

Influence des bioressources sur l'hydratation des liants minéraux et la résistance à la compression des bétons végétaux

Ana Laura Berger Cokely¹, Rafik Bardouh², Sofiane Amziane², Evelyne Toussaint², Grégory Mouille³, Agathe Bourchy¹, Fabienne Farcas¹ and Sandrine Marceau¹

¹ Univ Gustave Eiffel, MAST-CPDM, F-77454 Marne-la-Vallée, France

² Université Clermont Auvergne, UMR 6602 CNRS, Institut Pascal, 63178 Aubière, France

³ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, IJPB, 78000 Versailles, France

RESUME Les bétons végétaux sont de plus en plus utilisés comme matériaux de construction grâce à leurs propriétés isolantes et à leur impact réduit sur l'environnement. Cependant, l'utilisation de ces matériaux est encore limitée par le manque de connaissances et la grande variabilité de leurs performances qui rend impossible la prédiction de leurs propriétés mécaniques à partir de leur formulation initiale. Cette variabilité est due à l'influence de composés extraits des végétaux sur les mécanismes de prise des ciments pendant la mise en œuvre. Dans cette étude, l'impact de granulats végétaux (bambou, chènevotte et colza) sur la cinétique d'hydratation de deux ciments (CEM IV et LC3) et leurs propriétés mécaniques est évalué par calorimétrie isotherme et essais de compression. Pour les ciments et les végétaux utilisés dans ce travail, la chènevotte est la plante qui entraîne le plus grand retard de prise et la perte de chaleur cumulée la plus élevée par rapport aux ciments purs après 5 jours d'hydratation. Pour ces mesures, l'impact des végétaux est plus significatif pour le ciment CEM IV. En ce qui concerne les propriétés mécaniques des bétons végétaux, les valeurs de résistance à la compression sont les plus élevées pour les bétons de chanvre et les plus faibles pour les bétons de bambou pour les deux types de ciment. Enfin, en comparant les différentes propriétés étudiées, la résistance mécanique des bétons végétaux augmente lorsque la chaleur d'hydratation cumulée diminue en présence de végétaux par rapport aux ciments de référence.

Mots-clefs bétons végétaux, compatibilité, variabilité, calorimétrie isotherme, résistance à la compression

I. INTRODUCTION

Les bétons végétaux sont de plus en plus utilisés comme matériaux de construction grâce à leurs propriétés isolantes et à leur impact réduit sur l'environnement qui suscite un intérêt particulier dans le contexte actuel de la transition écologique, la réduction de la consommation d'énergie des bâtiments et l'utilisation de ressources naturelles non épuisables (Amziane and Collet, 2017).

Cependant, l'utilisation de ces matériaux est encore limitée par le manque de connaissances et la grande variabilité de leurs performances qui rend impossible la prédiction de leurs propriétés mécaniques à partir de leur formulation initiale (Niyigena et al., 2018).

Cette étude s'intègre dans un projet visant à contrôler les performances mécaniques des bétons végétaux et à définir des indicateurs de compatibilité entre les liants minéraux et les particules végétales qui sont utilisés dans leur formulation.

II. MATERIAUX

Pour évaluer l'impact du type de végétal, trois espèces sont utilisées dans cette étude : le bambou, la chènevotte et le colza.

Deux ciments de chimie et de cinétique d'hydratation différentes sont étudiés : le CEM IV/A (P), un ciment pouzzolanique (AFNOR, 2012), et le LC3, un ciment argilo-calcaire (Sharma et al., 2021).

III. METHODES

L'impact de granulats végétaux sur la cinétique d'hydratation des ciments est évalué par microcalorimétrie isotherme et des essais mécaniques ont été réalisés sur les bétons végétaux pour déterminer leur résistance à la compression.

A. Calorimétrie isotherme : suivi d'hydratation de pâtes de ciment avec l'ajout de végétaux

L'effet de l'ajout de végétaux sur l'hydratation des ciments est évalué par microcalorimétrie isotherme à 25°C (TA Instruments Tam-Air 8). Les échantillons testés sont des pâtes de ciment avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,5 et un rapport végétal/ciment (V/C) de 0 pour les échantillons de référence et 0,02 pour les mélanges. Les végétaux ont été broyés pour obtenir des mélanges homogènes pour les échantillons de petit volume et augmenter la surface de contact afin de maximiser l'interaction entre ces matériaux et la rendre indépendante des facteurs physiques des granulats végétaux, comme le facteur de forme et la rugosité de la surface des granulats.

Le flux de chaleur libéré par les réactions exothermiques d'hydratation des ciments avec et sans végétal et la quantité de chaleur cumulée sont mesurés au cours du temps pendant 5 jours.

B. Résistance à la compression des bétons végétaux

Le changement d'échelle de la pâte de ciment au béton est effectué pour voir si un impact similaire des plantes est visible sur la performance des bétons végétaux. Des éprouvettes de dimensions 150 × 150 × 150 mm³ ont été fabriquées selon la formulation de type mur recommandée pour les bétons de chanvre (Construire en Chanvre, 2012). La composition des bétons est présentée dans le Tableau 1. La formulation du béton de bambou a été modifiée en raison de l'absorption d'eau des granulats de bambou, plus faible que pour les autres végétaux pour obtenir une ouvrabilité similaire aux autres bétons végétaux. Les spécimens ont été placés dans une pièce climatisée (20 °C et 50 % HR) pendant 28 jours avant la mesure de leur résistance à la compression (Bardouh et al., 2023).

TABLEAU 1. Formulation des bétons végétaux

Végétal	Liant	E/C	V/C
Bambou	CEM IV	1	1,7
	LC3		
Chènevotte	CEM IV		0,5
	LC3		
Colza	CEM IV		0,5
	LC3		

IV. RESULTATS

L'impact des granulats végétaux sur la cinétique d'hydratation des ciments est évalué par comparaison entre les courbes de calorimétrie des pâtes de ciment contenant les végétaux par rapport au ciment non-modifié.

Pour chaque couple plante/ciment, deux courbes sont tracées : le flux de chaleur et la chaleur cumulée en fonction du temps (Figures 1 et 2). Deux paramètres principaux sont extraits des suivis d'hydratation : la position de la valeur maximale du flux de chaleur après le pic initial correspondant à l'insertion de l'échantillon dans l'appareil (Figure 3) et la chaleur cumulée après 5 jours (Figure 4).

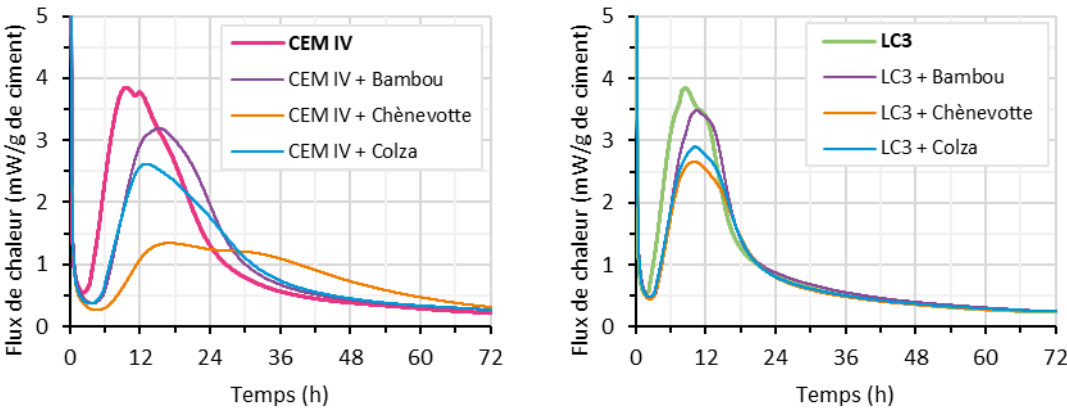


FIGURE 1. Flux de chaleur en fonction du temps pour les ciments CEM IV et LC3 sans et avec végétaux

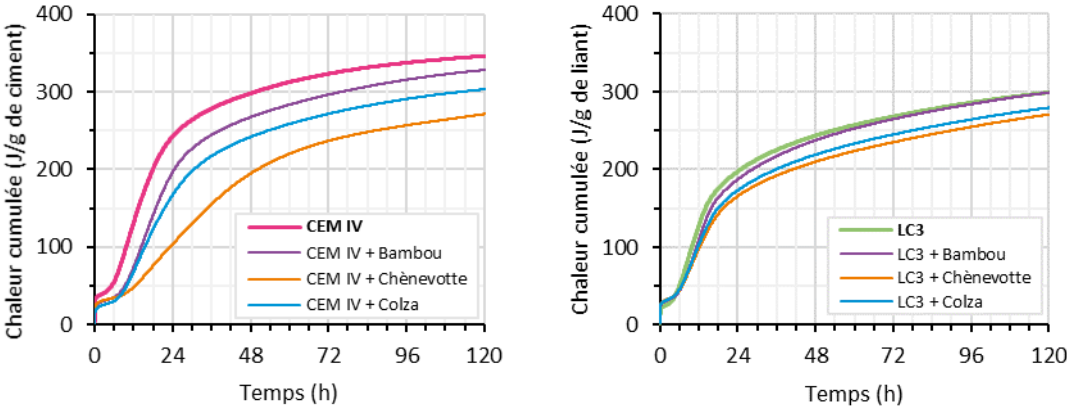


FIGURE 2. Chaleur cumulée en fonction du temps pour les ciments CEM IV et LC3 sans et avec végétaux

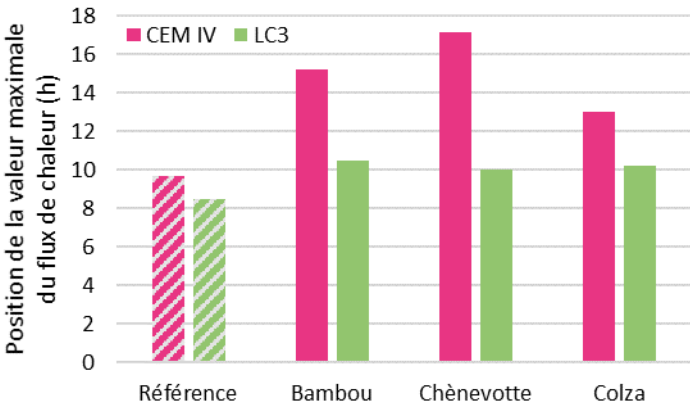


FIGURE 3. Position de la valeur maximale du flux de chaleur pour les ciments CEM IV et LC3 sans et avec végétaux

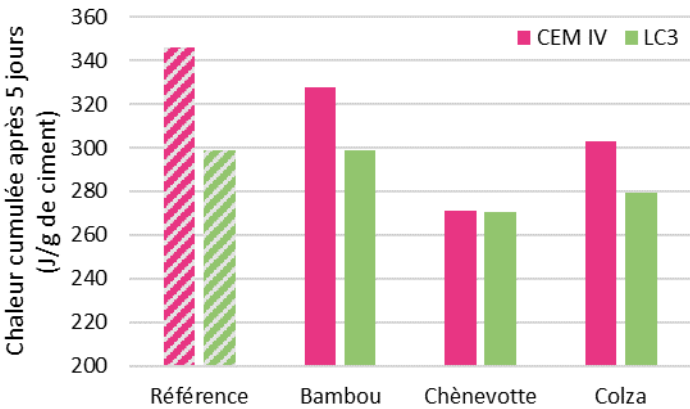


FIGURE 4. Chaleur cumulée après 5 jours pour les ciments CEM IV et LC3 sans et avec végétaux

Il est possible de constater que l'ajout de plantes dans les ciments entraîne des changements dans les courbes de flux de chaleur, correspondant à des réactions retardées et plus longues par rapport aux ciments purs, avec une variation de l'effet selon la nature du végétal et du ciment. De plus, la chaleur cumulée après 5 jours diminue lors de l'ajout de plantes dans les pâtes de ciment.

Sur la Figure 3, on peut observer que l'ajout de végétal entraîne un retard de prise de l'ordre de 2 heures pour le liant LC3, quelle que soit la nature du végétal. En revanche, pour le CEM IV, le retard de prise varie de 3 heures pour le colza à 7 heures pour la chènevotte, l'influence du bambou étant intermédiaire.

En ce qui concerne les valeurs des chaleurs d'hydratation relevées après 5 jours, pour le ciment LC3, le bambou n'a pas d'impact sur ce paramètre, alors que les valeurs atteintes pour la chènevotte et le colza sont de l'ordre de 92% de la chaleur d'hydratation du liant seul. Pour le ciment CEM IV, l'impact des végétaux est plus significatif, et la chaleur d'hydratation en présence de chènevotte, bambou et de colza atteignent respectivement 79, 88 et 95% de la chaleur d'hydratation du ciment non-modifié.

L'effet retardateur de prise des ciments en présence de granulats végétaux est généralement attribué aux constituants des plantes, tels que les sucres et les polyphénols, connus pour leur effet retardateur sur la prise des ciments (Delannoy et al., 2020). Dans cette étude, on peut également observer un effet différent en fonction de la nature du liant. En effet, d'une part, les composés végétaux extraits peuvent dépendre de la nature du ciment utilisé. D'autre part, ces différents composés végétaux interagissent différemment avec les phases anhydres des liants et leur impact dépend donc de la composition chimique du ciment utilisé (Tale Ponga et al., 2023).

Dans un deuxième temps, les performances mécaniques des bétons végétaux ont été caractérisées et leur résistance à la compression est présentée sur la Figure 5.

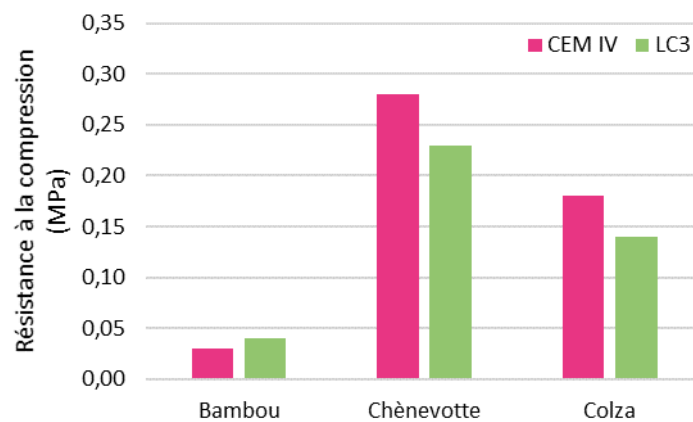


FIGURE 5. Résistance à la compression des bétons végétaux

Pour les deux ciments utilisés, les valeurs de résistance à la compression sont les plus élevées pour les bétons de chanvre et les plus faibles pour les bétons de bambou. Les valeurs faibles observées dans le cas des bétons de bambou peuvent être liées à leur formulation différente : le rapport végétal sur ciment V/C est de 0,5 pour les bétons de chanvre et de colza alors qu'il est de 1,67 pour les bétons de bambou. Les particules de bambou ayant une capacité d'absorption d'eau

plus faible que celles de chènevotte et de colza, le rapport V/C a été ajusté pour conserver une maniabilité similaire à l'état frais pour tous les bétons végétaux.

V. DISCUSSION

Afin de comprendre les résistances à la compression des bétons végétaux très variables en fonction du type de granulat, les résultats obtenus ont été comparés à ceux issus de l'étude par calorimétrie isotherme. Pour ces deux études à différentes échelles, il n'a pas été possible de conserver le même rapport végétal/ciment, car le flux de chaleur associé à l'hydratation du ciment n'est pas visible par calorimétrie isotherme si la quantité de végétal ajoutée au ciment est trop importante (Delannoy et al., 2020).

Dans les figures suivantes, les résistances à la compression des bétons végétaux sont reliées au retard de la valeur maximale du flux de chaleur (Figure 6) et à la diminution de chaleur cumulée à 5 jours par rapport à la référence (Figure 7).

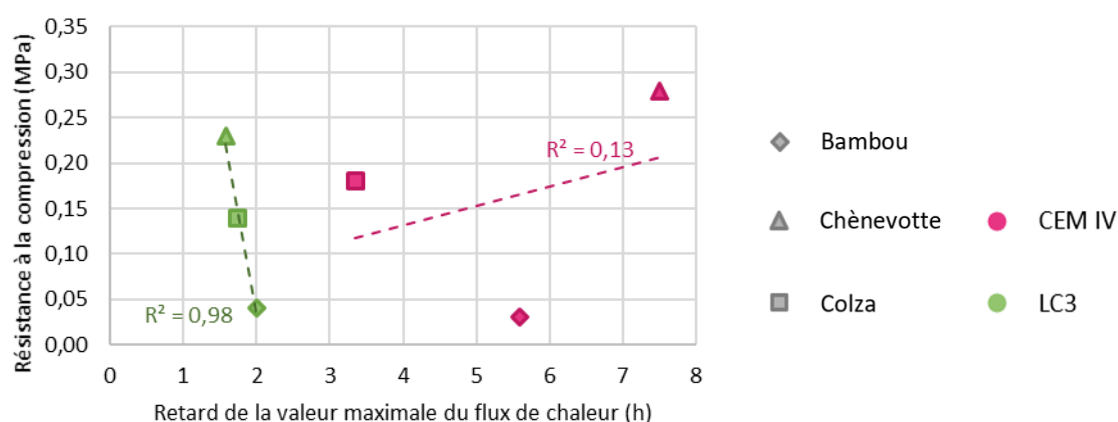


FIGURE 6. Résistance à la compression des bétons végétaux étudiés en fonction du retard de la valeur maximale du flux de chaleur

Pour les ciments et les végétaux utilisés dans ce travail, il existe une relation entre la résistance à la compression et le retard de prise causé par les végétaux dans le cas du ciment LC3, où la résistance mécanique des bétons végétaux augmente lorsque le retard dû à l'ajout de végétaux diminue.

En effet, certains extractibles organiques issus des agrégats végétaux sont connus comme retardateurs de prise, et ayant un impact sur la résistance mécanique, comme les sucres et phénols (Boix et al., 2020; Bourdot et al., 2019; Chupin et al., 2017; Delannoy et al., 2020; Jury et al., 2022; Wilding et al., 1984). Selon ces auteurs, ces composants végétaux retardateurs agissent par complexation, notamment des ions calcium, formant ainsi des composés organo-minéraux. Ce phénomène se caractérise par l'emprisonnement des ions Ca^{2+} issus de la dissolution des grains de ciment par les fonctions hydroxyle et carboxyle des molécules organiques chargées négativement en milieu basique.

Ainsi, la formation d'hydrates à l'origine de la résistance mécanique des bétons végétaux est empêchée, freinée ou même inhibée par la formation de ces composés organo-minéraux, selon des paramètres qui dépendent de la composition chimique des ciments et des plantes.

Cette relation n'est pas observée dans le cas du ciment CEM IV, ce qui montre que tous les composés extraits des particules végétales n'ont pas le même effet sur les différents composés chimiques du liant.

Sur la Figure 7, on peut observer que la résistance mécanique des bétons végétaux augmente lorsque la chaleur cumulée après 5 jours diminue. Des analyses complémentaires sur les interactions chimiques entre composés végétaux et ciments permettront d'interpréter ces résultats.

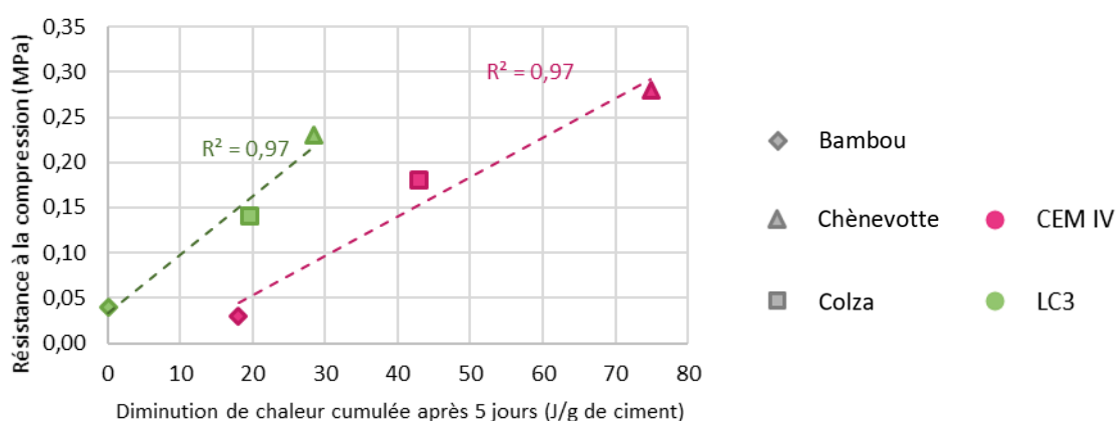


FIGURE 7. Résistance à la compression des bétons végétaux étudiés en fonction de la diminution de la chaleur cumulée après 5 jours

En parallèle, une analyse approfondie des résultats de caractérisation mécanique des bétons végétaux est nécessaire afin d'identifier la contribution des interactions végétal-minéral mises en évidence en calorimétrie isotherme, et celle liée à la morphologie des particules végétales, leur granulométrie et leurs capacités différentes d'absorption d'eau par exemple.

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude fait partie d'un projet visant à mieux comprendre l'interaction végétal-ciment pour contrôler les performances mécaniques des bétons végétaux et définir des indicateurs de compatibilité entre ces deux composants. L'impact de l'ajout de granulats végétaux sur la cinétique d'hydratation de deux ciments (CEM IV et LC3) a été évalué par calorimétrie isotherme sur des pâtes de ciments contenant des poudres végétales et par caractérisation mécanique des bétons végétaux.

Pour les trois végétaux et les deux ciments étudiés dans ce travail, une relation a été observée entre la différence de chaleur cumulée pour les ciments contenant des végétaux par rapport aux références et la résistance mécanique des bétons végétaux.

Ces résultats montrent que l'impact des végétaux sur la cinétique d'hydratation des ciments avec un ratio massique de seulement 2% peut expliquer leur influence sur des bétons végétaux qui contiennent une quantité élevée de végétaux.

D'autre part, la composition chimique de ces plantes est extrêmement complexe et variable. Cela confirme l'importance d'étudier les variations de la composition chimique de ces granulats et leur interaction avec différents ciments.

Des analyses complémentaires permettront de comprendre ces résultats et de les élargir pour d'autres types de matériaux. La caractérisation des composés végétaux extraits pendant la mise en œuvre des bétons est la prochaine étape vers la conception de bétons végétaux aux propriétés mécaniques optimisées.

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

- AFNOR, 2012. NF EN 197-1 Méthodes d'essais des ciments Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- Amziane, S., Collet, F. (Eds.), 2017. Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM, RILEM State-of-the-Art Reports. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1031-0>
- 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, RILEM Bookseries. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 100–108. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_9
- Boix, E., Gineau, E., Narciso, J.O., Höfte, H., Mouille, G., Navard, P., 2020. Influence of chemical treatments of miscanthus stem fragments on polysaccharide release in the presence of cement and on the mechanical properties of bio-based concrete materials. *Cement and Concrete Composites* 105, 103429. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103429>
- Bourdot, A., Magniont, C., Lagouin, M., Niyigena, C., Evon, P., Amziane, S., 2019. Impact of Bio-Aggregates Properties on the Chemical Interactions with Mineral Binder, Application to Vegetal Concrete. *ACT* 17, 542–558. <https://doi.org/10.3151/jact.17.542>
- Chupin, L., Ridder, D. de, Clément-Vidal, A., Soutiras, A., Gineau, E., Mouille, G., Arnoult, S., Brancourt-Hulmel, M., Lapierre, C., Pot, D., Vincent, L., Mija, A., Navard, P., 2017. Influence of the radial stem composition on the thermal behaviour of miscanthus and sorghum genotypes. *Carbohydrate Polymers* 167, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.002>
- Construire en Chanvre, 2012. Règles professionnelles d'exécution. SEBTP, Paris.
- Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., Amziane, S., Farcas, F., 2020. Impact of hemp shiv extractives on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials* 244, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118300>
- Jury, C., Girones, J., Vo, L.T.T., Di Giuseppe, E., Mouille, G., Gineau, E., Arnoult, S., Brancourt-Hulmel, M., Lapierre, C., Cézard, L., Navard, P., 2022. One-step preparation procedure, mechanical properties and environmental performances of miscanthus-based concrete blocks. *Materials Today Communications* 31, 103575. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103575>
- Niyigena, C., Amziane, S., Chateaneuf, A., 2018. Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete. *Construction and Building Materials* 160, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>

Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., Scrivener, K., 2021. Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research* 149, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>

Tale Ponga, D., Sabziparvar, A., Cousin, P., Boulos, L., Robert, M., Foruzanmehr, M.R., 2023. Retarding Effect of Hemp Hurd Lixiviates on the Hydration of Hydraulic and CSA Cements. *Materials* 16, 5561. <https://doi.org/10.3390/ma16165561>

Wilding, C.R., Walter, A., Double, D.D., 1984. A classification of inorganic and organic admixtures by conduction calorimetry. *Cement and Concrete Research* 14, 185–194. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90103-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90103-0)