

Evaluation du potentiel de la chènevotte de chanvre textile comme granulats biosourcés alternatifs pour le béton de chanvre

Djillali MEZHOUD, Paul SOULIE, Aurélie LABOREL-PRENERON, Camille MAGNIONT

Université de Toulouse - LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), Toulouse, France

RESUME Le béton de chanvre, matériau biosourcé et innovant à faible impact environnemental, joue un rôle clé dans la transition vers des constructions durables. Ce composite combine des performances hygrothermiques intéressantes avec un stockage temporaire de carbone. L'objectif de cette étude est d'explorer le potentiel des chènevottes de chanvre textile comme alternative aux chènevottes de chanvre industriel, dans le cadre de la relance d'une filière chanvre textile en France. Elle a été réalisée en partenariat avec l'association AURA CHANVRE. L'étude comporte plusieurs aspects : caractérisation des chènevottes, calibrage des fractions granulaires et fabrication et caractérisation mécanique et thermique d'échantillons cubiques et cylindriques. En dépit de la non-conformité des chènevottes de chanvre textile au Label Granulat Chanvre Bâtiment en raison de leur couleur, les essais de calorimétrie isotherme n'ont révélé ni retard de prise plus important pour les pâtes contenant du jus de chanvre textile ni différence notable dans la composition minéralogique après 28 jours. Les essais de compression ont montré que les bétons de chanvre formulés avec des chènevottes textiles offrent une résistance à la compression équivalente, voire supérieure, à ceux incluant des chènevottes industrielles. En parallèle, les mesures de conductivité thermique ont confirmé des performances similaires, validant l'usage des chènevottes textiles dans des bétons végétaux pour des applications en isolation répartie. Ces résultats démontrent le potentiel des chènevottes textiles pour la formulation de composites performants, contribuant à la transition écologique dans le secteur de la construction.

Mots-clés béton de chanvre, chènevotte de chanvre textile, matériaux biosourcés, performance thermique, transition écologique

Modalité de présentation : Présentation orale

I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est l'un des principaux consommateurs d'énergie en France, représentant près de 45 % de la consommation énergétique et environ 27 % des émissions de CO_2 (Ministère de la Transition écologique, 2022). Afin de limiter son impact environnemental, la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) a été mise en place pour favoriser l'utilisation de matériaux plus durables, en tenant compte de l'ensemble du cycle de vie des bâtiments (Ministère de la Transition écologique & Cerema, 2022). Parmi les alternatives encouragées, les matériaux biosourcés se distinguent par leur caractère renouvelable, leur production locale et leur faible transformation. En plus de leur contribution à la réduction des émissions de carbone grâce à la séquestration du CO_2 durant la croissance des végétaux, ces matériaux offrent des performances isolantes et hygrométriques intéressantes (Amziane et al., 2017; Avellaneda et al., 2023; Bacoup et al., 2019; Laborel-Préneron et al., 2022).

Dans ce contexte, le chanvre apparaît comme une solution particulièrement adaptée aux exigences de la construction durable. Cette plante à croissance rapide, cultivable localement, se distingue par sa capacité à stocker le carbone et par ses propriétés mécaniques et thermiques optimales pour la formulation de bétons végétaux. En associant la chènevotte de chanvre, à un liant minéral, le béton de chanvre constitue un matériau innovant offrant un compromis idéal entre performances environnementales, durabilité et confort hygrothermique.

La production de béton de chanvre repose principalement sur l'utilisation de chènevotte de chanvre industriel. Toutefois, l'approvisionnement en chanvre industriel reste limité à l'échelle nationale, en particulier dans certaines régions comme le sud de la France, où un approvisionnement local n'est pas possible. Dans ce contexte, la relance d'une filière chanvre textile en France offre une opportunité de valorisation des sous-produits de cette filière, notamment la chènevotte issue du défilage du chanvre textile, qui pourrait constituer une alternative durable.

La particularité de ce chanvre réside principalement dans son mode de culture, qui repose sur des pratiques agricoles spécifiques. Celles-ci incluent une densité de semis élevée permettant d'obtenir des tiges plus longues et, par conséquent, des fibres allongées. Après le fauchage, un défilage est nécessaire pour séparer les fibres de la tige, et différentes techniques ont été étudiées, notamment des procédés chimiques, enzymatiques et mécaniques (Li and Pickering, 2008; Song and Obendorf, 2006; Vignon and Garcia-Jaldon, 1996). Toutefois, ces approches nécessitent souvent un apport énergétique important, l'utilisation d'enzymes coûteuses ou la production de déchets difficilement valorisables (Md. Tahir et al., 2011). Par ailleurs, les fibres de chanvre sont principalement constituées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectine, avec une structure fibrillaire cohésive nécessitant une dégradation contrôlée de la lamelle moyenne pour optimiser leur séparation et leur intégration dans les composites (Love et al., 1994; Nykter et al., 2008). Pour répondre à ces contraintes, le rouissage au champ reste la méthode la plus accessible et adaptée à une production à grande échelle, car elle exclut tout apport énergétique externe ainsi que l'utilisation de traitements chimiques ou enzymatiques, évitant ainsi la génération de déchets industriels et limitant le niveau de transformation industrielle requis, ce qui permet de réduire significativement l'impact environnemental.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel des chènevottes de chanvre textile comme granulat biosourcé alternatif aux chènevottes de chanvre industriel dans le béton de chanvre, dans le cadre de la relance de la filière chanvre textile en France. Pour cela, une caractérisation approfondie des fractions granulaires, des propriétés mécaniques et thermiques des composites ainsi que des interactions chimiques entre les chènevottes et le liant est réalisée. Les performances des composites issus de la chènevotte textile sont comparées à celles de la chènevotte industrielle afin de déterminer leur aptitude à des applications en isolation répartie en dépit de sa couleur non conforme au Label Granulat Chanvre Bâtiment. En mettant en évidence des performances équivalentes, voire supérieures, cette étude contribue à diversifier les approvisionnements en matériaux biosourcés tout en soutenant la transition écologique du secteur de la construction.

II. MATERIAUX

Le granulat biosourcé utilisé dans cette étude est la chènevotte de chanvre textile, issue de cultures mettant en œuvre des pratiques agricoles spécifiques. Ces dernières incluent une densité de semis élevée pour obtenir des tiges plus longues, et donc des fibres allongées, le fauchage à la maturité florale et le rouissage, afin d'optimiser la qualité du matériau final. Cette chènevotte est fournie par l'association

AURA CHANVRE et la coopérative VirgoCoop, deux acteurs engagés dans la promotion et le renouveau de la filière du chanvre textile, tout en adoptant des pratiques agricoles durables. Pour valider et comparer les résultats de cette étude, une chènevotte de chanvre industrielle labellisée Granulat Chanvre Bâtiment, a été choisie comme référence en raison de ses propriétés reconnues et de son usage répandu dans le secteur. Les chènevottes de chanvre textile, obtenues via un processus de rouissage, ont été soumises à un procédé de broyage sur un broyeur à marteaux en testant deux grilles différant par leur taille, une à 32 mm et une à 20 mm. Les particules obtenues ont ensuite été dépoussiérées (élimination du passant à 250 μm) et le reliquat de fibres a été éliminé (élimination du refus sur un tamis à 8 mm). Une partie des particules ainsi obtenue à partir du broyage à 20 mm a été calibrée (CAL20) pour correspondre au mieux à la distribution granulométrique de la chènevotte industrielle de référence. Finalement, trois types de chènevotte de chanvre textile ont été obtenues : 32 mm, 20 mm, et 20 mm calibrée (CAL20) Fig. 1.

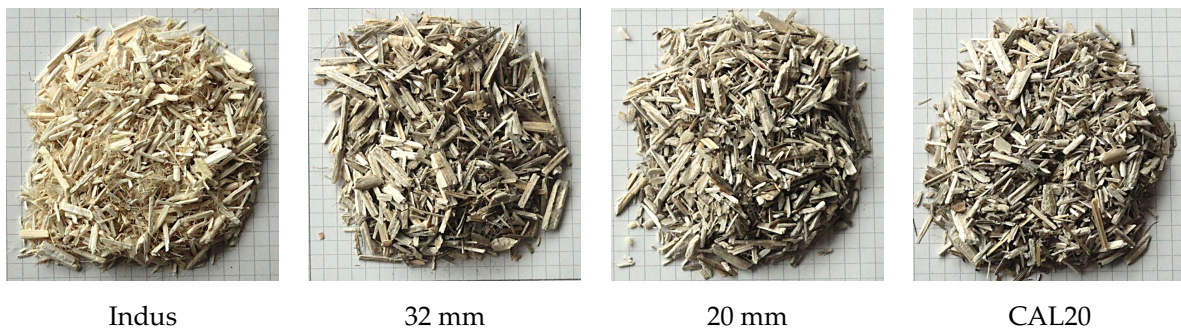


FIGURE 1. Fractions obtenues pour la chènevotte textile et industrielle

III. CARACTERISATION DES GRANULATS VEGETAUX

Avant de débiter la fabrication des composites de béton allégé, une série de caractérisations des granulats a été réalisée afin d'obtenir des paramètres essentiels à leur formulation. Ces analyses ont été basées sur des protocoles des recommandations du TC RILEM 236-BBM et d'études antérieures.

A. Analyse granulométrique

La première étape de cette démarche a été l'analyse granulométrique, réalisée selon les recommandations du TC RILEM 236-BBM, afin de caractériser la distribution des tailles de particules. Cette donnée est cruciale pour optimiser l'arrangement des granulats et leur interaction avec le liant, influençant directement les performances mécaniques et thermiques des composites.

L'analyse a été effectuée par tamisage à sec à l'aide d'une série de tamis aux ouvertures normalisées suivantes : 10 mm, 8 mm, 6,3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm et 0,25 mm. Avant l'essai, les granulats ont été soigneusement dépoussiérés par élimination des particules inférieures à 250 μm .

Chaque tamis et le fond ont d'abord été pesés à vide. Un échantillon de granulat a ensuite été pesé puis introduit dans le tamis. Le tamisage a été réalisé manuellement par des mouvements horizontaux et circulaires, jusqu'à stabilisation de la masse de refus. Après pesée, le refus a été transféré sur le tamis immédiatement inférieur, et l'opération répétée. Cette manipulation a été effectuée trois fois afin d'assurer une meilleure représentativité des résultats. Bien que seules les masses de refus aient été mesurées, les pourcentages de tamisat cumulé (passant) ont été calculés par différence, et utilisés pour l'établissement des courbes granulométriques.

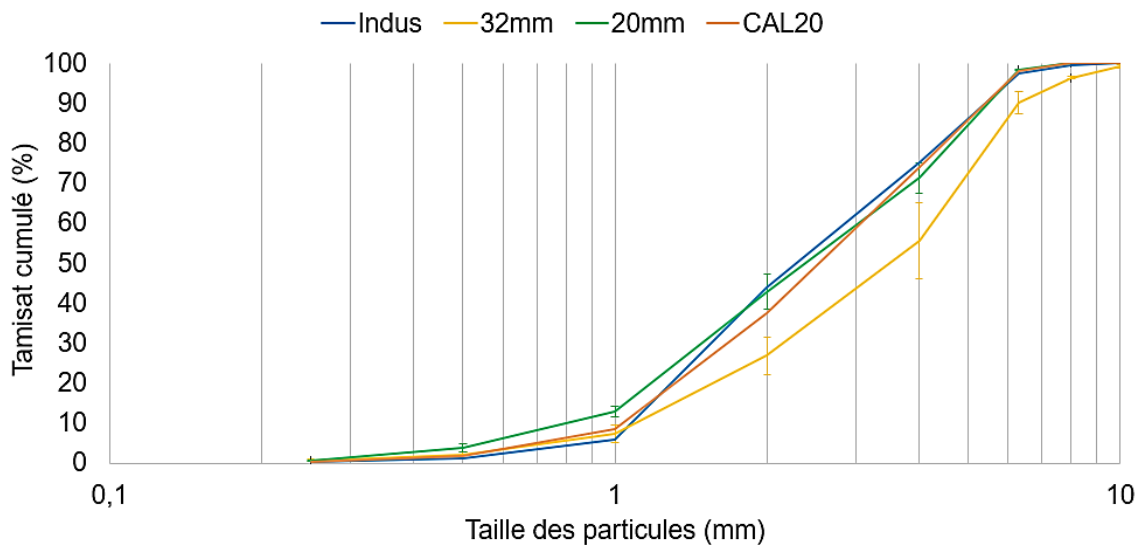


FIGURE 2. Courbes granulométriques des différentes chènevottes

La distribution granulométrique des particules pour les différentes fractions : Indus, 32 mm, 20 mm, et CAL20 est présentée sur la Fig. 2. La fraction 32 mm se distingue par une courbe légèrement décalée, indiquant une proportion plus importante de particules de grande taille. Cette particularité a été intentionnellement introduite pour permettre une comparaison des effets de la granulométrie entre les fractions 32 mm et 20 mm sur les propriétés des composites formulés. La fraction CAL20 a fait l'objet d'une étape supplémentaire de calibration pour atteindre une distribution granulométriques similaires à celle de la chènevotte industrielle (Indus). Ces trois fractions permettront d'étudier l'impact de la granulométrie sur les performances des composites.

B. Masses volumiques et porosités

Différentes masses volumiques ont également été mesurées pour caractériser les granulats sous divers états. La masse volumique en vrac, mesurée selon les recommandations du TC RILEM 236-BBM, reflète l'arrangement granulaire des granulats mis en place sans compactage. La masse volumique particulaire a été déterminée au moyen d'une méthode pycnométrique au sable fin et celle du solide a été déterminée au moyen d'un pycnomètre à hélium sur échantillons broyés à 80 μm , selon les méthodes présentées par Ratsimbazafy (2022). Ces trois masses volumiques permettent de déterminer les porosités inter- et intra-particulaires de l'arrangement granulaire. La porosité particulaire représente quant à elle la proportion de vides à l'intérieur d'une particule. Ces données ont été complétées par la mesure de la masse volumique compactée à l'état humide puis séchée, reproduisant le comportement des granulats au contact de l'eau et soumis à une compaction à l'aide d'un piston et d'une table vibrante, comme cela se produit lors de la fabrication des bétons et permettant d'adapter la formulation en fonction des caractéristiques des granulats végétaux. Ces caractérisations ont été réalisées selon des méthodes développées ou adaptées par Ratsimbazafy (2022).

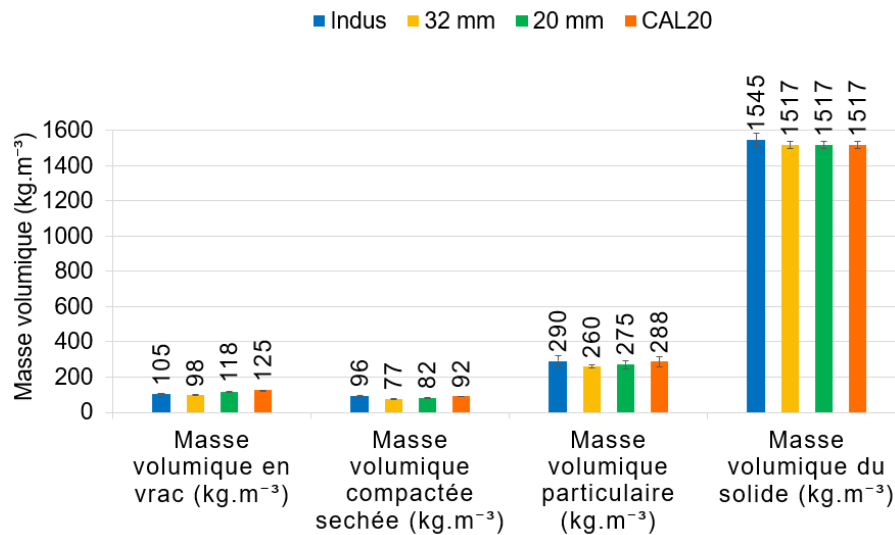


FIGURE 3. Masses volumiques en vrac, compactée séchée, particulaire et du solide

La Fig. 3 illustre les différentes masses volumiques mesurées pour les fractions Indus, 32 mm, 20 mm, et CAL20. Pour la masse volumique en vrac, les valeurs varient de 98 kg/m^3 pour la fraction 32 mm à 125 kg/m^3 pour la fraction CAL20, avec la fraction Indus à 105 kg/m^3 et la fraction 20 mm à 118 kg/m^3 . La CAL20 présente la valeur la plus élevée, à l'inverse, la fraction 32 mm affiche une masse volumique plus faible, probablement en raison de la présence prédominante de particules de grande taille, qui génèrent davantage de vides dans l'empilement naturel. Concernant la masse volumique compactée séchée, les valeurs s'étendent de 77 kg/m^3 pour la fraction 32 mm à 96 kg/m^3 pour la fraction Indus. La fraction Indus se distingue par une densité légèrement supérieure à celle des fractions 20 mm (82 kg/m^3) et CAL20 (92 kg/m^3), ce qui peut être attribué à une meilleure compacité des granulats industriels. La fraction 32 mm conserve la densité la plus faible, confirmant que la granularité plus grossière limite la compacité lors du compactage. En ce qui concerne la masse volumique particulaire, les valeurs sont relativement proches, oscillant entre 260 kg/m^3 pour la fraction 32 mm et 290 kg/m^3 pour la fraction Indus.

Enfin, pour la masse volumique du solide, une variation peu significative est observée entre les chènevottes industrielles et textiles, ayant des masses volumiques de squelette solide de 1545 kg/m^3 et 1517 kg/m^3 respectivement. Cette différence, pourrait être attribuée à l'impact du rouissage. Selon Liu et al. (2015), le rouissage augmente en effet la teneur en lignine des particules, ce qui influence directement la masse volumique de leur paroi cellulaire. La chènevotte textile, ayant une teneur accrue en lignine présenterait donc une masse volumique de solide plus faible.

Les porosités inter-particulaire, intra-particulaire et totale ont ensuite été calculées à partir des différentes masses volumiques obtenues. Ces résultats offrent une vision globale et détaillée des propriétés physiques des granulats, permettant ainsi d'évaluer leur influence sur la compacité, la durabilité et les performances mécaniques et thermiques des matériaux formulés.

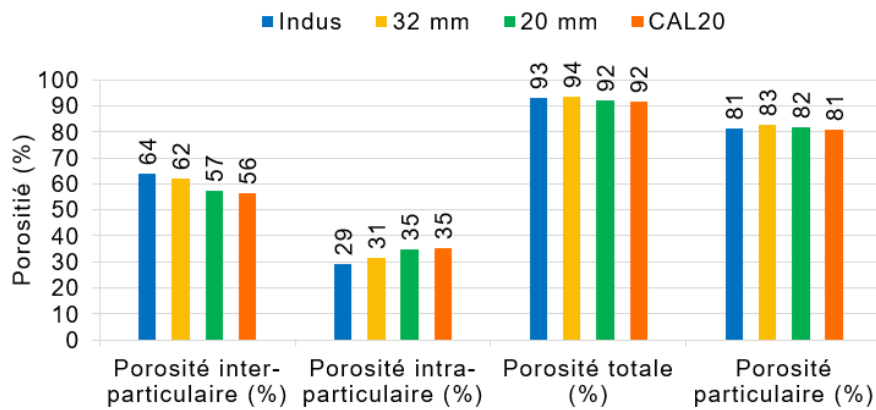


FIGURE 4. Porosité inter et intra particulaire, totale et particulaire

La Fig. 4 présente les différentes porosités des fractions Indus, 32 mm, 20 mm et CAL20, permettant d'analyser la structure interne et l'arrangement des particules. Malgré quelques variations observées entre les fractions, la porosité totale reste élevée et relativement constante. De même, la porosité particulaire ne montre pas de différences notables entre les fractions étudiées. Ces résultats indiquent que, bien que les fractions présentent de légères disparités dans la répartition des porosités inter et intra-particulaires, elles conservent globalement des caractéristiques similaires. Ainsi, il n'existe pas de différence significative entre les différentes fractions de chènevotte en termes de structure poreuse.

C. Absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau, un paramètre clé, a été mesurée conformément au protocole recommandé par le TC RILEM 236-BBM. Ce test permet d'évaluer la quantité d'eau absorbée par les granulats, un facteur déterminant pour anticiper leur comportement dans des environnements humides et ajuster la formulation des mélanges.

L'évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les fractions Indus, 32 mm, 20 mm et CAL20 est présentée sur la Fig. 5. Une augmentation progressive du taux d'absorption est observée pour toutes les fractions, avec des variations liées à leur structure et à leur porosité. La fraction Indus affiche un taux d'absorption inférieur tout au long de l'essai, ce qui peut s'expliquer par sa porosité intra-particulaire plus faible (29 %) que celle des autres fractions.

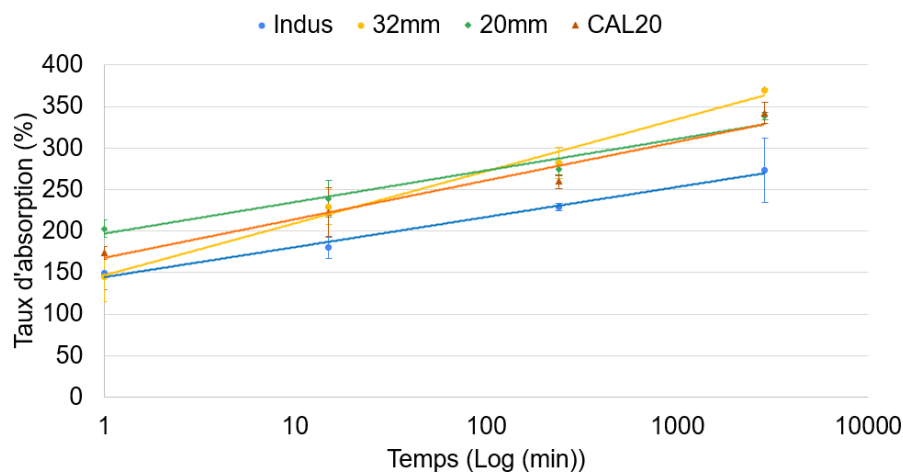


FIGURE 5. Courbes d'absorption d'eau des granulats

D. Analyse des interactions thermiques et chimiques

Un phénomène de retard de prise est fréquemment observé lors de la fabrication de béton de chanvre, principalement en raison des composants solubles présents dans la chènevotte (Wang et al., 2021). Ces composants interagissent avec le liant et influencent le processus de prise, ce qui peut poser des défis lors de la mise en œuvre. Afin d'étudier en détail l'impact de la chènevotte sur la prise du liant, des analyses thermo-chimiques ont été réalisées. La calorimétrie, une technique permettant de mesurer la chaleur échangée au cours des réactions chimiques, a été utilisée pour évaluer l'influence de la nature des jus de chènevotte sur le processus de prise, en comparant des solutions composées à 100 % de jus entre elles et avec une référence constituée uniquement d'eau pure. Les jus ont été préparés à partir de chènevottes broyées à 1 mm, mises en suspension dans de l'eau distillée (33,3 g de chènevotte pour 500 g d'eau) dans des béchers de deux litres. Après agitation pendant 48 heures, sous couvercle pour limiter l'évaporation, les mélanges ont été filtrés à 50 μm . Les filtrats obtenus ont ensuite été utilisés comme solutions d'étude. Parallèlement, des analyses chimiques, incluant l'ATG (analyse thermogravimétrique), ont permis de mettre en évidence les variations de composition chimique à différentes échéances. Ces investigations ont pour objectif de mieux comprendre les interactions thermiques et chimiques qui régissent le phénomène de prise du liant en présence de chènevotte.

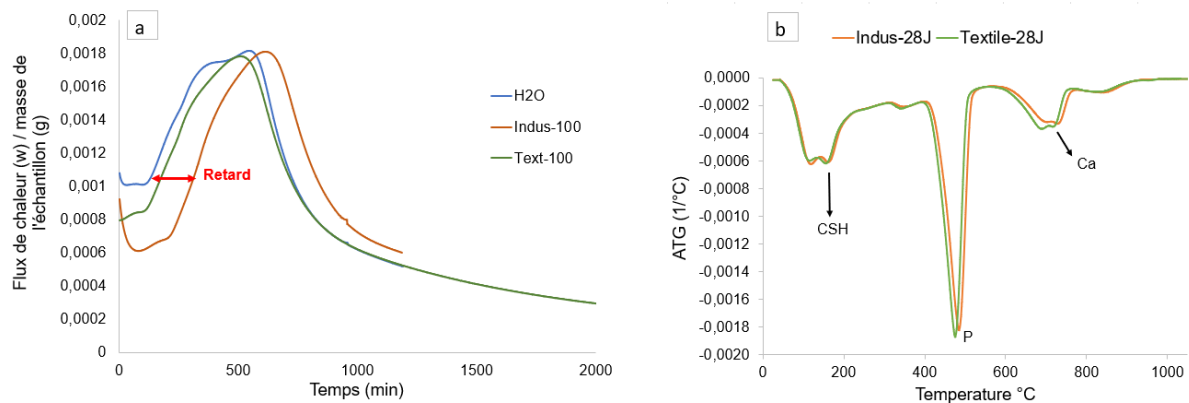


FIGURE 6. Résultats de calorimétrie isotherme (a) et d'analyse thermogravimétrique (b)

La Fig. 6.a illustre les résultats de la calorimétrie pour trois échantillons : H₂O, Indus-100 et Text-100. H₂O correspond à de l'eau pure, tandis que Indus-100 et Text-100 représentent respectivement des jus de chènevotte industrielle et textile, tous deux concentrés à 100 %. L'utilisation de ces jus hautement concentrés permet d'accentuer les écarts observables et d'évaluer plus précisément leur impact sur la prise du liant qui est identifiable par une variation marquée de la pente, due à la réaction exothermique associée à son durcissement. L'échantillon H₂O a été choisi comme référence pour déterminer le moment où débute cette prise. Une fois les réactifs consommés, la courbe décroît progressivement jusqu'à atteindre une phase de stabilisation. L'analyse des résultats révèle un retard de prise pour l'échantillon Indus-100, perceptible par un décalage du point de changement de pente. Contrairement aux échantillons H₂O et Text-100, dont la prise se produit quasi simultanément, l'échantillon Indus-100 met plus d'une heure supplémentaire à amorcer cette réaction. Ce retard s'explique par une forte teneur en composés hydrosolubles dans le jus de chènevotte industrielle. Par conséquent, le rouissage au champ de la chènevotte textile permet d'éliminer une partie des composés hydrosolubles, réduisant ainsi leur effet retardateur sur la prise du liant.

Les analyses ATG, présentées sur la Fig. 6.b, mettent en évidence les variations de la composition chimique en comparant les pertes de masse en fonction de la température pour les deux chènevottes

après 28 jours. Le premier palier de perte de masse, situé entre 100 et 200°C, correspond à la déshydratation des silicates de calcium hydratés (CSH), produits lors de la réaction d'hydratation du liant. Ces hydrates sont responsables du développement des propriétés mécaniques du matériau. L'observation d'un pic similaire pour les deux formulations suggère que l'hydratation du liant a été globalement comparable, malgré les différences d'interaction entre le liant et les jus de chènevotte observées précédemment en calorimétrie. Le pic marqué autour de 500°C correspond à la décomposition de la portlandite (P). L'intensité similaire de ce pic pour les deux formulations indique que la portlandite s'est formée en quantités comparables, malgré la présence de composés hydrosolubles dans la chènevotte industrielle, qui avaient retardé la prise du liant en calorimétrie. Enfin, la perte de masse observée entre 700 et 800°C, marquée par (Ca), correspond à la décomposition des carbonates de calcium, issus soit du liant, soit d'une éventuelle carbonatation progressive du matériau.

IV. FORMULATION ET FABRICATION DES BETONS VEGETAUX

Après avoir réalisé la caractérisation multiphysique des granulats dans la partie précédente, cette section se concentre sur la formulation et la fabrication des composites. Les propriétés des granulats, déterminées précédemment, servent à la fois de paramètres de formulation et de prédiction des performances des bétons allégés. Les dosages des différents composants, présentés dans le tableau 1, ont été calculés en se basant sur les dosages du matériau de référence, la chènevotte industrielle (Indus), ainsi que sur les caractéristiques des granulats (masses volumiques et taux d'absorption à 1 minute), conformément à l'approche décrite par Ratsimbazafy (2022). Un dosage constant en liant (Kg de liant par mètre cube de composite) a été utilisé afin de permettre l'évaluation de l'influence des propriétés des granulats sur les performances des composites. Les dosages du mélange de référence ont, quant à eux, été établis selon les recommandations du fabricant de liant. Le liant utilisé est une chaux formulée commercialement spécifiquement destinée à la formulation de béton de chanvre. Compte tenu des faibles résultats de compression obtenus avec la chènevotte industrielle, nous avons ajouté, afin d'améliorer la comparaison, une formulation contenant une autre chènevotte industrielle (Indus bis), utilisée dans une étude antérieure (tableau 1), avec un dosage en liant légèrement plus faible.

TABLEAU 1. Paramètres de formulation des mélanges

Chènevotte	Liant (kg.m ⁻³)	Granulats (kg.m ⁻³)	Eau (kg.m ⁻³)	Granulats/Liant	Eau/Liant
Indus bis	260	130	337	0.50	1.30
Indus	280	130	337	0.46	1.20
32 mm	280	104	331	0.37	1.18
20 mm	280	112	340	0.40	1.22
CAL20	280	125	343	0.44	1.22

Les composites fabriqués dans cette étude sont des blocs préfabriqués en laboratoire. Ils ont été réalisés à l'aide d'un procédé de vibro-compaction, dans des moules cubiques de 15 × 15 × 15 cm, avec un démoulage immédiat après mise en œuvre. Chaque composite a été constitué en trois couches successives, compactées pour assurer une densité homogène et optimisée.

V. CARACTERISATION DES BETONS DE CHANVRE

A. Performances mécaniques

Les essais de compression ont été réalisés suivant un chargement cyclique selon la méthode de Niyigena et al. (2016) sur des cubes de béton allégé. Les essais ont été effectués après 120 jours de stockage en ambiance de laboratoire, à l'aide d'une presse Zwick/Roell Z100 (Allemagne) équipée d'un capteur de force de 100 kN. Six éprouvettes ont été testées pour chaque formulation, dont trois pour chaque direction de chargement (parallèle ou perpendiculaire au sens de compactage).

Une courbe type des essais de compression cyclique, réalisée dans les directions parallèle et perpendiculaire au sens de compactage, est présentée pour chaque formulation sur la Fig. 7. Les résultats mécaniques montrent des performances prometteuses pour les mélanges à base de chènevotte de chanvre textile, tandis que les formulations utilisant des granulats de chènevotte de chanvre industriel affichent des résultats nettement plus faibles.

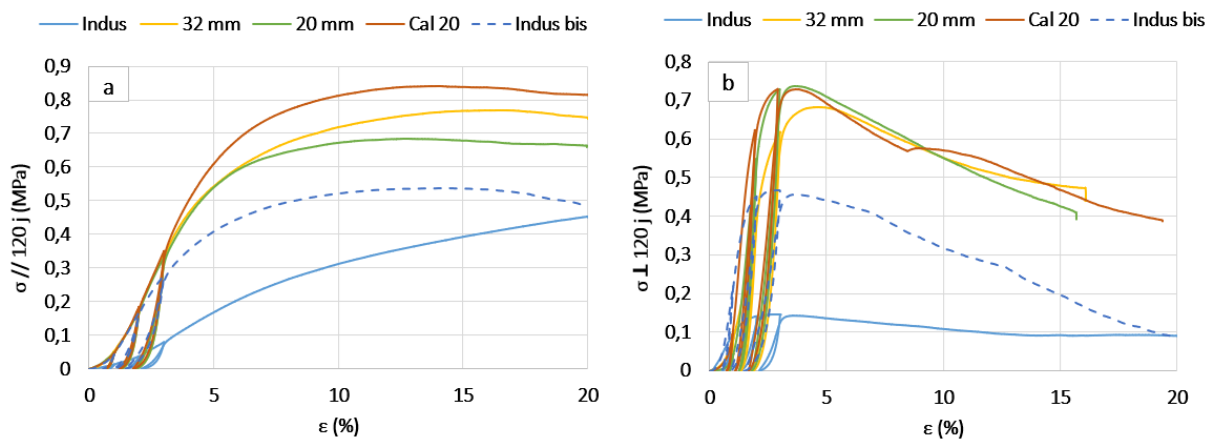


FIGURE 7. Courbes contrainte-déformation dans les directions (a) parallèle et (b) perpendiculaire au sens de compactage.

Dans la direction parallèle au sens du compactage Fig. 7.a, l'écrasement progressif des particules sans rupture claire rend impossible la définition d'une contrainte maximale, celle-ci augmentant avec la déformation. En revanche, dans la direction perpendiculaire Fig. 7.b, une contrainte maximale est identifiable et reportée pour chaque formulation sur la Fig. 8.a. Le paramètre mécanique retenu pour caractériser les deux directions de sollicitation est le module d'Young, déterminé conformément aux recommandations de la RILEM à partir des courbes contrainte-déformation. Les résultats pour les différentes formulations sont illustrés sur la Fig. 8.b.

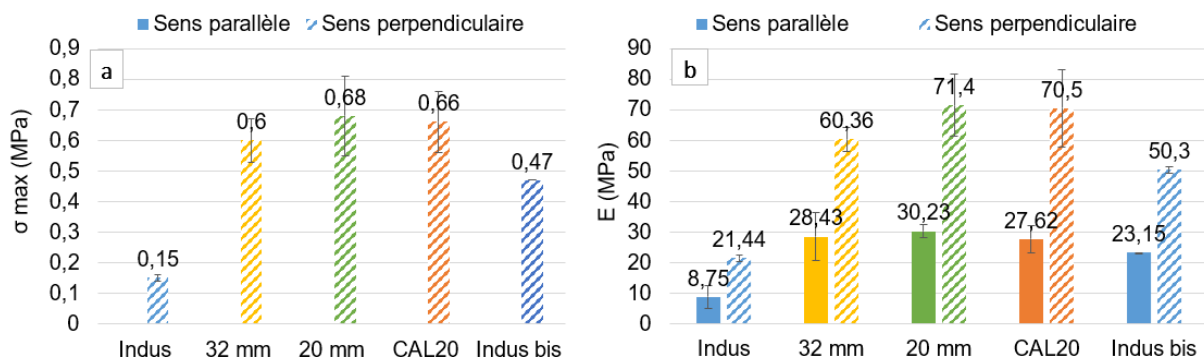


FIGURE 8. Résistance maximale à la compression (a) dans le sens perpendiculaire et module d'Young (b) dans les deux sens.

Les résultats des résistances mécaniques, présentés sur la Fig. 8, révèlent que les fractions 20 mm et CAL20 atteignent les résistances en compression les plus élevées, avec $0,66 - 0,68 \text{ MPa}$. Elles sont suivies de près par la fraction 32 mm ($0,60 \text{ MPa}$), également issue du chanvre textile qui met en évidence qu'une granulométrie plus grossière induit une légère diminution de la résistance en compression.

Quant à la formulation Indus bis, elle enregistre la résistance la plus faible, à savoir $0,47 \text{ MPa}$. Les formulations à base de granulats de chènevotte de chanvre industriel (Indus) présentent des résultats significativement plus faibles.

En résumé, les composites à base de chènevotte textile (fractions 32 mm, 20 mm et CAL 20) affichent des performances mécaniques nettement supérieures à celles obtenues avec la chènevotte industrielle. Néanmoins, des variations de masses volumiques existent entre les composites à base de chènevotte industrielle et les autres, il faudrait effectuer une étude complémentaire pour s'assurer de cette tendance.

B. Performances thermiques

La conductivité thermique des composites a été déterminée par la méthode transitoire au fil chaud. Cette méthode consiste à émettre un flux de chaleur q par effet Joule à l'interface entre deux échantillons à l'aide de la sonde fil chaud, puis à mesurer la variation de température dans le temps à l'aide d'un thermocouple intégré à la sonde. La puissance et le temps de chauffe ont été choisis de manière à ce que l'élévation de température soit toujours supérieure à 5°C et que le coefficient de corrélation R^2 entre les données expérimentales et le modèle théorique dépasse 0,999. Les valeurs de puissance et de temps de chauffe nécessaires pour satisfaire ces critères sont respectivement de $0,15 \text{ W}$ et 60 s . Les mesures ont été réalisées dans l'ambiance du laboratoire, sur des éprouvettes en équilibre avec celle-ci (température de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ et humidité relative de $65 \pm 5\%$). L'appareil de mesure utilisé est le FP2C de la société Néotim (France). La conductivité thermique mesurée résulte d'une moyenne de huit à douze mesures, afin de limiter les problèmes de précision et de représentativité liés à l'hétérogénéité des bétons végétaux.

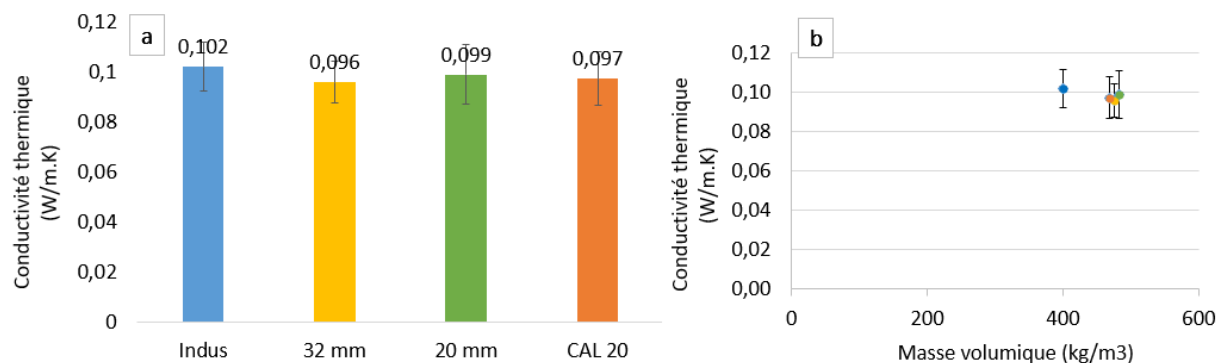


FIGURE 9. Conductivité thermique à l'ambiance (a) et conductivité thermique à l'ambiance en fonction de la masse volumique (b).

Les résultats de conductivité thermique des différentes formulations sont présentés sur la Fig. 9. La conductivité thermique des mélanges varie entre $0,096$ et $0,102 \text{ W}/(m \cdot K)$ écart non significatif au vu de la dispersion expérimentale (Fig. 9.a). Selon la littérature, cette méthode conduit généralement à une surestimation de la conductivité thermique d'environ 10 % par rapport aux mesures effectuées en régime permanent, notamment avec la méthode de la plaque chaude gardée. Par conséquent, il est

raisonnable de supposer que la conductivité thermique réelle des composites étudiés pourrait être au minimum 10 à 15 % inférieure aux valeurs mesurées dans cette étude.

En résumé, toutes les formulations présentent de bonnes performances en isolation thermique. Cependant, il n'a pas été possible de mettre en évidence une influence significative de la fraction granulométrique, de la masse volumique, ni de la nature de la chènevotte, en raison de la similarité des résultats obtenus (Fig. 9.b).

VI. CONCLUSION

Cette étude a permis de comparer deux chènevottes, l'une issue d'un chanvre industriel et l'autre d'un chanvre textile, et d'analyser l'impact de la granulométrie de la chènevotte de chanvre textile sur les performances mécaniques et thermiques des bétons végétaux.

Du point de vue chimique et thermodynamique, les analyses calorimétriques ont mis en évidence un retard de prise marqué pour la chènevotte industrielle, lié à la présence de composés hydrosolubles retardateurs de prise. Ce retard, bien que perceptible au début du processus, est imperceptible à long terme, comme l'ont confirmé les résultats ATG, qui montrent une hydratation similaire du liant pour les deux formulations après 28 jours. La formation des hydrates (CSH) et de la portlandite n'a pas été significativement affectée à long terme par ces composés. En revanche, aucun retard de prise n'a été remarqué pour la chènevotte textile.

D'un point de vue mécanique, les formulations contenant la chènevotte de chanvre textile ont montré des résistances élevées par rapport à celles contenant la chènevotte de chanvre industriel, confirmant ainsi l'influence positive du rouissage sur les propriétés mécaniques. Ces performances mécaniques supérieures à celles obtenues avec les chènevottes industrielles, soulignent le potentiel des chènevottes textiles pour formuler des bétons végétaux optimisés.

Les valeurs de conductivité thermique des composites à base de chènevotte sont similaires quels que soient la granulométrie et le type de chènevotte utilisé.

Enfin, il a été confirmé que la couleur de la chènevotte n'est pas un critère pertinent pour prédire les effets des interactions chimiques sur les performances mécaniques des composites.

En conclusion, ces travaux confirment que le rouissage de la chènevotte de chanvre textile ne dégrade pas les performances mécaniques des bétons végétaux tout en réduisant l'effet retardateur sur la prise du liant. Ces résultats ouvrent la voie à une valorisation accrue des chènevottes textiles dans la construction durable.

VII. PERSPECTIVES

À la lumière de ces résultats, des pistes de recherche et d'optimisation ciblées peuvent être explorées pour approfondir la compréhension des interactions chimiques, améliorer les procédés de fabrication, et garantir la durabilité des bétons à base de chènevotte de chanvre textile.

- Réaliser des analyses DRX (Diffraction des Rayons X) sur les pâtes modèles afin d'identifier et d'approfondir l'étude des phases minérales présentes, en particulier celles influencées par la nature des chènevottes.
- Optimiser les procédés de conception et de fabrication des bétons végétaux, en tenant compte des propriétés spécifiques des granulats textiles.

- Étudier le risque de prolifération microbienne, lié à la nature des chènevottes utilisées, pour garantir la durabilité, la pérennité et la sécurité des composites dans des conditions réelles d'utilisation.

Ces investigations permettront de mieux exploiter le potentiel des chènevottes de chanvre textile dans le domaine des matériaux de construction, en assurant des performances mécaniques, thermiques et chimiques optimales tout en répondant aux exigences de durabilité.

REFERENCES

Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., Sonebi, M., 2017. 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. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>

Avellaneda, A., Evon, P., Haurie, L., Laborel-Préneron, A., Lagouin, M., Magniont, C., Navarro, A., Palumbo, M., Torres, A., 2023. Evaluation of the Potential of Plant Aggregates from Corn and Sunflower Stalks for the Design of Building Materials, in: Amziane, S., Merta, I., Page, J. (Eds.), *Bio-Based Building Materials*. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 70–86. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_7

Bacoup, F., Mahieu, A., Vitaud, A., Drone, P., Gattin, R., Leblanc, N., 2019. Various methods of binding light agricultural byproducts. *Acad. J. Civ. Eng.* 37, 19–23. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.2>

Laborel-Préneron, A., Ampe, C., Labonne, L., Magniont, C., Evon, P., 2022. Thermal Insulation Blocks Made of Sunflower Pith Particles and Polysaccharide-Based Binders: Influence of Binder Type and Content on Their Characteristics. *Constr. Technol. Archit.* 1, 43–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.43>

Li, Y., Pickering, K.L., 2008. Hemp fibre reinforced composites using chelator and enzyme treatments. *Compos. Sci. Technol.* 68, 3293–3298. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.08.022>

Liu, M., Fernando, D., Daniel, G., Madsen, B., Meyer, A.S., Ale, M.T., Thygesen, A., 2015. Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibers. *Ind. Crops Prod.* 69, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.010>

Love, G.D., Snape, C.E., Jarvis, M.C., Morrison, I.M., 1994. Determination of phenolic structures in flax fibre by solid-state ¹³C NMR. *Phytochemistry, The International Journal of Plant Biochemistry* 35, 489–491. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)94788-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)94788-5)

Md. Tahir, P., Ahmed, A.B., SaifulAzry, S.O.A., Ahmed, Z., 2011. Retting process of some bast plant fibers and its effect on fibre quality: A review. *BioResources* 6, 5260–5281. <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.5260-5281>

Niyigena, C., Amziane, S., Chateauneuf, A., Arnaud, L., Bessette, L., Collet, F., Lanos, C., Escadeillas, G., Lawrence, M., Magniont, C., Marceau, S., Pavia, S., Peter, U., Picandet, V., Sonebi, M., Walker, P., 2016. Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Mater. Today Commun.* 7, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>

Nykter, M., Kymäläinen, H.-R., Thomsen, A.B., Lilholt, H., Koponen, H., Sjöberg, A.-M., Thygesen, A., 2008. Effects of thermal and enzymatic treatments and harvesting time on the microbial quality and

chemical composition of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Biomass Bioenergy* 32, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.015>

Ratsimbazafy, H.H., 2022. Évaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction (PALOMAC) (These de doctorat). Toulouse 3.

Song, K.H., Obendorf, S.K., 2006. Chemical and Biological Retting of Kenaf Fibers. *Text. Res. J.* 76, 751–756. <https://doi.org/10.1177/0040517506070520>

Vignon, M.R., Garcia-Jaldon, C., 1996. Structural features of the pectic polysaccharides isolated from retted hemp bast fibres. *Carbohydr. Res.* 296, 249–260. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(96\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(96)00226-1)

Wang, L., Lenormand, H., Zmamou, H., Leblanc, N., 2021. Effect of variability of hemp shiv on the setting of lime hemp concrete. *Ind. Crops Prod.* 171, 113915. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113915>