

# Etude sur l'effet du type et de l'orientation des biogranulats sur les propriétés mécaniques du béton biosourcé par Corrélation d'images numériques

Rafik Bardouh<sup>1</sup>, Evelyne Toussaint<sup>1</sup>, Sofiane Amziane<sup>1</sup>, Sandrine Marceau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, UMR 6602-UCA/CNRS, 63000, Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup> Université Gustave Eiffel, MATS-CPDM, 77454, Marne-La-vallée, CEDEX 2, France

## RESUME

Ce papier analyse l'impact de quatre types de granulats biosourcés (chanvre, bambou, roseau et colza) et de leur orientation (parallèle ou perpendiculaire à la direction du compactage) sur les propriétés mécaniques du béton biosourcé. La corrélation d'images numériques (CIN) permet d'étudier en détail la déformation des matériaux par rapport aux biogranulats utilisés et à ses orientations. Les résultats indiquent que le béton biosourcé avec les biogranulats orientés parallèlement au compactage sont plus rigides mais plus sensibles aux dommages dès un faible taux de déformation moins de 2 %. Alors que pour l'orientation perpendiculaire des biogranulats, le béton biosourcé subit un durcissement cyclique avec des niveaux de résistance supérieure à celles en orientation parallèle.

Le béton de chanvre s'est révélé être le plus robuste et le plus résistant. Contrairement à la plupart des bétons biosourcés testés avec une orientation perpendiculaire des biogranulats, le béton de colza a montré une rigidification jusqu'à un taux de déformation relativement plus élevé. Cette particularité s'explique par la présence de longues pailles de colza, qui améliorent sa flexibilité.

Par ailleurs, le béton biosourcé présente un déplacement vertical plus homogène lorsque les biogranulats sont orientés perpendiculairement, comparativement à une orientation parallèle. Dans cette dernière configuration, le béton de chanvre, qui offre les meilleures performances mécaniques, subit un déplacement vertical limité, alors que le béton de bambou le plus fragile, enregistre un déplacement vertical plus important.

**Mots-clefs** Béton biosourcé ; CIN ; ITZ ; orientation ; propriétés mécaniques

## I. INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, le béton biosourcé a émergé dans l'industrie de la construction en raison de sa durabilité, de son faible impact environnemental et de sa capacité à séquestrer le

carbone (Chabannes et al., 2017). Toutefois, ses propriétés mécaniques restent relativement faibles par rapport au béton conventionnel, ce qui limite son utilisation en tant que matériau structurel porteur (Tronet et al., 2016). Les résultats disponibles sur la résistance à la compression de la plupart des bétons biosourcés indiquent que celle-ci est généralement inférieure à 5 MPa (Bardouh et al., 2024). Cependant, cette résistance peut être considérablement améliorée grâce à des traitements physiques des granulats (raffinage) ainsi qu'à des traitements chimiques (Bardouh et al., 2024). La faible performance mécanique du béton biosourcé est principalement attribuée à plusieurs facteurs, notamment les propriétés d'absorption/désorption des granulats végétaux, qui induisent des variations volumétriques et créent une porosité accrue. De plus, la dissolution des sucres solubles contenus dans les granulats agit comme un agent retardateur de l'hydratation de la pâte de ciment (Sellami et al., 2013). Ce dernier phénomène est particulièrement influent, car il modifie la zone de transition interfaciale (ITZ) autour des granulats, en générant une zone halo de quelques millimètres où le ciment est mal, voire non hydraté, compromettant ainsi l'adhérence entre le granulat et la matrice cimentaire (Diquélou et al., 2015). Dans cette optique, le choix du liant joue un rôle crucial pour limiter autant que possible les effets néfastes des sucres dissous des biogranulats. (Bessette et al., 2015) ont démontré que l'utilisation du ciment prompt naturel (CNP) est particulièrement adaptée à la fabrication du béton de chanvre, grâce à sa prise rapide qui réduit le retard d'hydratation causé par les sucres.

Un autre facteur influençant les performances mécaniques du béton biosourcé est l'orientation des biogranulats par rapport à la direction de coulage. L'orientation des biogranulats introduit une variabilité importante dans les résultats mécaniques, selon qu'ils soient disposés perpendiculairement ou parallèlement à la direction de compactage (Nozahic et al., 2012).

Afin d'approfondir l'étude des propriétés mécaniques du béton biosourcé, (Bardouh et al., 2023) ont utilisé la corrélation d'images numériques (CIN) pour évaluer le comportement mécanique du béton de chanvre dans lequel les biogranulats étaient orientés perpendiculairement à la direction de compactage. L'analyse des champs de déformation verticale a révélé une réponse hétérogène avec des lignes de concentration des déformations, représentant les différentes couches formées lors de la mise en œuvre. La CIN peut également être exploitée pour optimiser les propriétés mécaniques du béton biosourcé en déterminant le module d'Young à partir du calcul des déformations issues de la CIN.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux

#### A.1 Liant minéral

Dans cette étude, le ciment prompt naturel (CNP) fourni par VICAT a été utilisé, puisqu'il est largement référencé dans la littérature comme liant couramment employé pour la fabrication du béton de chanvre (Bejat et al., 2015). En raison de sa prise rapide, un retardateur de prise a été ajouté, avec un ratio massique retardateur/liant de 0,0032. L'ajout de ce retardateur a permis de retarder la prise de 10 à 30 minutes ("le ciment naturel PROMPT en maçonnerie rapide"). Selon la fiche technique de VICAT, la résistance à la compression et le module de rigidité du CNP, à un

rapport E/C de 0,5 après 28 jours, sont respectivement de 12 MPa et 19,2 GPa (“Technical specifications PROMPT NATURAL CEMENT, 2007”).

### A.2 Biogranulats

Quatre types de biogranulats, ainsi que leurs noms scientifiques correspondants, ont été utilisés dans cette étude : les chènevottes de chanvre (*Cannabis sativa*), le bambou (*Bambusa vulgaris*), le colza (*Brassica napus*) et le roseau (*Phragmites australis*). Leurs propriétés physiques sont présentées dans le Tableau 1.

**Tableau 1: Propriétés physiques des biogranulats**

Propriétés		Chanvre	Bambou	Colza	Roseau
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Avant séchage	107 ± 4	305 ± 10	99 ± 6	169±8
	Après séchage	112 ± 5	304 ± 7	89 ± 7	145±6
Absorption d'eau	Teneur en eau initiale	1.65	0.37	2.68	2.65
	Taux de diffusion (k)	0.84	0.07	0.39	0.009
Taille moyenne (mm)	Longueur	8	5	10	4
	Largeur	5	5	9	2

### B. Méthodes

#### B.1 Processus de fabrication

La composition du béton biosourcé a été ajustée en fonction des propriétés de chaque biogranulat. Ainsi, quatre formulations distinctes ont été élaborées avec leurs rapports massiques comme le montre le tableau 2. Il est intéressant de noter que les proportions du chanvre et du colza étaient identiques, tandis que celles du bambou et du roseau nécessitaient une réduction du liant et d'eau par rapport à la masse de biogranulat. En particulier, la formulation du béton à base de bambou se distinguait par sa faible capacité d'absorption d'eau, comme présenté dans le Tableau 1.

Les éprouvettes en béton biosourcé ont été moulées sous forme de cubes de 15 cm de côté. Le protocole de fabrication détaillé a été exposé dans une étude antérieure (Bardouh et al., 2023). Pour chaque combinaison liant/biogranulat, quatre éprouvettes ont été confectionnées, dont deux ont été soumises à des essais selon deux orientations différentes des biogranulats : perpendiculaire et parallèle à la direction de compactage. Une fois démoulés (Figure 1.a), les éprouvettes ont été placés dans une chambre climatique contrôlée à 20°C et 50 % d'humidité relative (HR) pendant un an, afin d'évaluer l'évolution de leur densité sur le long terme. Il est important de souligner que les biogranulats orientés parallèlement correspond à une rotation de l'éprouvette de 90° après démoulage, car, lors du moulage, les biogranulats s'alignent par défaut de manière perpendiculaire à la direction de compactage (Figure 1.b). La densité des éprouvettes à l'état frais et sec est présentée dans le Tableau 3.

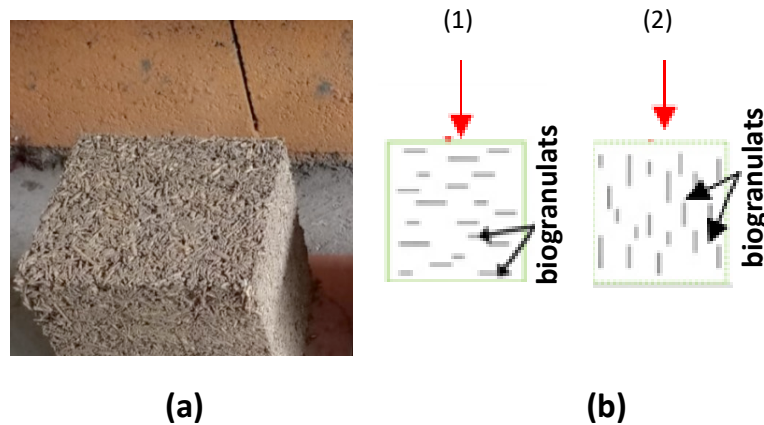


Figure 1. (a) Béton biosourcé démoulé, (b) Distinction de l'orientation des biogranulats, (1) orientation perpendiculaire, (2) orientation parallèle

Tableau 2: Formulations des 4 mélanges de béton biosourcé

Formulations	Masse (g)			
	Biogranulat (B)	Liant (L)	Eau (E)	Rapport B:L:E
Béton de chanvre	400	800	800	1:2:2
Béton de bambou	1000	600	600	1:0.6:0.6
Béton de roseau	400	800	800	1:2:2
Béton de colza	600	900	900	1:1.5:1.5

Tableau 3: Densité des éprouvettes de béton biosourcé aux états frais et sec

Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Etat frais		Etat sec	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
Béton de chanvre	568	0.17	365	1.45
Béton de bambou	679	0.33	454	0.64
Béton de roseau	681	0.07	460	0.16
Béton de colza	577	0.05	365	0.05

### B.2 Configuration des essais de compression cycliques et l'installation du CIN

Des essais de compression cyclique ont été réalisés sur des éprouvettes de béton biosourcé à l'aide d'une presse Zwick Roelle (250 kN de capacité), dans le but d'analyser leur comportement mécanique (voir Figure 2). La charge appliquée a été enregistrée avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz. Le protocole, composé de 19 cycles de chargement-déchargement, a imposé une augmentation graduelle de la déformation globale de 1 % à 10 % par paliers de 0,5 %, suivie d'un

chargement continu jusqu'à rupture de l'éprouvette. Les vitesses de test ont été calibrées à 3 mm/min (chargement) et 10 mm/min (déchargement). Pour atténuer les effets des irrégularités de surface, des plaques en bois ont été positionnées entre la machine et les éprouvettes, assurant ainsi une répartition uniforme des contraintes, condition indispensable pour des mesures fiables (Véronique, 2005). L'ajout de plaques de bois permet aux extrémités de l'éprouvette, qui définissent les conditions limites, de glisser plutôt que d'être bloquées. Ce dispositif d'essai influence ainsi significativement le mode de rupture des éprouvettes et prévient l'apparition du flambage sur leurs côtés.

La déformation des surfaces a été mesurée sans contact via une méthode de corrélation d'images numériques (CIN) 2D. Le dispositif expérimental (Figure 2) intégrait une caméra PCO 2000 (résolution 2048×2048 pixels, objectif 105 mm) associée à un éclairage LED. Les images, capturées à une fréquence d'une image/seconde via Camware64, ont été synchronisées avec la machine Zwick grâce à une boîte d'acquisition et au logiciel Catman. Les champs de déplacement et de déformation ont été calculés avec le logiciel SeptD (Cuynet et al., 2016) basé sur l'analyse des variations de niveaux de gris. Les paramètres clés—taille du sous-ensemble et pas—ont été fixés à 10 pixels chacun, permettant une analyse précise de la grille et des motifs.



Figure 2. Dispositif de compression cyclique et installation CIN

### B.3 Analyse des méthodes de mesure des paramètres mécaniques

Trois paramètres mécaniques ont été évalués dans cette étude : la rigidité (E), la résistance à la compression ( $\sigma_c$ ) et la résistance de service ( $\sigma_s$ ). Le module d'Young a été déterminé par la méthode flottante (Niyigena et al., 2019) et est défini comme le maximum des différent rigidités calculés tout le long de la phase de rechargement (avant le pic) à un incrément de déformation de 0.1%. Ainsi, le module d'Young dans la phase de rechargement de chaque cycle a été calculé selon l'équation (1) qui prend en compte un exemplaire de 1<sup>ère</sup> cycle comme indiqué en vert dans la Figure 3

$$E_1 = \text{MAX} \{E_{11}, E_{12}, E_{13}, E_{14}, \dots, E_{1m}\} \quad (1)$$

Étant donné que 19 cycles ont été réalisés, 19 modules d'Young ont été calculés, chacun correspondant à un cycle donné. La résistance de service représente la résistance mécanique au cycle où le module d'Young maximal a été observé parmi les 19 cycles. Ce paramètre est essentiel, car il traduit la performance mécanique optimale du béton biosourcé. En raison de la variabilité

de la réponse mécanique entre les orientations perpendiculaire et parallèle des biogranulats, il était difficile d'identifier un pic distinct sur la courbe permettant de déterminer précisément la résistance à la compression, en particulier pour les biogranulats orientés perpendiculairement. De ce fait, un taux de déformation arbitraire de 5 % a été retenu pour le calcul de la résistance à la compression, permettant d'obtenir une comparaison pertinente entre les deux orientations conformément aux méthodologies adoptées dans des études antérieures (Niyigena et al., 2016; Tronet et al., 2016).

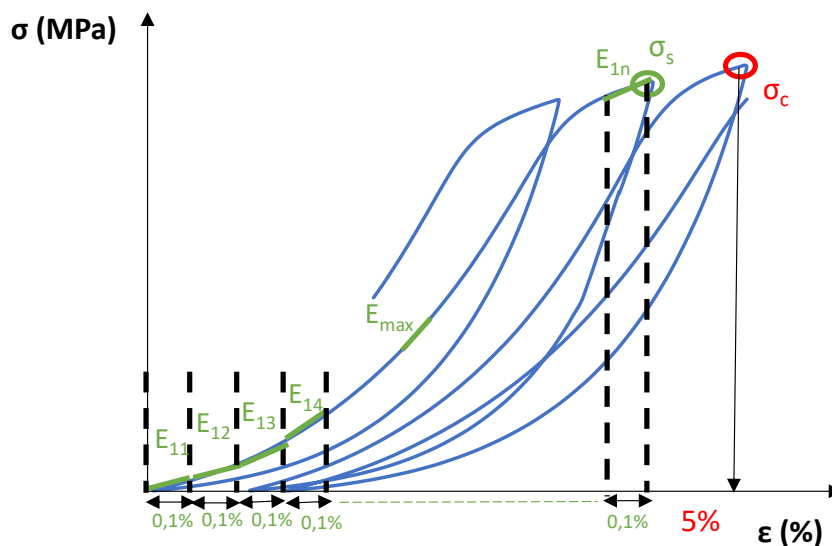


Figure 3. Méthode d'évaluation des paramètres mécaniques

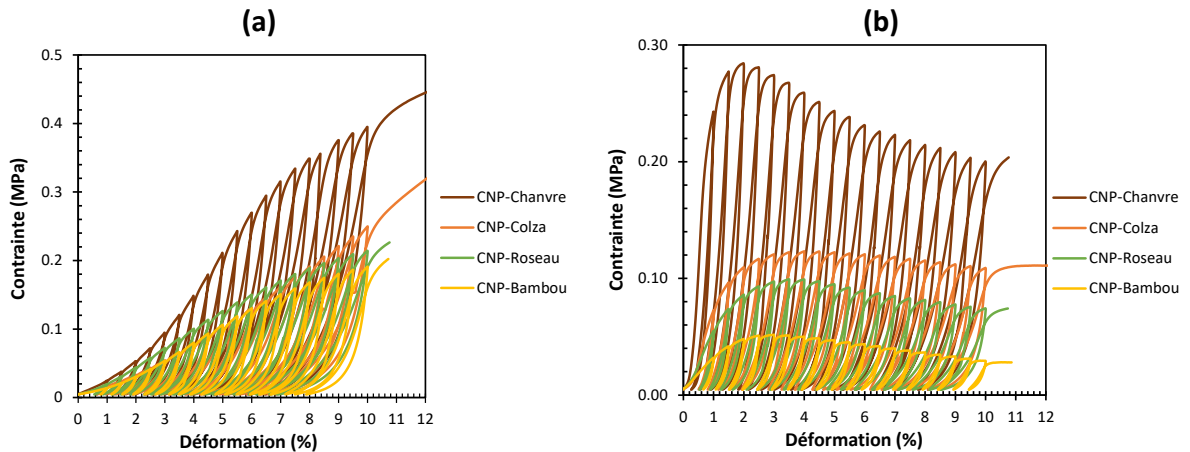
### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### A. Comportement mécanique du béton biosourcé

Les Figure 4.a et 4.b illustrent le comportement mécanique du béton biosourcé en fonction de l'orientation perpendiculaire et parallèle des biogranulats, respectivement. Le béton de chanvre s'est révélé être le plus performant dans les deux orientations. Cette supériorité est attribuée à la structure rigide du squelette des chènevottes par rapport aux autres bio-biogranulats. Il convient de souligner que les chènevottes possèdent la plus grande capacité de rétention d'eau, ce qui favorise une microstructure plus poreuse et entraîne ainsi une compressibilité accrue des biogranulats.

Pour les autres bétons biosourcés, une tendance similaire peut être observée entre les bétons à base de colza, de roseau et de bambou lorsque les biogranulats sont orientés perpendiculairement. Cependant, une forte disparité apparaît en orientation parallèle. Le béton de colza présente des propriétés mécaniques supérieures à celles des bétons de roseau et de bambou. Cette différence s'explique par la concentration des contraintes sur l'axe mineur des biogranulats et l'effondrement direct des lignes de joint (couches formées lors du processus de fabrication) entre les biogranulats. Le béton de colza a montré une performance mécanique supérieure grâce à la morphologie particulière de ses pailles. Leur aspect allongé leur permet de mieux se déformer, facilitant ainsi l'absorption des charges mécaniques. À l'inverse, le béton de bambou s'est révélé

être le plus faible dans les deux orientations, en raison de sa formulation spécifique, qui entraîne une liaison fragile entre la pâte de ciment naturel prompt (CNP) et les copeaux de bambou.



**Figure 4. Comportement mécanique du béton biosourcé en (a) : orientation perpendiculaire des biogranulats, (b) : orientation parallèle des biogranulats**

#### B. Propriétés mécaniques

Les Figure 5.a et 5.b illustrent l'évolution de la rigidité du béton biosourcé en fonction de l'orientation perpendiculaire et parallèle des biogranulats, respectivement. Les éprouvettes orientées perpendiculairement présentent une rigidification à des taux de déformation plus élevés par rapport aux éprouvettes orientées parallèlement. Ce comportement est en accord avec la réponse mécanique du béton biosourcé, où un durcissement par déformation est observé en orientation perpendiculaire des biogranulats (Figure 4.a), tandis qu'en orientation parallèle, la contrainte tend à diminuer dès les premières déformations (Figure 4.b). Cependant, les éprouvettes orientés parallèlement ont montré une rigidité plus élevée, le béton de chanvre atteignant 54 MPa dans cette configuration, contre 26 MPa en orientation perpendiculaire. Cette différence s'explique généralement par la plus grande rigidité des biogranulats dans leur direction longitudinale par rapport à leur direction latérale. Bien que les bétons de bambou, de roseau et de colza présentent une tendance mécanique similaire en orientation perpendiculaire des biogranulats, le béton de bambou affiche une rigidité plus élevée aux grandes déformations (6 %), suivi des bétons de roseau et de colza. En revanche, en orientation parallèle, le béton de colza s'est révélé plus robuste que ceux de roseau et de bambou. Cette contradiction peut être expliquée par deux hypothèses : d'une part, l'impact chimique limité des copeaux de bambou sur l'hydratation du ciment naturel prompt (CNP), favorisant ainsi une meilleure zone de transition interfaciale en orientation perpendiculaire des biogranulats ; et d'autre part, la grande taille des pailles de colza, leur permettant de se fléchir plutôt que de glisser à proximité des lignes de joint en orientation parallèle des biogranulats.

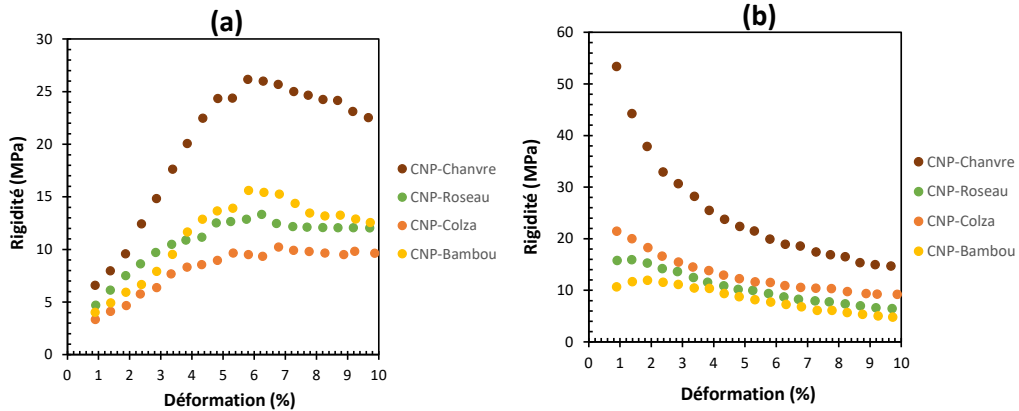


Figure 5. Évolution de la rigidité des différents bétons biosourcés (a) : orientation perpendiculaire des biogranulats, (b) : orientation parallèle des biogranulats

La Figure 6 présente un diagramme radar de la résistance à la compression (calculée à 5 % de déformation) et de la résistance de service (calculée au cycle où la rigidité maximale a été atteinte). En orientation perpendiculaire des biogranulats, on observe que la résistance de service est toujours supérieure à la résistance à la compression. En revanche, la résistance à la compression est plus élevée que la résistance de service en orientation parallèle des biogranulats, à l'exception du béton de bambou. Cela s'explique par une meilleure optimisation de l'agencement des biogranulats en orientation perpendiculaire, ce qui conduit à une résistance de service plus élevée, favorisée par une meilleure liaison entre les biogranulats et la pâte de ciment naturel prompt (CNP). Cependant, l'affinité entre les biogranulats et le ciment en orientation parallèle est faible en raison du glissement des particules et de la concentration des contraintes près des lignes de joint, ce qui explique les valeurs relativement plus faibles de la résistance de service par rapport à l'orientation perpendiculaire. L'exception du béton de bambou en orientation parallèle est en adéquation avec leur comportement mécanique, où la contrainte diminue proportionnellement entre 2 % (cycle de rigidité maximale) et 5 % de déformation. Ainsi, la résistance de service en orientation parallèle fait référence à l'affinité entre les biogranulats et la pâte de ciment plutôt qu'à la véritable résistance du matériau composite biosourcé. En suivant leur réponse mécanique, tant la résistance à la compression que la résistance de service étaient plus élevées en orientation perpendiculaire par rapport à l'orientation parallèle.

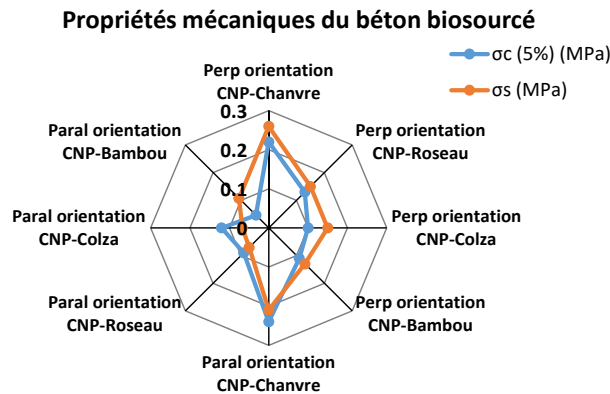
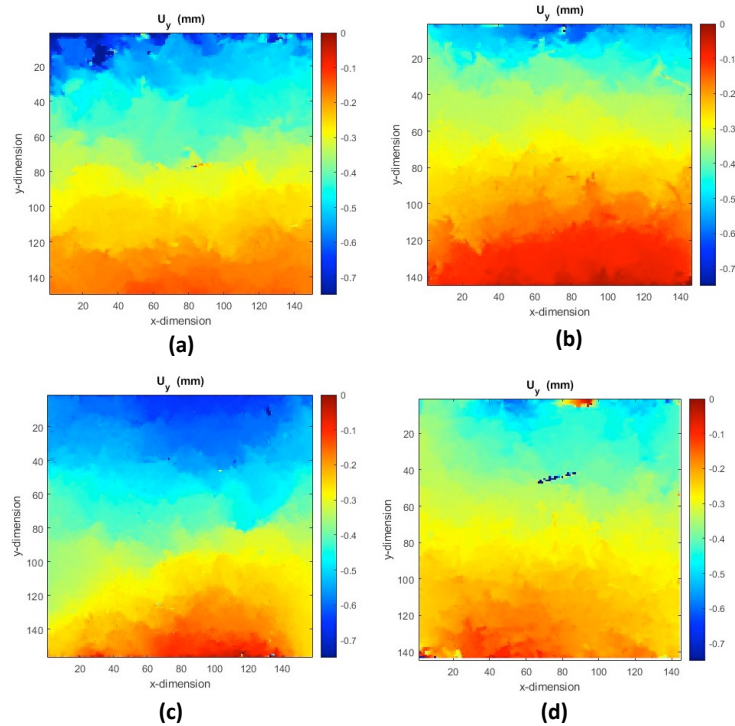


Figure 6. Résistances à la compression et de service du béton biosourcé

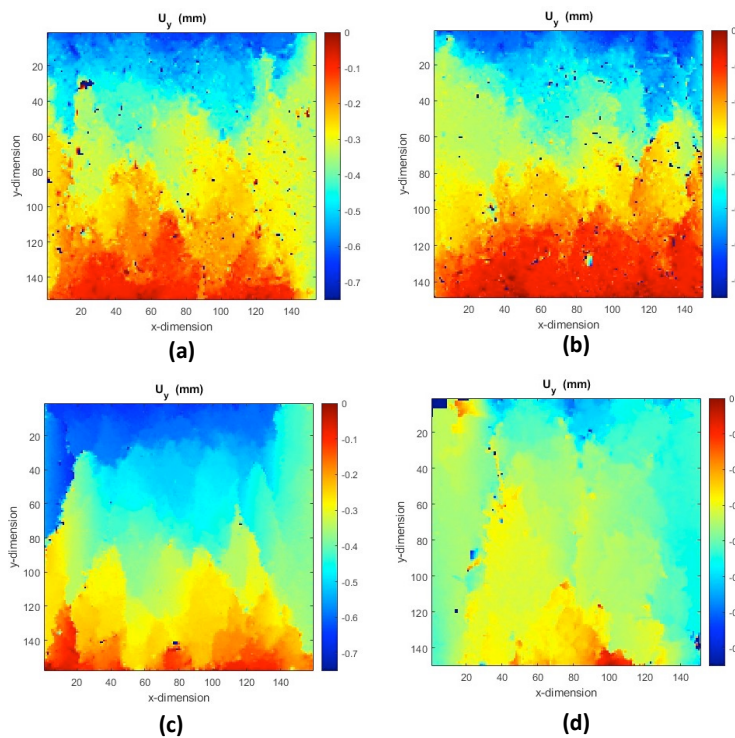
### C. Graphiques de cinématique CIN

Cette section se concentre sur la comparaison des courbes cinématiques CIN entre les différents éprouvettes de béton biosourcé pendant la phase d'endommagement, selon les deux orientations des biogranulats. Étant donné que le comportement d'endommagement des bétons biosourcés était plus prononcé dans les configurations à orientation parallèle, une déformation comprise entre 4 et 4,5 % a été prise en compte pour étudier le déplacement des éprouvettes par CIN. Dépasser cette plage de taux de déformation pour les biogranulats orientés parallèlement peut entraîner des vides importants dans l'identification des motifs lors de la corrélation. En revanche, les éprouvettes avec les biogranulats orientés perpendiculairement ont été évalués à un taux de déformation relativement plus élevé, compris entre 6 et 6,5 %. Les Figures 7 et 8 présentent les courbes de déplacement vertical des différents bétons biosourcés, respectivement en orientation perpendiculaire et parallèle des biogranulats.

On remarque un déplacement vertical plus homogène entre les bords des éprouvettes en orientation perpendiculaire des biogranulats. Cela est dû à l'optimisation de l'agencement des biogranulats qui contribue à la résistance mécanique, tandis que ces derniers subissent un glissement en orientation parallèle, ce qui entraîne des zones de concentration de contraintes autour des lignes de joint, comme on peut le voir sur le déplacement vertical des éprouvettes correspondants dans la Figure 8. Pendant leur phase de dégradation, les éprouvettes orientés parallèlement ont montré une relation directe entre la rigidité maximale et le faible déplacement vertical, et vice versa. Par exemple, dans une plage de déformation de 4 à 4,5 %, le béton de chanvre a montré le moins de déplacement (Figure 8.a), tout en étant le plus robuste (Figure 5.b). Cependant, le béton de bambou, qui a montré le plus grand déplacement (Figure 8.d), a présenté la rigidité la plus faible (Figure 5.b). Cette relation n'existe pas pour les éprouvettes orientés perpendiculairement en raison de la grande flexibilité des biogranulats le long de leur axe de longueur. En revanche, en orientation parallèle, ces biogranulats ont tendance à glisser le long de leur axe de largeur, ce qui entraîne un déplacement vertical accru. Cela conduit à un plus grand flambage des lignes de joint, entraînant finalement des propriétés mécaniques médiocres.



**Figure 7. Cartes de déplacement vertical du béton biosourcé testé en orientation perpendiculaire des biogranulats pendant les dommages à 6-6,5 % de déformation, (a) : béton de chanvre, (b) : béton de colza, (c) : béton de roseau, (d) : béton de bambou**



**Figure 8. Cartes de déplacement vertical du béton biosourcé testé en orientation parallèle des biogranulats pendant les dommages à 4-4,5 % de déformation, (a) : béton de chanvre, (b) : béton de colza, (c) : béton de roseau, (d) : béton de bambou**

#### IV. CONCLUSION

D'après le couplage entre l'analyse expérimentale et les courbes CIN, les points suivants peuvent être conclus dans cette étude :

- Le béton de chanvre a montré les meilleures performances mécaniques pour les deux orientations des biogranulats en raison de la structure du squelette des chènevottes et de leur haute compressibilité comparée à celle des autres biogranulats.
- Le béton de bambou a présenté une rigidité relativement élevée à haute déformation (6 %) pour l'orientation perpendiculaire des biogranulats, ce qui peut s'expliquer par l'impact chimique faible des copeaux de bambou sur les hydrates du CNP.
- La résistance de service était supérieure à la résistance à la compression en orientation perpendiculaire des biogranulats en raison de l'optimisation de l'agencement des biogranulats, ce qui a conduit à un meilleur collage.
- La résistance de service des éprouvettes orientées parallèlement fait référence à l'affinité entre les biogranulats et la pâte de CNP plutôt qu'à la véritable résistance du composite biosourcé.
- Un déplacement vertical plus homogène a pu être observé dans les éprouvettes orientées perpendiculairement, tandis que les éprouvettes orientées parallèlement ont subi des zones hétérogènes de concentration de contraintes dues au flambage des lignes de joint.
- Une relation directe a été observée entre la rigidité élevée et le faible déplacement vertical pour les éprouvettes orientées parallèlement.

#### V. REMERCIEMENTS

Les travaux de cette étude ont été financés par le projet ANR BIO-UP de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-21-CE22-0009).

#### REFERENCES

- Bardouh, R., Toussaint, E., Amziane, S., Marceau, S., 2024. Mechanical behavior of bio-based concrete under various loadings and factors affecting its mechanical properties at the composite scale: A state-of-the-art review. *Cleaner Engineering and Technology* 23, 100819. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100819>
- Bardouh, R., Toussaint, E., Amziane, S., Marceau, S., Martinhão, N., 2023. Towards Biobased Concretes with Tailored Mechanical Properties, in: Amziane, S., Merta, I., Page, J. (Eds.), *Bio-Based Building Materials*. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 100–108. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_9)
- Bejat, T., Piot, A., Jay, A., Bessette, L., 2015. Study of Two Hemp Concrete Walls in Real Weather Conditions. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 1605–1610. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.221>
- Bessette, L., Trémerie, B., Béjat, T., Piot, A., Jay, A., Davin, L.B., 2015. Study the development of mould on prompt natural cementbased hemp concrete. *Academic Journal of Civil Engineering* 33, 142–148. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.22>
- Chabannes, M., Becquart, F., Garcia-Diaz, E., Abriak, N.-E., Clerc, L., 2017. Experimental investigation of the shear behaviour of hemp and rice husk-based concretes using triaxial compression.

- Construction and Building Materials 143, 621–632.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.148>
- Cuynet, A., Toussaint, F., Roux, E., Scida, D., Ayad, R., 2016. Contribution of field measurements in the study of composites reinforced with flax fibers during quasi-static tensile tests, in: 1ère Conférence EuroMaghrébine des BioComposites. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.05417>
- Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., Kurek, B., 2015. Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites* 55, 112–121.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>
- le ciment naturel PROMPT en maçonnerie rapide [WWW Document],. URL <https://www.ciment-vicat.fr/Nos-Ciments/Les-ultra-performants/Ciment-naturel-PROMPT/Ciment-naturel-PROMPT-CNP-PM-NF-maçonnerie-rapide> (accessed 3.19.25).
- Niyigena, C., Amziane, S., Chateaneuf, A., 2019. Assessing the impact of calculation methods on the variability of Young's modulus for hemp concrete material. *Construction and Building Materials* 198, 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.174>
- Niyigena, C., Amziane, S., Chateaneuf, 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. *Materials Today Communications* 7, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>
- Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., De Baynast, H., 2012. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. *Cement and Concrete Composites* 34, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- Sellami, A., Merzoud, M., Amziane, S., 2013. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. *Construction and Building Materials* 47, 1117–1124.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>
- Technical specifications PROMPT NATURAL CEMENT, 2007,.
- Tronet, P., Lecompte, T., Picandet, V., Baley, C., 2016. Study of lime hemp concrete (LHC) – Mix design, casting process and mechanical behaviour. *Cement and Concrete Composites* 67, 60–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004>
- Véronique, C., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique.