

Effet des agrégats et des liants minéraux sur les propriétés mécaniques du béton biosourcé par la méthode CIN.

Rafik Bardouh

Clermont Auvergne INP, Institut Pascal UMR 6602 - UCA/CNRS, 63178 Aubière, France

RESUME Cet article évalue l'effet de 2 liants minéraux (CSA et CEM IV) et de 3 types de bio-agrégats (chanvre, colza et bambou) sur les propriétés mécaniques du béton biosourcé. Les résultats des tests mécaniques ont montré que les éprouvettes chargées parallèlement à l'axe des bio-agrégats étaient plus raides mais moins résistantes, à partir d'un taux de déformation précoce inférieur à 4 %. Indépendamment de la résistance mécanique commune des pâtes de ciment CSA et CEM IV seules, les éprouvettes biosourcées à base de CSA ont montré une performance mécanique très faible par rapport aux éprouvettes à base de CEM IV, mettant en évidence l'impact chimique défavorable des sucres sur les hydrates d'ettringite du ciment CSA. Le béton de chanvre a été le plus performant, tandis que le béton de bambou était le plus faible. Le béton de colza a été rigidifié jusqu'à des taux de déformation élevés en raison des longues pailles de colza, ce qui a amélioré sa flexibilité. Les graphiques cinématiques de la CIN ont montré que les éprouvettes orientées perpendiculairement se déplaçaient mieux verticalement pendant l'endommagement, ce qui a amélioré la dissipation d'énergie de ces configurations par rapport aux éprouvettes orientées parallèlement. Le béton de chanvre a été le plus uniforme en termes de déplacement vertical, tandis que le béton de bambou a été le plus souple.

Mots-clefs Résistance de service ; Béton biosourcé ; Module de Young (déterminé par méthode flottante) ; CIN

I. INTRODUCTION

Afin d'atteindre l'objectif fixé par l'Accord de Paris visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 50 % d'ici 2030 ("L'Accord de Paris | CCNUCC," n.d.), l'utilisation de matériaux de construction biosourcés s'accroît naturellement pour diminuer l'empreinte carbone (Mazhoud et al., 2017). Ces matériaux présentent des propriétés hygrothermiques très intéressantes (Bakkour et al., 2024) mais souffrent d'un inconvénient majeur : leurs faibles performances mécaniques (Niyigena et al., 2016). Ces performances dépendent fortement de divers facteurs à différentes échelles, notamment au niveau composite et microscopique (Bardouh et al., 2024a).

Le béton biosourcé, notamment le béton de chanvre a été utilisé pour divers applications à condition de respecter des seuils mécaniques : murs ($\geq 0,2$ MPa, 15 MPa), toitures ($\geq 0,05$ MPa, 3 MPa)

et planchers ($\geq 0,3$ MPa, 15 MPa), pour la résistance à la compression et le module d'élasticité respectivement (Bardouh et al., 2024a). Cependant, en remplaçant le béton biosourcé dans une perspective comparative avec les matériaux à base de terre renforcés par des fibres naturelles, ces derniers se distinguent par des performances mécaniques nettement supérieures, avec une résistance à la compression de 2,73 MPa et un module d'élasticité atteignant 141 MPa (Koutous and Hilali, 2021). Ces résultats s'expliquent principalement par leur densité sèche, environ quatre fois plus élevée que celle du béton biosourcé.

En effet, les propriétés mécaniques du béton biosourcé sont influencées par celles des liants minéraux (Arnaud and Gourlay, 2012) et des granulats végétaux utilisés (Brouard et al., 2018). Les sucres présents dans ces granulats induisent une zone de transition interfaciale creuse autour de l'agrégat, perturbant et retardant la prise du ciment (Delhomme et al., 2022). À cet égard, (Cokely et al., 2024) ont démontré que même une faible proportion massique de 2 % de bio-agrégats broyés a un impact significatif sur la cinétique d'hydratation du ciment. Cette observation met en lumière leur influence potentielle sur les performances du béton biosourcé lorsqu'ils sont incorporés à hauteur de 20 % à l'échelle composite.

Un autre facteur majeur de variabilité des propriétés mécaniques du béton biosourcé à l'échelle composite est l'orientation des particules. Plus précisément, les granulats orientés perpendiculairement à la direction de coulage présentent un comportement mécanique nettement différent de ceux alignés parallèlement (Nozahic et al., 2012).

Par ailleurs, la corrélation d'images numériques (CIN) s'est imposée comme une technique fiable pour analyser la déformation aux échelles inter- et intra-granulaire, grâce à son indépendance vis-à-vis des dimensions physiques exactes du matériau (Dave et al., 2009). Des études récentes menées par (Bardouh et al., 2023) ont appliqué cette technique à l'étude des propriétés mécaniques du béton de chanvre, soulignant son efficacité dans l'analyse des champs de déformation localisés. Leur travail met en évidence la nature hétérogène du comportement mécanique du béton de chanvre, observée grâce à la cartographie spatialisée des déformations obtenue par la CIN.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Matériaux

A.1 Liants minéraux

Cette étude a utilisé deux liants minéraux fournis par VICAT : un ciment pouzzolanique CEM IV (NATURAT CEM IV/A (P) 42.5 N CE NF) et un ciment sulfoalumineux à faible alcalinité (CSA). Le liant CSA, composé de 82 % de clinker et 18 % d'anhydrite ("ALPENAT," 2025). La résistance à la compression des deux liants est présentée dans le Tableau 1. Ces valeurs ont été obtenues à partir d'éprouvettes de mortier de $4 \times 4 \times 16$ cm³, préparées et testées conformément à la norme française ("NF EN 196-1," 2016). Une différence majeure entre ces ciments réside dans leurs produits d'hydratation : le ciment CSA forme principalement de l'ettringite ($C_6A\check{S}_3H_{32}$) (Équation 1), tandis que le CEM IV/A génère des phases classiques de silicate de calcium hydraté (C-S-H).

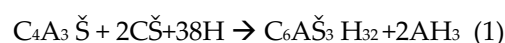


Tableau 1. Résistance à la compression des deux liants minéraux à différents temps de cure.

Résistance à la compression (MPa)	1J	2J	7J	28 J
CEM IV	18,53±0,74	29,20±2,78	41,20±2,62	58,20±2,29
CSA	9,48±0,53	13,25±1,37	31,70±2,19	60,32±3,01

A.2 Agrégats végétaux

Cette étude a intégré trois bio-agrégats, identifiés par leur nomenclature scientifique : chènevotte (*Cannabis sativa*), bambou (*Bambusa vulgaris*) et colza (*Brassica napus*). Ces agrégats ont été soumis à une caractérisation physico-chimique conformément à la méthodologie standardisée de la RILEM TC 236-BBM (Amziane et al., 2017). Les propriétés physiques des agrégats, notamment la densité apparente et la capacité d'absorption d'eau, ont été évaluées de manière systématique dans cette section.

Le bambou présente une masse volumique relativement plus élevée que le chanvre et le colza, comme indiqué dans le Tableau 2. Cependant, le bambou s'est avéré le moins absorbant en eau, ce qui justifie sa formulation spécifique lors du processus de fabrication. À l'inverse, la chènevotte a affiché la plus forte capacité d'absorption, avec un taux de diffusion de 0,84.

Tableau 2. Propriétés physiques des différents bio-agrégats.

Propriétés		Chanvre	Bambou	Colza
ρ (kg/m ³)	Avant séchage	107 ± 4	305 ± 10	99 ± 6
	Après séchage	112 ± 5	304 ± 7	89 ± 7
Absorption d'eau	Teneur en eau initiale	1,65	0,37	2,68
	Taux de diffusion (k)	0,84	0,07	0,39
Taille moyenne	Longueur (mm)	8	5	10
	Largeur (mm)	5	5	9

B. Méthodes

B.1 Préparation des éprouvettes de béton biosourcé

Indépendamment du type de liant, la composition des formulations de béton biosourcé a été adaptée en fonction de l'agrégat utilisé. Quatre mélanges distincts ont été développés avec les rapports massiques suivants (Agrégat:Liant:Eau) : béton de chanvre (1:2:2), béton de bambou (1:0.6:0.6), et béton de colza (1:2:2). Les formulations de béton biosourcé ont été conçues en maintenant un rapport Eau/Liant (E/L) constant de 0,5 pour la pâte de ciment. Pour cela, la moitié de l'eau pesée a été dédiée à l'hydratation de la pâte de ciment, alors que l'autre moitié a servi à l'humidification préalable des granulats. Cette méthode de préparation garantit une maniabilité homogène entre les différents échantillons de béton biosourcé.

Il est à noter que les bétons à base de chanvre et de colza ont été formulés de manière identique, ces 2 types de bio-agrégats partagent des proportions identiques, tandis que le béton de bambou

nécessite une réduction du liant et de l'eau par rapport à la masse d'agrégat. La formulation du béton à base de bambou se différencie de celles des autres bétons biosourcés en raison de la faible capacité d'absorption d'eau du bambou, comme le montre le Tableau 2.

Les éprouvettes biosourcées ont été moulées dans des cubes de 15 cm de côté. Les étapes de préparation ont été détaillées dans une étude précédente (Bardouh et al., 2023). Les éprouvettes ont été fabriquées en 3 couches successives du mélange préparé, selon chaque configuration. Les interfaces entre ces couches, ou les lignes de joint, constituent des zones de concentration des déformations, comme établi dans l'analyse des résultats. Pour chaque couple liant/agrégat, quatre éprouvettes ont été fabriquées : deux ont été testées avec une orientation des agrégats perpendiculaire à la direction de compactage, et deux avec une orientation parallèle. Après démoulage (Figure 1), les éprouvettes ont été placées dans une chambre conditionnée à 20 °C et 50 % HR pendant un an afin de suivre toute variation de densité à long terme. Il convient de préciser qu'une éprouvette orientée parallèlement correspond à une rotation de 90° après démoulage, les particules étant naturellement orientées perpendiculairement à la direction de compactage lors du moulage.

Tableau 3. Masse volumique des éprouvettes biosourcées à l'état frais et sec

Masse volumique (kg/m ³)	Eprouvettes à base de CEMIV				Eprouvettes à base de CSA			
	Etat frais		Etat sec		Etat frais		Etat sec	
	Moy	CV (%)	Moy	CV (%)	Moy	CV (%)	Moy	CV (%)
Béton de chanvre	564	0.08	356	0.13	551	0.12	335	1.33
Béton de bambou	621	0.24	425	0.72	647	0.04	437	0.44
Béton de colza	575	0.17	359	0.08	576	0.11	359	0.66



Figure 1. Béton biosourcé démoulé

B.2 Configuration du test de compression cyclique et installation de la CIN

Les éprouvettes de béton biosourcé ont été soumises à des essais de compression cyclique à l'aide d'une machine Zwick Roelle (capacité de 250 kN) afin d'évaluer leur réponse mécanique. L'application de la charge a été enregistrée à une fréquence d'acquisition de 10 Hz. Le protocole comprenait 19 cycles de chargement-déchargement, avec une augmentation progressive de la déformation globale de 1 % à 10 % par incréments de 0,5 %, suivie d'un chargement continu jusqu'à la rupture. Les vitesses de test ont été fixées à 3 mm/min pour le chargement et 10 mm/min pour le

déchargement, le logiciel Zwick arrêtant l'essai après une chute de 80 % de la charge maximale (Figure 2). Afin de minimiser les irrégularités de surface influençant les résultats, des plaques en bois ont été insérées entre la machine et les éprouvettes, garantissant un contact homogène, un facteur essentiel pour une caractérisation mécanique précise (Cérézo, 2005).

La corrélation d'images numériques (CIN) en 2D a été employée pour mesurer de manière non invasive la déformation des surfaces des éprouvettes biosourcées. Le dispositif expérimental (Figure 2) comprenait une caméra PCO 2000 (2048×2048 pixels, objectif de 105 mm) et un éclairage LED, alignés sur le centre de gravité des éprouvettes. Les images ont été capturées à une fréquence d'une image par seconde via le logiciel Camware64, synchronisé avec la machine d'essai Zwick grâce à une boîte d'acquisition et le logiciel Catman. Les champs de déplacement et de déformation ont été calculés à l'aide du logiciel SeptD (Cuynet et al., 2019), qui analyse la distribution des niveaux de gris selon un critère de corrélation normalisée avec interpolation bilinéaire. Les principaux paramètres—taille de sous-ensemble et pas—ont été fixés à 10 pixels chacun, définissant ainsi la taille de la grille et l'analyse du motif.



Figure 2. Configuration de compression cyclique et installation de la CIN

B.3 Méthodologie de computation des propriétés mécaniques

Deux paramètres mécaniques ont été évalués dans cette étude : le module d'élasticité (E) et la résistance de service (σ_s). La méthodologie d'évaluation de ces paramètres est illustrée à la Figure 3. Le module d'élasticité correspond à la pente calculée lors de la phase de rechargement de chaque cycle, avec une différence de déformation de 0,1 %, comme indiqué par les lignes rouges dans la Figure 3. Son évaluation a suivi la technique flottante décrite par (Niyigena et al., 2019), permettant d'optimiser le module maximal à un taux de déformation spécifique au cours de la phase de rechargement. Le module d'élasticité a été déterminé dans la phase de rechargement plutôt que dans celle de déchargement, cette dernière correspondant à un état de relaxation du matériau, au cours duquel le plateau supérieur de la machine n'est plus en contact direct avec l'éprouvette, et aucune charge effective n'est appliquée.

La résistance de service représente la contrainte mécanique de la courbe enveloppe au cycle où le module calculé atteint sa valeur maximale, en tenant compte du fait que l'essai de compression cyclique a engendré 19 cycles de chargement-déchargement. La résistance de service n'a pas été définie comme le maximum de la courbe contrainte-déformation pour deux raisons principales. Premièrement, les éprouvettes dont les particules sont orientées perpendiculairement à la direction de compactage ne présentent pas de pic de contrainte : la contrainte augmente de manière continue

jusqu'à la fin de l'essai, rendant toute comparaison directe avec les éprouvettes orientées parallèlement non pertinente. Deuxièmement, au maximum de contrainte — atteint en fin d'essai — le matériau est fortement endommagé, ce qui engendre une variabilité importante des valeurs de résistance mesurées.

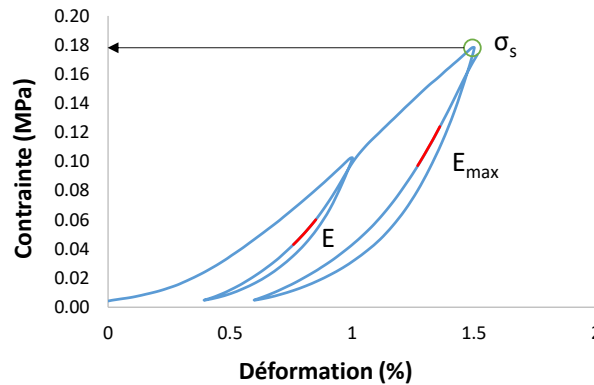


Figure 3. Méthodologie d'évaluation des paramètres mécaniques

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Comportement mécanique du béton biosourcé

A.1 Éprouvettes à base de CEM IV

La Figure 4 montre le comportement mécanique des éprouvettes de béton biosourcé avec une orientation perpendiculaire des agrégats (a), et une orientation parallèle (b). La réponse mécanique en orientation perpendiculaire a été décrite par un durcissement sous contrainte après chaque cycle, également appelé densification dans la littérature (Walker et al., 2014), tandis que les éprouvettes orientées parallèlement ont montré une diminution continue de la contrainte, à partir d'une déformation précoce de 2,5 % pour les bétons de chanvre et de bambou, et de 4 % pour le béton de colza. Cet aspect distinct entre les deux orientations est dû au glissement et à la faible capacité de résilience des particules pour supporter la charge mécanique sur leur axe mineur par rapport à l'axe principal. En effet, les particules orientées parallèlement à la direction de compaction sont plus vulnérables à l'endommagement, car la charge mécanique entre en contact direct avec les lignes de joint définies lors du processus de fabrication. Dans les deux orientations des agrégats, le béton de chanvre a été le plus performant, tandis que le béton de bambou était le plus faible. Il convient de mentionner que la formulation du béton de bambou était unique en raison de l'absorption d'eau des agrégats, ce qui a entraîné une teneur en liant plus faible, provoquant ainsi une faible affinité entre les particules et la pâte de ciment. La structure de squelette de la chènevotte, ainsi que ses propriétés physiques, ont joué un rôle majeur dans la performance mécanique du composite.

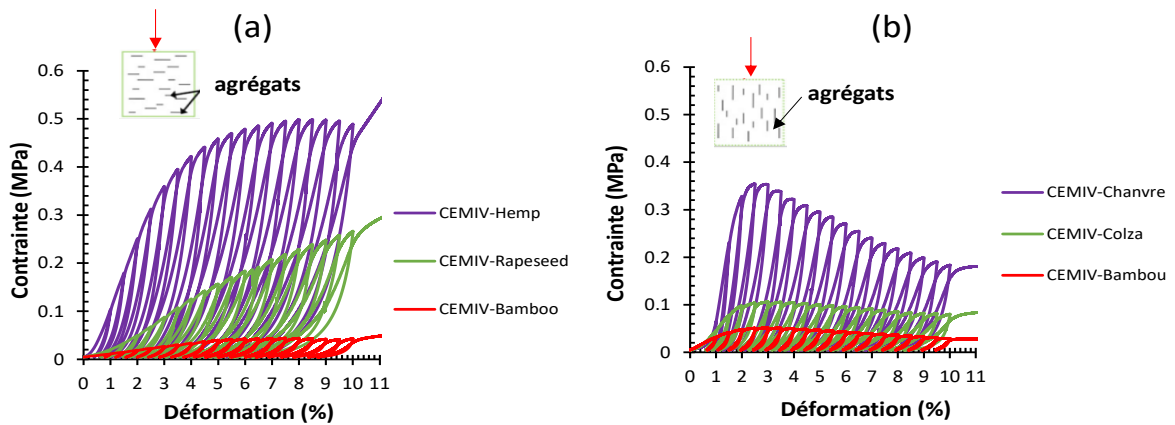


Figure 4. Comportement mécanique des éprouvettes à base de CEM IV
(a) : orientation perpendiculaire, (b) : orientation parallèle

A.2 Éprouvettes à base de CSA

La même tendance mécanique a été remarquée pour les éprouvettes à base de CSA en ce qui concerne l'orientation des agrégats (Figure 5). Le béton de bambou a toujours été le moins performant dans toutes les configurations. Cependant, une réponse distincte du béton de colza en orientation parallèle des agrégats peut être observée, où la contrainte continue d'augmenter jusqu'à un taux de déformation élevé (7 %). Cela peut être expliqué par la flexibilité des pailles de colza sur leur axe transversale (largeur), celles-ci étant les plus grosses particules parmi l'ensemble des bio-particules utilisées (voir tableau 2), et ce, indépendamment de l'orientation parallèle. En comparant les pâtes de ciment seules, leur résistance à la compression était presque identique après 28 jours (voir Tableau 1). Cependant, lorsqu'elles sont mélangées avec des bio-agrégats, une énorme différence peut être observée entre les deux composites, où les éprouvettes à base de CSA ont montré des performances mécaniques très faibles. Une hypothèse peut expliquer cette observation : la teneur en sucres solubles des bio-agrégats entraîne un retard plus prononcé du mécanisme d'hydratation de l'ettringite par rapport aux hydrates de silicate de calcium (Bardouh et al., 2024b).

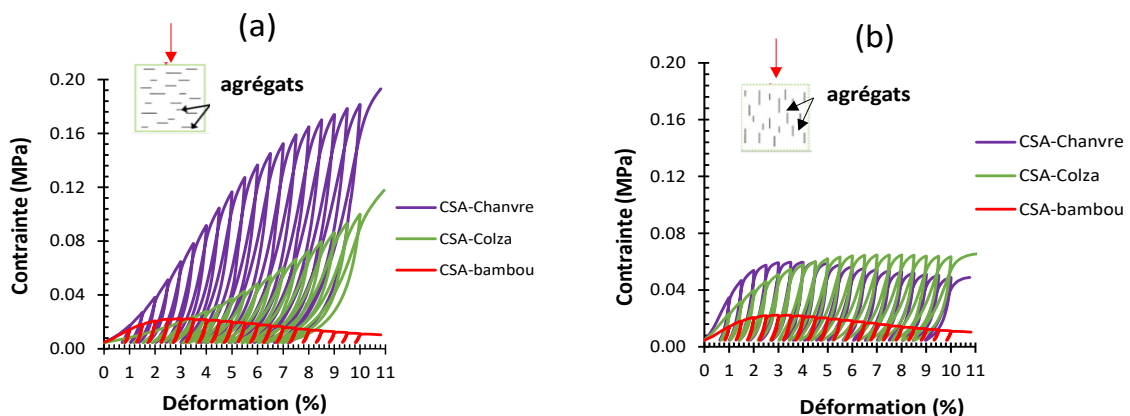


Figure 5. Comportement mécanique des éprouvettes à base de CSA
(a) : orientation perpendiculaire, (b) : orientation parallèle

B. Propriétés mécaniques du béton biosourcé

B.1 Module de Young

La Figure 6 montre les valeurs du module maximal en fonction du taux de déformation auquel elles ont été calculées pour (a) : éprouvette à base de CEM IV, (b) : éprouvette à base de CSA. Indépendamment du type de liant minéral, les éprouvettes orientées parallèlement ont toujours été plus rigides que celles orientées perpendiculairement. En raison de leur réponse mécanique, les éprouvettes orientées parallèlement ont atteint leur rigidité maximale à un taux de déformation plus faible avant d'entrer dans la phase de d'endommagement (voir Figures 4.b et 5.b). Cependant, le béton de bambou a présenté une rigidité maximale presque identique entre les deux orientations des agrégats. Cela est dû à la morphologie du bambou où leur largeur et leur hauteur étaient presque identiques, ce qui atténue l'effet de l'orientation des agrégats sur les propriétés mécaniques de leur composite. Il peut être noté que le béton de colza en orientation perpendiculaire a atteint son module maximal à des taux de déformation relativement plus élevés (8,3 % et 9,7 % pour CEM IV-colza et CSA-colza, respectivement). Cela est dû au plus grand élanement des pailles de colza, augmentant leur flexibilité pour maintenir la charge mécanique.

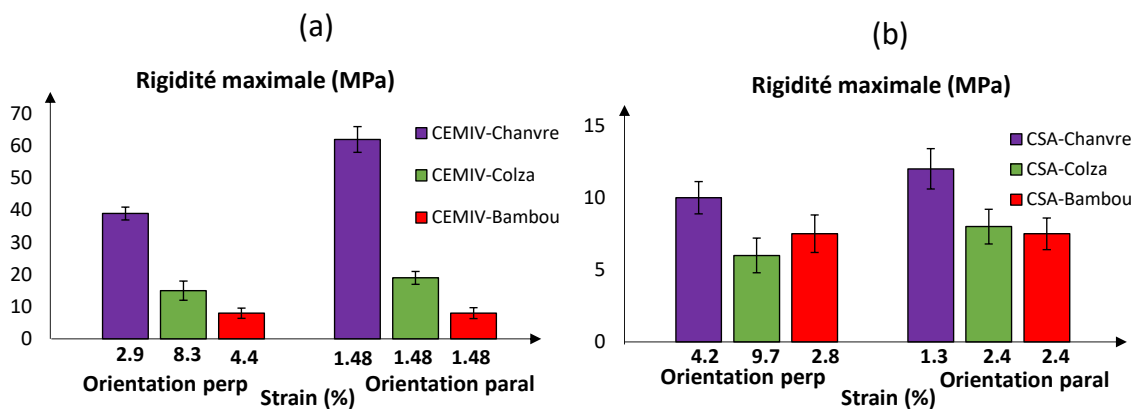


Figure 6. Module maximal dans différentes orientations des agrégats pour (a) : éprouvettes à base de CEM IV, (b) : éprouvettes à base de CSA

B.2 Résistance de service

La résistance en service σ_s est un paramètre important pour déterminer la résistance mécanique du béton biosourcé à sa performance mécanique ultime, permettant de réduire l'incertitude dans le calcul de la résistance à la compression, en particulier pour les éprouvettes orientées perpendiculairement. L'incertitude observée provient de la variabilité des protocoles utilisés pour la détermination de la résistance à la compression des bétons biosourcés, soumis à différents niveaux de déformation (1,5 %, 5 %, 7,5 %) (Tronet et al., 2016). Cette variabilité méthodologique est renforcée par le caractère pseudo-ductile du comportement mécanique de ces matériaux en orientation perpendiculaire, se traduisant par une courbe contrainte-déformation sans pic clairement identifiable, rendant difficile la définition d'une résistance maximale univoque (Bardouh et al., 2024a).

σ_s était plus élevé pour les éprouvettes orientées perpendiculairement par rapport à celles orientées parallèlement, quel que soit le type de liant. Cela est dû à la disposition plane des particules en cas d'orientation perpendiculaire, ce qui a conduit à une contrainte de compression uniaxiale quasi pure. Cependant, la charge de compression cyclique appliquée sur les lignes de joint (2 couches lors

du processus de fabrication) dans le cas de l'orientation parallèle a conduit à un effet de flambage à proximité de ces couches, entraînant la séparation des particules entre les couches. En effet, la résistance en service des éprouvettes orientées parallèlement représente l'affinité entre les agrégats et la pâte de ciment plutôt que la véritable résistance du composite (Bardouh et al., 2024b). Les éprouvettes à base de CEM IV ont montré une résistance en service supérieure à celle des éprouvettes à base de CSA. De manière similaire à la rigidité maximale, le béton de chanvre était le plus résistant et le béton de bambou le moins résistant.

Contrainte de service σ_s

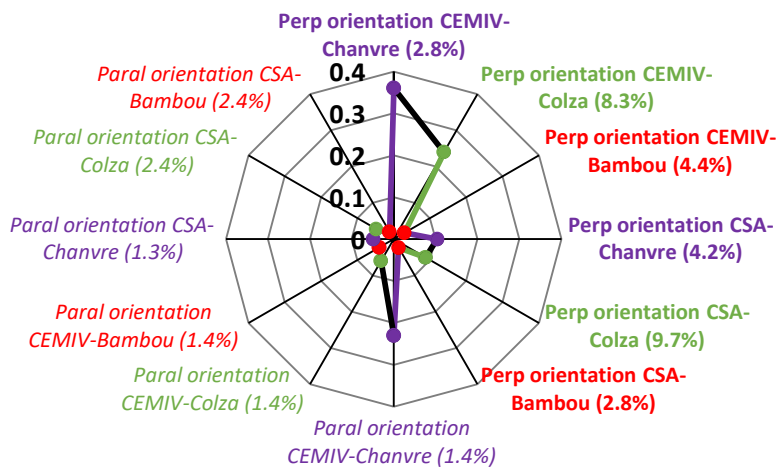


Figure 7. Résistance de service des différents éprouvettes biosourcées

B.3 Graphiques cinématiques de la CIN

Afin d'optimiser la performance mécanique du béton biosourcé, et étant donné que les éprouvettes à base de CEM IV ont montré une meilleure performance mécanique, cette section se concentre sur l'évaluation des graphiques cinématiques uniquement pour les éprouvettes à base de CEM IV.

Les graphiques de la CIN ont été réalisés sur les éprouvettes à base de CEM IV pendant la phase d'endommagement entre 0 % et 5,24 % de déformation pour toutes les éprouvettes. L'objectif était de normaliser le taux de déformation pour les deux orientations, tout en faisant varier la contrainte appliquée. Depuis les courbes mécaniques de Figure 4, les cartes de déplacement du béton biosourcé pendant la phase d'endommagement en orientation perpendiculaire ont été calculées entre les niveaux de contrainte de 0 MPa à 0,36 MPa (béton de chanvre), de 0 MPa à 0,14 MPa (béton de colza), et de 0 MPa à 0,03 MPa (béton de bambou). Cependant, les mêmes cartes de déplacement pendant l'endommagement pour les éprouvettes orientées parallèlement ont été évaluées dans les niveaux de contrainte de 0 MPa à 0,21 MPa (béton de chanvre), de 0 MPa à 0,08 MPa (béton de colza), et de 0 MPa à 0,02 MPa (béton de bambou). Le béton de chanvre a montré un déplacement uniforme dans les deux orientations des agrégats entre les zones d'interfaces des lignes de joints (Figures 8.a et 9.a), ce qui explique la dissipation uniforme de l'énergie au sein de son composite, contribuant efficacement à sa performance mécanique. D'ailleurs, le béton de chanvre en orientation perpendiculaire était le moins déformé par rapport aux autres configurations comme le montre la carte de déformation longitudinale (Figure 8.a). Le béton de colza en orientation

perpendiculaire (Figure 8.b) a montré le moins de déplacement parmi sa structure en raison de la rigidification prononcée de ce type de béton biosourcé, limitant ainsi son déplacement vertical. Cependant, le béton de bambou a subi le plus grand déplacement vertical dans les deux orientations des agrégats, avec un déplacement hétérogène prononcé en orientation parallèle (Figures 8.c et 9.c). Cela est en ligne avec la faible performance du béton de bambou soumis à la charge mécanique, ce qui a entraîné un plus grand déplacement dans sa microstructure par rapport aux autres bétons biosourcés. De ce fait, une corrélation inverse est observée entre l'intensité des déformations subies par le matériau et ses performances mécaniques. Les zones de concentration de déformation, matérialisées par des lignes bleu foncé sur les cartes de déformations et généralement localisées au niveau des interfaces inter-couches (lignes de joints), indiquent que plus ces concentrations sont marquées, plus la performance mécanique du matériau est compromise.

Pour le même taux de déformation (5.24%), les configurations parallèles (Figure 9) présentent une hétérogénéité plus marquée, malgré un niveau de contrainte globalement inférieur à celui observé pour les configurations perpendiculaires (Figure 8). Ce comportement s'explique par l'effondrement direct des lignes de joints, induisant un phénomène de flambage latéral au sein des éprouvettes.

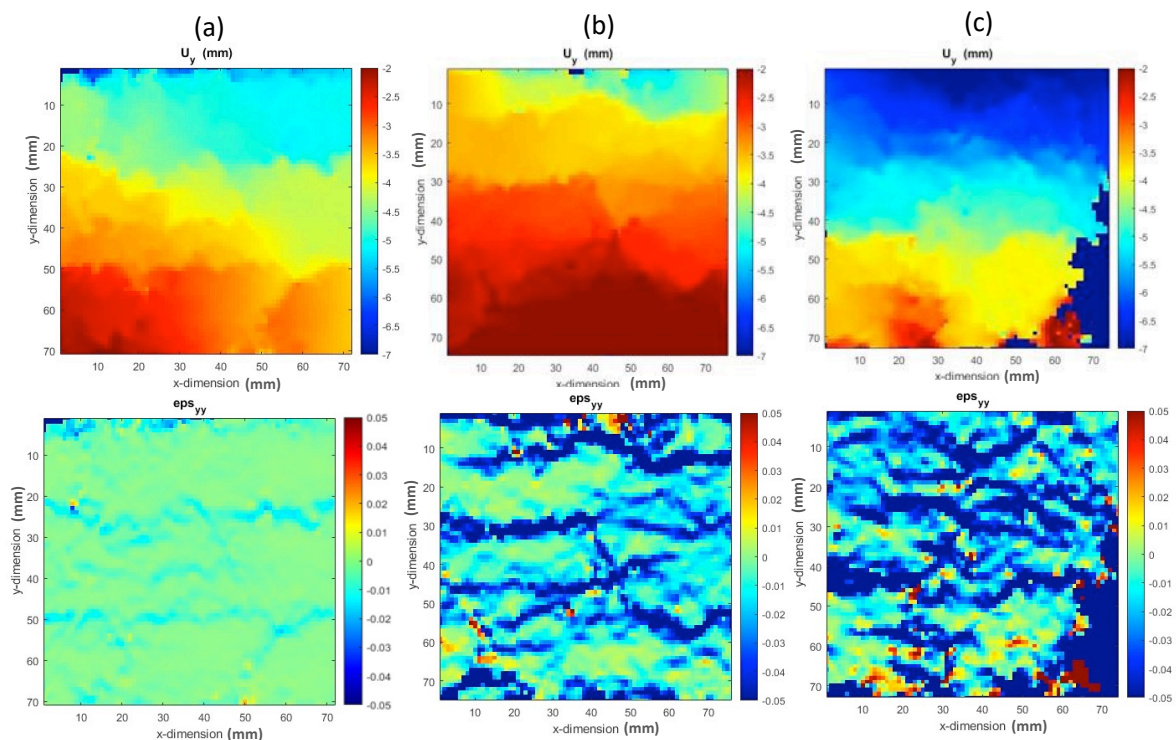


Figure 8. Graphiques de déplacement vertical (en haut) et de déformation longitudinale (en bas) pendant l'endommagement pour les éprouvettes testées avec une orientation perpendiculaire des agrégats, (a) : CEM IV-Chanvre, (b) : CEM IV-Colza, (c) : CEM IV-Bambou

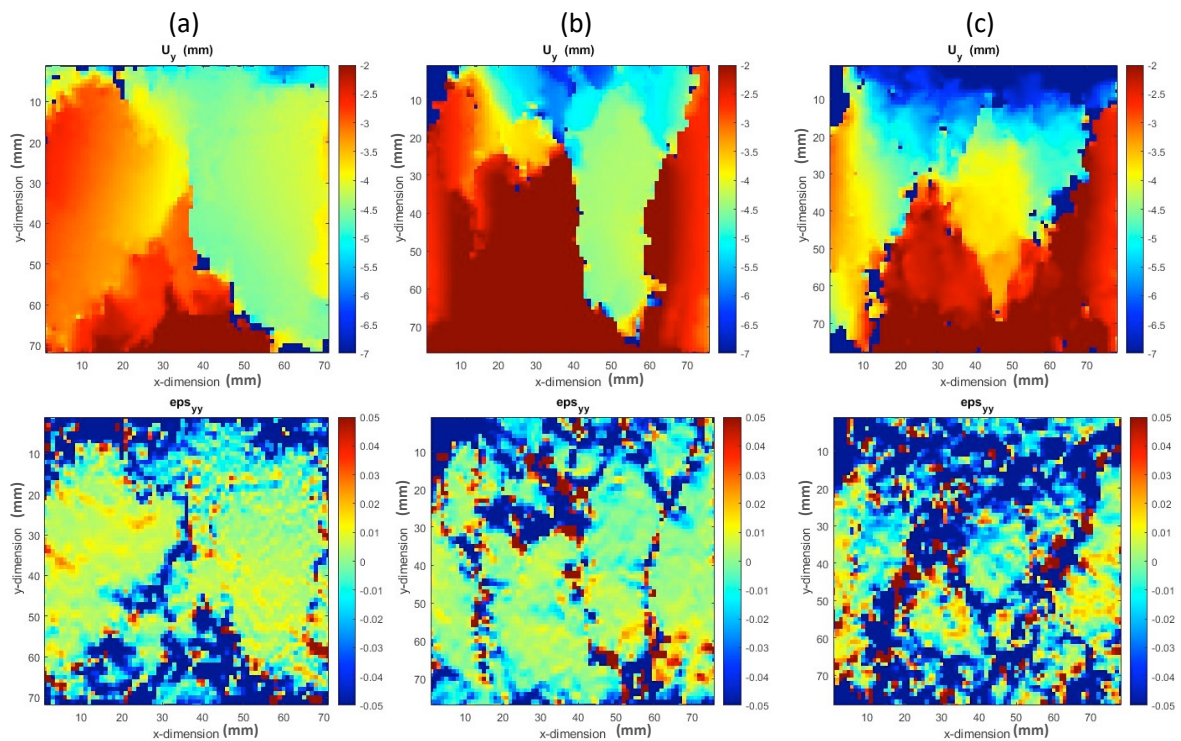


Figure 9. Graphiques de déplacement vertical (en haut) et de déformation longitudinale (en bas) pendant l'endommagement pour les éprouvettes testées avec une orientation parallèle des agrégats, (a) : CEM IV-Chanvre, (b) : CEM IV-Colza, (c) : CEM IV-Bambou

IV. CONCLUSION

Sur la base de la corrélation entre les résultats expérimentaux et les graphiques de la CIN de cette étude, les points suivants peuvent être conclus :

- Les éprouvettes à base de CEM IV ont montré de meilleures performances mécaniques que les éprouvettes à base de CSA, en raison de l'effet chimique prononcé des sucres solubles sur l'ettringite par rapport aux hydrates de silicate de calcium.
- Les éprouvettes orientées perpendiculairement ont montré un durcissement sous contrainte en raison de l'optimisation de l'enrobage des particules et du durcissement du liant, tandis que les éprouvettes orientées parallèlement ont démontré un effet de flambage entre les couches suivi d'un effondrement en traction du liant.
- Les éprouvettes orientées parallèlement ont montré une rigidité plus élevée à un taux de déformation plus faible.
- La résistance de service représente l'affinité entre les particules et el liant pour les éprouvettes orientées parallèlement, plutôt que la véritable résistance du composite biosourcé dans le cas de l'orientation perpendiculaire.
- Une forte concentration de déformation au niveau des interfaces entre les couches est corrélée à une faiblesse des performances mécaniques du béton biosourcé.

- Pour le même taux de déformation, les configurations parallèles présentent une hétérogénéité plus intense malgré le niveau faible de contrainte appliquée sur ces configurations par rapport aux configurations perpendiculaires.

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

- ALPENAT [WWW Document], 2025. URL <https://www.ciment-viceat.fr/Nos-Ciments/Les-ultra-performants/ALPENAT-UP/ALPENAT> (accessed 5.14.25).
- 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>
- Arnaud, L., Gourlay, E., 2012. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Constr. Build. Mater.* 28, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- Bakkour, A., Ouldboukhitine, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2024. A review of multi-scale hygrothermal characteristics of plant-based building materials. *Constr. Build. Mater.* 412, 134850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134850>
- Bardouh, R., Toussaint, E., Amziane, S., Marceau, S., 2024a. 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. *Clean. Eng. Technol.* 23, 100819. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100819>
- Bardouh, R., Toussaint, E., Amziane, S., Marceau, S., Berger Cokely, A.L., 2024b. Study of the mechanical behavior of hemp concrete with two different mineral binders through digital image correlation in various aggregate orientations, in: *RILEM Conference on Sustainable Materials & Structures: Meeting the Major Challenges of the 21st Century - SMS 2024*. Toulouse, France.
- 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
- Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Ranganathan, N., Méo, S., 2018. Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Constr. Build. Mater.* 161, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>
- Cérézo, V., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique (These de doctorat). Lyon, INSA.
- Cokely, A.L.B., Bardouh, R., Amziane, S., Toussaint, E., Mouille, G., Bourchy, A., Farcas, F., Marceau, S., 2024. Influence des bioressources sur l'hydratation des liants minéraux et la résistance à la compression des bétons végétaux. *Acad. J. Civ. Eng.* 42, 78–86. <https://doi.org/10.26168/ajce.42.1.7>
- Cuynet, A., Toussaint, F., Roux, E., Scida, D., Ayad, R., 2019. Contribution of field measurements in the study of composites reinforced with flax fibers during quasi-static tensile tests. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.05417>
- Dave, S., Song, X., Hofmann, F., Dragnevski, K., Korsunsky, A.M., 2009. Digital image correlation and finite element analysis of inter- and intra-granular deformation. *Procedia Eng., Mesomechanics* 2009 1, 197–200. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2009.06.046>

- Delhomme, F., Prud'homme, E., Julliot, C., Guillot, T., Amziane, S., Marceau, S., 2022. Effect of hemp on cement hydration: Experimental characterization of the interfacial transition zone. *Results Chem.* 4, 100440. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100440>
- Koutous, A., Hilali, E., 2021. Reinforcing rammed earth with plant fibers: A case study. *Case Stud. Constr. Mater.* 14, e00514. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00514>
- L'Accord de Paris | CCNUCC [WWW Document], n.d. URL <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris> (accessed 1.29.25).
- Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., Lanos, C., 2017. Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. *Constr. Build. Mater.* 155, 1126–1137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.121>
- NF EN 196-1 [WWW Document], 2016. . Afnor Ed. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-196-1/methodes-dessais-des-ciments-partie-1-determination-des-resistances/fa184622/57803> (accessed 1.29.25).
- Niyigena, C., Amziane, S., Chateauneuf, A., 2019. Assessing the impact of calculation methods on the variability of Young's modulus for hemp concrete material. *Constr. Build. Mater.* 198, 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.174>
- 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>
- 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. *Cem. Concr. Compos.* 34, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- Tronet, P., Lecompte, T., Picandet, V., Baley, C., 2016. Study of lime hemp concrete (LHC) – Mix design, casting process and mechanical behaviour. *Cem. Concr. Compos.* 67, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004>
- Walker, R., Pavia, S., Mitchell, R., 2014. Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Constr. Build. Mater.* 61, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>