

Effets des conditions de cure sur le comportement hygro-thermo-mécanique du béton de chanvre

Elhadj Oumar DIALLO¹, Thomas SANCHEZ¹, Laurence CURTIL¹, Abdelkrim TRABELSI²

¹ LMC2 EA 7427, Université Lyon 1, 82 bd Niels Bohr 69100 Villeurbanne

² CETHIL UMR 5008, Université Lyon 1, 9 Rue de la Physique, 69100 Villeurbanne

RESUME Le béton de chanvre est un matériau biosourcé prometteur dans la rénovation énergétique du bâti ancien (Interchanvre, 2020). L'objectif de ces travaux est d'évaluer l'influence des conditions de cure (HR et T°) en fonction de la saison de mise en œuvre (été, hiver, humide, sèche, etc.) sur les propriétés hygriques, thermiques et mécaniques de ce matériau. A cet effet, trois composites ont été réalisés : argile-chanvre (argile : 38,5%, chanvre : 15,4%, eau : 46,1%) ; argile-chaux-chanvre (argile : 34,6%, chaux : 3,9 %, chanvre : 15,4%, eau : 46,1%) ; et chaux-chanvre (chaux : 38,5%, chanvre : 15,4%, eau : 46,1%). Les paramètres climatiques étudiés sont ceux de la région Auvergne-Rhône-Alpes : été sévère (32°C, 63%) ; hiver sévère (0°C, 86%) ; et un climat tropical guinéen humide (40°C, 80%). Les propriétés hygrothermiques et mécaniques des composites ont été évaluées après 28 jours de cure en fonction de leur teneur en eau : conductivité thermique, absorption d'eau capillaire et résistance à la compression. Ces travaux ont permis de montrer que la conductivité thermique varie du simple au double suivant la saison de mise en œuvre. On observe également des différences significatives d'un matériau à l'autre en termes de capacité d'absorption et de résistance à la compression.

Mots-clés béton de chanvre, argile, chaux, caractérisation hygrothermique et mécanique, conditions de cure

I. INTRODUCTION

La nécessité de préserver les matières premières utilisées dans le secteur de la construction et la volonté d'employer des matériaux de construction durables, dans un contexte de changements climatiques, amènent les politiques et les scientifiques à privilégier l'usage des matériaux biosourcés. Dans ce cadre, les bétons végétaux constituent une solution alternative aux isolants conventionnels. Plus particulièrement, de par sa porosité ouverte estimée à près de 80% en volume (Arnaud & Gourlay, 2012), le béton de chanvre présente des propriétés hygrothermiques intéressantes.

De nombreuses études ont examiné l'impact de la formulation et des conditions de mise en œuvre du béton de chanvre sur ses propriétés mécaniques et hygrothermiques. Par exemple, (De Bruijn et al., 2009) ont montré que, sous des conditions de conservation à 20°C et 50% d'humidité relative, les anas et fibres de chanvre confèrent au matériau des propriétés mécaniques comparables à celles des bétons de chanvre classique. (Magniont, 2010) a démontré la compatibilité d'un liant pouzzolanique avec les granulats végétaux à 20°C et 65% HR. (Chamoïn, 2013), pour des conditions de cure à 23°C et 50% HR, a observé que le liant Tradichanvre présente un pouvoir de stockage de vapeur inférieur à celui du liant Tradical. (Chabannes, 2015) a comparé les propriétés de bétons végétaux à base de granulats de chanvre et de balles de riz à 20°C et HR 50%, montrant des résistances mécaniques similaires pour les 2 types de granulats. (Nozahic, 2012), à 20°C et 35 % HR, a obtenu des résistances en compression conformes aux recommandations (> 0,2 MPa). (Evrard,

2008) a souligné, dans des conditions de 20°C et 65 % HR, le comportement hygroscopique élevé du béton de chanvre, intermédiaire entre la brique d'argile et le bois. (Arnaud & Gourlay, 2012) ont étudié l'effet de plusieurs niveaux d'humidité relative (30 %, 50 %, 75 % et 98 % à 20°C) sur des bétons de chanvre à base de chaux. (Mazhoud, 2017), avec des conditions de cure de 23°C et 50% HR, est parvenu à des résultats qui soulignent les performances mécanique et hygrothermique des bétons de chanvre à base d'argile et d'argile stabilisée à la chaux.

Cependant, ces travaux se concentrent généralement sur une seule condition de cure (20°C, 50%) ou (23°C, 50%), ce qui limite la compréhension de l'impact des variations environnementales sur la cure du matériau et son comportement. Les travaux de (Chamoïn, 2013) et (Dinh, 2014) abordent brièvement les conditions de conservation, mais sans étude approfondie des effets spécifiques de ces conditions. La seule étude ayant pris en compte plusieurs niveaux d'humidité relative est celle de (Arnaud et Gourlay, 2012), à savoir des humidités relatives HR de 30%, 50%, 75% et 98% sur des bétons de chanvre pendant 28 jours. Cette étude montre que la résistance à la compression est optimale pour HR > 50 %, mais diminue fortement au-delà de 75 %, indépendamment du liant utilisé (NHL 3.5 NHL 2 Chaux aérienne (75%), Chaux hydraulique (15%) et pouzzolane (10%)). Cette diminution est attribuée à une réduction de la vitesse de carbonatation due à une moindre diffusion du CO₂ dans les pores saturés en eau. Toutefois, cette étude a été conduite à température constante (20°C), alors que la quantité d'eau évaporée dépend aussi de la température de l'air de cure. Ainsi, la plupart des recherches existantes n'explorent pas l'effet combiné de la température et de l'humidité relative, pourtant déterminants dans le séchage et le durcissement du béton de chanvre.

Face à ces limites, l'objectif de ce travail est d'analyser de façon approfondie l'influence croisée de la température et de l'humidité relative de cure sur le comportement hygrothermique et mécanique du béton de chanvre. Pour cela, trois formulations (argile-chanvre, argile-chaux-chanvre et chaux-chanvre) ont été soumises à des conditions climatiques représentatives de l'hiver et de l'été de la région Auvergne-Rhône-Alpes, ainsi qu'à un climat tropical humide (Guinée). Cette approche vise à fournir une meilleure compréhension de l'influence des variations climatiques réelles sur les performances du matériau.

II. MATÉRIAUX ET METHODES

II.1. Matériaux

Dans nos travaux, nous avons étudié le béton de chanvre en comparant le liant argile à la chaux. Nous avons choisi l'argile pour son faible impact environnemental et la chaux comme matériau de référence. Lors de nos études préliminaires, nous avons abouti à un troisième composite en raison du comportement mécanique faible du composite à base d'argile, celui-ci est un mélange hybride argile-chaux-chanvre, dans lequel 10% de chaux ont été ajoutés pour assurer une stabilisation optimale (Mazhoud, 2017).

Liants. Dans cette étude, trois liants ont donc été utilisés : l'argile, le mélange argile-chaux et la chaux. L'argile utilisée est un mélange Illite et Montmorillonite de couleur jaune. Elle est séchée et broyée jusqu'à atteindre une granulométrie < 60 µm. De masse volumique 700 kg/m³, cette argile est bien adaptée aux particules de chènevette. La chaux utilisée est le BATICHANVRE, une chaux naturelle formulée pour le béton de chanvre. Labélisée Construire en Chanvre (CenC), elle est composée de 70% de chaux hydraulique et de 30% de Ciment Portland.

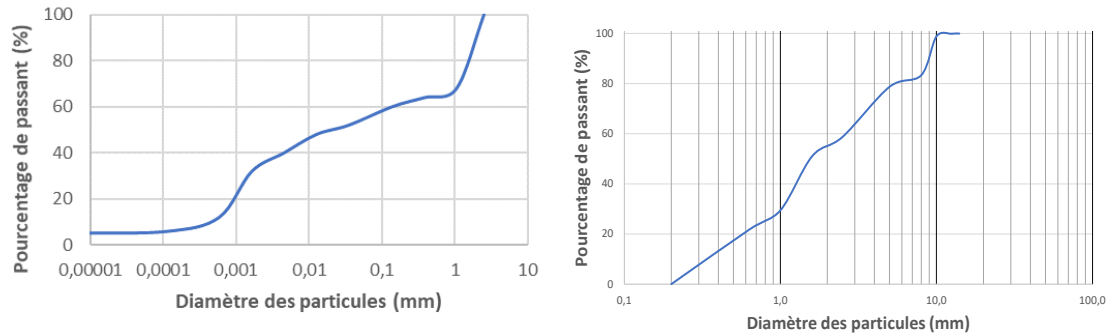


FIGURE 1 : Courbes granulométriques de l'argile (gauche) et du chanvre (droite)

La figure 1 présente les courbes granulométriques de l'argile et celle du chanvre. La courbe de l'argile est obtenue par sédimentométrie, selon la norme NF P94-057. On remarque que la majorité des particules ont un diamètre inférieur à 2,5 mm. Par ailleurs, avec un VBS de 3,05, cette argile appartient à la catégorie des sols limono-argileux.

Granulat. Le granulat utilisé est une chènevotte labélisée par l'Association Construire en Chanvre (CenC). C'est une paille de 10 à 40 mm, de masse volumique en vrac de 130 kg/m³ et de conductivité thermique de 0.048 W/(m.K). La granulométrie du chanvre (figure 1) a été obtenue par la technique du tamisage mécanique classique. Les particules analysées ont un diamètre compris entre 0,2 mm et 11 mm. Ces valeurs se retrouvent dans la littérature avec (Mazhoud, 2016) qui a trouvé un diamètre de particules variant entre 0,2 et 12 mm.

Matériaux Composites – Formulation. Trois formulations ont été étudiées : une composition de référence à base de chaux -chanvre (C), une à base d'argile – chanvre (A) et une à base d'argile stabilisée à 10% de chaux - chanvre (AC). Ces compositions sont résumées dans le Tableau 1 :

Tableau 1 : Formulation des composites

Code	G/L	E/L	Pourcentage massique			
			Chanvre	Argile	Chaux	Eau
A	0,4	1,2	15,38	38,46	0	46,15
AC	0,4	1,2	15,38	34,62	3,85	46,15
C	0,4	1,2	15,38	0	38,46	46,15

Dans le tableau ci-dessus, G signifie Granulats en l'occurrence de la chènevotte, L signifie liant (soit argile soit le mélange argile-chaux soit la chaux) et E la quantité d'eau.

Matériaux Composites – Mise en œuvre. Ces composites ont été fabriqués suivant un protocole détaillé dans la Figure 2, afin de garantir une comparaison cohérente des différentes formulations en termes de propriétés mécaniques et hygrothermiques.

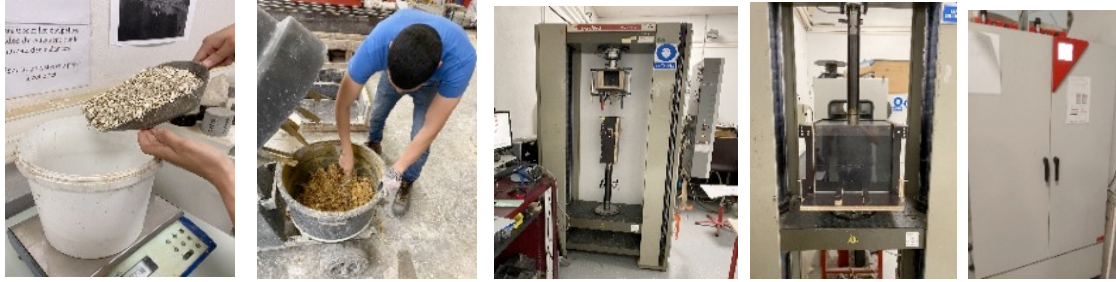


FIGURE 2 : Protocole de fabrication des échantillons (Echantillonnage ; malaxage ; compactage mécanique et stockage en enceinte climatique)

Pour la fabrication des échantillons, un malaxeur d'une puissance de 1,5 kW, d'une vitesse de rotation de 152 tr/min et d'une capacité de 50 litres a été utilisé. La procédure de fabrication est la suivante : introduction du liant puis de l'eau ; malaxage pendant 5 min afin d'avoir un mélange homogène ; ajout du chanvre pré-mouillé selon le rapport Eau/chanvre de 0.4 ; malaxage pendant 7 min, afin d'obtenir un mélange suffisamment homogène.

Les éprouvettes ont été compactées mécaniquement à l'aide d'une presse d'une capacité de 400 kN, réglée pour appliquer une contrainte de compactage de 0,25 MPa. 2 types d'éprouvettes (35x35x4 cm³ et 10x10x10 cm³) ont été réalisées afin d'effectuer les essais de conductivité thermique et de compression. Pour chaque condition de cure étudiée, 27 éprouvettes sont fabriquées.

II.2. Conditions de cure

Après fabrication, les échantillons sont pesés et stockés dans une enceinte climatique dont la plage de régulation est comprise entre 0 et 70°C pour la température, et 10 à 80 % pour l'humidité relative, permettant de simuler les différents climats étudiés pendant 28 jours. Trois différents climats (Tableau 2) ont été considérés : deux de la région lyonnaise et un climat type tropical humide, la Guinée.

Tableau 2 : Températures et humidités relatives des climats de Lyon et de la Guinée

Type de climat	Hiver	Été	Guinée
Température (°C)	0.3	31.8	40
Humidité relative (%)	86	63	80

II.3. Protocole expérimental de caractérisation

Masse volumique. La mesure de la masse volumique (ρ en kg/m³) du béton de chanvre consiste à déterminer le volume de l'échantillon (en m³) à partir des dimensions prises précisément avec un pied à coulisse et à calculer la masse (en kg) par pesée (précision : 0,01 g). Cette méthode est définie par la norme NF P 94-053, qui fournit un cadre pour la détermination de la masse volumique des matériaux de construction, notamment les bétons.

Conductivité thermique. L'essai de conductivité thermique (Figure 3) a été réalisé selon la méthode du plan chaud symétrique à deux faces. La mesure est donc réalisée en régime permanent, à l'instar de l'essai de la boîte chaude gardée (Norme NF EN 12667). Pour chaque condition de cure, les échantillons testés (3 à base d'argile, 3 à base de chaux et 3 avec l'argile stabilisée) mesurent

35×35×4 cm³, une épaisseur volontairement réduite afin de limiter les effets de bord et d'assurer un transfert thermique principalement unidirectionnel.

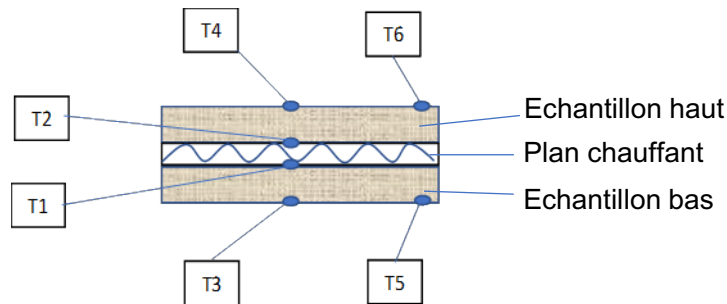


FIGURE 3 : Principe et banc d'essais pour mesure de conductivité thermique

Le principe de cette méthode repose sur la génération de chaleur par un élément chauffant, suivie d'une dissipation par conduction à travers l'échantillon. Les différentes températures (T_i) aux interfaces sont mesurées à l'aide de thermocouples. La conductivité thermique est ensuite déterminée à partir de la relation (1) :

$$\lambda = \frac{\Phi}{S \left(\frac{T_1 - T_3}{e_{bas}} + \frac{T_2 - T_4}{e_{HAUT}} \right)} \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (1)$$

Où Φ est la puissance électrique appliquée en (W), S est la surface de l'échantillon en (m²) ; ΔT est la différence de température en (K) ; e est l'épaisseur de l'échantillon en (m).

Contrainte de compression. Le test de compression a été utilisé pour évaluer la résistance à la compression des matériaux. Pour chaque type de climat, neuf éprouvettes (3 à base d'argile, 3 à base de chaux et 3 avec l'argile stabilisée) de dimensions 10 x 10 x 10 cm³ ont été testées sur une machine de compression de marque Zwick/Roell, de capacité 5kN. Pendant le test, une vitesse de descente de 5mm/mn a été respectée pour tous les échantillons. Le calcul de la contrainte de compression utilise la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{S} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

σ_c est la contrainte de compression (MPa) ; F_{max} est la charge maximale supportée par l'échantillon (N) ; S est la surface de la section supérieure de l'échantillon (mm²)

Absorption d'eau capillaire. L'absorption par capillarité est une propriété hydrique qui témoigne de la capacité d'un matériau à absorber une quantité d'eau par unité de temps et de surface, lorsqu'une seule face est en contact direct avec de l'eau. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité C s'exprime en kg/m²s^{1/2}, et est obtenue expérimentalement selon la norme NF EN 772-11 :

$$C = \frac{m(t) - m_0}{S\sqrt{t}} \left[\frac{kg}{m^2 s^{1/2}} \right] \quad (3)$$

Où $m(t)$ est la masse à l'instant t en kg ; $m(0)$ est la masse initiale en kg ; t est le temps en seconde ; S est la surface exposée à l'eau en m². La température de l'eau est contrôlée durant tout l'essai et du

papier aluminium permet de protéger les faces non exposées afin d'avoir un flux d'absorption unidimensionnel. Les échantillons sont en immersion pendant des intervalles de temps définis (0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 15 ; 30 ; 60 ; 120 et 180 min) et le test a été réalisé selon le protocole suivant : pesée de la masse initiale (m_0) de neuf échantillons secs de chaque condition de cure ; mise en place de l'échantillon verticalement dans le bac d'eau de manière à immerger seulement la face non protégée ; temps 0 dès que l'échantillon est en contact avec l'eau ; pour chaque intervalle de temps défini, retirer l'échantillon de l'eau, essuyer rapidement et délicatement la surface au papier absorbant pour enlever l'excès d'eau, puis peser l'échantillon ; noter la masse de l'échantillon après chaque intervalle ($m(t)$) ; calculer la quantité d'eau absorbée (C) à chaque intervalle de temps.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Conductivité thermique

Influence des conditions de cure. Sur la figure 4, on remarque que la conductivité thermique des trois formulations est relativement similaire, avec des performances légèrement meilleures pour le mélange argile-chaux-chanvre avec une conductivité thermique allant de 0,108 à 0,160 W/(m.K). La formulation chaux-chanvre présente la plus grande dispersion des valeurs avec un écart type de 0,052 W/(m.K), probablement en raison du phénomène d'hydratation, fortement dépendant des conditions de cure et dans une moindre mesure du processus de carbonatation.

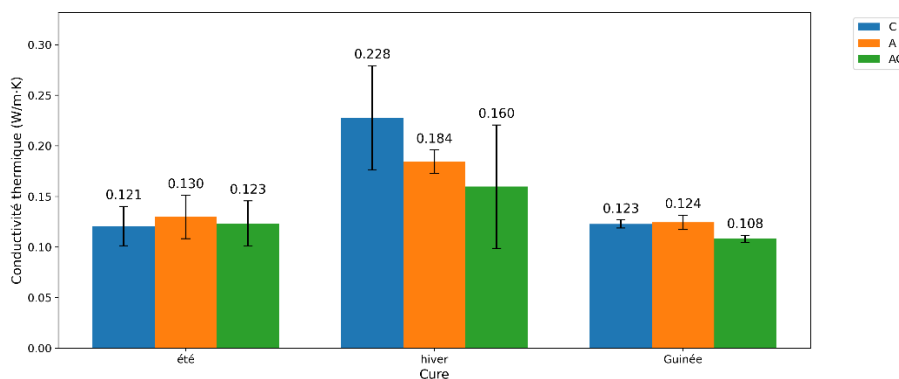


FIGURE 4 : Conductivité thermique en fonction des conditions de cure

La figure 4 met aussi en évidence l'impact significatif de la cure sur la conductivité thermique, particulièrement en hiver : 0,228 W/(m.K) pour la formulation d'argile-chanvre, 0,184 W/(m.K) pour le mélange argile-chaux-chanvre et 0,160 W/(m.K) pour la formulation chaux-chanvre. Concernant le climat de la Guinée, bien qu'humide, les conductivités mesurées y sont plus faibles que celles observées en hiver. Cette différence s'explique par des températures plus élevées, entraînant un écart plus important entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur ambiante, favorisant ainsi un séchage plus intense.

Influence de la teneur en eau. L'un des principaux facteurs influençant les variations de la conductivité thermique reste la teneur en eau des matériaux. En effet, la figure 5 montre une corrélation significative entre la conductivité thermique et la teneur en eau pour les différents échantillons testés.

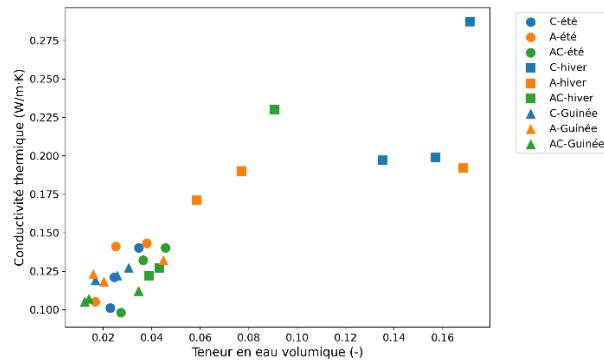


FIGURE 5 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau

Ce résultat confirme un impact relativement faible de la formulation sur la conductivité thermique. En revanche, la teneur en eau joue un rôle prépondérant, avec une variabilité plus marquée et des conductivités plus élevées dans les conditions hivernales : des valeurs de 0,192 W/(m.K) pour l'argile-chanvre, 0,230 W/(m.K) pour l'argile-chaux-chanvre à 0,287 W/(m.K) pour le chaux-chanvre pour des teneurs en eau variant de 4,3 à 16,8%.

III.2. Contrainte de compression

Influence des conditions de cure. La figure 6 présente les résultats de l'étude sur la résistance en compression du béton de chanvre en fonction des conditions de cure. Il ressort que ces conditions influencent de manière significative la contrainte de compression des différents composites analysés.

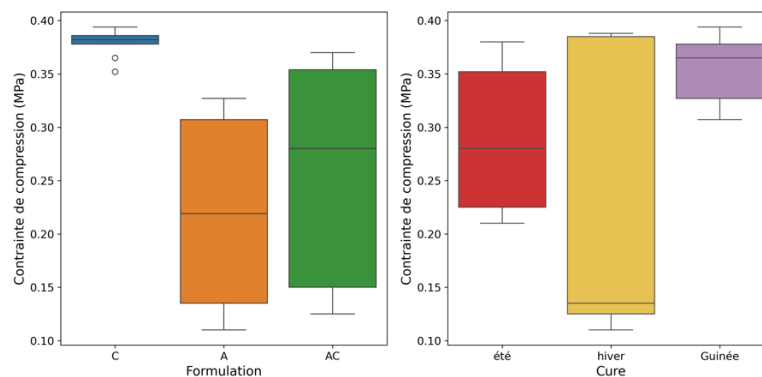


FIGURE 6 : Contrainte de compression en fonction de la formulation (à gauche) et des conditions de cure (à droite)

En été, on observe une meilleure contrainte de compression pour l'ensemble des composites, en fonction de leur formulation, comparé à l'hiver. Plus précisément, le composite argile-chanvre affiche des valeurs comprises entre 0,210 MPa et 0,225 MPa. De son côté, le mélange argile-chaux-chanvre présente une résistance en compression variant de 0,275 MPa à 0,295 MPa. Quant au composite chaux-chanvre, il se distingue par des contraintes plus élevées, allant de 0,352 MPa à 0,380 MPa. En hiver, une diminution notable de la résistance en compression est constatée pour les composites à base d'argile. En effet, la contrainte de compression du composite argile-chanvre se situe entre 0,110 MPa et 0,135 MPa, tandis que celle du mélange argile-chaux-chanvre varie de 0,125 MPa à 0,150 MPa. En revanche, les composites à base de chaux présentent une meilleure résistance avec des valeurs comprises entre 0,378 MPa et 0,394 MPa. Il est néanmoins important de noter que,

malgré cette baisse, la résistance du mélange argile-chaux-chanvre demeure supérieure à celle de l'argile-chanvre seul. Dans le climat guinéen, le comportement des bétons de chanvre est plutôt proche de celui observé en été. Ainsi, la contrainte de compression du composite argile-chanvre oscille entre 0,307 MPa et 0,327 MPa. Le mélange argile-chaux-chanvre présente des valeurs comprises entre 0,354 MPa et 0,370 MPa. Les composites chaux-chanvre suivent la même tendance qu'en été, avec une résistance en compression variant entre 0,378 MPa et 0,394 MPa.

Influence de la teneur en eau. La contrainte de compression du béton de chanvre en fonction de la teneur en eau est un facteur important pour évaluer la performance du matériau dans des applications structurales. La figure 7 présente les résultats de l'étude de la résistance en compression du béton de chanvre en fonction de la teneur en eau. Il apparaît clairement que la teneur en eau a une influence sur la contrainte de compression de tous les composites.

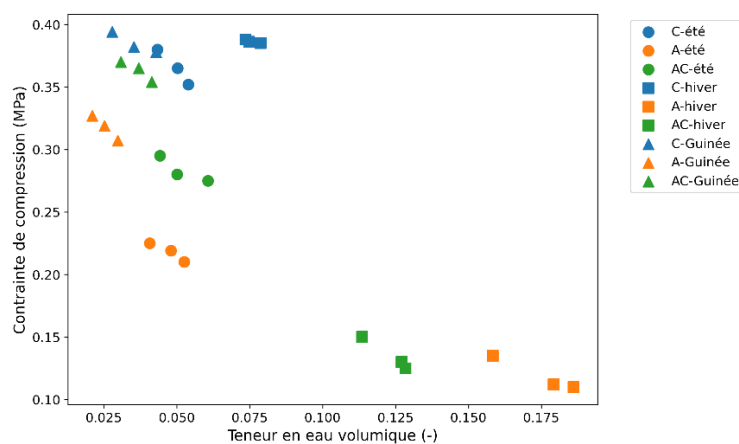


FIGURE 7 : Contrainte de compression en fonction de la teneur en eau

On peut également observer des contraintes de compression supérieures à 0,3 MPa pour tous les composites à base de chaux ou d'argile stabilisée, avec des teneurs en eau entre 2,1 à 7,9%. En Été, on constate une baisse de la contrainte de compression pour tous les composites en fonction de leur teneur en eau. En effet, pour des teneurs en eau de 4,1 et 5,3% du composite argile-chanvre, on observe des contraintes de compression respectivement de 0,225 et 0,210 MPa. Dans le même ordre, le mélange argile-chaux-chanvre suit un comportement similaire. Avec des teneurs en eau de 4,4 et 6,1%, on observe des contraintes mécaniques de 0,295 et 0,275 MPa. Le composite chaux-chanvre s'est distingué par des contraintes de compression de 0,380 et 0,352 MPa pour des teneurs en eau respectivement de 4,3 et 5,4%. En hiver, les composites d'argile-chanvre et argile-chaux-chanvre voient leurs résistances de compression fortement chuter en comparaison aux composites formulés avec la chaux. Toutefois, la contrainte de compression du mélange argile-chanvre garde des valeurs de résistance en compression supérieures à celles de l'argile-chanvre, 0,150 MPa à 11,4% de teneur. Il est très difficile de donner une interprétation à un tel comportement, mais (Dhakal et al., 2017), qui ont travaillé avec le Bati chanvre, indiquent que ce type de liant est principalement composé de chaux hydratée avec de petites quantités d'ingrédients pouzzolaniques et de 20 à 30% de ciment portland pour faciliter le processus de prise en raison d'un mélange de carbonatation (exposition à l'air) et de prise hydraulique (exposition à l'eau). Avec le climat de la Guinée, les bétons végétaux ont présenté un comportement plutôt similaire à celui de climat Été. Comme les autres types de climats, on remarque une influence de la teneur en eau sur tous les composites. En effet, l'argile-chanvre montre pour des teneurs en eau de 2,1 à 3%, la contrainte de compression varie

respectivement de 0,327 à 0,307 MPa. Le mélange argile-chaux-chanvre quant à lui présente des valeurs de la contrainte de compression variant de 0,370 à 0,354 MPa pour des teneurs en eau de 3,1 à 4,1%. Les composites chaux-chanvre ont montré un comportement similaire à ceux de l'Été. Les valeurs de la contrainte de compression varient de 0,394 à 0,378 MPa pour des teneurs en eau de 2,8 et 4,3%.

III.3. Coefficient d'absorption d'eau capillaire

Influence des conditions de cure. L'influence des conditions de cure sur le coefficient d'absorption d'eau capillaire du béton de chanvre nécessite une analyse approfondie en raison des caractéristiques particulières de ce type de matériau. La figure 8 montre le coefficient d'absorption d'eau capillaire des composites étudiés en fonction de différentes conditions climatiques. Ainsi, en Été, tous les composites montrent une dépendance aux conditions de cure. Dans ce contexte, les composites argile-chanvre absorbent davantage que ceux de chaux-chanvre et du mélange argile-chaux-chanvre, avec une moyenne des coefficients d'absorption d'eau capillaire de $0,793 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$. Il est également notable que le mélange argile-chaux-chanvre présente des coefficients d'absorption plus faibles que ceux d'argile-chanvre et de chaux-chanvre. Cette tendance pourrait s'expliquer par des réactions chimiques entre l'argile et la chaux hydraulique, entraînant une diminution du pouvoir d'absorption de l'argile, en accord avec les travaux de Barbero-Barrera et al (2014) sur la stabilisation de l'argile. En hiver, contrairement au comportement des composites en été, les échantillons de chaux-chanvre affichent le coefficient d'absorption d'eau capillaire le plus faible, $0,323 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$.

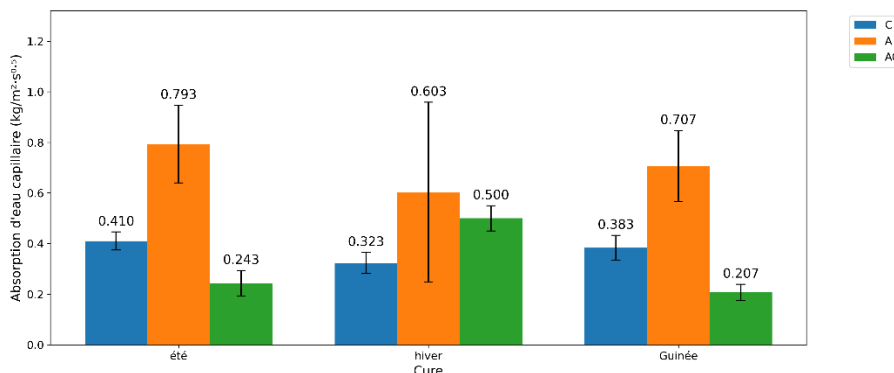


FIGURE 8 : Coefficient d'absorption d'eau en fonction des conditions de cure

Influence de la masse volumique.

La figure 9 présente le coefficient d'absorption d'eau capillaire des composites étudiés en fonction de leur masse volumique relativement à chaque type de climat.

distinguent par une résistance mécanique notable (0,386 MPa). Ces travaux ont également mis en évidence l'influence des conditions de cure sur le coefficient d'absorption d'eau capillaire. Il a été observé que la résistance à la remontée capillaire de l'argile, qu'elle soit exposée aux conditions d'été, d'hiver ou au climat tropical humide de la Guinée, pourrait être attribuée au mode de compactage des échantillons.

- **Influence de de la teneur en eau :**

Cette étude a mis aussi en évidence le rôle prépondérant de la teneur en eau, avec une variabilité plus marquée et des conductivités thermiques plus élevées dans des conditions hivernales, pour des teneurs en eau comprises entre 10 % et 37 %. Elle révèle également que la teneur en eau influence la résistance mécanique, avec des valeurs plus faibles observées en hiver (0,110 MPa pour une teneur en eau de 39 %).

Ces résultats rendent compte de la nécessité de connaître le climat au cours duquel la mise en œuvre du béton de chanvre doit être réalisé, pour lui garantir des propriétés mécaniques et hygrothermiques optimales. Nous envisageons une suite de l'étude pour l'étendre à d'autres paramètres parmi lesquels les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur.

RECOMMANDATIONS

Les résultats auxquels nous sommes parvenus sont très encourageants, mais n'ont porté que sur une analyse à l'échelle du matériau. C'est pourquoi, nous recommandons :

- D'analyser en laboratoire le comportement hygrothermique des matériaux étudiés à l'échelle d'une paroi de terre à pisé, en tenant compte du cas spécifique des remontées capillaires ;
- D'étudier le comportement hygrothermique des matériaux dans le cadre d'une simulation des remontées capillaires sur une paroi de terre à pisé ;
- D'analyser le comportement hygrothermique des matériaux sur une paroi en terre à pisé à l'échelle du bâtiment.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'Université Claude Bernard Lyon1 (UCBL) et le Ministère guinéen de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de l'Innovation (MESRSI) pour le financement du projet. Ils remercient également l'association OIKOS pour leurs précieux conseils ainsi que l'entreprise SAINBIOSE pour la fourniture des matériaux indispensables à l'étude.

REFERENCES

- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50-56.
- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>

- Barbero-Barrera, M. M., García-Santos, A., & Neila-González, F. J. (2014). Thermal conductivity of lime mortars and calcined diatoms. Parameters influencing their performance and comparison with the traditional lime and mortars containing crushed marble used as renders. *Energy and Buildings*, 76, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.065>
- Chabannes, M. (2015). Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction [PhD Thesis, Université Montpellier].
- Chamoin, J. (2013). Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation [PhD Thesis, INSA de Rennes].
- De Bruijn, P. B., Jeppsson, K.-H., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, 103(4), 474-479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>
- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655-3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>
- Dinh, T. M. (2014). Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant [Phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier].
- Evrard, A. (2008). Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials.
- Interchanvre (2020) production du chanvre dans les biosources
- Magniont C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources [PhD Thesis, Toulouse 3].
- Mazhoud B. (2017). Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés [PhD Thesis, INSA de Rennes].

- Nguyen T. T. (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre [Phdthesis, Université de Bretagne Sud].
- Nozahic, V. (2012). Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal : Application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux [PhD Thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II].