

Liège, Belgique
8-9 Novembre 2018

EFFET DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN MATÉRIAU DE CONSTRUCTION À BASE D'AGRO- RESSOURCES

ZERROUKI Redouane^A, BENZAOUK Amar^A, DAHER Suzanne^A, MERZOUD Mouloud^B, BEJI Hassen^A

^A Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI-EA 3899) / Université de Picardie Jules Verne
IUT d'Amiens – Département de Génie-Civil / Avenue des Facultés, 80025 Amiens cedex 01 - France.

^B Laboratoire de Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba BP 12, Annaba 23000 - Algérie

Résumé : Les exigences de l'habitat, qui viennent s'ajouter au contexte environnemental et économique, font des matériaux de construction, à base de particules végétales, l'objet d'un intérêt croissant. Dans ce contexte, la principale motivation étant le gain en poids, associé à des propriétés physico-mécaniques et thermiques intéressantes.

Ce travail constitue une contribution à la valorisation de particules de chanvre (chènevotte) par leur incorporation dans une matrice minérale, comme granulats de substitution au sable. Le but étant de développer un matériau de type "béton léger", pouvant être utilisé dans la construction. Le matériau élaboré est un mortier dans lequel, le sable a été substitué par des particules végétales de chanvre (chènevotte) à des teneurs volumiques de 0, 50 et 100%. La nature du liant a été variée en fonction des dosages en ciment et en Tradical PF70. Il s'agit d'évaluer les propriétés, des matériaux élaborés à l'état durci, telles que les résistances mécaniques, aussi bien en compression qu'en flexion, le comportement élastique et les propriétés thermiques en fonction du sens de coulage du matériau frais, suivant le sens parallèle (//) et perpendiculaire (\perp), par rapport à la direction de la sollicitation.

Après optimisation de la composition du liant, à travers des tests d'hydratation, les résultats des essais, de caractérisation physico-mécanique, ont montré que malgré une baisse de résistances mécaniques, en fonction du taux volumique des particules végétales, les matériaux présentent des propriétés compatibles avec leur utilisation comme béton léger. La mise à contribution, des particules de chènevotte, s'est manifestée par le maintien d'une contrainte résiduelle, suffisamment élevée aux grandes déformations, caractérisant ainsi un comportement ductile du matériau. De plus, le choix du sens de coulage contribue à l'amélioration de la résistance mécanique. Dans le sens perpendiculaire, le matériau présente des résistances mécaniques plus élevée, comparativement à celui parallèle. Pour une substitution totale du sable, l'effet du sens du coulage devient négligeable. Quant au comportement thermique, l'orientation choix du sens type perpendiculaire, confère au matériau de meilleures performances.

Mots-clés : matériau Agro-sourcé, particule végétale, compatibilité chimique, propriété physico-Mécanique, contrainte résiduelle, ductilité, conductivité thermique

1. INTRODUCTION

Le monde d'aujourd'hui est confronté à son plus grand défi dans la maîtrise de la consommation énergétique, mais également dans la diminution de la pollution et des émissions de gaz à effet serre. En France, le bâtiment est le premier consommateur d'énergie, outre le transport, l'industrie et l'agriculture. Ainsi, ce secteur constitue une des clefs majeures, permettant de réduire très sensiblement nos dépenses énergétiques et contribuer à la réduction des GES. Pour répondre à ces objectifs, les procédés de production et de mise en œuvre des matériaux de construction n'ont cessé d'évoluer, à travers d'une part, le développement de matériaux innovants, et d'autre part, la mise en place de réglementations thermiques successives. Dans ce contexte, les matériaux bio-sourcés (à base de particules végétales) constituent une réponse potentielle aux besoins en matériaux compatibles avec une construction durable, respectant les exigences de la réglementation.

Les matériaux de construction, de types bio-sourcés, ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Outre leurs faibles masses volumiques, ils présentent des propriétés thermiques et acoustiques intéressantes. Néanmoins, leur sensibilité à l'eau est un frein à leur développement industriel. Pour pallier ce phénomène de reprise d'eau, des traitements physiques d'imprégnation ou d'enrobage superficiel des inclusions, ont été étudiés (Romildo et al., 2003 ; Fertikh et al., 2011).

Dans le même contexte, d'autres travaux sur la formulation des bétons et/ou mortier, à bases d'agroressources, ont montré que les performances de ces derniers dépendent de la nature des fibres végétales et de leurs dimensions (Almeida et al., 2002 ; Marius et al., 2002 ; Abdelmouleh et al., 2007 ; Li et al., 2006). De plus, leur incorporation permet d'améliorer la résistance en traction, la ductilité ou encore le comportement post-fracture des bétons (Cérézo, 2005 ; Meirhaeghe et al., 2011 ; Privas, 2013). Des travaux concernant les bétons de betteraves, de l'industrie sucrière, ont montré que les matériaux élaborés présentaient une forte instabilité dimensionnelle (Montréal, 2007). Dans le même objectif, d'autres travaux ont été réalisés sur les bétons de diss, mettant en évidence l'effet inhibiteur que les fibres de diss exerçaient sur le liant (Merzoud et al., 2015 ; Djerrada, 2016). Des travaux similaires, avec des particules d'anas de lin et de fibres de colza, ont été réalisés (Aamr-Daya et al., 2008 ; Zhang, 2015).

Le béton de chanvre est l'un des matériaux de construction le plus développé en France. Il est utilisé comme matériau de remplissage porteur et/ou d'isolation, dans un système éco-constructif. Compte tenu de sa forte porosité, ce dernier présente des performances thermiques et acoustiques particulièrement intéressantes (Evrard, 2008 ; Chamoin et al., 2008 ; Arnaud et al., 2009). Toutefois, plus le béton de chanvre est léger, plus son niveau d'isolation thermique est élevé, et plus ses propriétés mécaniques sont faibles. C'est la raison pour laquelle, il est nécessaire d'optimiser sa composition, afin d'obtenir le meilleur compromis entre ces performances.

La première piste, envisagée dans ce travail, consiste à faire varier le dosage en particules végétales ainsi que la nature du liant. Cette étude porte sur la faisabilité mais aussi l'évaluation des propriétés physico-mécaniques et thermiques d'un matériau de construction, à base de particules de chènevotte, en vue de son utilisation dans le domaine d'application des "bétons légers". Les matériaux étudiés ont été élaborés par substitution du sable, contenu dans un mortier de référence, par des particules de chènevotte à des teneurs volumiques de 0%, 50% et 100%. L'effet de ces particules a été examiné, à travers la caractérisation physico-mécanique des matériaux, en compression et en flexion, mais aussi thermique par la mesure de la conductivité thermique à l'état sec. L'influence du sens du coulage du matériau, suivant le sens parallèle (//) et perpendiculaire (\perp), par rapport à celui de la sollicitation, a également été examiné.

2. MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle, à feuilles palmées (Figure 1-a). Après défibrage ou teillage, la tige se décompose en chènevottes (forme granulaire du chanvre), constituées de petits bâtonnets courts, de quelques millimètres à quelques centimètres de long (Figure 1-b). La Figure 1-c illustre la courbe granulométrique des particules de chènevottes. Leurs propriétés sont données par le tableau 1. On constate, à l'évidence, que ces particules présentent une grande porosité, avec un taux d'absorption d'eau élevé. L'absorption a été mesurée par immersion des particules végétales, dans l'eau, jusqu'à saturation totale. De plus, il a été observé une cinétique d'absorption très rapide, en raison du caractère hydrophile de ces particules.

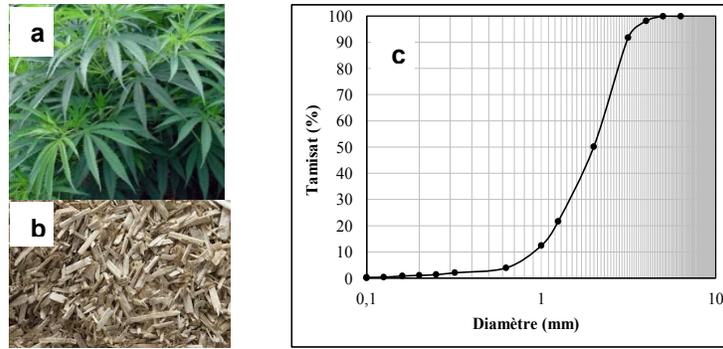


Figure 1. Aspect (a) : de la plante de chanvre - (b) : des particules de chènevotte - (c) : Courbe granulométrique

Masse vol. appar. (kg/m ³)	Masse vol. réelle (kg/m ³)	Porosité (%)	Absorption d'eau (%)
120,5	1460,5	91,7	241,8

Tableau 1. Propriétés des particules de chènevotte

Le liant, utilisé, est un mélange de ciment, de type CPJ-CEMII 32.5 suivant la norme NF P15-301 (Afnor, 1994), et de Tradical PF70, dans des proportions massiques variables. Ce dernier est constitué d'un mélange de 75% de chaux aérienne, 10% de liants hydrauliques et 15% de pouzzolanes (BCB-Tradical, 2015). Le sable utilisé est un sable siliceux, ayant une granulométrie 0/5.

Le matériau élaboré est un mortier dans lequel, le sable a été substitué par les particules de chènevotte, à des taux volumiques de 0%, 50% et 100%. Le mortier de référence (MR) a été préparé selon la formulation Sable/Liant=3 et Eau/Liant=0,6, correspondant à des rapports massiques.

Pour la fabrication du matériau, les particules végétales et le sable ont été initialement mélangés à sec. Ce type de procédé permet de pallier leur ségrégation, mais aussi de favoriser leur dispersion dans la matrice. Pour le liant, le ciment et le Tradical PF70 ont été initialement mélangés à sec, avant l'introduction d'eau de gâchage. L'ensemble est d'abord mélangé à vitesse lente, pendant 2 minutes, avant l'ajout du mélange chènevotte-sable. Le matériau frais est, ensuite, malaxé, à vitesse lente, durant 2 minutes supplémentaires. A l'issue de cette étape, le matériau a été coulé, dans des moules cubiques (100 x 100 x 100 mm), prismatiques (70 x 70 x 280 mm) et parallélépipédiques (250 x 250 x 60 mm), et vibré à l'aide d'une table vibrante. Les différents matériaux ont ensuite été conservés, avant et après démoulage, en salle de conservation à température et hygrométrie contrôlées (20±2°C, HR=98%), pendant 28 jours. Pour chaque formulation, le matériau a été testé dans les sens parallèle (//) et perpendiculaire (⊥), par rapport au sens de coulage. Au vu des dimensions des particules de chènevottes, on peut admettre, selon des observations expérimentales, que leur orientation longitudinale est toujours perpendiculaire au sens du coulage. La Figure 2 illustre les deux configurations.

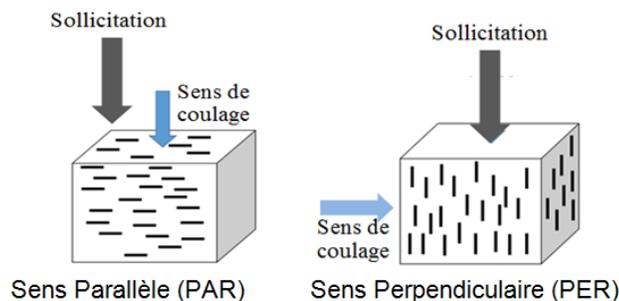


Figure 2. Représentation schématique du sens de la sollicitation, par rapport à celui du coulage

La compatibilité chimique entre les particules végétales et le liant, a été évaluée suivant un test d'hydratation (Hachmi et al., 1990). Le principe consiste à quantifier l'effet inhibiteur des particules de chènevotte sur la réaction d'hydratation du liant, à partir des courbes température/temps, enregistrées. Ces courbes permettent également de localiser le temps de début de prise, correspondant au début de la variation de la température d'hydratation. Des essais préliminaires ont été réalisés d'une part, avec le matériau de référence (sans particules végétales), et d'autre part en substituant le sable par 30%, massique, de chènevotte. Cet essai a également permis de tester d'autres types de liants, dont la composition des matériaux et leurs désignations, sont données par le tableau 2. Le dispositif expérimental, utilisé, est donnée par la Figure 3. L'effet inhibiteur, des particules végétales, a été quantifié en évaluant l'indice d'inhibition I (%), suivant l'expression (1) (Hachmi et al., 1990 ; Moslemi et al., 1983).

$$I(\%) = 100 \cdot \left(\frac{t'-t}{t}\right) \cdot \left(\frac{T-T'}{T}\right) \left(\frac{a-a'}{a}\right) \quad (1)$$

T et T' (°C) sont les températures maximales d'hydratation respectives du liant et du matériau ; t et t' (h) sont les temps correspondants, a et a' (°C/h) représentent les pentes maximales de la courbe température/temps du liant et du matériau.

Matériau	Liant (% mass.)		Granulats (% vol.)	
	Ciment	Trical	Sable	Chanvre
MR-75C/25T	75	25	100	0
CH30-75C/25T	75	25	70	30
CH30-100C/0T	100	0	70	30
CH30-0C/100T	0	100	70	30

Tableau 2. Désignation des matériaux étudiés

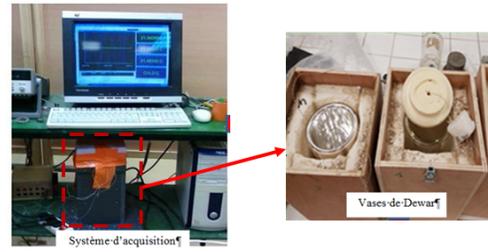


Figure 3. Dispositif expérimental du test d'hydratation

Les propriétés physico-mécaniques, à l'état durci, ont été déterminées à 28 jours, pour les matériaux contenant 0% (MR), 50% et 100% de particules végétales, par substitution au sable. La masse volumique sèche a été évaluée par mesure géométrique et pesée. Les essais mécaniques, en compression et en flexion, ont été réalisés suivant la norme EN 196-1 (Afnor, 1995).

La mise à contribution des particules végétales, sur la déformabilité du matériau, a été évaluée par mesure de l'Indice de Fragilité (IF), à l'aide des diagrammes contrainte/déformation, exprimé par l'expression (2) (Consoli et al., 2002).

$$IF = 1 - \frac{\sigma_{res}}{\sigma_{max}} \quad (2)$$

σ_{res} et σ_{max} sont les contraintes résiduelles et maximales, respectivement, des matériaux.

si σ_{res} tend à s'annuler, le matériau est fragile (IF tend vers 1). Si σ_{res} tend vers σ_{max} , le matériau est alors ductile (IF tend vers 0).

Les essais thermiques ont été réalisés sur des échantillons de dimensions 250 x 250 x 60 mm, préalablement séchées dans une étuve, à $70 \pm 2^\circ\text{C}$, en utilisant la méthode de la plaque chaude gardée, selon la Norme EN12667 (EN12667, 2001). Pour effectuer la mesure, l'échantillon est pris en sandwich entre deux plaques (chaude et froide), maintenues à des températures différentes avec un écart de 10°C . Ce qui permet d'établir un flux de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE

3.1 Test d'hydratation

Les courbes température/temps, obtenues lors de la réaction d'hydratation, pour les différents matériaux, sont illustrées par la Figure 4. Les valeurs des paramètres, correspondants, sont données par le tableau 3. On constate que l'ajout de particules de chènevotte provoque une inhibition de la réaction d'hydratation, quel que soit le type de liant utilisé. Cet effet inhibiteur est caractérisé par une diminution de la température maximale d'hydratation et une augmentation du temps requis. Pour un taux de 30% en chènevotte, la température maximale varie de 39,8°C, pour le matériau MR-75C/25T, à 29,7°C, pour CH30-75C/25T. Les temps, correspondants, pour atteindre ces températures, sont de 11h et 15,5h, avec des temps de début de prise de 1h et 2,5h, respectivement. Cette différence serait liée à la présence de substances hydrosolubles, qui sont également responsables de la précipitation partielle de la Portlandite. Pour une composition de 30%, l'indice d'inhibition est de 7,5%, correspondant à un effet inhibiteur de type "faible inhibition".

Si l'on compare l'effet de la nature du liant, on constate que l'ajout du Tradical PF70 est probablement responsable de la réduction de cet effet inhibiteur. On constate également que la diminution du dosage en ciment, provoque une diminution de l'indice d'Inhibition, qui varie de 30,4%, pour le matériau CH30-100C/0T à 4,2%, pour celui de type CH30-0C/100T, formulé uniquement avec du Tradical. Cet état correspond au passage d'un effet de type "Inhibition modérée", à celui de type "Faible inhibition". Cette différence est attribuée à la présence de la chaux, dans le liant Tradical, qui génère des ions (Ca^{2+}), en excès, responsables de la prise et du durcissement du matériau. La fixation, par les particules végétales, des ions calcium (Ca^{2+}) et leur appauvrissement dans le liant cimentaire, serait la cause principale du retard de prise constaté. Cependant, la viabilité de l'utilisation des matières végétales, dans une matrice minérale, dépend de leurs traitements appropriés mais aussi de celui de la matrice minérale, afin de prévenir les composants qui entravent les propriétés des matériaux.

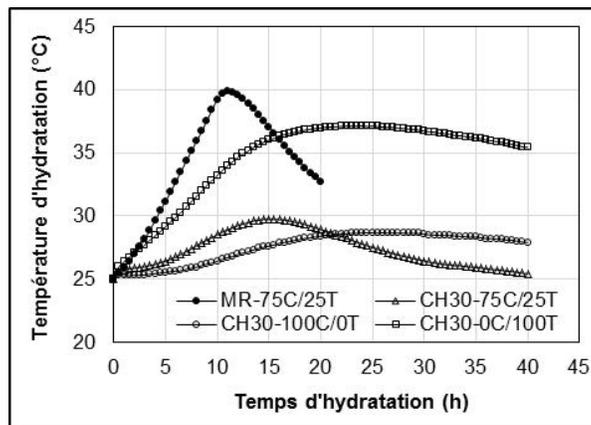


Figure 4. Courbes d'hydratation température-temps des différents matériaux

Matériau	Temp. Max. d'hydrat. (°C)	Temps Max. Hydrat. (h)	Début de prise (h)	I(%)
MR-75C/25T	39,8	11,0	1,0	-
CH30-75C/25T	29,7	15,5	2,5	7,5
CH30-100C/0T	28,6	25,0	3,5	30,4
CH30-0C/100T	37,1	24	2,0	4,2

Tableau 3. Paramètres de la réaction d'hydratation

3.2 Caractérisation physico-mécanique

3.2.1 Allègement des matériaux

L'évolution de la masse volumique sèche des matériaux, en fonction de la teneur en particules de chènevotte, est illustrée par la Figure 5. Pour un taux de substitution allant de 0 à 100%, la masse volumique varie de 1480 à 820 kg/m^3 ; Ce qui correspond à un allègement d'environ 44,5%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et d'allègement des structures. Outre la faible densité des particules de chènevotte, l'allègement du matériau est également lié à l'augmentation de la porosité à l'interface Chènevottes/liant. En effet, les mesures de la porosité ouverte, par saturation en eau, ont montré que celle-ci augmente avec le taux de substitution. De plus, les résultats ont montré que l'augmentation du dosage en chènevotte, entraînerait une augmentation de l'entraînement d'air (air-occlus) dans la matrice (tableau 4).

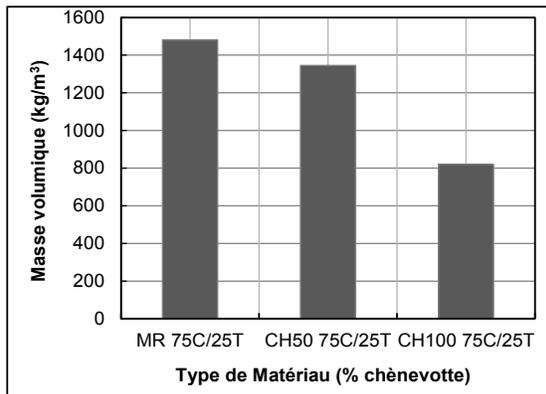


Figure 5. Masse volumique des matériaux

Matériau	Air-occlus (%)	Porosité ouverte (%)
MR-75C/25T	2,6	8,4
CH50-75C/25T	7,0	16,2
CH100-75C/25T	13,0	44,5

Tableau 4. Propriétés des différents matériaux

3.2.2 Comportement mécanique en compression

Les diagrammes contrainte-déformation, pour les différents taux de substitution, sont illustrés par la Figure 6. Celle-ci montre que l'ajout de chènevotte, provoque une baisse considérable de la résistance à la compression (tableau 5). Elle varie de 9,2 MPa à 0,7 MPa, pour une composition de 100%; Soit une réduction d'environ 92%. La baisse de performances mécaniques serait liée à la faible rigidité des particules végétales mais aussi à leur faible adhérence à la matrice. De plus, la diminution de la compacité, induit une porosité supplémentaire dans le matériau. Des observations, au Microscope Electronique à Balayage, mettent en évidence des défauts d'interface, responsables de l'augmentation de la porosité du matériau (Figure 7-a). De plus, on constate la présence d'une porosité importante, résultant de l'augmentation de l'entraînement d'air (bulles d'air) dans la matrice (la Figure 7-b).

On constate également que le comportement du matériau de référence (MR) est de type "fragile", caractérisé par une courte phase élastique, suivie d'une rupture brutale. Par contre, la présence de chènevotte confère au matériau un comportement de type "ductile", en faisant apparaître une phase plastique plus étendue, qui retarde l'étape de fissuration. Malgré une incidence défavorable sur les résistances en compression, l'augmentation de la teneur en chènevotte améliore le comportement des matériaux en déformation. Le tableau 5 montre que la déformation à la rupture varie de 4,1 mm/m, pour le matériau (MR), à 13,2 mm/m, pour le matériau CH100-75C/25T. Les valeurs des modules d'élasticité, correspondants, sont de 2161 MPa et 54,3 MPa. Cette différence est liée à la présence des particules végétales, qui amortissent les contraintes exercées en leur périphérie, en raison de leur faible rigidité.

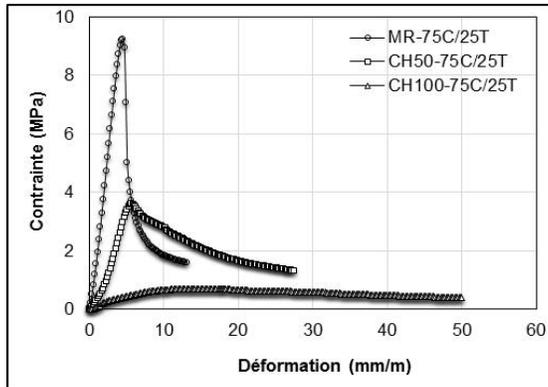


Figure 6. Diagramme contrainte-déformation, en fonction du taux de chènevette (sens //)

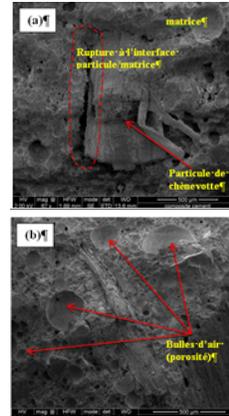


Figure 7. Vues au MEB de la microstructure des matériaux

Matériau	σ_{\max} (MPa)		Déf. Max. (mm/m)		E (MPa)		σ_{res} (MPa)		(IF)	
	PAR	PER	PAR	PER	PAR	PER	PAR	PER	PAR	PER
MR/75C/25T	9,2		4,1		2161,4		1,60		0,82	
CH50-75C/25T	3,6	3,9	5,6	7,3	888,0	785,2	1,3	1,6	0,63	0,58
CH100-75C/25T	0,7	1,2	13,2	14,6	54,3	48,8	0,3	0,7	0,57	0,41

Tableau 5. Propriétés mécaniques, en compression, des matériaux élaborés

Le comportement fragile ou ductile, des matériaux, a été caractérisé à l'aide de l'Indice de Fragilité (*IF*). Les résultats, des paramètres de déformabilité, sont donnés par le tableau 5. Pour le matériau CH100-75C/25T, la valeur de la contrainte résiduelle est d'environ 43% de celle à la rupture. En revanche, celle du matériau (MR) est de 17%. La variation de l'indice (*IF*), correspondant, de 0,82 à 0,57, met en évidence le caractère ductile des matériaux à base de chènevottes. La mise à contribution des particules de chènevottes, se manifeste précisément par le maintien d'une contrainte résiduelle, suffisamment élevée, aux grandes déformations. Ce qui n'est pas le cas du matériau (MR), caractérisé par une rupture immédiate de type "fragile".

L'influence du sens de coulage du matériau, par rapport à celui de la sollicitation, sur la résistance à la compression, a également été examinée. *Les résultats obtenus sont données par le tableau 5.* On constate que l'orientation PER (\perp), confère au matériau une résistance à la compression plus élevée, comparativement à l'orientation de type PAR (\parallel). Cette différence serait certainement liée à une plus grande surface de contact, entre le liant et les particules, qui induit, par conséquent, une meilleure adhérence de ces dernières. De plus, la nature de la porosité à l'interface particule/liant, qui se présente en profondeur dans la matrice, pour le cas PER, pourrait contribuer à améliorer les performances mécaniques du matériau. Pour le matériau CH50-75C/25T, la résistance varie de 3,6 MPa, pour le cas PAR (\parallel), à 3,9 MPa, pour le cas PER (\perp). Une tendance similaire a été observée pour le matériau CH100-75C/25T où, les résistances sont de 0,7 MPa et 1,2 et MPa, pour le cas PAR et PER, respectivement.

3.2.3 Comportement mécanique en flexion

L'influence du taux de chènevette sur le comportement des matériaux, en flexion, est illustrée par la Figure 8. Les valeurs des résistances à la rupture, correspondant, sont données par le tableau 6. Les résultats mettent en évidence une perte de performances mécaniques, avec l'ajout de particules de

chênevotte. Pour un dosage allant de 0 à 100%, la résistance à la flexion varie de 3,7 MPa, pour le matériau MR-75C/25T, à 0,9 MPa, pour celui de type CH100-75C/25T ; Ce qui correspond à une perte de performances de l'ordre 76%. On constate que la baisse de la résistance en flexion est moins importante que celle en compression. Au vu de ces résultats, l'adhérence des particules de chènevotte, à la matrice, constitue vraisemblablement le paramètre prépondérant qui explique les différences observées. Au-delà d'un certain dosage, des amas de chènevottes ont tendance à se former, rendant ainsi leur dispersion plus difficile. Ce qui provoque, par conséquent, une perte de leurs performances lors d'une sollicitation en flexion. On constate également que la présence de particules de chènevotte, confère au matériau une augmentation de la flèche (tableau 6). A la rupture, celle-ci varie de 0,28 mm, pour le matériau MR-75C/25T, à 0,39 mm, pour celui de type CH100-75C/25T. Le module d'élasticité, correspondant, évolue dans le sens de l'augmentation de l'élasticité. Il varie de 2121,2 MPa à 281,8 MPa, confirmant ainsi le caractère ductile des matériaux à base de particules végétales.

Lors des essais, un phénomène de pontage a été observé, pour les matériaux à base de particules de chènevotte. Celui-ci permet de retarder la propagation des fissures. La Figure 9 montre une photographie des matériaux, après la rupture. Contrairement au matériau (MR), celui de type CH100-75C/25T conserve sa structure et les lèvres de la fissure restent liées, "cousues", grâce aux particules végétales. Ces dernières permettent, donc, de mieux contrôler la propagation des fissures en retardant ainsi la phase de rupture.

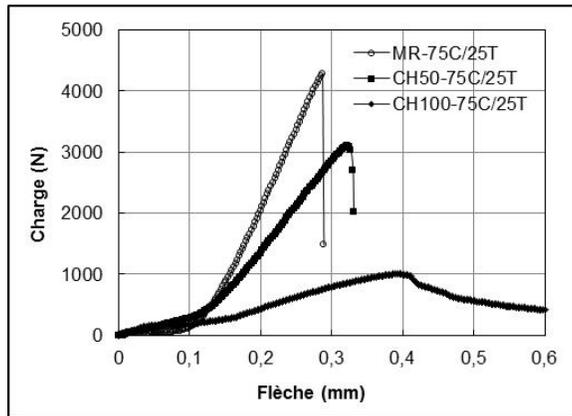


Figure 8. Diagrammes Charge/Flèche des matériaux



Figure 9. Etat des matériaux, après la rupture en flexion

Matériau	R _f (MPa)		Flèche (mm)		Mod. d'élasticité (MPa)	
	PAR	PER	PAR	PER	PAR	PER
MR/75C/25T	3,74		0,28		2121,2	
CH50/75C/25T	1,74	2,70	0,32	0,50	1262,4	391,2
CH100/75C/25T	0,92	1,32	0,39	0,40	281,8	286,75

Tableau 6. Propriétés mécaniques en flexion des matériaux

L'influence du sens de coulage, sur les résistances à la flexion, a été examinée, pour les différents matériaux. Les valeurs des paramètres, correspondants, sont données par le tableau 6. On constate que l'orientation de type PER confère au matériau une résistance plus élevée, comparativement au cas PAR. Néanmoins, la flèche est nettement plus importante dans ce dernier cas. Pour le matériau, à 100% de chènevotte, la différence est nettement moins significative. Ceci est probablement dû au fait que, pour un taux important de chènevotte, la rupture du matériau est plutôt gouvernée par l'état de l'interface particule/matrice. Par ailleurs, on note que la résistance à la flexion est légèrement plus élevée, pour le cas PER, comparativement au cas PAR. Néanmoins, les flèches sont quasiment similaires.

3.3 Caractérisation thermique

Les résultats des mesures de la conductivité thermique, à l'état sec et une température de 20°C, pour les différents matériaux, sont illustrés par le tableau 7. On constate clairement que plus la teneur en chènevotte augmente plus la conductivité thermique diminue. Celle-ci varie de 0,690 W/m.K, pour le matériau MR, à 0,259 W/m.K, pour le matériau CH100-75C/25T ; Ce qui correspond à un gain de performances de l'ordre de 62% Cette différence serait liée à la faible conductivité des particules de chènevotte mais aussi à l'augmentation de la porosité du matériau.

Les valeurs, données par le tableau 7, montrent que le sens du coulage affecte les performances thermiques des matériaux. On constate que l'orientation PER (\perp) confère au matériau de meilleures performances thermiques ; pour le matériau CH100-75C/25T, les conductivités thermiques sont de 0,259 W/m.K et 0,238 W/m.K, pour le cas PAR et PER, respectivement. La différence de la forme de la porosité, dans le cas PAR et PER, est un facteur supplémentaire qui peut influencer les performances thermiques des matériaux. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs (Nozahic, 2012 ; Nguyen, 2010). Ces derniers attribuent cette différence à l'orientation préférentielle des particules de chènevotte durant le compactage et à leur anisotropie propre. Au niveau microscopique, ces particules sont constituées par un assemblage de faisceaux longitudinaux. Leur conductivité thermique est plus élevée dans la direction parallèle aux faisceaux. Le passage du flux de chaleur est alors plus favorable lorsqu'il s'effectue dans le sens des capillaires longitudinaux de la chènevotte.

Matériau	Conductivité thermique sec (W/m.K)	
	PAR	PER
MR/75C/25T	0,69	
CH50/75C/25T	0,626	0,522
CH100/75C/25T	0,259	0,238

Tableau 7. Valeurs de la conductivité thermique des matériaux, à l'état sec, à 20°C

4. CONCLUSION

Les travaux présentés concernent l'optimisation de la formulation et la caractérisation physico-mécanique et thermique d'un matériau de construction, à base de particules de chanvre, en vue de son utilisation dans le domaine d'application des bétons légers. Les résultats ont montré que la substitution partielle du ciment par du Tradical, entraîne une amélioration du temps de prise du matériau, avec un effet inhibiteur de type "faible inhibition".

L'étude des caractéristiques mécaniques a montré que l'ajout de chènevotte, réduit sensiblement la résistance à la compression. On note une perte de performances de l'ordre de 92%, pour un allègement d'environ 44,5%, par rapport au matériau de référence. De plus, l'augmentation du dosage en particules de chènevotte, réduit sensiblement la résistance à la flexion, avec une diminution nettement plus faible que celle en compression. La mise à contribution, des particules de chènevotte, a été observée particulièrement lors de l'analyse du comportement en déformation des matériaux. La présence de ces particules s'est manifestée par le maintien d'une contrainte résiduelle, suffisamment élevée, aux grandes déformations ; Ce qui confère aux matériaux un comportement ductile, suivie d'une rupture diffuse. En revanche, le matériau (MR) est caractérisé par une rupture immédiate de type "fragile".

Les résultats des mesures de la conductivité thermique des matériaux, à l'état sec, ont montré que celle-ci diminue considérablement avec l'incorporation de chènevotte. L'accroissement des performances thermiques est lié au caractère isolant des particules de chanvre mais aussi à leur grande porosité. Par ailleurs, on note que le sens du coulage, par rapport à celui de la sollicitation, est un paramètre supplémentaire qui viendrait influencer le comportement du matériau. On constate que le choix du coulage dans le sens PER, confère au matériau un comportement plus performant aussi bien en

sollicitation mécanique qu'en thermique, comparativement au cas PAR. Malgré une baisse significative des performances, les valeurs obtenues restent compatibles avec l'utilisation du matériau comme isolant, selon la classification de la RILEM ($> 0,5$ MPa et $< 0,3$ W/m.K, pour un matériau isolant) (RILEM LC2, 1978).

Néanmoins, des travaux complémentaires de caractérisation de la nature et de la distribution de la porosité dans la matrice, en fonction du sens de coulage, sont utiles afin d'élucider ce phénomène.

RÉFÉRENCES

- Aamr-Daya E., Langlet T., Benazzouk A. (2008), Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: physico-mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, 30: 957–63.
- Abdelmouleh M., Boufi S., Belgacem M.N., Dufresne A. (2007), Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading; *Composites Science and Technology*, 67:1627-1639
- Almeida R.R., Del Menezzi C.H.S. Teixeira D.E.(2002), Utilisation of the coconut shell of babaçu (*Orbignya* sp.) to produce cement-bonded particleboard. *Bioresource Technology*, 85: 159-163.
- Arnaud L. et Hustache Y. (2009), Influence des matériaux agro-sourcés sur les performances des produits : normalisation et réglementation. 1er Congrès CenC, Sens-France.
- BCB. [En ligne]. Available: <http://www.bcb-tradical.fr>, France.
- Cérézo V. (2005), Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, Thèse de doctorat de l'ENTPE, 250 p.
- Chamoin J., Collet F., Pretot S. (2008), Optimisation de bétons de chanvre projeté et moulé – Caractérisation du matériau de référence. Rencontre de l'AUGC, Nancy-France.
- Consoli N.C., Montardo J.P., Prietto P.D.M., Pasa G.S. (2002), Engineering behavior of sand reinforced with plastic waste, *Journal of Geotechnical and Engineering*, ASCE, 128(6): 462-472.
- Djerada A. (2016), Elaboration de composites à base de fibres végétales : Caractérisation physico-mécanique et thermique, Rapport de Stage de Master 2 / Stratégies et Conduite en Energétique et Energies Renouvelables, Université de Picardie Jules Verne, 112 p.
- Evrard A. (2008), Transient hygrothermal behavior of Lime-Hemp Materials, PhD. Thesis in Applied Science, Université Catholique de Louvain, 226 p.
- Fertikh S., Merzoud M., Habita F.M., Benazzouk A.. (2011), Comportement mécanique et hydrique des composites à matrice cimentaire et argileuse à base de diss "Ampelodesma mauritanica". XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Université de Tlemcen-Algérie, 188–196.
- Hachmi M., Moslemi A.A., Campbell A.G. (1990), A new technique to classify the compatibility of wood with cement, *Wood Sci Technol*, 24: 345-354.
- Li Z., Wang X., Wang L. (2006), Properties of hemp fiber reinforced concrete composites. *Composites Part A- Applied Science and Manufacturing*, 37(3): 497–505.
- Marius E., Ovidiu M., Marcel M. (2002), Influence of the wood waste characteristics and its chemical treatment on the composites properties, NOCMAT/3, International Conference, Vietnam, 245-249.
- Meirhaeghe C. (2011), Étude de gisement accessible de fibres végétales à usage matériaux en France. Technical report, Fibres Recherche Développement (FRD)-France.
- Merzoud M., Sellami A., Gouasmila A., Benazzouk A. (2015), Effet du traitement des fibres de diss sur le comportement mécanique des composites cimentaires. Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015 (Nouveau Matériaux et Durabilité), LGCGE-Ecole des Mines de Douai, Lille Nord de France.
- Monreal P. (2007), Étude de faisabilité de bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betteraves : traitements physico-chimiques des granulats et évaluation de l'influence sur les performances mécaniques, hydriques et thermiques. PhD thesis, Université de Picardie Jules Vernes, 195 p.
- Moslemi A.A., Garcia J.F., Hofstrand A.D. (1983), Effect of various treatments and additives on wood Portland cement water systems. *Wood and Fiber Science*, 22: 164-176.
- Nguyen T.T. (2010), Contribution à l'étude de la formation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre», Thèse - Université de Bretagne Sud, France.
- Norme AFNOR (1994), Liants hydrauliques, ciments courants—composition, spécification et critères de conformité.

Norme AFNOR (1995), Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: Détermination des résistances mécaniques.

Norme EN12667 (2001), Thermal performance of building materials and products-Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-Products of high medium thermal resistance.

Nozahic V. (2012), Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée 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 l'Université Blaise Pascal - Clermont II, France.

Privas E. (2013), Matériaux ligno-cellulosiques Élaboration et Caractérisation". PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – ParisTech, 210 p.

RILEM LC2 (1978), Functional classification of lightweight concrete, 11:281-283.

Romildo D., Filho T., Ghavami K., England G.L., Scrivener K. (2003), Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. Cement and Concrete Composites, 25(2):185-196.

ZHANG X. (2015), Elaboration de composites à base de fibres végétales : Caractérisation physico-mécanique et efficacité énergétique, Rapport de Stage de Master 2 / Stratégies et Conduite en Énergétique et Énergies Renouvelables, Université de Picardie Jules Verne, 119 p.