
Valorisation de granulats végétaux pour la formulation d'écomatériaux de construction

Camille Magniont^{1*}, Gilles Escadeillas¹, Claire Oms-Multon¹, Marie Coutand¹

¹ Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions); 135, avenue de Rangueil; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

* camille.magniont@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de cet article est de comparer les propriétés de la chènevotte du chanvre et de la moelle de tournesol dans le cadre de leur valorisation en tant que granulats végétaux associés à une matrice pouzzolanique. L'observation par microscopie électronique à balayage de ces granulats a permis de mettre en évidence leurs microstructures distinctes. Ceci expliquerait les écarts de comportement mécanique et thermique des composites incorporant ces granulats végétaux. Concernant le comportement à long terme des composites, les résultats mettent en évidence la minéralisation des particules et en particulier de la chènevotte par des composés de nature calcique.

ABSTRACT. The aim of this paper is to compare hemp shiv and sunflower pith properties when they are used as plant aggregates incorporated to a pozzolanic matrix. The SEM observation of these aggregates showed distinct microstructures. The result could be responsible for the difference observed between the mechanical and thermal behaviour of composites including these two types of plant aggregates. Long term behaviour of composites revealed the mineralization by calcium compounds of plant aggregates, in particular hemp shiv.

MOTS-CLÉS : granulat végétal, chènevotte, moelle de tournesol, durabilité, écomatériau.

KEYWORDS: plant aggregate, hemp shiv, sunflower pith, durability, ecofriendly building material.

1. Introduction

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui en pleine mutation afin de proposer des solutions innovantes répondant aux nouvelles exigences des réglementations et des usagers en termes d'impact environnemental et sanitaire. Dans ce cadre, le développement de matériaux de construction innovants, qui respectent la santé et améliorent le confort de l'utilisateur tout en ayant un impact environnemental limité, constitue un enjeu prioritaire.

L'utilisation de matières premières renouvelables et notamment de coproduits agricoles constitue une des voies envisagées. Différents travaux ont d'ores et déjà été menés sur le développement de matériaux de construction à base de chènevotte, particules ligneuses issues de la tige du chanvre.

Le béton de chanvre, qui associe ces granulats végétaux légers à une matrice minérale généralement formulée à base de chaux aérienne, présente des propriétés d'usage intéressantes. Il permet notamment d'obtenir une conductivité thermique compatible avec une fonction d'isolation répartie et ses performances énergétiques pourraient être meilleures en raison d'un comportement hygrothermique spécifique mis en évidence dans de précédents travaux mais dont les mécanismes ne sont pas encore parfaitement connus (Samri, 2008).

Néanmoins, certains verrous restent à lever pour permettre le développement à plus grande échelle de ce matériau. Le fort pouvoir absorbant des particules de chènevotte présente notamment un désavantage vis-à-vis du fort surdosage en eau qu'il engendre, et des problèmes de temps de séchage très long qu'il occasionne au moment de la mise en œuvre. De plus, les performances mécaniques du béton de chanvre restent insuffisantes pour envisager une utilisation en tant que matériau porteur. De récents travaux ont exploré différentes voies d'amélioration des propriétés de ce composite, notamment la modification de la nature de la matrice (Magniont, 2010a), le compactage ou vibrocompactage du mélange à l'état frais (Nguyen, 2009), ou encore sa mise en œuvre par projection (Chamoin, 2008).

Dans cet article, nous nous proposons de présenter les résultats obtenus avec un granulats végétal d'une autre nature : la moelle de tournesol, et de comparer les propriétés obtenues avec celles des granulats de chènevotte.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux

2.1.1 Matrice minérale et adjuvant d'origine végétale

La matrice minérale utilisée dans ces travaux a été formulée dans le cadre de travaux antérieurs (Magniont, 2010a), elle associe de la chaux hydraulique naturelle NHL 5 de Saint Astier et du métakaolin Argicem de l'entreprise Argeco.

Ce mélange est complété par l'ajout d'un adjuvant d'origine végétale, le carbonate de glycérol (CG), fourni par Huntsman (USA), il est synthétisé à partir du glycérol, co-produit de la production industrielle d'acides gras (agents tensio-actifs) et de biodiesels. Les bénéfices de l'incorporation du CG à cette matrice pouzzolanique innovante ont été présentés par ailleurs (Magniont, 2010b).

2.1.2 Granulats végétaux

2.1.2.1 Chènevotte

La chènevotte, ou granulats de chanvre, désigne la partie intérieure fragmentée de la tige de chanvre. La chènevotte utilisée dans cette étude a été fournie par la société Agrofibre, filière chanvre du Groupe Euralis, lancée en juin 2008 et implantée à Cazères en Haute-Garonne (31). L'usine de 2300 m² a permis en 2008 de traiter 15000 tonnes de paille de chanvre et l'objectif affiché est de 35000 tonnes d'ici 3 ans pour 5000 ha de production environ.

La chènevotte résulte d'un processus de défibrage industriel de la paille de chanvre par battage mécanique ; les particules sont ensuite dépoussiérées et calibrées.



Figure 1. Particules de chènevotte

Les particules de chanvre (Figure 1) sont des particules beiges à blanches, allongées, de forme parallélipédique de 1 à 4 mm de côté et de 4 à 12 mm de longueur.

2.1.2.2 Moelle de tournesol

Le tournesol, de nom scientifique *Helianthus annuus L.*, est une plante originaire d'Amérique du Nord, importée en Europe par les Espagnols au XVI^{ème} siècle. Sa culture est aujourd'hui largement répandue sur tous les continents pour ses graines riches en huile alimentaire de bonne qualité. La France est le premier producteur européen devant l'Espagne et la Hongrie.

Le plant de tournesol est constitué de racines, d'une tige, de feuilles et d'un capitule contenant les graines. Il est quasi exclusivement cultivé pour ses graines, essentiellement destinées à la production d'huile. Le tourteau est le co-produit de l'obtention de l'huile par trituration, il est valorisé dans l'alimentation animale.

Lors de la récolte, la tige est coupée sous le capitule, qui est battu pour récupérer les graines et est ensuite rejeté aux champs. La tige et le capitule sont ensuite enfouis et valorisés à travers leur apport humique et minéral. Ceci explique un des avantages de la culture du tournesol qui est de ne pas ou très peu appauvrir le sol (Vandenbossche, 1998). Cependant, d'après les travaux de Vandenbossche, la part de la moelle dans les apports minéraux, protéiques et humiques reste faible, son seul prélèvement pourra donc facilement être compensé.

Les tiges de tournesol utilisées dans cette étude nous ont été fournies par Luc Floissac, membre de ARESO (Association Régionale des Eccoconstructeurs du sud-ouest). Les tiges de tournesol ont été récoltées mécaniquement après la moisson, en adaptant une ensileuse à herbe. Le système utilisé permet de récolter, broyer et ensacher environ 1 m³ de tiges de tournesol en une demi-heure (mais il serait facile d'accélérer la vitesse de récolte avec une machine véritablement appropriée). Le rendement est de 5 m³ par hectare environ.



Figure 2. Méthode de récolte et aspect des tiges de tournesol broyées (flèches : moelle) (ARES0)

Les tiges de tournesol broyées ont ensuite été triées manuellement afin d'isoler la moelle de l'écorce des tiges. L'aspect et la couleur de la moelle rappellent le polystyrène (Figure 3). Les particules végétales sont de dimensions comprises entre 5 et 15 mm.



Figure 3. Particules de moelle de tournesol

2.2. Méthodes

2.2.1 Observation au microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisé est un appareil de type JEOL JSM-6380 LV couplé à un spectromètre de dispersion d'énergie (EDS) RÖNTEC.

De manière à limiter l'altération des composites étudiés, les observations et analyses ont été réalisées sans métallisation en vide partiel (60 Pa), mode électrons rétrodiffusés avec une tension d'accélération de 15kV.

L'observation de la section transversale des granulats végétaux a été réalisée sur des échantillons noyés dans un plot de résine de type Mécaprex MA2, polis une fois durcis.

2.2.2 Mesure de la conductivité thermique

Les essais ont été réalisés avec un appareil λ -Meter EP 500 selon la méthode de la plaque chaude gardée. La mesure est réalisée à une température de 25°C, avec une différence de température de 10 K entre les plaques. Le régime permanent est considéré comme atteint lorsque la conductivité varie de moins de 1% pendant un intervalle de temps de 60 minutes.

Des échantillons parallélépipédiques de base 15*15cm² et d'épaisseur variable ont été testés.

2.2.2 Comportement mécanique des composites

Les essais mécaniques ont été réalisés sur une presse Hounsfield H50KS, les essais en compression ont été menés à vitesse de déplacement constante de 0.5 mm/min. Deux éprouvettes ont été testées pour chaque échéance.

3. Microstructure des granulats végétaux

La microstructure des particules de chanvre est visible sur les clichés des figures 4 et 5. Il s'agit d'une structure fortement anisotrope que l'on pourrait qualifier de tubulaire. En effet, le rôle de la chènevotte est d'assurer la conduction de la sève des racines vers les organes aériens de la plante. La chènevotte est donc principalement composée de vaisseaux conducteurs dont la section, de diamètre habituellement compris entre 10 et 20 μm , est visible sur le cliché de la figure 4.

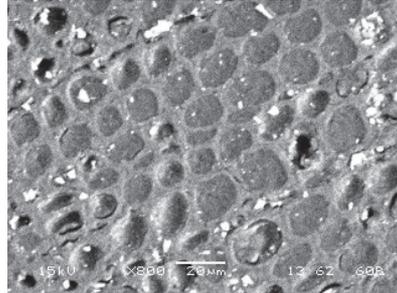


Figure 4. Observation au MEB en vide partiel en mode électrons rétrodiffusés de la section transversale de particules de chènevotte (x800)

Les clichés des sections longitudinales (figure 5) des particules de chènevotte permettent de distinguer des vaisseaux de différentes dimensions dont les plus importants présentent des liaisons transversales (orifices dans les parois) qui permettent une communication entre les vaisseaux.

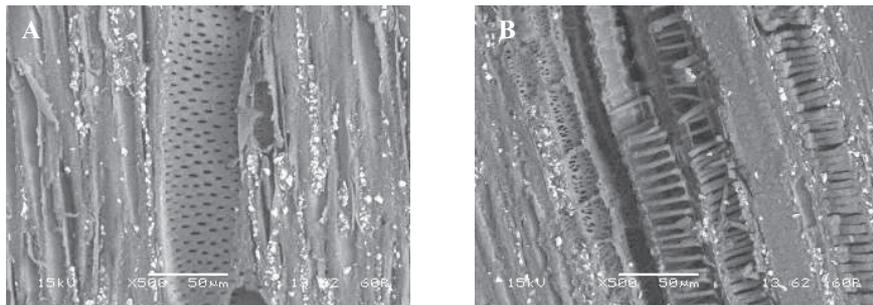


Figure 5. Observations au MEB en vide partiel en mode électrons rétrodiffusés de la section longitudinale de particules de chanvre (x 500)

La figure 5 permet également d'observer des structures lignifiées de formes variées sur les parois et à l'intérieur des vaisseaux.

La structure très poreuse des particules de chènevotte explique leur faible masse volumique apparente ($\rho = 320 \text{ kg/m}^3$ (Cérézo, 2005)), mais également leur grande sensibilité à l'eau.

L'observation au MEB d'une particule de moelle noyée dans de la résine et polie (Figure 6) met en évidence la structure alvéolaire de la moelle, le rayon moyen de chaque alvéole dépassant les $100 \mu\text{m}$. Cette structure explique sa très faible densité de 35 kg/m^3 (Vandenbossche, 1998).

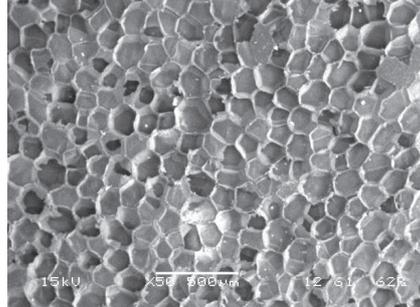


Figure 6. Observations au MEB en vide partiel en mode électrons rétrodiffusés d'une section de moelle de tournesol (x50)

Les observations au MEB des deux granulats végétaux ont donc permis de mettre en évidence leur microstructure distincte : une porosité tubulaire de faible diamètre et fortement connectée pour la chènevotte, et une structure alvéolaire de grande dimension pour la moelle de tournesol.

4. Propriétés des composites incorporant des granulats végétaux

4.1. Formulation

La première phase de cette étude a consisté au choix des formulations étudiées. L'objectif était d'explorer une large plage de dosage de chacun des granulats afin de décrire le comportement de composites aux propriétés variables tant du point de vue mécanique que thermique. Les formulations retenues sont présentées dans le tableau 2 ci-après.

Mélange	Granulats (%masse)	Granulats (%volume)	E/L
ADJ	-	0.0	0.5
CHEN10	10	24.1	0.61
CHEN25	25	38.4	0.88
CHEN32	32	42.1	1
TOURN1	1	24.6	0.5
TOURN2	2	39.5	0.5
TOURN3	3	49.5	0.5
TOURN4	4	54.0	0.6

Tableau 2. Pourcentages massiques et volumiques de granulats végétaux, rapport E/L des mélanges étudiés

En raison du fort pouvoir absorbant des particules de chènevotte, le dosage E/L a dû être adapté afin d'obtenir un mélange frais suffisamment liquide pour permettre l'enrobage des granulats par la pâte liante.

En revanche avec les granulats de moelle de tournesol, il n'a été nécessaire d'augmenter le rapport E/L uniquement pour la formulation T4 présentant le plus fort dosage en granulats. Ceci présente un avantage certain vis-à-vis du temps de séchage et des propriétés mécaniques du composite. Cette faible absorption volumique des granulats peut être reliée à leur faible dosage massique, ou à une cinétique d'absorption plus lente que celle de la chènevotte (des essais complémentaires de caractérisation devront être menés sur ces particules végétales).

4.2. Propriétés à moyen terme

Sur le graphique ci-dessous (Figure 7) sont présentées les performances en compression et la conductivité thermique du liant pur et des différents mélanges à teneur en granulats végétaux variables.

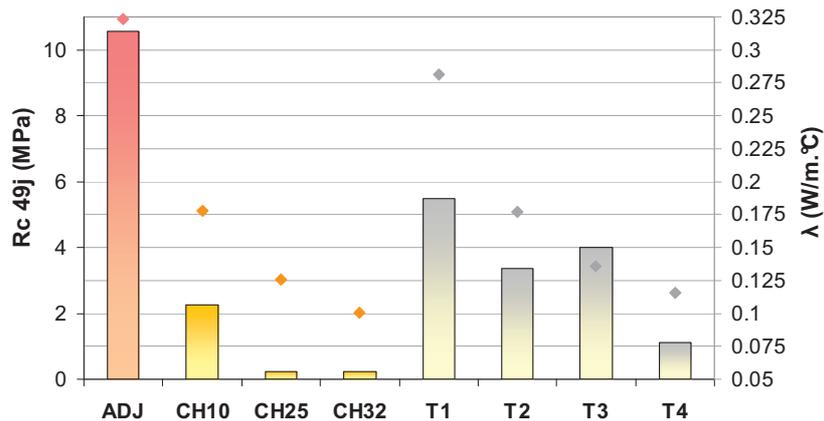


Figure 7. Influence du dosage en granulats végétaux sur la résistance en compression (histogramme) et la conductivité thermique (◆) à 49 jours

On note qu'à 49 jours les mélanges incorporant de la chènevotte présentent des résistances faibles, comparables aux résultats présentés dans la littérature. Pour le mélange à 10% de granulats, la résistance dépasse néanmoins 2 MPa. Pour ce fort dosage en liant, les particules de chènevotte sont vraisemblablement noyées dans une matrice continue, dont les propriétés déterminent le comportement mécanique du composite. Au-delà, pour les mélanges à 25% et 32% de chènevotte, la valeur de la résistance en compression reste très faible (environ 0.23 MPa). Le comportement mécanique du composite est alors proche d'un empilement de particules compressibles reliées par des ponts de pâte liante (Cérézo, 2005).

Pour les composites formulés à partir de granulats de tournesol, les résistances en compression sont plus élevées, entre 1.1 et 5.5 MPa.

En ce qui concerne la conductivité thermique, on constate bien sur qu'elle diminue lorsque la concentration en granulats végétaux augmente. Il est intéressant de noter que pour une conductivité thermique inférieure, le mélange T4 possède une performance mécanique qui surpasse largement celle du mélange CH32.

La formulation T4 permet donc d'atteindre, par une mise en œuvre sans compactage mécanique, une performance thermique compatible avec une fonction d'isolation répartie (0.115 W/m.K) et tout en conservant une performance mécanique à 49 jours qui dépasse les 1 MPa.

La différence de comportement mécanique avec les deux types de granulats est attribué au faible coefficient d'absorption volumique de la moelle de tournesol qui permet de formuler la pâte fraîche sans augmenter (ou dans des proportions bien moindres qu'avec la chènevotte) le rapport E/L par rapport à la pâte pure. Ainsi, la pâte liante est moins poreuse et ses performances mécaniques meilleures.

Des essais d'absorption capillaire ont également été réalisés sur ces composites (Magniont, 2010a) et ont mis en évidence la forte réduction de l'absorption d'eau par les mélanges à base de moelle de tournesol vis-à-vis de ceux incorporant de la chènevotte.

4.3. Interactions physicochimiques à long terme entre granulats végétaux et espèces minérales

De précédents travaux ayant mis en évidence une nette évolution du comportement mécanique des composites à base de chènevotte pendant plusieurs mois après leur coulage (Magniont, 2010a), nous avons cherché à identifier les raisons de cette évolution par des observations au MEB et analyses chimiques réalisées sur des granulats végétaux extraits d'échantillons âgés de 2 ans et demi, conservés en ambiance intérieure sans contrôle particulier de l'humidité relative.

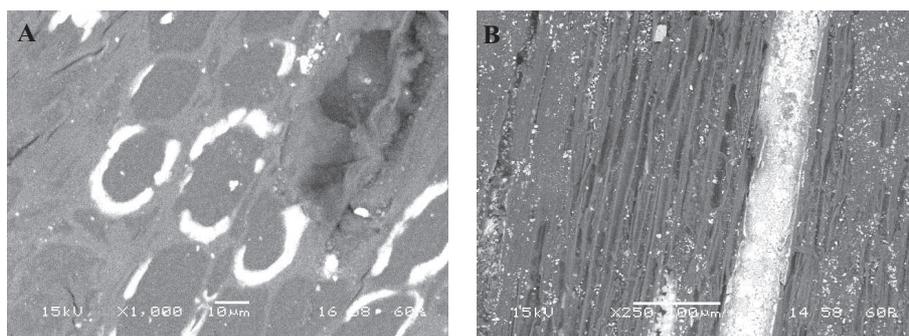


Figure 8. Observations au MEB en vide partiel en mode électrons rétrodiffusés d'une section transversale (A : x1000) et longitudinale (B : x250) de chènevotte extraite d'un composite âgé de 2 ans et demi

Les clichés réalisés (Figure 8) permettent de conclure à la migration d'espèces minérales dans les pores de la chènevotte conduisant à une minéralisation partielle (cliché A) ou totale (cliché B) de ces pores. Les analyses EDS couplées à ces observations ont clairement mis en évidence la nature calcique de ces espèces.

Ce mécanisme de minéralisation des particules végétales avec le temps pourrait expliquer leur rigidification progressive et l'amélioration de la résistance en compression ainsi que l'augmentation du module d'élasticité des composites.

Les observations réalisées sur des particules de moelle de tournesol ont également montré la présence d'espèces minérales dans les particules végétales, mais sans pouvoir conclure précisément à la formation d'un précipité localisé dans les alvéoles du matériau, des analyses complémentaires devront être mises en œuvre.

5. Conclusion

Cet article a permis de comparer un granulats innovant, la moelle de tournesol, à la chènevotte, particule végétale utilisée en bâtiment pour formuler le béton de chanvre.

Les propriétés à moyen terme (résistance en compression et conductivité thermique) des composites incorporant de la moelle de tournesol sont très prometteuses en raison notamment de sa microstructure, distincte de celle de la chènevotte, qui semble limiter son affinité avec l'eau.

Concernant le comportement à long terme de ces composites, les premières observations permettent de faire l'hypothèse d'une minéralisation progressive des granulats végétaux par la dissolution, diffusion et reprécipitation des espèces calciques contenues dans la matrice.

Il semblerait que cette diffusion ait lieu préférentiellement dans les pores de grande dimension des particules de chènevotte sur les parois desquels on distingue nettement un dépôt calcique. Certains étant même totalement remplis.

Des analyses complémentaires devront être menées pour identifier les mécanismes de migration des espèces ioniques au sein de la moelle de tournesol et évaluer la durabilité des composites incorporant ce granulats végétal.

Références

Cérézo V., Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, Thèse de doctorat de l'ENTPE, juin 2005

Chamoin J., Collet F., Pretot S., « Optimisation de bétons de chanvre projeté et moulé – Caractérisation du matériau de référence », *Actes des 20^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil – AUGC2008*, Nancy, 4-6 juin 2008.

Magniont C., Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Toulouse, 2010.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 mai 2011

Magniont C., Escadeillas G., Oms-Multon C., De Caro P., « The benefits of incorporating glycerol carbonate into an innovative pozzolanic matrix », *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n°7, 2010, p. 1072-1080.

Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C., « Etude de la formulation des bétons de chanvre pour la confection d'éléments préfabriqués par compactage », *Actes des 27^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil - AUGC2009*, Saint Malo, 3-5 juin 2009.

Samri D., Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2008.

Vandenbossche Maréchal V., Fractionnement des tiges et capitules de tournesol. Hydrodistillation d'une huile essentielle odorante, extraction et modification chimique de pectines, et mise en forme d'agromatériaux biodégradables, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 1998.