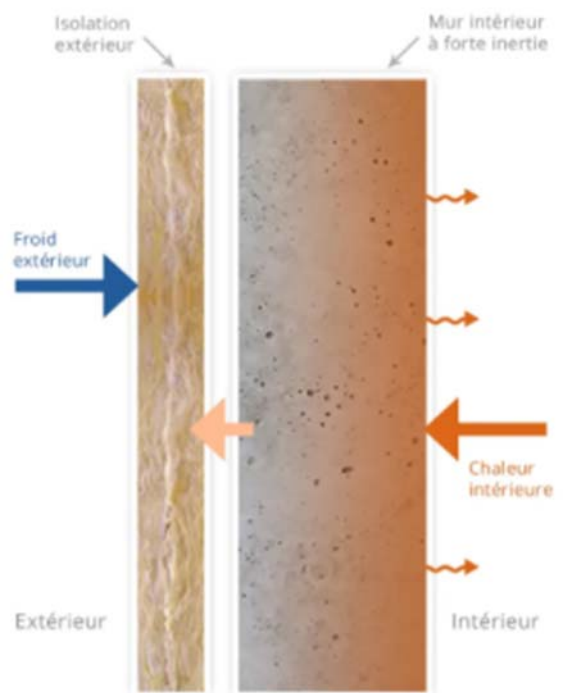


Figure 1-5: Le mur en pierre ayant une forte inertie, il emmagasine la chaleur intérieure et la restitue

1.4 Les exigences Performance Énergétique des Bâtiments (PEB)

Avant d'étudier les isolants et les différents types de blocs, il est nécessaire de rappeler les exigences Performance Énergétique des Bâtiments (PEB).

En Wallonie, il existe un règlement appelé PEB qui précise les exigences de consommation énergétique de tous les bâtiments devant demander un permis d'urbanisme (construction, rénovation, rénovation, etc.). L'objectif principal du PEB est de réduire la consommation d'énergie primaire (**Figure 1-6**) et d'offrir un confort intérieur agréable aux bâtiments.

Pour cela, trois points sont à considérer :

- La qualité de l'enveloppe :
Optimisez l'isolation, l'étanchéité à l'air, la ventilation contrôlée et les apports solaires en évitant la surchauffe.
- La qualité du système et des équipements auxiliaires :
Choisissez des équipements de chauffage, d'eau chaude sanitaire et d'éclairage de qualité.
- Qualité énergétique : Promouvoir les énergies renouvelables. (web, la performance énergétique des batiments)

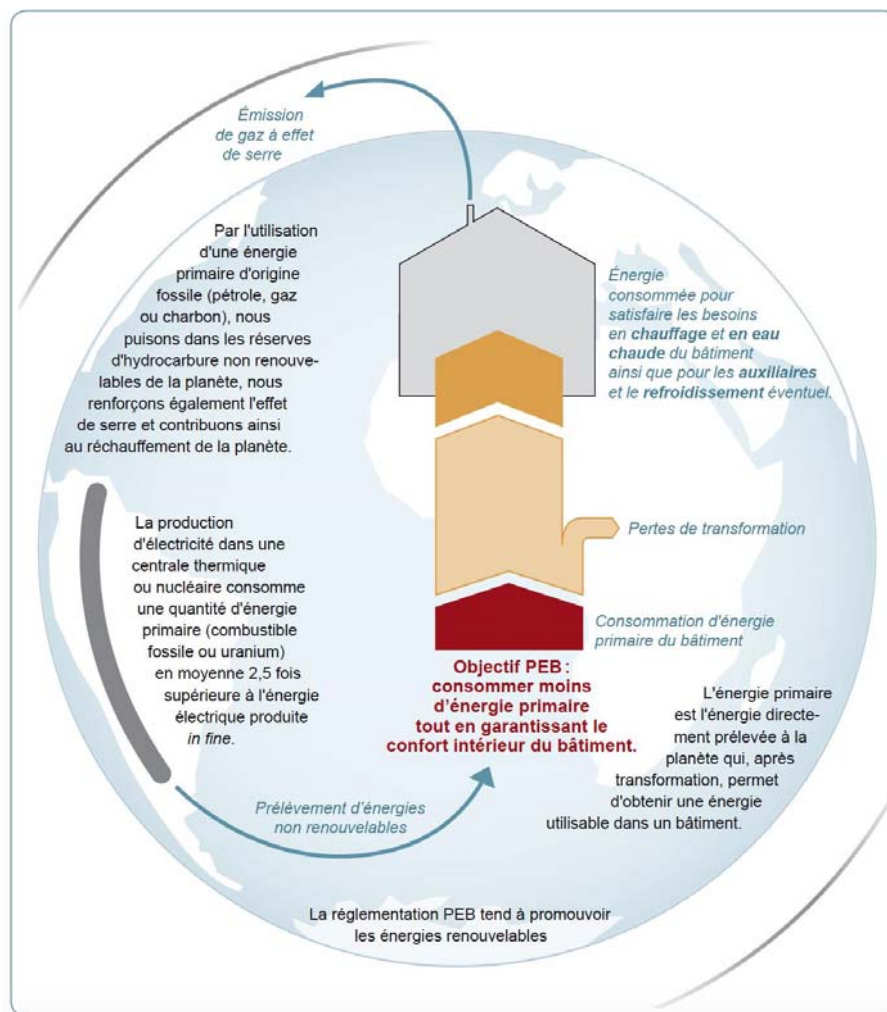


Figure 1-6: Schéma de l'objectif PEB (web, objectif PEB, 2019)

La réglementation stipule la valeur maximale de la transmission thermique U [$W/m^2.K$] ou la valeur minimale du coefficient de résistance thermique R [$m^2.K/W$] pour respecter les différentes parois de l'immeuble. La valeur de U dépend du type de mur (mur, toit, etc.), de la composition du mur et de son environnement immédiat. Le **tableau 1-1** ci-dessous donne les valeurs courantes à respecter. (web, Guide des exigences et procédures Travaux PEB en Région de Bruxelles-Capitale, 2015)

Tableau 1-1: Valeurs U_{max}/R_{min} : réglementation PEB depuis le 1er janvier 2014 (web, Guide des exigences et procédures Travaux PEB en Région de Bruxelles-Capitale, 2015)

Parois du volume protégé	U_{max} [W/m ² K]	R_{min} [m ² K/W]
Toitures et plafonds	0,24	
Fenêtres	1,80	
Vitrages	1,10	
Portes et portes de garage	2,00	
Façades légères	2,00	
Vitrages	1,10	
Murs <ul style="list-style-type: none"> • extérieurs ou tout autre environnement sauf sol, cave, vide sanitaire • en contact avec vide sanitaire ou cave • en contact avec le sol 	0,24	1,40 1,50
Briques de verre	2,00	
Planchers <ul style="list-style-type: none"> • en contact avec l'extérieur ou un espace adjacent non chauffé • sur sol, vide sanitaire, cave 	0,30 0,30	1,75
Parois mitoyennes	1,00	

En fonction du coefficient U du mur, de la surface de perte totale et du volume de protection du bâtiment, le niveau d'isolation global K peut être calculé (**Figure 1-7**). Ce coefficient caractérisera la performance globale de l'enveloppe du bâtiment : plus le K est faible, meilleure est la performance de la structure de l'enveloppe. Actuellement, la réglementation prévoit un K inférieur ou égal à 35 pour tout logement neuf. Dans les prochaines années, la valeur du coefficient à atteindre par les bâtiments neufs se rapprochera progressivement de la norme passive, c'est-à-dire que U est inférieur ou égal à 0,15 W/m²K, et le coefficient K est compris entre 10 et 20. (web, Niveau K, s.d.)

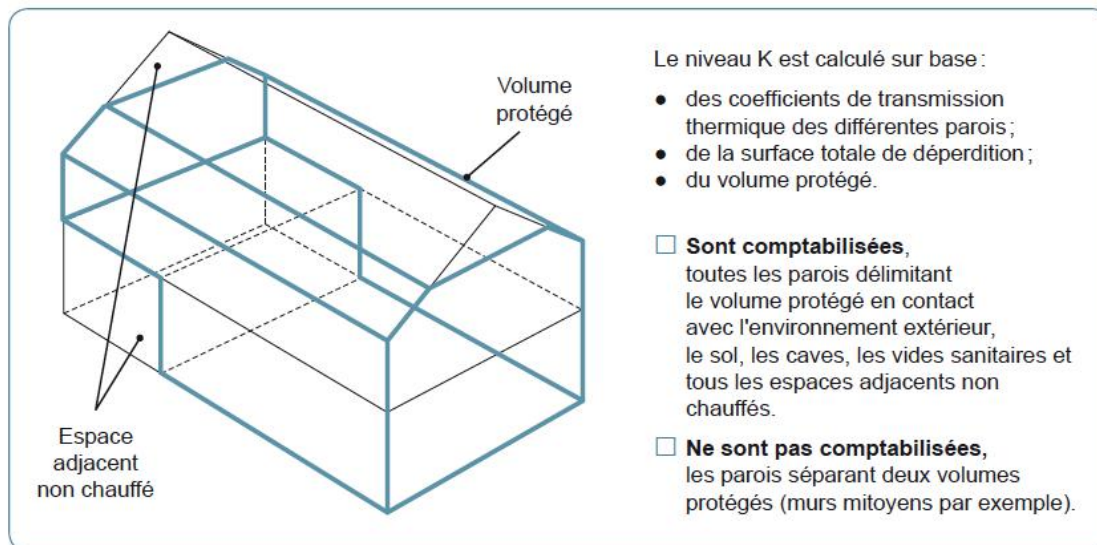


Figure 1-7: Niveau k (web, performance énergétique des bâtiments (PEB) industriels en région wallonne, 2016)

1.5 Les matériaux isolants dans le bâtiment

Les principaux isolants utilisés depuis les années 70 sont les polystyrènes, polyuréthanes et laines minérales. Ces matériaux sont très performants pour réduire les pertes de chaleur mais ont des impacts néfastes sur l'environnement et sur la santé. Progressivement, les mentalités ont changé et la construction s'est tournée vers des matériaux issus de ressources renouvelables et naturelles avec un faible impact environnemental et offrant un climat intérieur sain. (Lamalle, 2015-2016)

1.5.1 Isolants minéraux

1.5.1.1 Laine de verre

La laine de verre blanche est un matériau utilisé dans l'isolation de l'habitat. Fabriquée à partir de sable, la laine de verre blanche se maintient comme un enchevêtrement de fibres qui emprisonnent l'air immobile. Ce matériau permet l'isolation thermique et l'isolation acoustique. (web, Ooreka maison, s.d.)

La laine de verre est :

- **Écologique** : Elaborée à partir de verre recyclé à 60 % en moyenne, elle permet d'économiser plus de 100 fois l'énergie qu'il a fallu pour la fabriquer.
- **Thermique** : La laine de verre ne conduit pas la chaleur. Son coefficient de conductivité thermique, ou " λ ", se situe entre 0,030 et 0,040 (W/m.K).
- **Acoustique** : Sa structure permet d'affaiblir tout type de bruits : chocs, voisinage, extérieurs...
- **Incombustible** : Elle n'alimente pas l'incendie, limite la propagation des flammes et peut résister à une chaleur de plus de 600 °C. (web, toutes les caractéristiques de la laine de verre, s.d.)



Figure 1-8: Laine de verre (web, Ooreka maison, s.d.)

Cependant, la laine de verre peut présenter les inconvénients suivants :

- Elle peut se tasser dans le temps et ne pas résister dans les milieux humides.
- Elle présente un bilan écologique négatif avec des matières premières non renouvelables. (web, laine de verre: avantages et inconvénients, s.d.)
- Les fibres de la laine de verre peuvent être irritantes pour la peau, les yeux et la gorge.

1.5.1.2 Laine de roche

La laine de roche (MW) est fabriquée à partir d'une ressource abondante, le basalte (roche volcanique) de fondant et de coke, les performances thermiques sont bonnes (Harch, 2018)



Figure 1-9: Laine de roche (web, avantage de la laine de roche, s.d.)

La laine de roche peut être intégrée dans le parpaing ou bien coller vers l'extérieur.

La laine de roche est :

- **Excellente performance thermique :** La laine de roche doit son pouvoir isolant exceptionnel à sa structure qui comporte d'innombrables cellules d'air.
 - **Bonne performance acoustique :** En plus des nombreuses cellules d'air, la laine de roche contient également des fibres isolantes entremêlées, ce qui lui permet de se dresser contre les pollutions sonores.
 - **Un isolant qui résiste au feu :** La résistance au feu est un critère de choix important chez les isolants thermiques. Sachez que les incendies domestiques n'arrivent pas qu'aux autres.
 - **Un isolant qui limite la condensation intérieure :** La laine de roche se comporte très bien au contact de l'eau et de l'humidité.
 - **Un isolant qui éloigne les termites :** La laine de roche résiste très bien aux termites.
- (web, Laine de roche : caractéristiques, prix et choses à savoir, 2019)

Par contre, elle peut présenter les inconvénients suivants :

- Elle n'offre qu'une protection très limitée contre le réchauffement des intérieurs en été.
- La laine de roche se tasse avec le temps et a donc une longévité moyenne.
- Les fibres de la laine de roche sont très volatiles et peuvent présenter des risques pour les alvéoles pulmonaires.

1.5.1.3 L'argile expansée

L'argile expansée est fabriquée à partir d'argile naturelle brute, qui est séchée réduite en poudre puis mélangée à de l'eau. L'extraction du gaz des billes de 1 à 10 mm de diamètre produit leur expansion. Ses performances thermiques sont plutôt faibles, l'affaiblissement acoustique permis par l'argile expansé est correct, pour les bruits aériens comme pour les bruits d'impact. (Harch, 2018)



Figure 1-10: L'argile expansée (web, laterlite. Comment utiliser l'argile expansée, s.d.)

1.5.2 Isolants synthétiques

1.5.2.1 Le polystyrène

Le polystyrène (PS) est issu d'un dérivé de raffinage du pétrole, peut être présenté sous deux formes :

- **Le polystyrène expansé (PSE)** : est obtenu par polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane. Il est caractérisé par une grande légèreté. Sa conductivité est très faible (entre 0.031 et 0.038 w/m.K). (web, Le polystyrène expansé, un isolant efficace et accessible, s.d.)
- **Le polystyrène extrudé (XPS)** : est obtenu après polymérisation du styrène par extrusion sous pression d'une pâte de fusion grâce à un gaz lourd. Les performances thermiques sont légèrement meilleurs que celles du PSE (0.027 à 0.040 W/m.K). (web, Le polystyrène extrudé, économique et très isolant, s.d.)

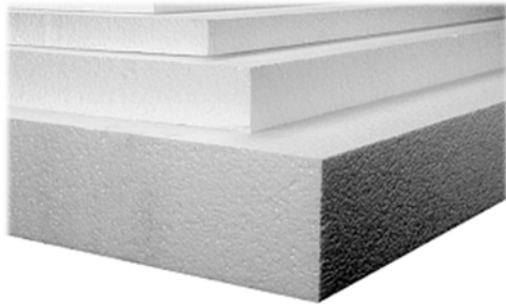


Figure 1-12: Polystyrène expansé (web, thermiques, conseils, s.d.)

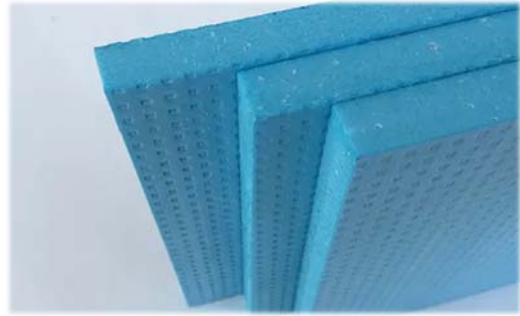


Figure 1-11: Polystyrène extrudé (web, durable, le bloc de l'habitat, s.d.)

1.5.2.2 Le polyuréthane

Les polyuréthanes sont obtenus par le mélange de trois composants : un polyol, un isocyanate et un agent d'expansion (CO_2) en présence de catalyseurs (Il influe uniquement sur la cinétique chimique, en accélérant une réaction).

Il s'agit d'un matériau léger avec une masse volumique de 40 Kg/m^3 .

Son coefficient de conductivité thermique est $\lambda = 0,022$ à $0,025 \text{ W/mK}$ pour les panneaux et $0,028$ à $0,030 \text{ W/m.K}$ pour les mousses.

Les performances acoustiques du polyuréthane sont médiocres.

Les domaines d'emploi : les toitures et les toitures terrasses, les sols et les doublages de murs.

Ces isolants sont recyclables par broyage ou traitement chimique. (web, Quels avantages et inconvénients pour le polyuréthane, s.d.)



Figure 1-14: isolant en polyuréthane (web, panneau isolant polyuréthane, s.d.)



Figure 1-13: Mousse de polyuréthane (web, mousse polyuréthane, s.d.)

1.5.3 Isolants végétaux

1.5.3.1 Le liège expansé

Le liège est le matériau naturel le plus intéressant pour l'isolation acoustique, il absorbe parfaitement les bruits d'impact, c'est pourquoi on utilise des rouleaux de doublure en liège ou

Chapitre 1 : isolation dans le béton

des panneaux de liège naturel polis en dessous. Parquet, carreaux de céramique ou toute autre couche de revêtement pour faire taire les pas, les chutes d'objets, etc. (web, Isoler ses sols avec du liège, s.d.)



Figure 1-15: Panneaux de liège (web, maison_eco_distribution, s.d.)

Tableau 1-2: Caractéristiques du béton de liège (web, FICHE TECHNIQUE - GRANULE DE LIEGE NATUREL, 2007)

CARACTERISTIQUES	NORMES et/ou TOLERANCE
Masse volumique	120kg/m ³ (4/16 mm) 100 kg/m ³ (4/8 mm)
Granulométries	4 / 16 mm 4 / 8 mm
Coefficient de conductivité thermique 20°C	$\lambda = 0,040$ W/m°K
Stabilité dans le temps	Illimitée. Produit imputrescible.
Réaction au feu	Très difficilement inflammable
Attaque des insectes, rongeurs et autres	Peu propice

Tableau 1-3: Résistance thermique en fonction de l'épaisseur (web, FICHE TECHNIQUE - GRANULE DE LIEGE NATUREL, 2007)

Epaisseur en mm	30	40	50	60	80	100	120	150	180	200
R = m ² .°C/W	0,75	1	1,25	1,50	2	2,50	3	3,75	4,5	5

Selon les résultats expérimentaux de Tedjditi et al. (2020), concernant le potentiel d'utilisation du liège vierge pour développer du béton léger pour des applications de construction, on peut noter que le béton de liège peut présenter de bonnes propriétés mécaniques en tant que matériaux non structuraux. De plus, une utilisation d'un taux important de liège dans le béton

amène à réduire considérablement la valeur de conductivité thermique qui peut être comprise entre 0,041 et 0,56 W/m. K. (Tedjditi et al., 2020)

1.5.3.2 Laine de bois

La laine de bois est un matériau écologique à isolation naturelle. Son avantage est d'offrir une bonne isolation phonique et de vous procurer une sensation de confort en terme d'isolation thermique. En effet, il permet de limiter les déperditions de chaleur en hiver. En été, sa forte inertie a l'avantage de ralentir la transmission de la chaleur et de conserver la fraîcheur accumulée lors des nuits d'été. (web, laine de bois. materiau d'isolation ecologique, s.d.)



Figure 1-16: Laine de bois (web, h2o-isolation, s.d.)

Tableau 1-4: Caractéristiques des panneaux en laine de bois (CNERIB Algérie, 1994)

Epaisseur (cm)	3	5	10	15
Poids (kg/m ²)	11	16	28	42
Densité (kg/m ³)	320	300	260	260
Conductivité thermique (W/m°C)	0,080	0,075	0,075	0,075
Résistance à la flexion (MPa)	0,7	0,5	0,4	0,3
Résistance à la compression (MPa)	0,4	0,3	0,2	0,2
Résistance à la compression à 10% déformation (MPa)	0,05	0,10	0,10	0,15

1.5.3.3 Copeaux de bois

La sciure de bois désigne tous les résidus produits par le sciage du bois. Les copeaux sont produits lors du traitement mécanique de la matière première (bois). Par conséquent, les débris produits par l'usine peuvent être recyclés et utilisés dans l'industrie de la construction. (Khelifi, 2012)

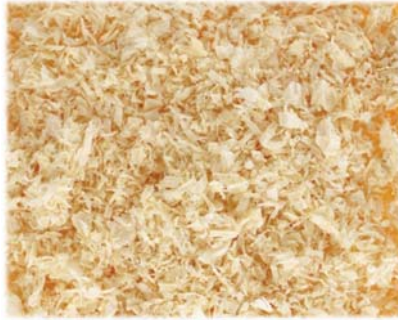


Figure 1-17: Copeaux de bois (web, litière copeaux de bois, s.d.)

1.6 Béton à base de bois

Le béton de bois diffère du béton traditionnel par sa composition, utilisant principalement des copeaux de bois minéralisés substitués partiellement aux granulats. Ainsi, les déchets industriels relatifs au bois ont été utilisés dans la confection du béton léger.



Figure 1-18: Béton de bois (web, Vicat mélange bois et ciment dans un béton aux performances thermiques améliorées, 2021)

Ainsi, les principaux composants du béton léger à base de bois deviennent :

- Le ciment.
- Les granulats.
- Les copeaux de bois.

- L'eau.

Cette innovation, a amené le secteur industriel à développer plusieurs produits dans ce sens comme l'agreslith-c, l'isolabloc, le thermibloc. Ces produits seront développés dans le chapitre 2.

1.7 Conclusion

Pour réaliser une isolation thermique ou acoustique, différentes solutions et matériaux sont disponibles. Ce sont principalement les matériaux fibreux et les matières cellulaires qui peuvent être utilisés dans l'isolement d'un bâtiment. Ces matériaux sont généralement utilisés comme des isolants rapportés.

Dans le chapitre suivant, nous mettrons en évidence, à travers une recherche bibliographique l'effet de l'utilisation des copeaux de bois dans le béton sur les performances mécaniques et d'isolation de ces matériaux biosourcés.

Chapitre 2 : le bois dans le béton

2.1 Introduction

Le bois peut être utilisé dans plusieurs industries dans le domaine du bâtiment comme dans le chauffage ou la menuiserie ; mais peut générer beaucoup de déchets. Pour réduire le risque de pollution, ces déchets doivent être réutilisés et avoir une seconde vie. A ce titre, l'utilisation des déchets de bois ou les copeaux de bois dans la fabrication de certains matériaux peut être une solution pour la protection de l'environnement et l'efficacité énergétique. (CAMPREDON, 1975)

2.2 Le bois

La description du matériau « bois » à différentes échelles structurelles constitue la base pour maîtriser son comportement mécanique et ses propriétés hygroscopiques. Le passage du niveau d'ultra-microstructure au niveau de micro- et macro-structure permet d'établir un lien entre les changements de caractéristiques structurelles et leurs effets sur la réponse immédiate et différée de ce matériau (Bousaid, 2003)

2.3 La macrostructure du bois

Le bois a une structure cellulaire principalement orientée selon l'axe de l'arbre. En formant des cellules allongées, les arbres poussent de façon circulaire, reflétant la nature anisotrope du bois.

Il y a 3 directions privilégiées (**Figure 2-1, 2-2**) :

- Une longitudinale L, suivant l'axe de l'arbre ;
- Une radiale R, perpendiculaire aux cernes de croissance ;
- Une tangentielle T, perpendiculaire aux deux précédentes directions.

L'échelle d'observation macroscopique ne fait intervenir que le volume de base suffisamment important par rapport à la microstructure cellulaire, ce qui permet de formuler l'hypothèse de continuité du milieu. En raison des irrégularités locales et de l'hétérogénéité causées par les différents stades de croissance, les propriétés physiques de ce matériau deviennent difficiles à identifier. (CAMPREDON, 1975)

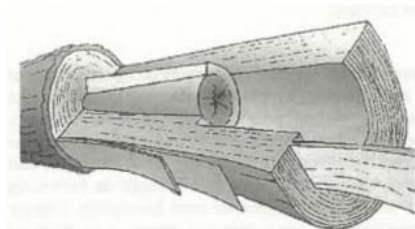


Figure 2-1: Le bois à l'échelle macroscopique (CLAIR, 2001)

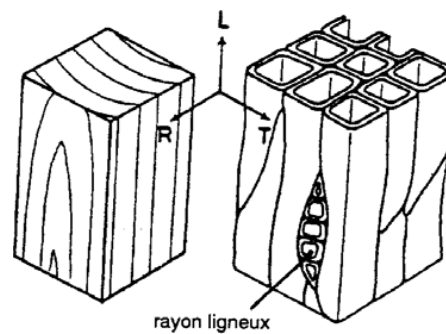


Figure 2-2: Représentation des axes principaux d'orthotropie (R, T, L) d'un bois résineux, aux échelles macro et microstructurelle, d'après Norimoto et Gril (1989). (Bousaid, 2003)

2.4 La microstructure

A cette échelle, le bois est assimilé à un squelette polymère composé d'alvéoles qui composent les fibres. Les cellules longitudinales, appelées trachéides, représentent 90 % de la structure cellulaire. Leur épaisseur de paroi cellulaire varie avec la période de croissance, mais le rapport longueur-épaisseur est encore assez important, environ 100:1. D'autres types de cellules, appelés parenchyme ou rayons ligneux, sont disposés selon un motif entrecroisé. La disposition des alvéoles laisse la plupart des vides plus ou moins remplis d'eau, ce qui explique la grande porosité du bois. Cet aspect se reflète dans la densité du matériau, qui constitue le facteur déterminant de ses propriétés mécaniques et thermo-hydrauliques. (Aidan et al., 2005)

2.5 Ultrastructure et composition chimique

Des observations à l'échelle micrométrique peuvent décrire en détail les différentes couches de cellules et de parois cellulaires. La paroi cellulaire est composée d'une paroi primaire entourée d'une couche intermédiaire et d'une paroi secondaire interne composée de trois couches de S1, S2 et S3 (**Figure 2-3**). La couche S2 est la plus épaisse. Elle peut atteindre 85 % de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire. Les principaux composants chimiques des parois cellulaires sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. La chaîne moléculaire de la cellulose est entourée d'hémicellulose et noyée dans la lignine pour former des microfibrilles sous forme de spirales croisées. Les microfibrilles sont les unités structurales de la paroi cellulaire. Dans les couches S1 et S3, l'angle d'inclinaison de ces microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule varie de 50° à 90°, tandis que dans la couche S2, l'angle d'inclinaison est inférieur à 30°. L'épaisseur

importante de la couche S2 et la faible inclinaison de ses microfibrilles reflètent son rôle déterminant dans la réponse mécanique du bois. (CHEVALLEY, 1982)

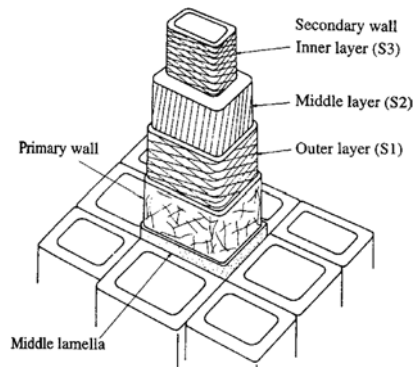


Figure 2-3 : Schématisation de la paroi cellulaire de trachéide, d'après Dinwoodie 1981. (Bousaid, 2003)

Les travaux expérimentaux de Cowdrey et Preston (1966) ont montré que lorsque l'angle d'inclinaison de la microfibrille passait de 40° à 10°, la rigidité du bois d'épicéa initial augmentait 6 fois. Walker et Butterfield (1996) ont trouvé la même observation sur le bois de pin. (Bousaid, 2003)

2.6 Couple bois-béton

En raison du manque de barres d'acier pour renforcer le béton, le développement des bâtiments mixtes bois-béton a principalement commencé après les deux guerres mondiales. Ainsi, la superposition passive de dalles de béton sur des poutres en bois est transformée en éléments structurels plus solides, plus durables et plus stables.

Les avantages de la technologie hybride sont nombreux :

- La connexion entre les deux matériaux augmente la rigidité dans le plan, ce qui est très important pour les calculs sismiques.
- Pour les structures en bois exposées à des changements climatiques sévères, le béton contribue à protéger le plancher en bois, augmentant ainsi sa durabilité.
- D'autres propriétés tout aussi importantes, telles que l'isolation acoustique et la résistance au feu, sont renforcées par la présence de béton.

- L'aspect économique est le facteur décisif. La rapidité d'exécution, la réduction des coûts de fondation, et les aspects écologiques et architecturaux sont propices à l'utilisation de la technologie de mélange bois-béton.
- De plus, le développement de plusieurs systèmes de connexion qui s'adaptent à différents types d'ouvrages rend ces ouvrages hybrides plus compétitifs. (web, mixité bois béton, 2013)

2.7 Caractéristiques du matériau hybride béton - bois

2.7.1 Masse volumique

D'après les études expérimentales faites par D.Taoukil sur la caractérisation mécanique et hydrique d'un béton allégé avec les résidus de bois (Taoukil et al., 2011) :

La masse volumique sèche est mesurée après séchage des matériaux dans une étuve à 80°C et aspiration d'air jusqu'à ce que leur qualité reste constante (état sec) après 24 heures. La masse volumique sèche des deux matériaux légers varie avec la fraction de poids léger dans les résidus de bois, comme le montre la **figure 2-4**. (Taoukil et al., 2011)

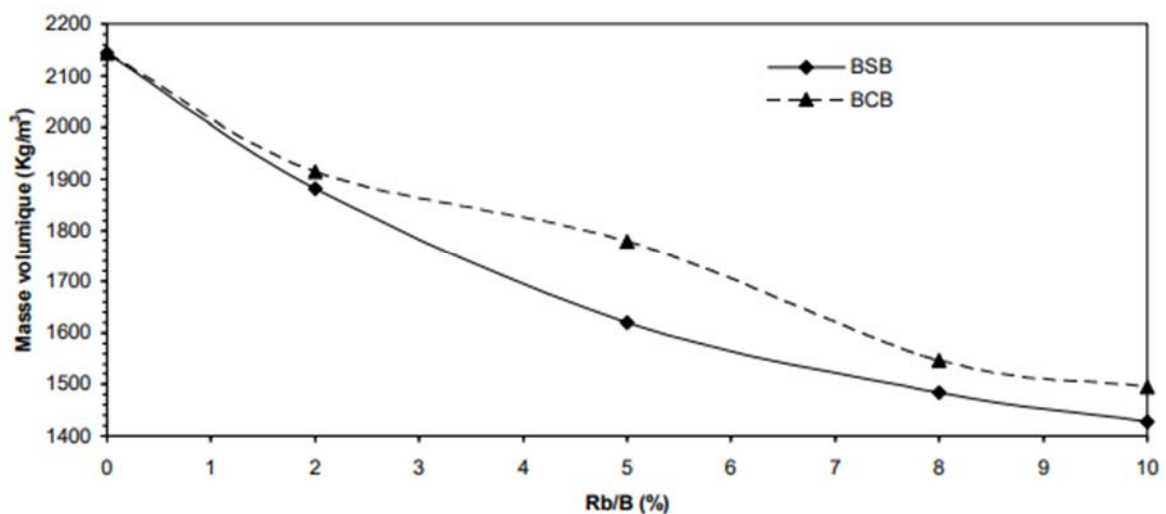


Figure 2-4: Variation de la masse volumique sèche avec la fraction d'allégement en résidus de bois. (Taoukil et al., 2011)

L'augmentation du pourcentage des résidus de bois amène à réduire considérablement la masse volumique du mélange. Ainsi, la substitution massique de 10% du béton par des résidus de bois peut réduire d'un tiers la masse volumique du mélange. En revanche, il a été montré que pour une même teneur en bois, la masse volumique des bétons de copeaux de bois (BCB) est supérieure à la masse volumique des bétons de sciures de bois (BSB). Cela peut s'expliquer par

le fait que les débris dans le mortier sont plus compressibles que la sciure de bois. (Taoukil et al., 2011)

Ayache et al. (2019) ont étudié l'influence des copeaux de bois sur la masse volumique de trois types de bétons : les bétons ordinaires, autoplaçants et de haute performance. Les résultats présentés sur les **figures 2-5, 2-6 et 2-7** montrent que quel que soit le type de béton, l'augmentation de la teneur des copeaux engendre toujours une diminution de la masse volumique.

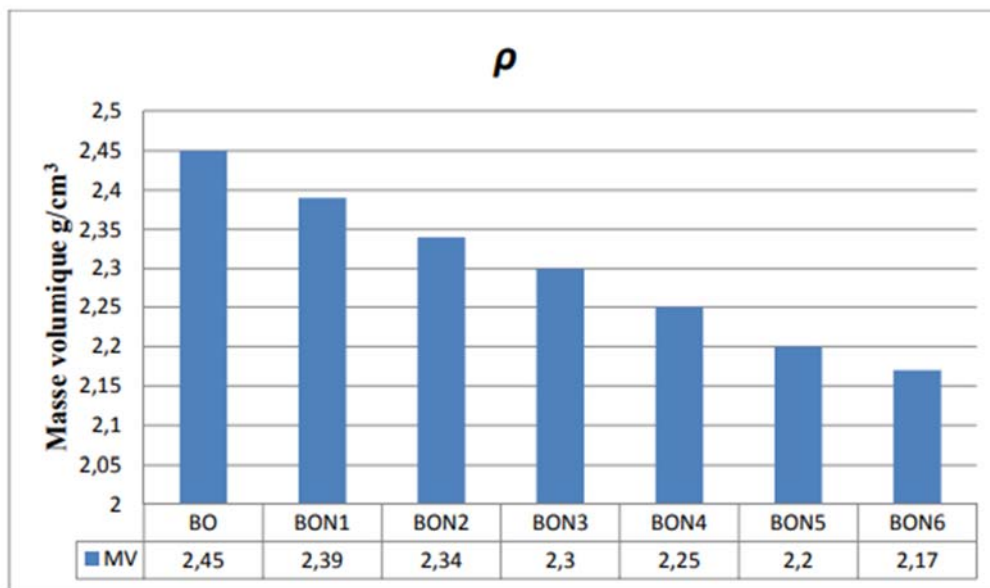


Figure 2-5: La masse volumique à l'état durci de béton ordinaire avec copeaux de bois (Ayache et al., 2019)

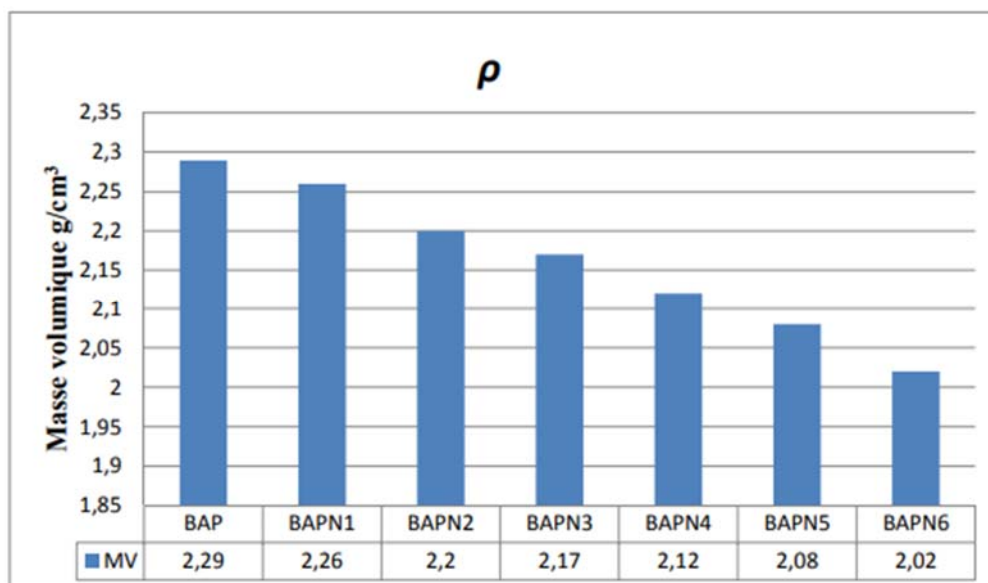


Figure 2-6: La masse volumique à l'état durci de béton autoplaçant avec copeaux de bois (Ayache et al., 2019)

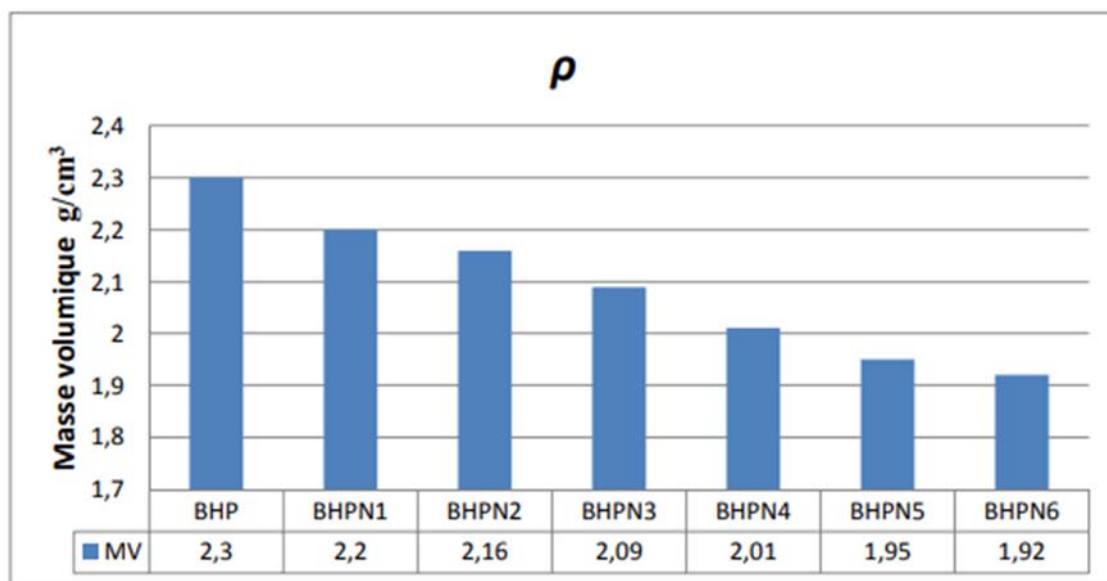


Figure 2-7: La masse volumique à l'état durci de béton à haute performance avec copeaux de bois (Ayache et al., 2019)

2.7.2 Porosité

Belhadj et al (2012) a montré que les copeaux de bois ont tendance à augmenter la porosité des mélanges surtout s'ils ne sont pas traités vis-à-vis de l'humidité.

Par ailleurs le type de traitement des copeaux de bois avec un lait de ciment mélangé avec certaines additions, puis séchés, a aussi une grande influence sur la porosité des mélanges réalisés. (Bederina et al., 2012)

A ce titre, il est aussi recommandé de renforcer le mélange avec des additions minérales telles que les fillers calcaires.

Tableau 2-1 : Masse volumiques et porosité des bétons étudiés (Belhadj et al., 2012)

Teneur en copeaux kg/m ³	Masse volumique kg/m ³	Porosité accessible a eau
B. Sans Copeaux	1965,31 ± 30,39	0,0853±0,0007
B avec Copeaux Non Traités	1423,82 ± 21,48	0,1337±0,0030
B. avec Copeaux Traités	1610,39 ± 18,00	0,1039±0,0015

Selon les mêmes auteurs, l'utilisation des copeaux de bois dans les mélanges granulaires ont tendance à réduire l'affaissement des mélanges. Cela peut être principalement due à la grande capacité d'absorber l'eau que peuvent avoir les copeaux de bois.

2.7.3 Coefficient d'absorption d'eau des copeaux de bois

Le traitement des copeaux de bois a une incidence sur l'absorption. A ce titre, dans une étude menée par Belhadj et al (2012), les résultats ont montré que le traitement avec la chaux ou les fillers calcaires restent recommandés pour réduire le coefficient d'absorption du mélange.

Tableau 2-2: Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau (Belhadj et al., 2012)

Type de traitement	Coefficient absorption d'eau
S-TR : Sans traitement	3,440
TR.1: Lait de base 100% ciment	0,680
TR.2: 85% ciment+15% calcaire	0,578
TR.3: 70% ciment+30% calcaire	0,627
TR.4: 90% ciment + 10% chaux	0,605
TR.5: 80% ciment + 20% chaux	0,580
TR.6: 85% ciment+ 15% sable dune	0,704
TR.7: 70% ciment+ 30% sable dune	0,680

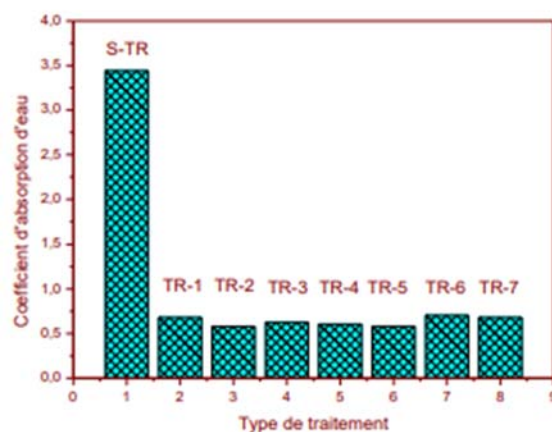


Figure 2-8: Influence des traitements sur le coefficient d'absorption d'eau (Belhadj et al., 2012)

2.7.4 Comportement hygrométrique

Les résultats obtenus par (Taoukil et al., 2011) ont bien montré que le béton à base de copeaux de bois a une absorption plus élevée par rapport à un béton ordinaire. Toutefois, les résultats obtenus par le même auteur semblent moins clair si le taux de substitution varie entre 2% et 5%. Figures 2-9 et 2-10.

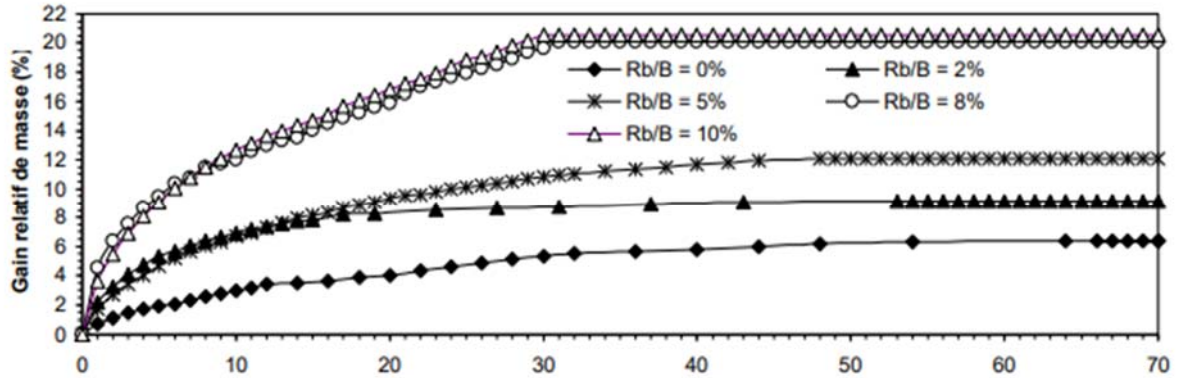


Figure 2-9: Essai d'absorption de l'eau pour le béton allégé avec la sciure de bois. (Taoukil et al., 2011)

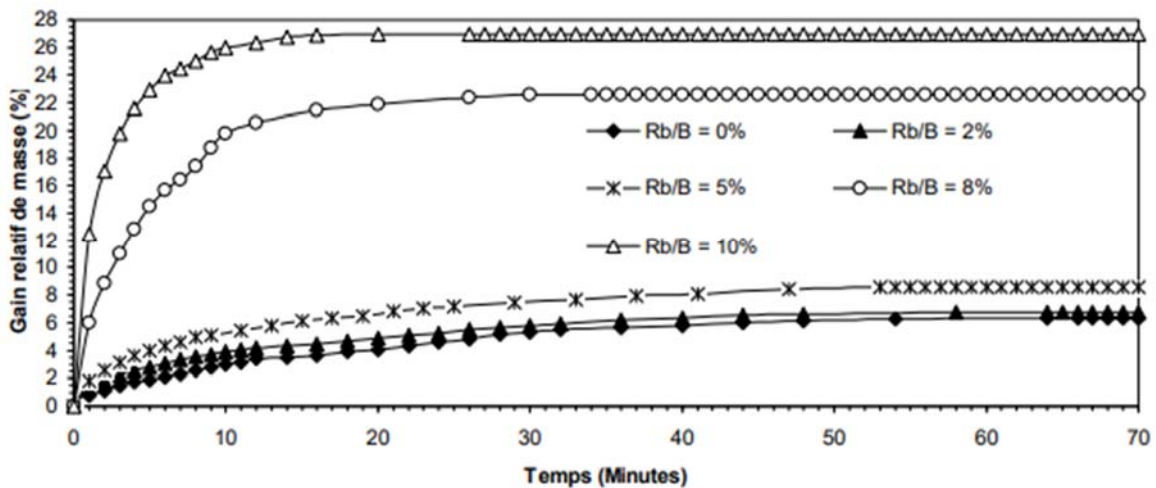


Figure 2-10: Essai d'absorption de l'eau pour le béton allégé avec les copeaux de bois. (Taoukil et al., 2011)

Ayache et al. (2019) ont confirmé ces résultats sur la base d'essais réalisés sur différents types de béton.

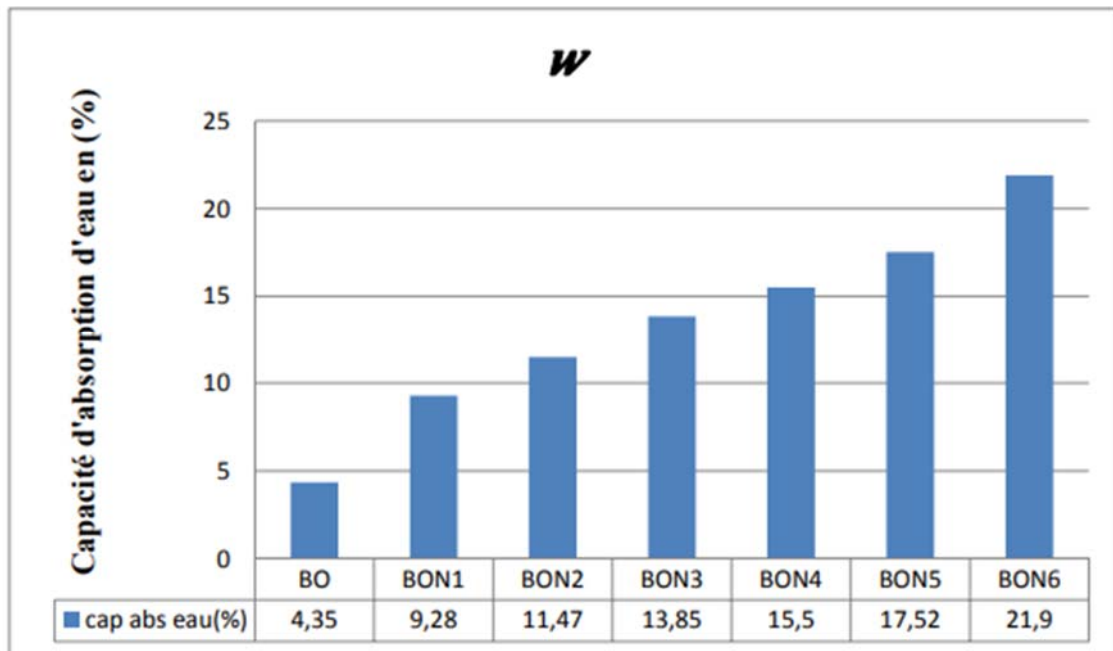


Figure 2-11: Capacité d'absorption d'eau de béton ordinaire à base des copeaux de bois (Ayache et al., 2019)

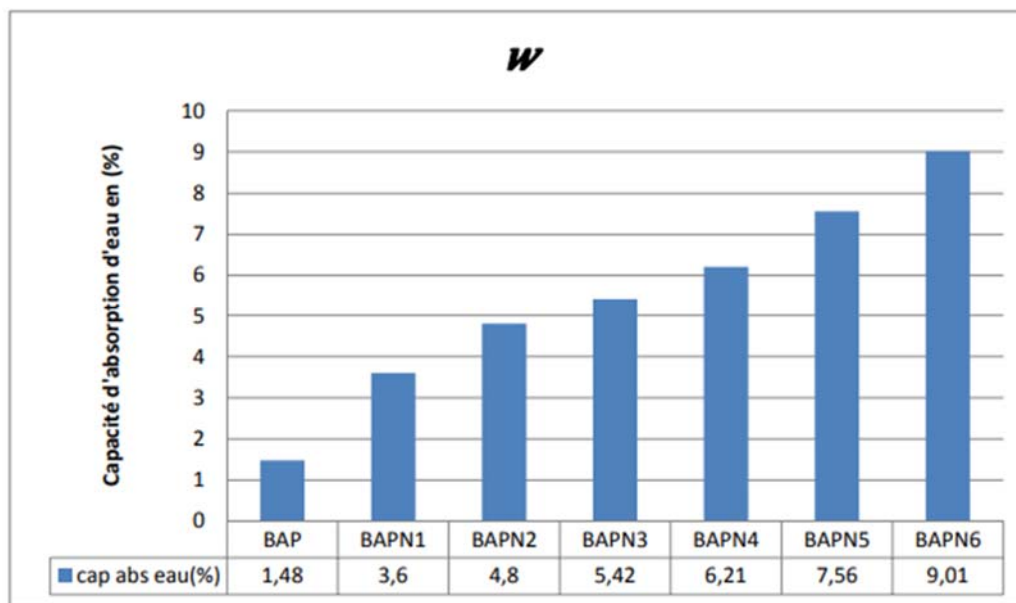


Figure 2-12: Capacité d'absorption d'eau de béton autoplaçant à base des copeaux de bois (Ayache et al., 2019)

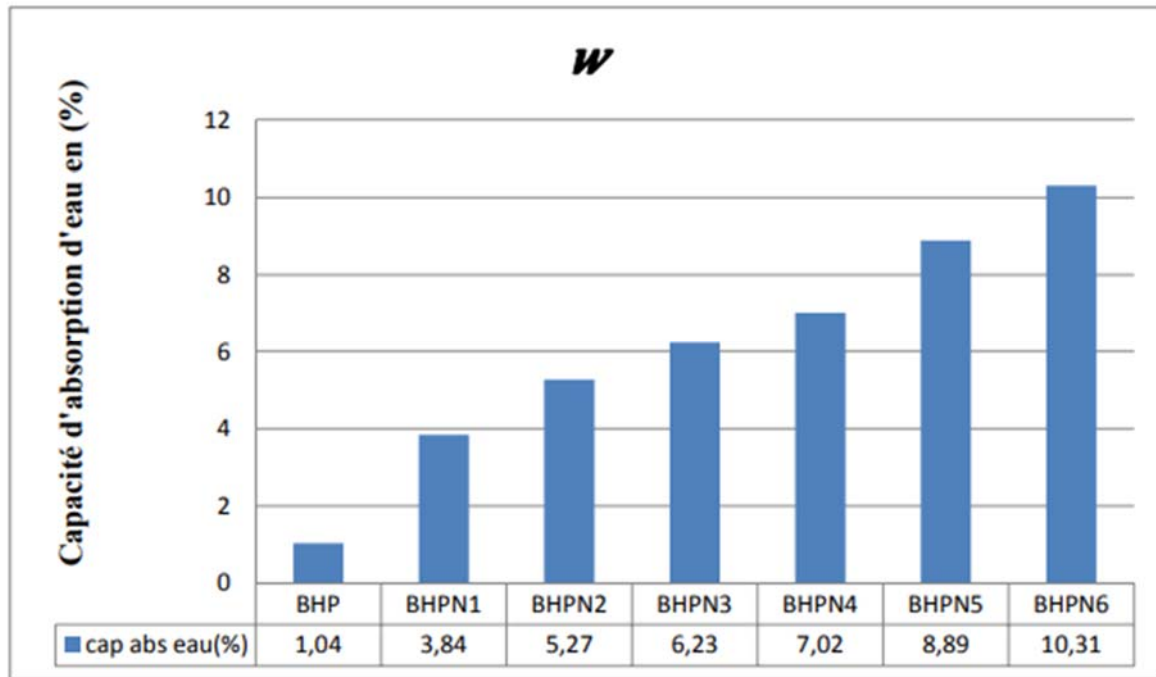


Figure 2-13: Capacité d'absorption d'eau de béton à haute performance à base des copeaux de bois (Ayache et al., 2019)

2.7.5 Résistance mécanique à la compression

La figure 2-14 montre clairement que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de résidus de bois. (Taoukil et al., 2011).

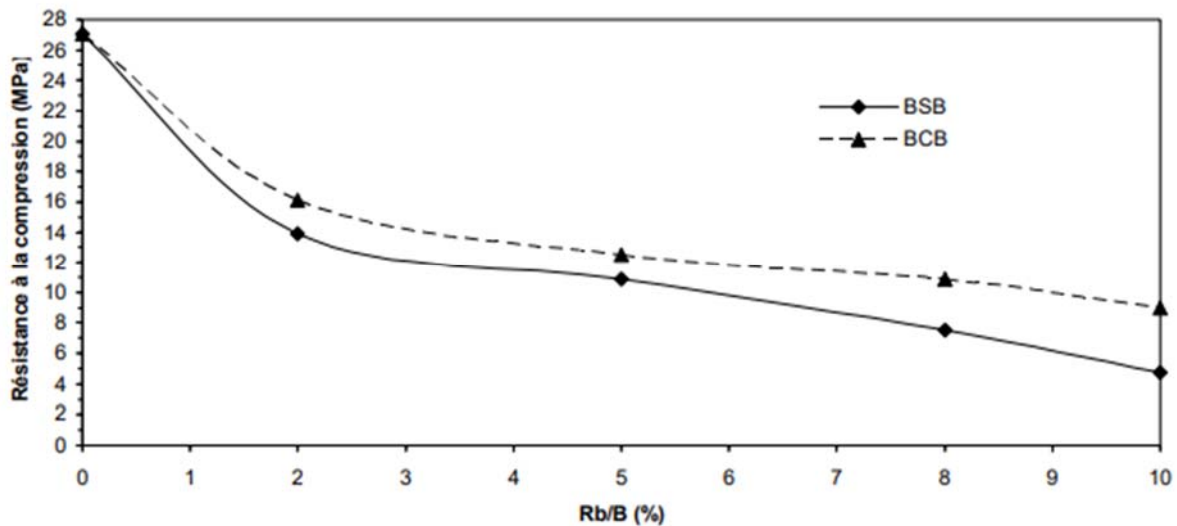


Figure 2-14: Variation de la résistance à la compression en fonction de la fraction d'allègement en résidus de bois. (Taoukil et al., 2011)

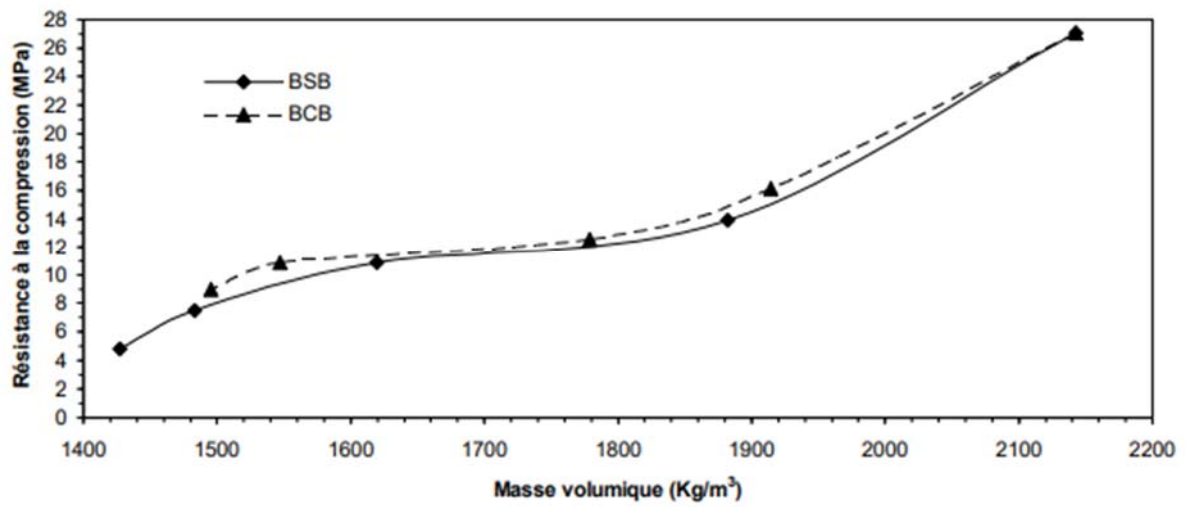


Figure 2-15: Variation de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique. (Taoukil et al., 2011)

Bouabdallah et al. (2007) ont eu le même constat. Ce résultat a une corrélation directe avec la porosité des mélanges.

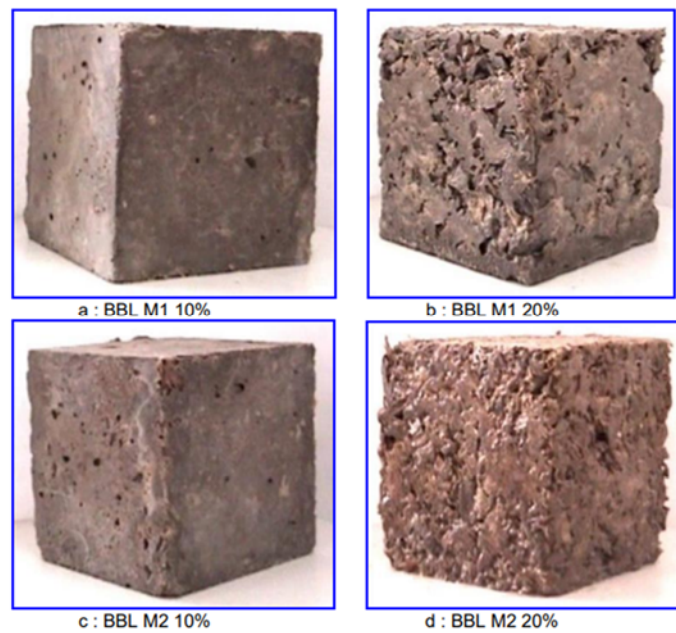


Figure 2-16: Béton de bois léger (Bouabdallah et al., 2007)

Contrainte de déformation

La courbe contrainte/déformation permet de suivre le comportement du béton dans les domaines élastiques et post-élastique. Les résultats trouvés par Bouabdallah et al. (2007) montrent que pour les bétons à base de copeaux de bois, la phase élastique se termine entre 80% et 90% de la résistance à la compression. De plus, la résistance à la compression du béton à base de copeaux de bois augmente, plus son comportement est proche d'un comportement fragile. (Bouabdallah et al., 2007)

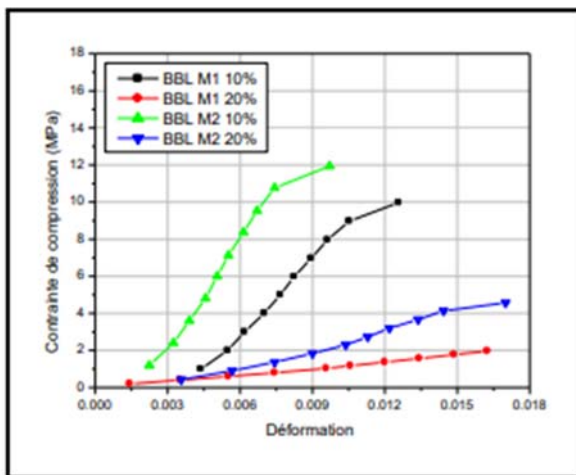


Figure 2-17: Evolution de la contrainte de compression en fonction des déformations à 7 jours (Bouabdallah et al., 2007)

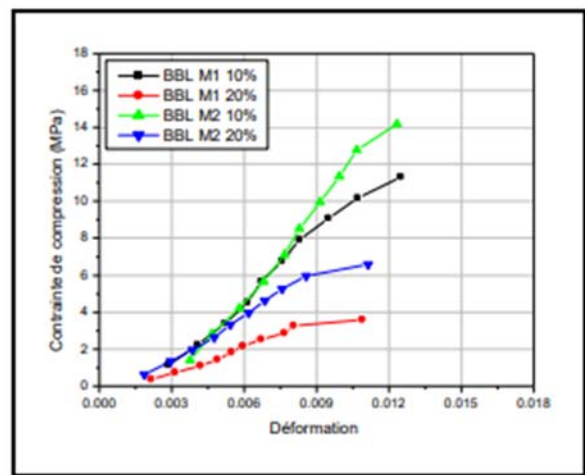


Figure 2-18: Evolution de la contrainte de compression en fonction des déformations à 14 jours (Bouabdallah et al., 2007)

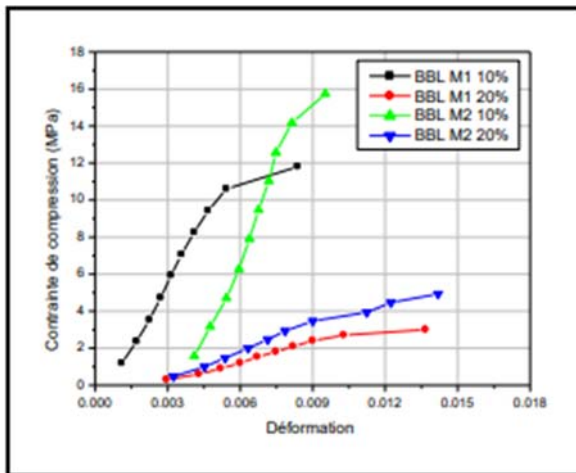


Figure 2-19 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de déformation à 21 jours (Bouabdallah et al., 2007)

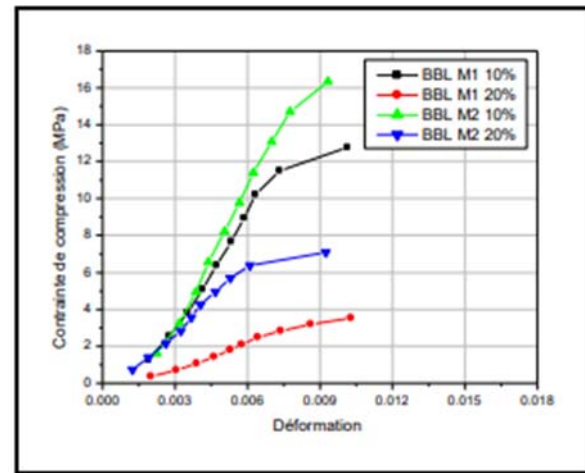


Figure 2-20 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de déformation à 28 jours (Bouabdallah et al., 2007)

2.7.6 Propriétés thermiques

Les résultats trouvés par Belhadj (2012) ont montré que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation des copeaux de bois dans le béton.

Tableau 2-3: Propriétés thermiques des bétons étudiés (Belhadj et al., 2012)

Teneur en Copeaux de bois kg/m ³	Conductivité thermique W/mK	Chaleur spécifique massique J/kgK
B. Sans Copeaux	2,165 ± 0,174	1289,64 ± 39,85
B. avec Copeaux Non Traités	0,611 ± 0,023	808,10 ± 30,71
B. avec copeaux de bois traités CF	1,366 ± 0,091	1145,95 ± 36,08
B. avec copeaux de bois traités CH	1,490 ± 0,069	1102,74 ± 59,38

Par ailleurs, les résultats de Lahouioui et al. (2016) sur des bétons renforcés avec des fibres de bois de palmier ont montré que l'ajout de ces derniers réduits progressivement et simultanément la conductivité thermique et la diffusivité des composites. La conductivité thermique du béton passe de 1.4 W.m⁻¹.K⁻¹ à 0.11 W.m⁻¹.K⁻¹ pour 30% de ces fibres. Les composites sont donc bien plus isolants dès 5% d'ajout de fibres.

Taoukil et al. qui ont étudié l'effet de l'ajout de copeaux de bois et de laine de bois sur les propriétés thermiques des bétons ont également conclu que l'ajout de fibres naturelles améliore les caractéristiques d'isolation des bétons. Ces résultats ont été confirmés par Lahouioui comme présentés sur les figures (2-21, 2-22). (Lahouioui et al., 2016)

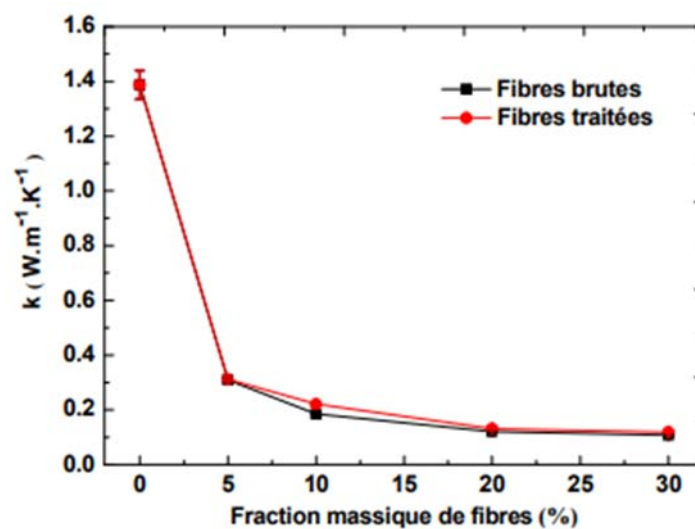


Figure 2-21: Conductivité thermique des composites (Lahouioui et al., 2016)

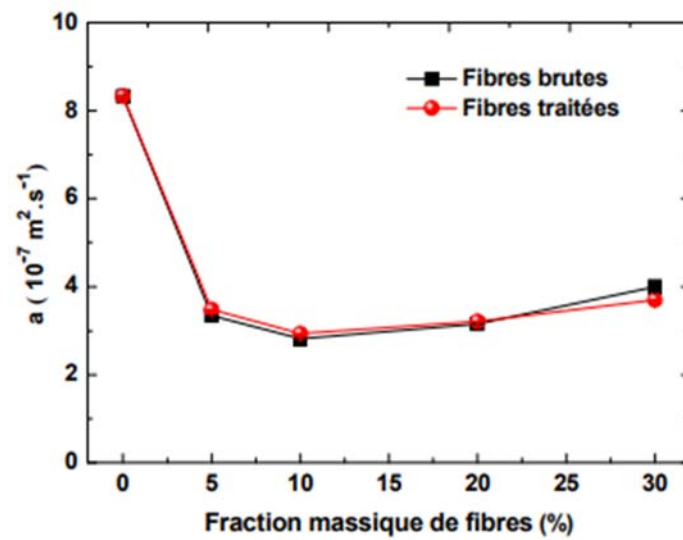


Figure 2-22: Diffusivité thermique des composites (Lahouioui et al., 2016)

2.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'effet des copeaux de bois dans le béton. Il est clair qu'ils peuvent avoir un effet bénéfique sur les propriétés d'isolation au dépend des propriétés mécaniques.

Pour plus d'investigation, le chapitre suivant est réservé à une étude expérimentale relative aux parpaings formulés à base de copeaux de bois.

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.1 Introduction

Le travail expérimental consiste à développer un parpaing à base de copeaux de bois, tout en étudiant les caractéristiques thermique, mécanique et acoustique de ce matériau.

Les éléments nécessaires à la compréhension des expérimentations sont explicités. Le protocole employé, les résultats ainsi que les principales conclusions sont aussi présentés dans ce chapitre.

3.2 Caractérisation des copeaux de bois

Dans cette recherche, les copeaux de bois sont issus du hêtre en provenance d'un menuisier privé sis à Mansourah (**figure 3-1**).



Figure 3-1: Copeaux de bois utilisés

La masse volumique absolue a été mesurée au laboratoire avec la méthode du ballon en utilisant l'alcool. La masse volumique des copeaux de bois est de 814 kg/m^3

3.3 Fabrication des blocs à base de copeaux de bois

3.3.1 Le moule utilisé

Les blocs étudiés ont été fabriqués manuellement au niveau du laboratoire de la SEROR. Le moule utilisé a été réalisé par l'équipe du laboratoire EOLE et qui permet de former des blocs de dimensions extérieurs $40 \times 15 \times 18 \text{ cm}$ avec des parois d'une épaisseur de 2 cm (**figure 3-2**).

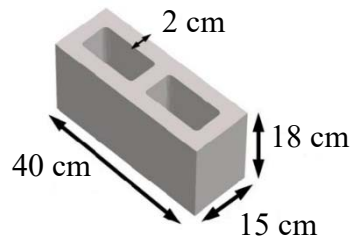


Figure 3-2: Dimensions du bloc

Pour des raisons relatives à la pandémie, il était impossible de fabriquer ces moules dans des entreprises avec une pondeuse industrielle pour parpaings.

3.3.2 Formulation des blocs

Après une enquête sur le terrain, notamment chez l'A.P.M.C et au niveau du laboratoire SEROR, plusieurs formulations ont été testées. La formulation qui nous a donné la meilleure adhérence du matériau est présentée sur le **tableau 3-1**.

Tableau 3-1: Composition du béton de bois

	Quantité [kg]
Ciment CEM II 42,5 A	90
Sable 0/4	250
Eau	72
Gravier 4/8	25

Pour les copeaux de bois, on procédait à des substitutions massiques de gravier à des taux allant de 0 à 100% par pas de 20%.

3.3.3 Mode de malaxage et confection

Le malaxage est fait dans une petite bétonnière du labo SEROR (**figure 3-3**).



Chapitre 3 : partie expérimentale

La démarche de malaxage utilisée est la suivante :

- Préparation des différents ingrédients pour la formulation (**figures 3-4, 3-5, 3-6**)



Figure 3-6: La pesée des copeaux de bois



Figure 3-5: La pesée du sable



Figure 3-4: La pesée du ciment

- Introduire les ingrédients dans la bétonnière (**figure 3-7**).



Figure 3-7: Introduction des ingrédients

Chapitre 3 : partie expérimentale

- Faire tourner la bétonnière pendant 5min pour mélanger les constituants à l'état sec. Introduire ensuite graduellement l'eau et laisser tourner pendant 15 min jusqu'à ce que le mélange soit complètement homogène.
- Remplir le mélange dans le moule manuellement en vibrant
- Utiliser la partie supérieure du moule qui permet d'obtenir le bloc de béton à base de copeaux de bois. (Figures 3-8, 3-9)



Figure 3-8: Bloc de béton de bois confectionné avec le moule manuel



Figure 3-9: Bloc béton de bois

3.4 Masse volumique apparente

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse [kg]}}{\text{Volume apparent [m}^3\text{]}} \quad [\text{kg/m}^3]$$



Figure 3-10: Relevé de la valeur de la masse

Les masses volumiques ont été mesurées sur éprouvettes cubiques de dimension cubique (15 x 15 x 15) cm.

Résultats

Les masses des blocs en fonction du taux de bois intégré dans les mélanges sont présentées dans le **tableau 3-2**

Tableau 3-2 : Masse des blocs

	M [kg]
Blocs sans CB	7,959
Blocs avec 20% CB	7,149
Blocs avec 40% CB	6,244
Blocs avec 60% CB	5,648
Blocs avec 80% CB	5,530
Blocs avec 100% CB	5,061



Figure 3-11 : Forme du bloc

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le **tableau 3-3** :

Tableau 3-3 : Masse volumique

Quantité des copeaux de bois	Masse volumique [kg/m ³]
Blocs sans CB	2358,22
Blocs avec 20% CB	2118,22
Blocs avec 40% CB	1850,07
Blocs avec 60% CB	1673,48
Blocs avec 80% CB	1638,52
Blocs avec 100% CB	1499,55

En augmentant, la quantité de copeaux de bois, les blocs deviennent moins denses et donc ils devraient être plus isolants.

3.5 Essai thermique

L'objectif de l'essai est de déterminer la variation de la température entre les deux faces du bloc. Dans chaque bloc, nous allons placer des thermo – couples pour mesurer la température pendant une heure.

La source de chaleur interne consiste à l'emplacement d'une lampe d'une puissance de 100W à l'intérieur d'une enceinte de 2448 cm³.



Figure 3-12: La pose des blocs



Figure 3-13: Intégration de la lampe

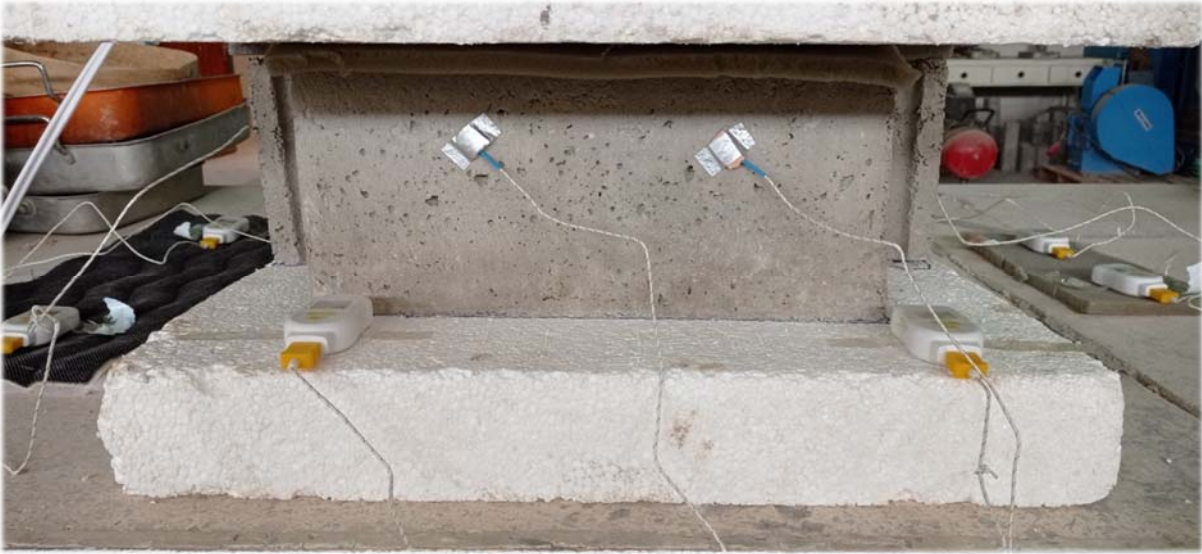


Figure 3-14: La pose des capteurs

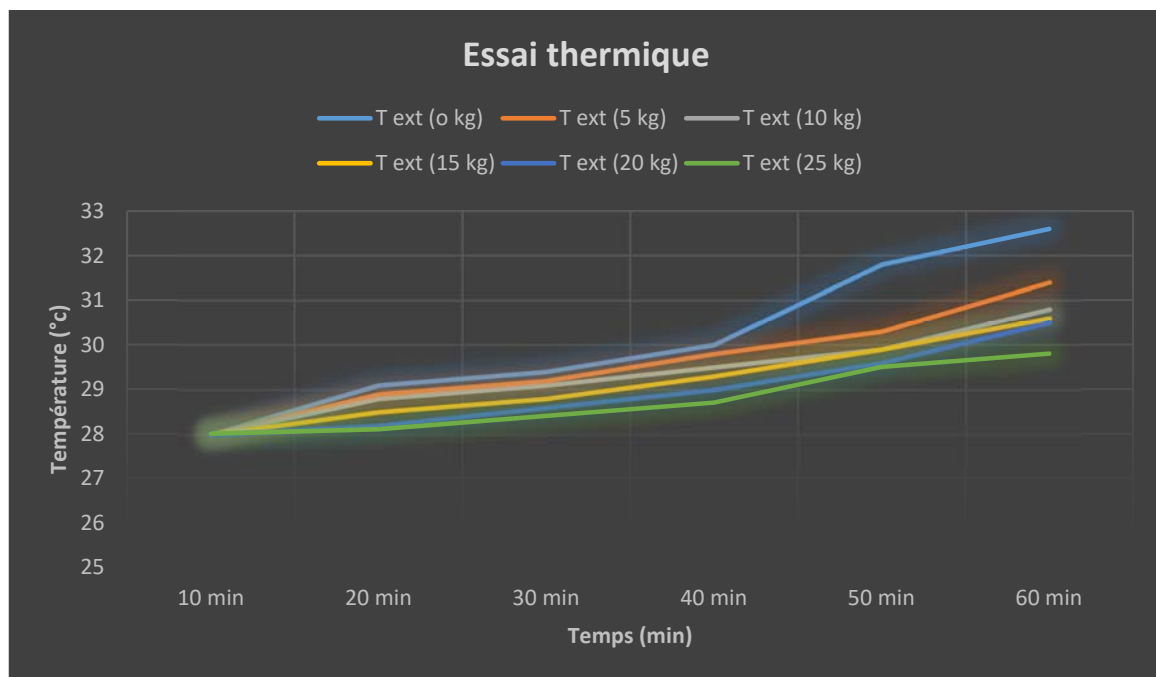


Figure 3-15: Essai thermique

Résultats

Tableau 3-4: Résultat d'essai thermique

T (°c)	Bloc formulé avec											
	0 kg		5 kg		10 kg		15 kg		20 kg		25 kg	
	T _{int}	T _{ext}	T _{int}	T _{ext}	T _{int}	T _{ext}	T _{int}	T _{ext}	T _{int}	T _{ext}	T _{int}	T _{ext}
t=10min	65	28	65	28	65	28	65	28	65	28	65	28
t=20min	65	29,1	65	28,9	65	28,8	65	28,5	65	28,2	65	28,1
t=30min	65	29,40	65	29,2	65	29,1	65	28,8	65	28,6	65	28,4
t=40min	65	30	65	29,8	65	29,5	65	29,3	65	29	65	28,7
t=50min	65	31,8	65	30,3	65	29,9	65	29,9	65	29,6	65	29,5
t=60min	65	32,6	65	31,4	65	30,8	65	30,6	65	30,5	65	29,8

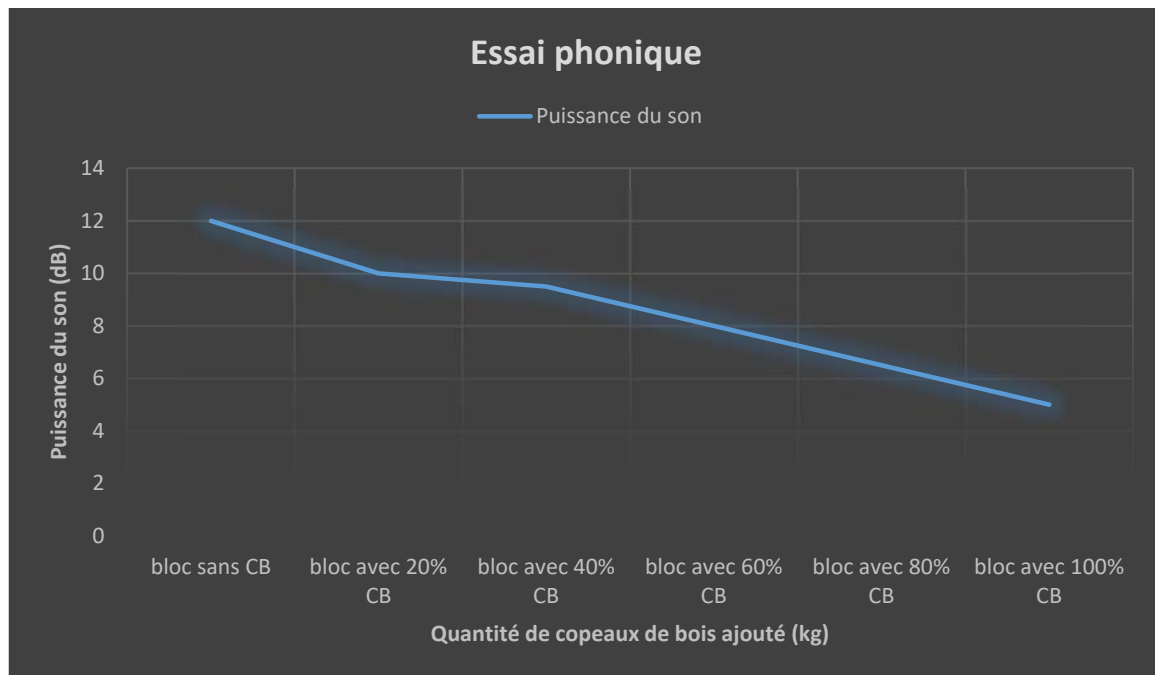


A partir des résultats trouvés, il est clair que l’augmentation de la quantité des copeaux de bois dans les blocs a permis de réduire les déperditions et d’améliorer l’isolation thermique. Ce constat devient plus significatif si nous prenons en considération l’effet du temps. Le bloc formulé avec 25kg de copeaux de bois a donné de meilleur résultat vis à vis la masse volumique et la résistance thermique.

Résultats

Tableau 3-5: Résultat essai phonique

Quantité des copeaux de bois	Puissance du son [dB]
Blocs sans CB	12
Blocs avec 20% CB	10
Blocs avec 40% CB	9,5
Blocs avec 60% CB	8
Blocs avec 80% CB	6,5
Blocs avec 100% CB	5



Les résultats obtenus sont aussi prometteurs et permettent de mettre en évidence l'apport des copeaux de bois pour améliorer l'isolation phonique. La présence des pores à l'intérieur du bloc a donné de meilleurs résultats par rapport au bloc sans copeaux de bois car l'air est un bon isolant phonique. Cette relation est presque linéaire. Une substitution totale de gravier par de copeaux de bois a permis de réduire le niveau sonore de 50%. Le même bloc formulé avec 25kg a donné une meilleure isolation phonique.

3.7 Essai de compression

L'essai de résistance mécanique est réalisé avec une presse mécanique du laboratoire de l'université.



Figure 3-18: Banc d'essai de compression

Tableau 3-6: Résultat essai de compression

Quantité des copeaux de bois	Force de compression [KN]
Blocs sans CB	121,45
Blocs avec 20% CB	138,9
Blocs avec 40% CB	85,65
Blocs avec 60% CB	27,45
Blocs avec 80% CB	42,45
Blocs avec 100% CB	36,05

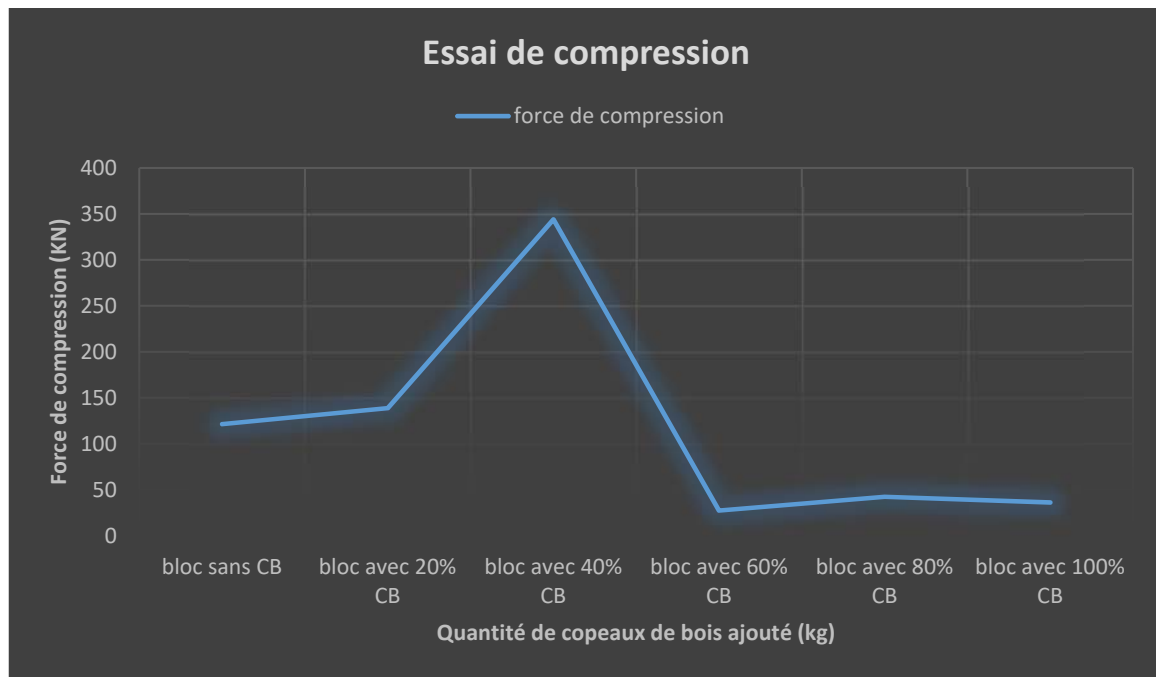


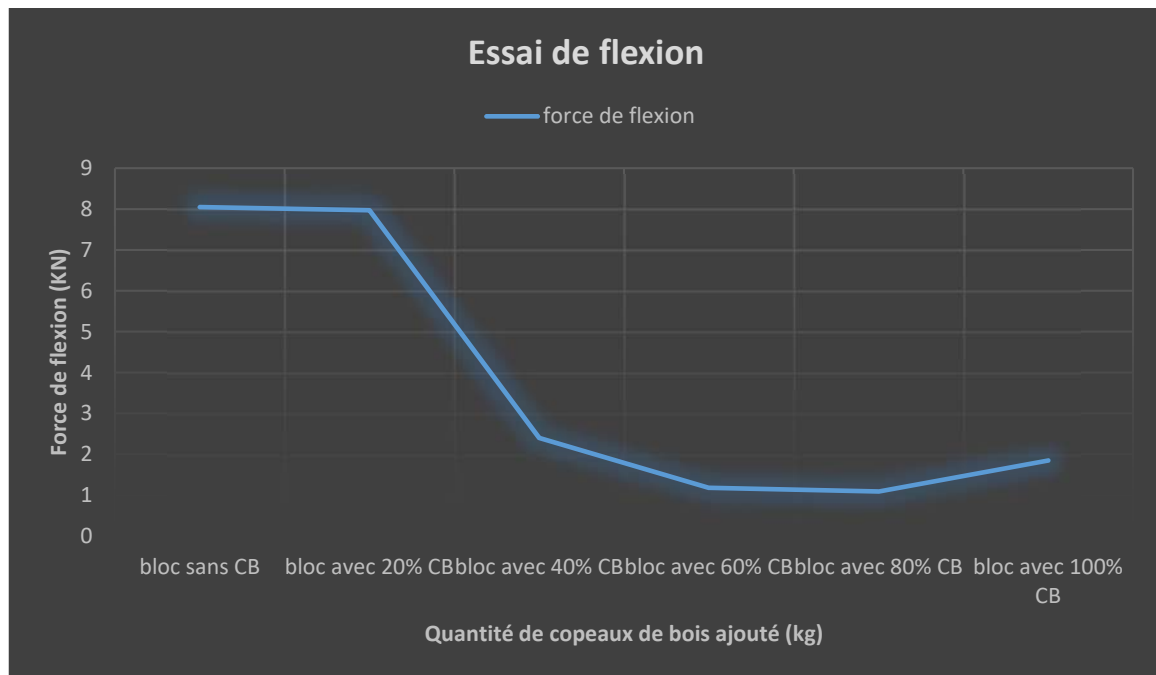
Figure 3-19: Blocs après l'essai de compression

Les résultats obtenus sont moins clairs même si la tendance montre qu'en augmentant le taux de substitution par des copeaux de bois, la résistance mécanique diminue. Ce résultat était prévisible puisque la résistance des graviers est nettement supérieure à celle des copeaux de bois.

Les essais de traction par flexion ont aussi été réalisés sur les blocs en utilisant l'appareil « le didactique » du laboratoire. Les résultats des essais de flexion sont résumés dans le **tableau 3-7**

Tableau 3-7: Résultat essai de flexion

Quantité des copeaux de bois	Force de flexion [KN]
Blocs sans CB	8,05
Blocs avec 20% CB	7,97
Blocs avec 40% CB	2,4
Blocs avec 60% CB	1,18
Blocs avec 80% CB	1,09
Blocs avec 100% CB	1,85



Les résultats obtenus sont assez corrélés avec ceux des essais de compression et qui montrent que l'ajout des copeaux de bois a un effet non bénéfique sur le plan de la résistance mécanique que ce soit à la compression ou à la flexion.



Figure 3-20: Fissure de rupture du bloc

3.8 Conclusion

A partir des résultats trouvés, on peut apporter les conclusions suivantes :

- ✓ Le bloc de béton de bois est plus léger.
- ✓ Le bloc de béton de bois améliore l'isolation thermique.
- ✓ Le bloc de béton de bois améliore l'isolation acoustique.
- ✓ Le bloc de béton de bois n'améliore pas la résistance mécanique du béton.

CONCLUSION GENERALE

Dans l'industrie de la construction, le choix du matériau est très important car il doit répondre aux besoins de l'ouvrage non seulement sur le plan du confort mais aussi sur les plans de résistance et de durabilité. Pour des raisons de confort, les performances thermiques doivent être améliorées afin de limiter les déperditions et réduire donc la consommation d'énergie.

Dans ce contexte énergétique, il est intéressant d'envisager des formulations de béton avec des matériaux de construction ayant de bonnes propriétés thermiques et acoustiques. Dans ce sens, l'utilisation des copeaux de bois dans le béton peut être une bonne solution. Ce point à éveiller notre intérêt surtout que l'utilisation des copeaux de bois dans le béton restent un domaine intéressant et s'inscrit dans la tendance actuelle à l'utilisation de matériaux bio-dérivés.

Dans ce travail, l'objectif principal était de formuler et de fabriquer des blocs de parpaing à base de copeaux de bois sur la base d'une enquête sur le terrain et de formulations au niveau du laboratoire. De plus, un travail à caractère expérimental a été réalisé au niveau des laboratoires EOLE pour étudier les performances mécaniques, acoustiques et thermiques que peut offrir ce matériau biosourcé.

Les principaux résultats obtenus sont résumés comme suit :

L'utilisation des copeaux de bois a permis d'alléger et donc de réduire la densité des blocs de parpaings. Ce qui peut être bénéfique pour alléger les charges permanentes de la construction et de réduire la pénibilité chez les maçons.

L'utilisation des copeaux de bois a aussi permis d'améliorer l'isolation thermique et d'éviter les déperditions dans ce sens. Ce résultat est encore plus important avec le temps.

L'utilisation des déchets de bois a amélioré l'isolation phonique en réduisant les déperditions sonores.

Toutefois, l'utilisation des copeaux de bois ne sera pas sans conséquence sur la résistance mécanique, même si ce point n'est pas très important puisque les blocs de parpaings n'ont pas un rôle très important dans la résistance.

Les blocs formulés avec 25kg de copeaux de bois ont présenté les meilleurs résultats sur le plan thermique et acoustique.

En perspectives, il serait intéressant de développer cet axe recherche en utilisant des traitements avec des laits de ciment combinés avec d'autres additions sur les copeaux de bois avant leurs incorporations dans les blocs de bétons.

Références Bibliographiques

Ouvrages et articles :

Aidan W. (2005). l'encyclopédie du bois. Editions Hachette, France.

Åstrand, Johnny; Bessadi, Lynda; Johansson, Erik; Laïd, Saadia; Teggour, Hocine; Toumi, Nadjia (1994). Matériaux thermiquement isolants: béton mousse : panneaux en laine de bois suède: université de lund.

Ayache B., Rahal I., Benmansour W. (2019). Caractérisation des différents types de béton à base de copeaux de bois (Béton Ordinaire – Béton Autoplaçant – Béton A Haute Performance). Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba.

Bederina M., Bouziani T., Khenfer M., Quéneudec M. (2012). Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois. MATEC Web of Conferences 2, 01006. doi:DOI: 10.1051/mateconf/20120201006

Belhadj B., Bederina M., Khenfer M. (2012). Effet de différents traitements de copeaux de bois sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sables légers. Revue des sciences et sciences de l'ingénieur, Volume 2, N°1, pp. 36-42.

Bouabdallah M. A., Bouabdallah A., Houari A., Hamou K., Bentouiti M. (2007). Comportement de béton léger à base de granulats et des fibres de bois, séminaire national de "Génie Civil", 20 & 21 novembre Université Badji Mokhtar - Annaba, pp 1 - 9.

Bousaid E. (2003). Contribution à la modélisation des effets différents du bois et du béton sous conditions climatiques variables. Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon.

Campredon J. (1975). le bois. Presses universitaires de France Vendôme, France.

Chevalley E. (1982). le bois panneaux et matériaux. Edition delta & spes.

Clair B. (2001). Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.

Ghomari F., Boukli Hacene A., Taleb O. (2011) , Study of Limestone Addition on the Mechanical and Rheological Characteristics in the SCC. Jordan Journal of Civil Engineering Vol 5, N° 3 , pp 412 - 423

Harch N. (2018). Etude comparative sur les caractéristiques thermiques des matériaux de construction. Mémoire de Master, Université de Biskra.

Khelifi W., Belouettar R. (2012). Influence de la nature des copeaux de bois sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons à base de copeaux de bois. XX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Chambéry, 6 au 8 juin 2012, pp. 1-10.

Lahouioui M., Fois M., Ibos L., Ghorbal A. (2016). Etude des performances thermiques et mécaniques de matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres de bois de palmier. *Congrès Français de thermique*.

Lamalle M. (2016). Bloc de béton de bois, une alternative au bloc traditionnel?. Master en ingénieur civil architecte, à finalité approfondie, Université de Liège, Belgique.

Taleb O. (2017) Etude du comportement rhéologique des betons autoplaçants locaux, Thèse de doctorat. Université de Tlemcen.

Taoukil D., El Bouardi A., Ajzoul T., Ezbakhe H. (2011). caractérisation mécanique et hydrique d'un beton allége avec les. résidus de bois, Revue internationale d'héliotechnique, N°43, pp. 1-7.

Tedjdi A.K., Ghomari F., Taleb O., Belarbi R., Bouhraoua R.T. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 265 (120734) pp. 1-13.

Sites web :

web, s. (2007, septembre 25). conductivité thermique d'un matériau. Récupéré sur energie plus: <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/comportement-des-materiaux4/conductivite-thermique-d-un-materiau/>

web, s. (2007, juin). fiche technique - granule de liege naturel. Récupéré sur <http://www.lieges-melior.com/GRANULE.pdf>

web, s. (2013). mixité bois béton. Récupéré sur federation francaise du batiment: https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/mediatheque/batimetiers.html?ID_ARTICLE=1875

web, s. (2015, juin). Guide des exigences et procédures Travaux PEB en Région de Bruxelles-Capitale. Récupéré sur VADE-MECUM TRAVAUX PEB : 2008-2014: https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/GIDS_VademecumTravauxPEB_2008-2014_FR

web, s. (2016, avril 14). performance énergétique des bâtiments (PEB) industriels en région wallonne. Récupéré sur http://www.pirotech.be/wp-content/uploads/2016/05/P21_EGEnergy_PEBIndustrie_20160414.pdf

web, s. (2019, septembre 7). Laine de roche : caractéristiques, prix et choses à savoir. Récupéré sur [mon-equeurre.fr/mes-travaux-au-milimetre-!:](http://mon-equeurre.fr/mes-travaux-au-milimetre-!/) <https://www.monequerre.fr/laine-de-roche-caracteristiques-prix-et-choses-a-savoir/>

- web, s. (2019, avril 05). objectif PEB. Récupéré sur wallonie énergie:
https://energie.wallonie.be/fr/01-01-objectif-peb.html?IDC_PEB=9652&IDD=135023&IDC=9758
- web, s. (2020, février 26). Isolation thermique du bâtiment les points à connaître. Récupéré sur <https://blog.batimat.com/isolation-thermique-du-batiment/>
- web, s. (2021, janvier 08). Vicat mélange bois et ciment dans un béton aux performances thermiques améliorées. Consulté le juillet 09, 2021, sur <https://www.usinenouvelle.com/editorial/idee-verte-vicat-melange-bois-et-ciment-dans-un-beton-aux-performances-thermiques-ameliorees.N1046659>
- web, s. (s.d.). agresta. Consulté le juillet 10, 2021, sur <https://www.agresta.fr/fr/construction/1-agreslith-c.html>
- web, s. (s.d.). avantage de la laine de roche. Consulté le juillet 05, 2021, sur <https://www.knaufinsulation-maghreb.com/produits/avantages/laine-de-roche>
- web, s. (s.d.). bretagne-materiaux. Consulté le juillet 10, 2021, sur <https://www.bretagne-materiaux.fr/p/gros-oeuvre-bpe-voirie-tp/parpaing-bloc-standard-xelis-n-38-19-super-thermibloc-1000x380x250-A3986850>
- web, s. (s.d.). Coefficient de transmission thermique (U). Récupéré sur actu environnement:
https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/coefficient_de_transmission_thermique_u.php4
- web, s. (s.d.). durable, le bloc de l'habitat. Consulté le juillet 09, 2021, sur <https://www.blog-habitat-durable.com/polystyrene-extrude-un-isolant-thermique-en-plaque-efficace-et-economique/>
- web, s. (s.d.). h2o-isolation. Consulté le juillet 09, 2021, sur <https://h2o-isolation.com/blog/choisir-la-laine-de-bois-pour-une-isolation-ecologique-2/>
- web, s. (s.d.). Inertie thermique d'une maison. Récupéré sur Ecosources:
<https://www.ecosources.org/inertie-thermique>
- web, s. (s.d.). ISOLABLOC. Consulté le JUILLET 10, 2021, sur <https://www.isolabloc.fr/>
- web, s. (s.d.). Isoler ses sols avec du liège. Récupéré sur alsacork:
<https://www.alsacork.fr/actualites/isoler-ses-sols-avec-du-liege/>
- web, s. (s.d.). la performance énergétique des bâtiments. Récupéré sur wallonie énergie:
<https://energie.wallonie.be/fr/performance-energetique-des-batiments.html?IDC=6148>
- web, s. (s.d.). laine de bois. materiau d'isolation ecologique. Récupéré sur alsabrico:
<https://www.alsabrico.fr/isoler/materiaux-d-isolation-ecologique/laine-de-bois/>

- web, s. (s.d.). laine de verre: avantages et inconvénients. Récupéré sur <https://gaz-tarif-reglemente.fr/maitriser-sa-consommation/travaux/isolation/materiaux-isolants/isolation-laine-verre.html>
- web, s. (s.d.). laterlite. Comment utiliser l'argile expansée. Consulté le juillet 07, 2021, sur <https://www.laterlite.fr/qui-sommes-nous/granulats-legers-argile-expandee/utilisation/>
- web, s. (s.d.). Le polystyrène expansé, un isolant efficace et accessible. Récupéré sur conseils thermiques: <https://conseils-thermiques.org/contenu/polystyrene-expanse.php>
- web, s. (s.d.). Le polystyrène extrudé, économique et très isolant. Récupéré sur conseils thermiques: <https://conseils-thermiques.org/contenu/polystyrene-extrude.php>
- web, s. (s.d.). litière copeaux de bois. Récupéré sur <https://www.fermedebeaumont.com/litiere-copeaux-bois-p-7934.html>
- web, s. (s.d.). maison_eco_distribution. Consulté le juillet 09, 2021, sur <https://maisonecodistribution.com/produit/panneau-liege-expanse/>
- web, s. (s.d.). mousse polyuréthane. Récupéré sur <https://www.maisonentravaux.fr/actualites-travaux/appliquer-mousse-polyurethane-expansive/>
- web, s. (s.d.). Niveau K. Récupéré sur eurabo: <https://www.eurabo.be/fr/lexique/niveau-k>
- web, s. (s.d.). Ooreka maison. Consulté le juillet 06, 2021, sur <https://isolation.ooreka.fr/astuce/voir/672833/laine-de-verre-blanche>
- web, s. (s.d.). panneau isolant polyuréthane. Récupéré sur <https://epdm.fr/isolant-polyurethane-pur-pir/>
- web, s. (s.d.). Quels avantages et inconvénients pour le polyuréthane. Récupéré sur <https://travaux.info/faq/isolation/quels-avantages-et-inconvenients-pour-le-polyurethane-isolant>
- web, s. (s.d.). résistance thermique. Récupéré sur <https://www.xpair.com/lexique/definition/resistance-thermique.htm>
- web, s. (s.d.). thermiques, conseils. Consulté le juillet 09, 2021, sur <https://conseils-thermiques.org/contenu/polystyrene-expanse.php>
- web, s. (s.d.). toutes les caractéristiques de la laine de verre. Récupéré sur filmm: <https://www.filmm.org/laine-minerale/laine-de-verre-minerales>

Annexe

Participation au concours du meilleur prototype

Avec ce projet, nous avons participé au concours du meilleur prototype organisé par VREX et le centre i2E le 14/07/2021, lors d'une journée de valorisation de l'innovation sur les travaux scientifiques à caractère expérimental au niveau de la faculté de technologie.

Le deuxième prix a été décerné à ce projet.



Lauréat du meilleur prototype



le stand du projet

