



**HAL**  
open science

## **Contribution à l'élaboration d'un référentiel de caractérisation des granulats végétaux pour la construction**

Herinjaka Haga Ratsimbazafy, Aurélie Laborel-Préneron, Camille Magniont,  
Philippe Evon

### ► **To cite this version:**

Herinjaka Haga Ratsimbazafy, Aurélie Laborel-Préneron, Camille Magniont, Philippe Evon. Contribution à l'élaboration d'un référentiel de caractérisation des granulats végétaux pour la construction. Congrès Français de Génie Civil (CFGC), May 2023, Paris, France. <10.26168/ajce.41.1.37>. <hal-04846547>

**HAL Id: hal-04846547**

**<https://hal.science/hal-04846547v1>**

Submitted on 18 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Contribution à l'élaboration d'un référentiel de caractérisation des granulats végétaux pour la construction

Herinjaka Haga Ratsimbazafy<sup>1</sup>, Aurélie Laborel-Préneron<sup>1</sup>, Camille Magniont<sup>1</sup>, Philippe Evon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Chimie Agro-industrielle, Université de Toulouse, INP, ENSIACET, Toulouse, France

**RESUME** L'usage de matières premières disponibles localement constitue un paramètre prépondérant de l'impact environnemental des matériaux de construction biosourcés. Les travaux présentés dans cet article contribuent à l'établissement d'un référentiel de caractérisation des agro-ressources applicable aux différents co-produits agricoles disponibles dans chaque région et à la constitution d'une base de données des co-produits agricoles valorisables en construction. En partenariat avec une entreprise de recherche et développement agricole, Ovalie Innovation, la première étape a consisté à valider des protocoles de caractérisation adéquats pour les granulats végétaux utilisables dans la construction. Neuf granulats locaux et une chènevotte, étudiée comme granulats de référence, ont été soumis à une série de caractérisations chimiques, multi-physiques et mécaniques développées ou adaptées à partir des recommandations existantes dans la littérature. Dans un second temps l'impact de ces caractéristiques sur les propriétés d'usage des bétons végétaux préfabriqués a été évalué. Une méthode de formulation de béton végétal est également proposée à partir des propriétés mesurées.

**Mots-clés** béton végétal, granulats végétaux, référentiel de caractérisation, propriétés mécaniques, conductivité thermique

## I. INTRODUCTION

En raison de ses impacts négatifs sur l'environnement, le secteur de la construction doit reconsidérer ses modes constructifs. Les matériaux de construction à base de bioagréats offrent des perspectives prometteuses pour atteindre ces objectifs grâce à l'utilisation de sous-produits agricoles, qui présentent de nombreux bénéfices environnementaux. Tout d'abord, les bioagréats sont dérivés d'une ressource végétale abondante et renouvelable, qui constitue également un puits de carbone, en effet les produits agricoles ont la propriété de capter le dioxyde de carbone de l'atmosphère pendant leur croissance et de le stocker dans leurs organismes. En outre, l'utilisation de particules végétales dans les matériaux de construction permet d'économiser de précieuses ressources naturelles grâce à la valorisation des déchets agricoles [1].

Le béton de chanvre a été le matériau à base de bioagréats le plus étudié ces dernières années. Cependant, le chanvre n'est pas produit à grande échelle en France et il est en particulier peu

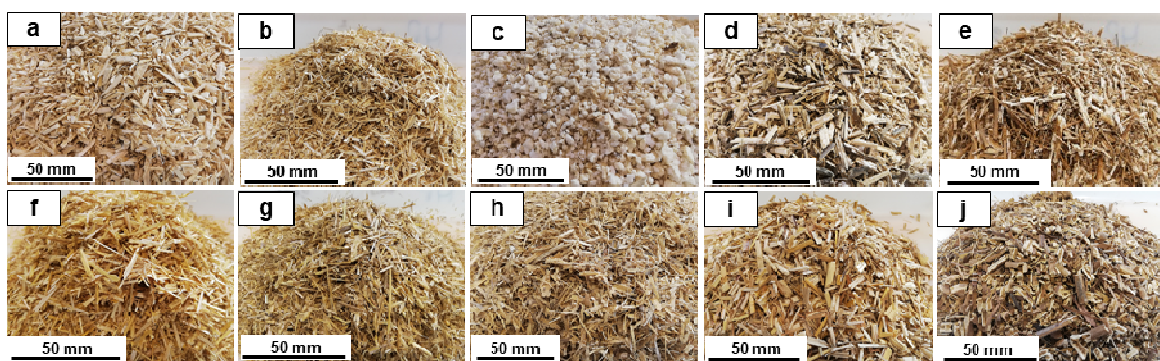
disponible dans le sud-ouest de la France. Or, pour minimiser les distances de transport et donc les émissions de carbone, la matière première doit être disponible localement. C'est le cas des 9 sous-produits agricoles étudiés dans le projet PALOMAC faisant l'objet du présent article, sélectionnés pour leur disponibilité et le coût limité de leur collecte dans le cadre d'une collaboration avec Ovalie Innovation, entreprise de recherche et développement agricole.

Afin de répondre à l'objectif de validation de protocoles de caractérisation adéquats pour les granulats végétaux utilisables dans la construction, ces neuf granulats locaux ainsi qu'une chènevotte, étudiée comme granulats de référence, ont été soumis à une série de caractérisations chimiques, multi-physiques et mécaniques développées ou adaptées à partir des recommandations existantes dans la littérature. A l'issue de cette caractérisation, une méthode de formulation de béton végétal est proposée à partir des propriétés mesurées. Enfin, les propriétés d'usage des bétons végétaux formulés à partir de ces granulats sont étudiées pour identifier l'impact des caractéristiques des particules végétales sur ces performances et initier l'établissement d'un référentiel de caractérisation des granulats végétaux pour différents usages en construction.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux

Dix sous-produits agricoles ont été choisis pour cette étude et ont été soumis au même processus de transformation afin d'obtenir les agrégats végétaux étudiés. Ce processus consistait en une série de broyage, de tamisage et de séparation mécanique. Dans le cas de la tige de tournesol, un tapis roulant incliné et un système de soufflage ont été utilisés pour séparer les particules de moelle (partie interne molle de la tige) de celles d'écorce (partie externe rigide et ligneuse). Enfin, les particules végétales ont été tamisées sur un tamis à maille carrée de 12 mm dont le passant constitue les agrégats végétaux utilisés dans cette étude (Fig. 1). Selon leur origine, les dix agrégats végétaux peuvent être classés en quatre catégories : (1) Co-produits issus de plantes à fibres : la chènevotte de chanvre (CHEN) et les anas de lin (AL) ; (2) Tiges ou pailles d'oléagineux : moelle de tournesol (MT), écorce de tournesol (ET) et paille de coriandre (PC) ; (3) Co-produits de plantes céréalières : paille (PB), et menues pailles de blé (MP) et spathes de maïs (SM) ; (4) Autres sous-produits : tige de miscanthus (TM) et sarment de vigne (SV).



**FIGURE 1.** Granulats végétaux étudiés : (a) CHEN, (b) AL, (c) MT, (d) ET, (e) PC, (f) PB, (g) MP, (h) SM, (i) TM, (j) SV

Pour former des bétons végétaux, ces différents granulats végétaux sont associés à un liant commercial préformulé à base de chaux, le BATICHANVRE®, produit par la société "Chaux & Enduits de Saint-Astier". Ce type de liant est fortement recommandé pour la fabrication du béton de chanvre [2]. Selon les données techniques du fabricant, le BATICHANVRE® est composé de 70% de chaux naturelle et de 30% de liant hydraulique et pouzzolanique plus des additifs spécifiques.

#### *B. Méthodes*

En ce qui concerne la caractérisation des granulats, les propriétés élémentaires (analyse granulométrique et masse volumique en vrac) ont été déterminées conformément aux recommandations du TC RILEM 236-BBM [3].

La détermination de la teneur en hydrosolubles des granulats a été réalisée avec un extracteur à chaud Foss Fibertec FT 122 sur des poudres d'agrégats selon la méthode de Van Soest et Wine [4] en utilisant une solution neutre d'eau distillée (pH 7), et une solution d'hydroxyde de sodium ayant un pH égal à 12. La perte de masse de l'échantillon analysé a été mesurée après une heure dans la solution en ébullition.

Les caractéristiques physiques complémentaires (masse volumique particulière et masse volumique de solide), les paramètres de formulation (masse volumique compactée séchée et absorption réelle après compaction) et les propriétés de l'arrangement de particules (comportement mécanique en compression et conductivité thermique) ont été déterminés selon des méthodes développées ou adaptées par Ratsimbazafy dans sa thèse [5].

### **III. CARACTERISATION DES GRANULATS VEGETAUX**

#### *A. Taille et forme des granulats végétaux*

L'analyse granulométrique réalisée par analyse d'images permet de définir plusieurs paramètres caractérisant la forme des granulats. Parmi eux, la circularité apparaît comme une propriété qui conditionne fortement le comportement de l'arrangement de particules, en particulier soumis à un compactage. En se basant sur ce critère, les granulats peuvent être répartis en 3 familles. La distribution de circularité observée pour chacune de ces familles est représentée sur la figure 1.

Le premier type est caractérisé par des granulats végétaux allongés, de circularité faible, plus de 60% des surfaces projetées des agrégats ont des circularités comprises entre 0 et 0,25. Le deuxième type rassemble les granulats présentant une circularité moyenne, dont plus de 60% des aires projetées ont des circularités comprises entre 0,20 et 0,50. Le dernier type est le plus circulaire avec plus de 60% des aires projetées ayant des circularités comprises entre 0,40 et 0,65.

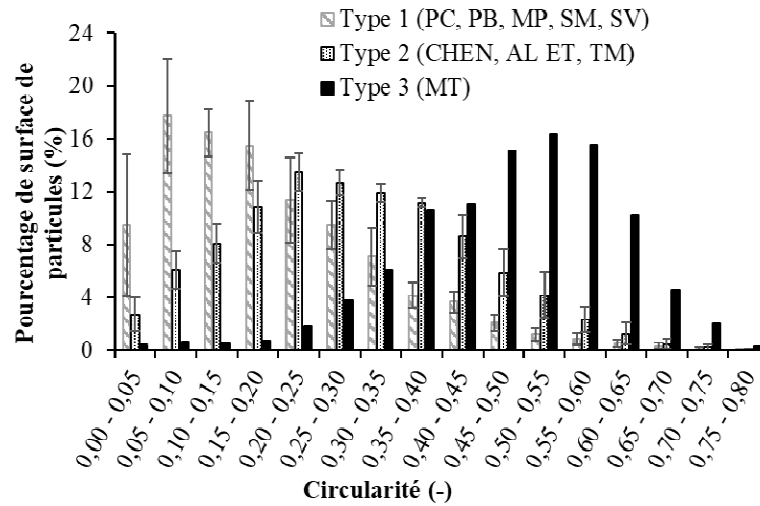


FIGURE 2. Distribution type de la circularité des particules pour les trois familles identifiées

B. Masses volumiques et porosités des granulats végétaux

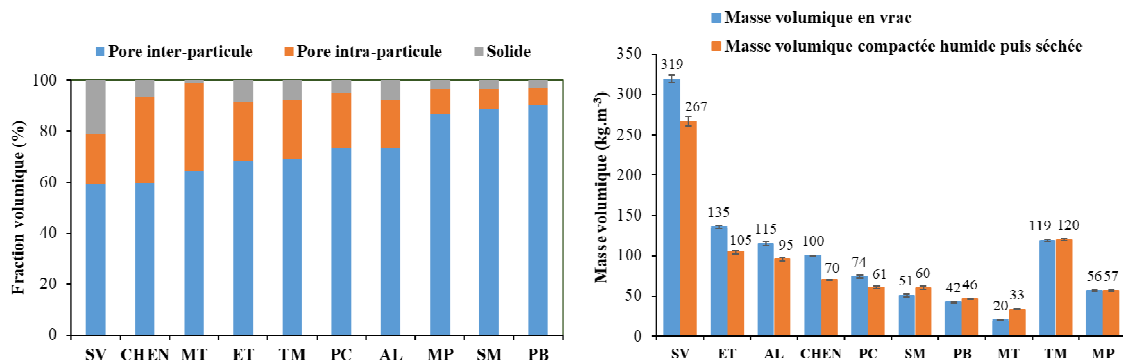
Afin de comprendre et prédire les propriétés des composites incluant les particules végétales, il est nécessaire de caractériser leur porosité. La mesure de la masse volumique en vrac des particules donne une première indication mais elle n'est pas suffisante. Elle ne renseigne en effet pas sur la répartition entre porosité interparticulaire (qui sera réduite par réarrangement et partiellement comblée par le liant au moment de la fabrication du composite) et porosité intraparticulaire, qui perdurera dans le composite ou sera réduite par écrasement des particules. Afin d'accéder à cette donnée, une mesure de la masse volumique des particules et une estimation de la masse volumique de solide sont réalisées. Les résultats obtenus pour les 10 granulats considérés sont présentés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Masses volumiques de solide, particulaire, en vrac et compactée séchée des 10 granulats

| Granulats végétaux         | Masse volumique de solide (kg.m <sup>-3</sup> ) | Masse volumique des particules (kg.m <sup>-3</sup> ) | Masse volumique en vrac (kg.m <sup>-3</sup> ) | Masse volumique compactée séchée (kg.m <sup>-3</sup> ) |
|----------------------------|---|--|---|--|
| Sarments de vigne (SV)     | 1504  | 779 ± 8  | 319 ± 5                                       | 266.6 ± 5.8  |
| Spathes de maïs (SM)       | 1523  | 444 ± 12   | 51 ± 2  | 60.3 ± 1.5   |
| Paille de blé (PB)         | 1519  | 436 ± 9  | 42 ± 1  | 61.0 ± 1.4   |
| Anas de lin (AL)           | 1500  | 433 ± 4  | 115 ± 2                                       | 95.1 ± 1.7   |
| Menues pailles de blé (MP) | 1515  | 430 ± 10   | 56 ± 1  | 56.5 ±   |
| Ecorce de tournesol (ET)   | 1515  | 425 ± 2  | 135 ± 1                                       | 104.6 ± 2.1  |
| Tige de miscanthus (TM)    | 1509  | 387 ± 2  | 119 ± 2                                       | 119.9 ± 1.3  |
| Paille de coriandre (PC)   | 1500  | 275 ± 2  | 74 ± 2  | 46.5 ± 0.6   |
| Chènevotte (CHEN)          | 1502  | 248 ± 1  | 100 ± 1                                       | 70.3 ± 0.7   |
| Moelle tournesol (MT)      | 1536  | 56 ± 2   | 20 ± 0  | 33.2 ± 0.6   |

A partir de ces mesures, il est alors possible de calculer les différentes proportions volumiques de solide, de vides interparticulaires et de vides intraparticulaires dans chaque arrangement. Les résultats sont représentés sur le graphiques gauche de la figure 3. Quelle que soit la nature des particules considérées, la porosité totale des arrangements est très importante. Elle excède 90%

pour tous les granulats à l'exception des sarments de vigne (79%) et atteint 98% pour la moelle de tournesol. La répartition des vides est similaire pour les granulats MP, SM et PB. Appartenant tous au type 1 défini précédemment, ces particules allongées produisent des arrangements très lâches (porosité totale > 96%) dans lesquels la porosité intraparticulaire est faible par rapport aux vides interparticulaires. Dans les arrangements de type 2 ainsi que dans celui de paille de coriandre, la part de vides intraparticulaires augmente. Les granulats de chènevotte et de moelle de tournesol se distinguent quant à eux par une part de vides intraparticulaires supérieure à 30%. L'arrangement de particules de sarments de vigne est très différent des autres avec une proportion de solide beaucoup plus élevée.



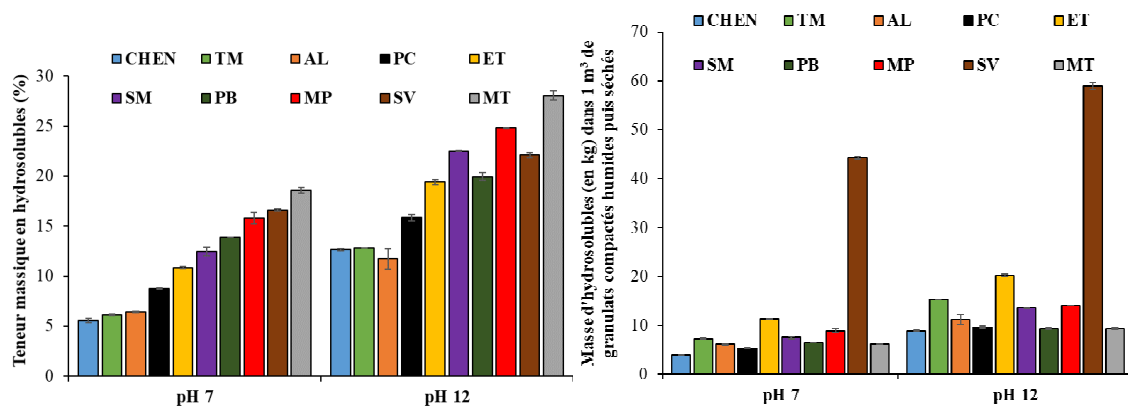
**FIGURE 3.** Fraction volumique de pore interparticulaire, de pore intraparticulaire et solide dans l'arrangement en vrac des granulats végétaux (gauche) Comparaison de la masse volumique compactée humide puis séchée et de la masse volumique en vrac des granulats végétaux (droite)

En se basant sur la méthodologie proposée par Ratsimbazafy [5], la caractérisation des granulats a été complétée par la détermination de propriétés des granulats compactés à l'état humide, considérées comme représentatives de l'état des granulats dans un béton végétal vibrocompacté. Sur le graphique de droite de la Figure 3, on observe un écart relatif entre la masse volumique en vrac et cette masse volumique compactée séchée différent d'un granulat à l'autre. En effet, en fonction de leur morphologie, de leur porosité et de leur rigidité, le comportement de l'arrangement de granulats soumis à une compaction est distinct. Les phénomènes de réarrangement puis d'écrasement des différentes particules auront tendance à augmenter la masse volumique de l'arrangement mais, dans le même temps l'absorption et l'adsorption d'eau par les granulats conduisent à un gonflement et un foisonnement des particules qui peuvent compenser ou surpasser ce phénomène. C'est ce qu'il advient pour les granulats de type 2, plus rigides ainsi que pour la paille de coriandre et les sarments de vignes pourtant classés en type 1 selon leur forme, mais dont la rigidité les rapproche du type 2 (voir Figure 5 droite). A l'inverse, pour les granulats de type 1 le réarrangement et l'écrasement irréversibles des longues particules au cours du compactage conduisent à une augmentation de la masse volumique de l'arrangement. La moelle de tournesol, seul granulat de type 3, se distingue à nouveau par une augmentation de près de 65% de la masse volumique de l'arrangement compacté à l'état humide, suite au réarrangement et à l'écrasement des particules à la plus grande porosité particulaire.

#### D. Composition chimique des granulats végétaux

Il est établi dans la littérature que les composants hydrosolubles présents dans les granulats végétaux peuvent être à l'origine de retard de prise et/ou de perturbations importantes dans le développement des résistances des liants minéraux réactifs. Il s'agit donc d'un paramètre

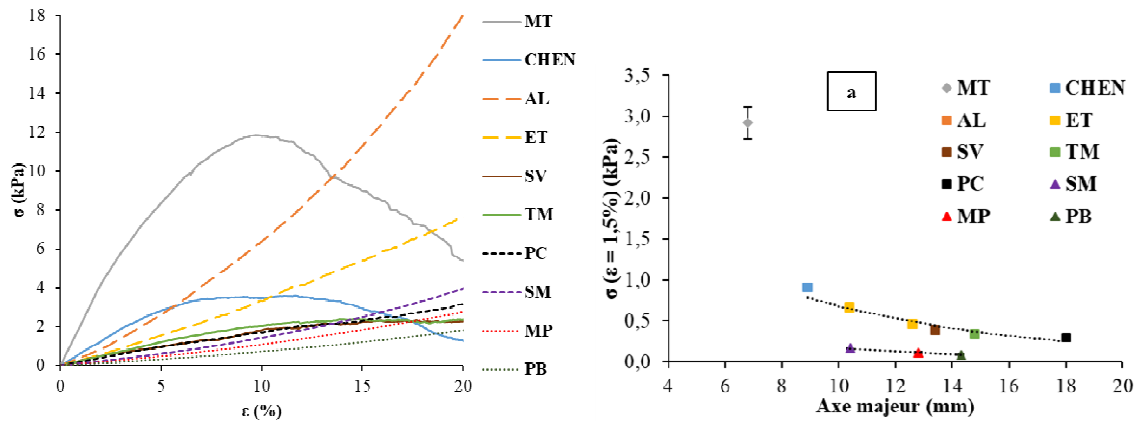
important à déterminer, dont le dosage est classiquement réalisé à pH 7. Or, comme le montrent les résultats présentés sur la Figure 4, les teneurs en hydrosolubles des différents granulats sont significativement différentes à pH 7 et 12. Cette différence provient de la présence, en proportions variables dans chaque granulat, de composants solubles à pH 12 mais insolubles à pH 7, en particulier les hémicelluloses. Il est donc judicieux de déterminer les hydrosolubles à pH 12 pour une meilleure compréhension de leur impact sur les performances des composites. La comparaison des graphiques gauche et droite de la figure 4, met en évidence l'importance de comparer des teneurs en hydrosoluble par unité de volume de granulats compactés et non par unité de masse comme c'est habituellement le cas. Les masses volumiques varient dans de telles proportions d'un granulat à l'autre, que l'évaluation de l'effet néfaste d'un granulat vis-à-vis de la prise du liant peut être complètement faussée (la moelle de tournesol qui présente la plus forte teneur en hydrosolubles sur le graphique de gauche, apparaît comme inoffensive sur le graphique de droite).



**FIGURE 4.** Teneur en hydrosolubles à pH 7 et 12 des granulats végétaux (gauche) Masses d'hydrosolubles à pH 7 et 12 dans 1 m<sup>3</sup> de granulats compactés humides puis séchés (droite).

#### E. Propriétés mécaniques de l'arrangement

La Figure 5 gauche montre les courbes contrainte-déformation des arrangements compactés de granulats végétaux. Sur le graphique de droite, la contrainte à 1,5% de déformation est représentée en fonction de l'axe majeur des particules. Deux types de comportement mécanique des empilements compactés de granulats végétaux se dégagent. Le premier est caractérisé par l'existence d'un pic qui peut s'expliquer par l'atteinte d'une contrainte de rupture de l'arrangement dont la cohésion se fait soit par enchevêtrement des particules rigides ou, pour le cas spécifique de la moelle de tournesol, grâce aux pectines solubilisées à l'état humide qui jouent le rôle de liant naturel entre les granulats à l'état sec. Le second comportement montre une rigidification croissante de l'empilement des granulats liée à leur écrasement progressif. Dans ce cas, il n'est pas possible de retenir une contrainte maximale pour caractériser le comportement mécanique, c'est pourquoi nous avons choisi la contrainte à 1,5% de déformation comme grandeur caractéristique.

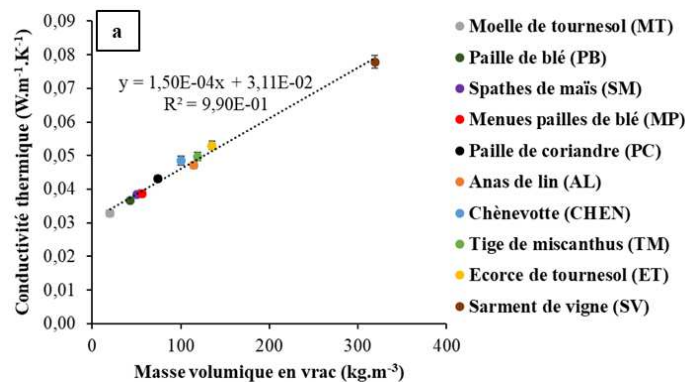


**FIGURE 5.** Courbes contrainte ( $\sigma$ ) – déformation ( $\epsilon$ ) illustrant le comportement mécanique en compression des granulats végétaux compactés (gauche) Contrainte  $\sigma$  ( $\epsilon = 1,5\%$ ) des empilements compactés de granulat végétal en fonction de leur axe majeur (droite)

Sur la figure 5 droite, on distingue 3 familles de granulats, similaires à celles identifiées en analysant les mesures de masse volumique compactée séchée. Les arrangements de particules allongées et peu rigides de MP, SM et PB, celles pour lesquelles le compactage conduit à une densification, présentent une contrainte négligeable. Les arrangements de particules plus circulaires et plus rigides, dont la masse volumique compactée est inférieure à la masse volumique en vrac, permettent d’atteindre un niveau de contrainte plus élevé. On retrouve dans cette catégorie les particules SV et PC avec les particules de type 2 ce qui est cohérent avec les résultats de la figure 3 droite. Dans chaque famille, la contrainte à 1,5% de déformation de l’arrangement diminue avec la taille moyenne des particules. L’arrangement de moelle de tournesol, rendu cohésif par la solubilisation de composants de type pectine permet d’atteindre un niveau de contrainte largement supérieur aux autres granulats.

*F. Propriétés thermiques de l’arrangement*

La conductivité thermique sèche de l’arrangement de particules dépend de sa porosité totale, et peut donc être prédit à partir de la masse volumique en vrac de l’arrangement de particules (Figure 6).



**FIGURE 6.** Conductivité thermique en fonction de la masse volumique en vrac

#### IV. FORMULATION ET FABRICATION DES BETONS VEGETAUX

Sur la base de la méthode de formulation développée par Ratsimbazafy [5], des bétons végétaux ont été fabriqués avec un dosage constant en liant afin de permettre l'évaluation de l'influence des propriétés des granulats sur les performances des composites. Les proportions des autres composants ont été déterminées à partir d'une formulation de référence à base de chènevotte de chanvre indiquée dans la première ligne du tableau 2. A partir de cette formulation de mélange chanvre-chaux de type mur, pour chaque nouveau granulat, le besoin en eau et la masse de granulats végétaux à introduire ont été ajustés en fonction de la densité sèche des granulats compactés à l'état humide et de la capacité d'absorption d'eau après compactage, afin de tenir compte des spécificités de chaque granulat. La composition de chaque mélange ainsi que leurs densités fraîche et sèche sont présentées dans le tableau 5.

**TABLEAU 2.** Paramètres de formulation des mélanges étudiés et masses volumiques sèches des composites mesurées expérimentalement.

| Formulation | Dosage (L) (kg.m <sup>-3</sup> ) | Dosage (G) (kg.m <sup>-3</sup> ) | Dosage (E) (kg.m <sup>-3</sup> ) | G/L (-) | E/L (-) | Q <sub>fraîche</sub> (kg.m <sup>-3</sup> ) | Q <sub>sèche</sub> (kg.m <sup>-3</sup> ) |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------|---------|--|--|
| CHEN        | 258                              | 111                              | 362                              | 0.43    | 1.40    | 731  | 391 ± 5                                  |
| AL          | 258                              | 150                              | 334                              | 0.58    | 1.29    | 742  | 413 ± 7                                  |
| MT          | 258                              | 37                               | 352                              | 0.14    | 1.36    | 647  | 333 ± 10                                 |
| ET          | 258                              | 165                              | 310                              | 0.64    | 1.20    | 734  | 425 ± 9                                  |
| PC          | 258                              | 96                               | 346                              | 0.37    | 1.34    | 700  | 385 ± 6                                  |
| PB          | 258                              | 73                               | 323                              | 0.28    | 1.25    | 655  | 386 ± 9                                  |
| MP          | 258                              | 89                               | 318                              | 0.35    | 1.23    | 665  | 406 ± 18                                 |
| SM          | 258                              | 95                               | 350                              | 0.37    | 1.35    | 704  | 398 ± 5                                  |
| TM          | 258                              | 189                              | 342                              | 0.73    | 1.33    | 790  | 381 ± 10                                 |
| SV          | 258                              | 312                              | 316                              | 1.21    | 1.22    | 886  | 513 ± 17                                 |

#### V. CARACTERISATION DES COMPOSITES

##### A. Performances mécaniques

Les courbes contrainte-déformation typiques obtenues lors des essais de compression cyclique réalisés sur les composites sont présentées sur la Figure 7. Dans la direction parallèle au compactage, une contrainte maximale est atteinte avant la rupture pour certains granulats, tandis qu'un écrasement progressif des particules est observé pour d'autres. La comparaison du comportement en compression des bétons végétaux dans les deux directions de sollicitation, parallèle et perpendiculaire à la direction de compactage, met en évidence leur anisotropie mécanique liée à l'anisotropie de structure induite lors du compactage, qui engendre une orientation préférentielle des granulats allongés dans le plan perpendiculaire au compactage. Afin de comparer la performance mécanique des différents composites, les paramètres mécaniques caractéristiques retenus sont le module flottant [6] et la contrainte atteinte pour une déformation de 1,5%. Les résultats sont présentés sur la Figure 8.

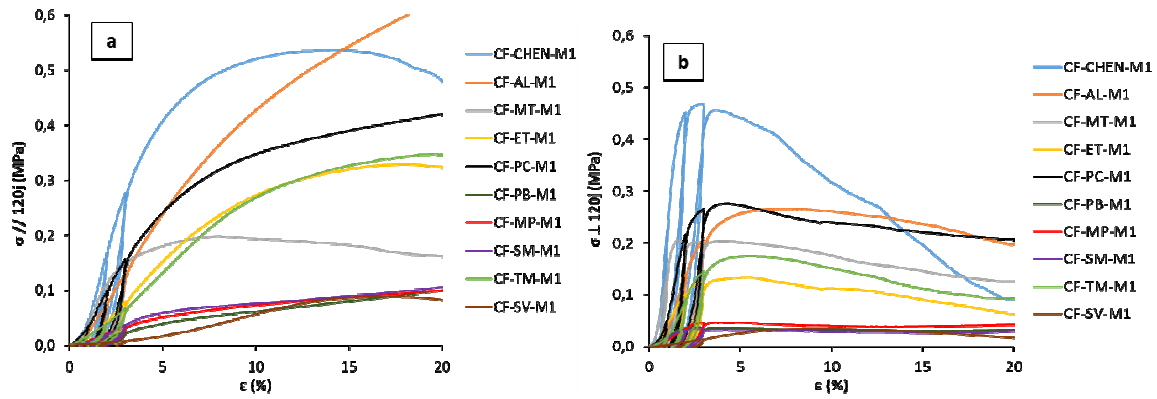


FIGURE 7. Courbes contrainte-déformation dans les directions (a) parallèle et (b) perpendiculaire au compactage.

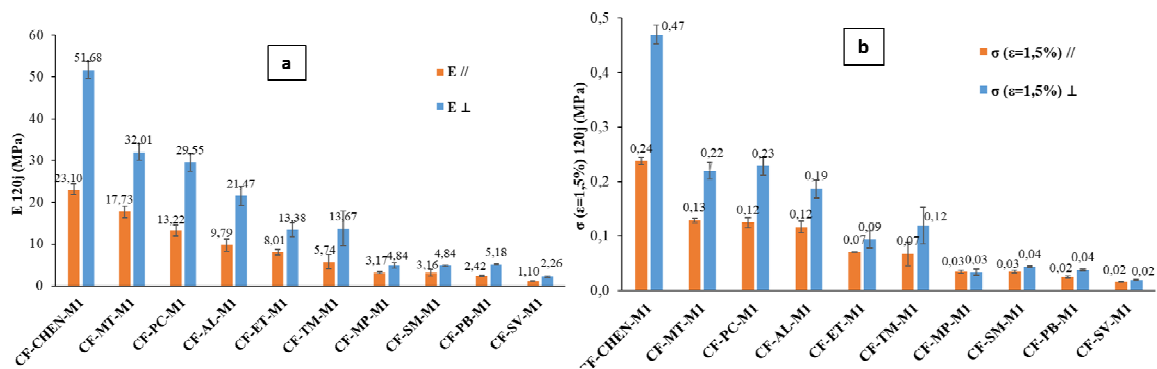
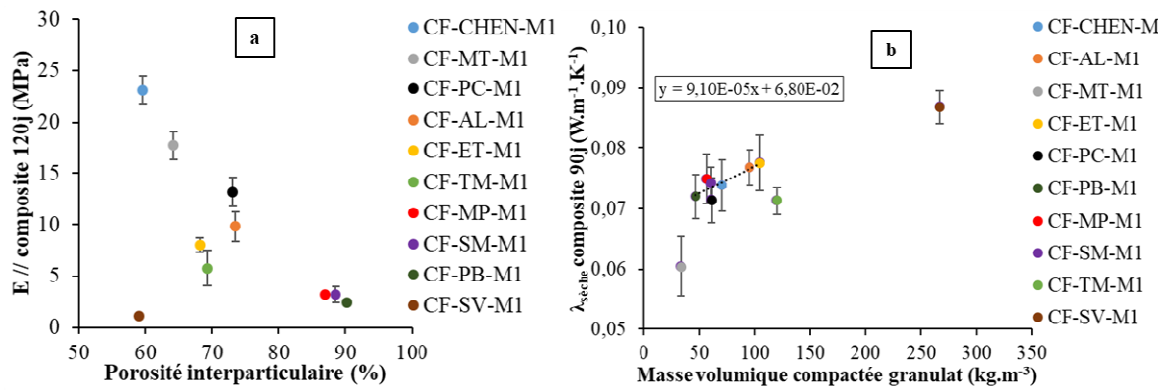


FIGURE 8. Comparaison (a) des modules flottants E et (b) des contraintes  $\sigma$  ( $\epsilon=1,5\%$ ) dans les sens parallèle et perpendiculaire au sens de compactage.

La relation entre le comportement de l'arrangement de granulats vis-à-vis du compactage à l'état humide, dépendant de sa morphologie, de sa porosité et de sa rigidité, et la performance mécanique du composite associant granulat végétal et matrice est évidente, en particulier dans la direction perpendiculaire au compactage. Les différentes familles précédemment identifiées apparaissent à nouveau même si des différences existent, vraisemblablement liées aux problèmes d'interaction chimique liant-particules comme nous le verrons juste après.

L'organisation spatiale des granulates les uns par rapport aux autres dans l'arrangement compacté conditionne en effet la forme du squelette de liant qui apporte la rigidité au composite.

Sur la figure 9 a, en retenant le paramètre de la porosité interparticulaire de l'arrangement comme grandeur caractéristique, on voit qu'il est possible de prédire via une relation linéaire le module du composite. Plus la porosité interparticulaire de l'arrangement de particules est grande moins le composite sera rigide. Les trois granulates qui s'écartent de cette tendance sont les granulates d'écorce de tournesol (ET), de tiges de miscanthus (TM) et de sarments de vigne (SV). Il s'agit des trois granulates avec la teneur en hydrosolubles la plus importante (Figure 4 droite). Dans ces composites, en dépit d'un arrangement granulaire favorable, les interactions chimiques délétères empêchent ou limitent le durcissement du liant minéral réactif, conduisant à de faibles performances mécaniques des composites.



**FIGURE 9.** Module flottant ( $E$ ) du composite dans le sens parallèle au sens de compactage en fonction de la porosité inter-particulaire du vrac des granulats (a) Conductivité thermique sèche des composites en fonction de la masse volumique compactée des granulats (b).

### B. Performances thermiques

L'évolution de la conductivité thermique sèche du composite en fonction de la masse volumique compactée de l'arrangement de granulats est représentée sur la Figure 9 b. Ce paramètre semble là encore un bon indicateur pour prédire la performance du composite. Trois granulats ne suivent pas la même tendance, il s'agit notamment de la moelle de tournesol dont la répartition porale se distingue des autres granulats en raison de sa forte porosité intraparticulaire.

## VI. CONCLUSION

Le présent article vise à contribuer à l'élaboration d'un référentiel de caractérisation des granulats végétaux pour la construction. Les résultats permettent de valider la définition et la méthode de mesures d'indicateurs physiques, chimiques et mécaniques prédictifs de la performance du granulat utilisé pour une application dans le bâtiment.

En ce qui concerne leur usage pour la formulation de bétons végétaux incluant un liant minéral réactif et produits par vibrocompaction, il apparaît pertinent de caractériser le granulat dans un environnement représentatif de celui dans lequel il sera mis en œuvre (pH, humidité, contrainte de compactage).

Dans ce contexte, une teneur en hydrosolubles à pH 12 faible et une porosité interparticulaire limitée, permettront d'atteindre une performance mécanique optimale, tandis qu'une masse volumique compactée séchée la plus faible possible sera favorable du point de vue de la conductivité thermique. Il en résulte que le meilleur compromis entre les deux performances sera atteint avec des granulats présentant une forte porosité intraparticulaire.

Il est important de souligner que les limites identifiées ou à identifier ne le sont que pour une application donnée et ne sont pas forcément valables pour toutes les autres. Un co-produit agricole pourra ainsi être orienté vers tel ou tel mode d'application (vibrocompaction, projection, coulage en place, isolation en vrac etc.) en association avec tel ou tel liant (minéral réactif, argileux, sans liant etc.) en fonction de ses propriétés chimiques et multiphysiques.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Région Occitanie, Ovalie Innovation, la communauté d'agglomération Tarbes-Lourdes-Pyrénées et l'IUT de Tarbes pour le financement de ce projet.

## REFERENCES

1. Peñaloza D., Erlandsson M., and Falk A.: 'Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings', *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 219–226, (2016), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041.
2. Pichon Q. and Naumovic J.-M.: Guide des bonnes pratiques - Construire en chanvre. 2016. [https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC\\_Bonnes\\_Pratiques\\_Tome\\_2.pdf](https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC_Bonnes_Pratiques_Tome_2.pdf), dernier accès 2020/11/23
3. Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., Sonebi, M.: Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Mater Struct* 50, 167 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>
4. Van Soest, P.J.; Wine, R.H.: Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. Part IV. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.* 50, 50-55 (1967).
5. Ratsimbazafy H. H.: 'Evaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction', Université Toulouse III - Paul Sabatier, Tarbes, (2022).
6. Niyigena C, Amziane S, Chateauneuf A, Arnaud L, Bessette L, Collet F, et al.: Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Mater Today Commun.* 7: 122-133 (2016).