

Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée

Moro Olivier BOFFOUE¹, Koffi Clément KOUADIO^{1*}, Conand Honoré KOUAKOU¹, Aka Alexandre ASSANDE¹, Anne DAUSCHER², Bertrand LENOIR² et Edjikemé EMERUWA¹

¹ *Laboratoire de Géomatériaux, UFR-Sciences de la Terre et des Ressources Minières
Université Felix Houphouët-Boigny Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

² *Laboratoire de Physique des Matériaux - Ecole Nationale Supérieure des Mines Nancy,
France Parc de Saurupt 54042, Nancy CEDEX, France*

* Correspondance, courriel : kklements@yahoo.fr

Résumé

Ce travail vise à déterminer la résistance à la compression et la conductivité thermique des blocs à base d'argile comprimée et stabilisée au ciment d'une part et à étudier la variation de ces propriétés en fonction de la teneur en ciment d'autre part. Les mesures réalisées indiquent que la résistance des blocs sans ciment est de 3,7 MPa par « voie sèche » pour une conductivité thermique de 0,91 Wm⁻¹K⁻¹ (déterminée à l'aide d'un fluxmètre). L'incorporation de ciment entraîne une variation de ces deux propriétés. Ainsi on note d'abord une baisse de la résistance suivie d'une augmentation au delà de 4 % de ciment. Toutefois la conductivité thermique des blocs ayant les teneurs en ciment les plus importantes reste proche de celle des blocs sans ciment.

Mots-clés : *bloc d'argile, ciment portland, stabilisation, résistance en compression, conductivité thermique.*

Abstract

Influence of cement content on the thermomechanical properties of compressed and stabilized clay blocks

This work aims to determine the compressive strength and the thermal conductivity of clay compressed blocks and stabilized with cement and to study the influence of the cement ratio on these characteristics of the blocks. The resistance of blocks without cement is (determined at dry state) is 3.7 MPa and measurements made with a fluxmeter show that the thermal conductivity of these blocks is 0,91 Wm⁻¹ K⁻¹. The results show also that the thermal conductivity and the compressive strength of the blocks vary according to the cement ratio. However the thermal conductivity of the blocks with high cement ratio is close to that of the blocks without cement.

Keywords : *clay blocks, Portland cement, stabilization, compressive strength, thermal conductivity.*

1. Introduction

L'un des soucis majeurs dans les pays tropicaux comme la Côte d'Ivoire est le réchauffement important dans les habitations lié à la grande insolation. Pour remédier à cette situation, il est fait usage abondamment d'appareils de brassage d'air; ce qui engendre une grande consommation d'énergie et des maladies. Vu le coût élevé de l'énergie dans ces pays, il est nécessaire de trouver des méthodes de construction alternatives à travers l'utilisation des matériaux dotés d'une faible conductivité thermique. Les matériaux de construction en terre (brique d'argile cuite, tuiles, bloc de terre comprimée) sont reconnus pour leur grande inertie thermique. En Côte d'Ivoire, ces matériaux sont utilisés en partie pour le confort thermique qu'ils procurent dans les habitations. Si des données importantes sont disponibles au niveau de leurs propriétés mécaniques, ce n'est pas le cas pour les propriétés thermiques (conductivité thermique, diffusivité thermique...) où les données sont soit inexistantes soit mal connues.

De plus pour la sécurité des utilisateurs, ces matériaux doivent répondre à certaines normes. Notamment celles concernant les propriétés mécaniques comme la résistance à la compression. Cette étude est une contribution pour pallier ce déficit. En effet, ce nouveau matériau (bloc d'argile stabilisé au ciment) est destiné à la réalisation de murs des maisons, pour inciter à son utilisation une bonne connaissance de ces propriétés telle que sa conductivité thermique mais aussi la résistance à la compression, peuvent être des facteurs déterminants. Par ailleurs, de nombreuses études ont montré que l'incorporation de stabilisant comme le ciment entraîne une variation de ces propriétés [1-3]. Aussi cette étude vise-t-elle d'une part à mesurer la résistance à la compression et conductivité thermique de ces blocs et d'autre part à étudier l'influence du ciment sur ces propriétés. Des mesures de la conductivité thermique par la méthode du fluxmètre ont donc été réalisées.

2. Technique expérimentale

2-1. Elaboration des échantillons

Les échantillons destinés à cette étude, sont réalisés à partir d'une matière première de base composée en proportion massique de 80 % d'argile et de 20 % de sable (utilisé comme dégraissant). L'argile (constituant principal), est composée de kaolinite (56 %) d'illite (29 %) et quartz (24 %) [4] et le sable essentiellement composé de quartz [5]. L'argile et le sable sont d'abord mélangés à sec pour former la matière première de base. A ce mélange, on ajoute différentes proportions de ciment portland CEM IIB (CPJ 32,5) dans des teneurs allant de 0 à 15 %. A chaque mélange de ces trois constituants à sec, on ajoute une quantité d'eau de gâche déterminée selon la formule suivante :

$$E = 0,2A + 0,4C \quad (1)$$

Où E , est la quantité d'eau en mL, A la masse d'argile et C la masse de ciment exprimée en g.

Le mélange ainsi constitué est malaxé jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Deux types d'échantillons ont été réalisés pour cette étude. Pour les mesures de la résistance à la compression des blocs de dimensions 22 x 11x 8 cm³ sont réalisés à l'aide d'une presse manuelle de type Terstaram permettant de faire un compactage statique. Afin de déterminer la conductivité thermique des blocs, des échantillons de petites tailles (30x30 mm²) dont l'épaisseur varie entre 5 et 2 mm, ont été réalisés à partir du même mélange. Ceci pour tenir compte du dispositif de mesure. Ces échantillons sont obtenus par compaction à l'aide de la presse TERSTARAM dont on modifie le volume du moule.

Après séchage dans une salle (humidité relative 70 à 80 %, $\Theta = 27$ à 30° C) pendant 28 jours comme le préconisent [6], leurs surfaces sont ensuite rectifiées à l'aide d'une meule de précision.

2-2. Détermination de la résistance à la compression

La résistance mécanique d'un matériau de construction est de loin l'une des propriétés les plus importantes. En effet, la stabilité de l'édifice réalisé en dépend énormément. La résistance a été mesurée : deux types de mesures ont été faites l'une par voie sèche ou « résistance sèche » effectuée sur les blocs à l'état sec et l'autre par voie humide ou « résistance humide », effectuée sur les blocs immergés dans l'eau pendant 4 jours après 24 jours de séchage [7]. La résistance en compression exprimée en MPa est donnée par la formule :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

où F est la force appliquée en Newton; S la surface de contact des briquettes avec le plateau en mm^2 .

2-3. Détermination de la conductivité thermique

2-3-1. Mise en œuvre de la mesure

Il s'agit de mesurer le flux thermique à travers les différents échantillons étudiés lorsqu'on les soumet à un chauffage. Le dispositif utilisé à cet effet est un fluxmètre de type Captec (**Figure 1**). Ce dispositif permet de mesurer des conductivités thermiques comprises entre 0 et $5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour des échantillons de faible épaisseur ($\Phi \leq 5 \text{ mm}$) en régime stationnaire. La méthode est basée sur l'application de la loi de Fourier en régime permanent (dans les conditions de stabilité):

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

où Φ , est le flux thermique, λ , la conductivité thermique et S , la surface d'application du flux et T , la température.

Elle nécessite l'utilisation de deux échantillons au minimum de différentes épaisseurs et tient compte des résistances de contact (l'utilisation d'un grand nombre d'échantillon permet une meilleure précision statistique). Après détermination des épaisseurs des échantillons, un gradient thermique est imposé à travers chaque échantillon (de base $30 \times 30 \text{ mm}$) placé entre deux plaques. A l'aide d'une source d'alimentation électrique, une intensité de courant est délivrée dans la résistance chauffante incorporée dans la plaque supérieure tandis que la plaque inférieure est en contact avec un dissipateur thermique. Ces capteurs de flux sont connectés à un thermocouple différentiel qui permet de déterminer la différence de température entre les faces de l'échantillon. L'ensemble capteurs thermiques/thermocouple différentiel est relié à un commutateur lui-même connecté à un voltmètre. Ce voltmètre permet de déterminer les flux thermiques et la différence de température exprimés sous forme de tension. Les différentes valeurs pour le flux thermique et la température exprimées respectivement en Wm^{-2} et $^\circ\text{C}$ sont ensuite obtenues par calcul.

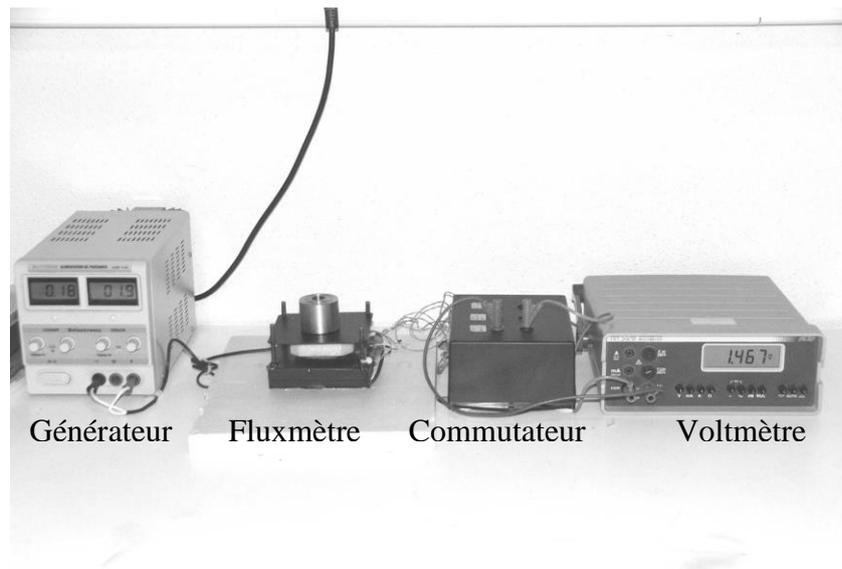


Figure 1 : Dispositif expérimental de mesure de la conductivité thermique

2-3-2. Calcul de la conductivité thermique

A partir des valeurs de flux thermique (Φ) et la différence de température ΔT données par le voltmètre, on calcule la résistivité thermique R^* à l'aide de la formule suivante:

$$R^* = \frac{\Delta T}{\Phi_{\text{moy}}} \quad (4)$$

où R^* : la résistivité thermique (W/m. K)

La détermination de la conductivité thermique s'obtient selon la formule suivante :

$$\lambda = \frac{e_1 - e_2}{R^*_1 - R^*_2} \quad (5)$$

où e_1 et e_2 sont les épaisseurs des différents échantillons (m) et $R^*_1 - R^*_2$ leurs résistances apparentes (W/m. K).

Pour minimiser les erreurs, la résistivité moyenne est déterminée à l'aide d'une courbe de régression $R^* = f(e)$. La pente de cette courbe correspond à la conductivité thermique λ .

3. Résultats et discussion

3-1. Détermination de la résistance à la compression

Les résultats de ces analyses sont présentés dans la **Figure 2**. Ces courbes montrent que la résistance à la compression varie en fonction de la teneur en ciment. Pour la compression par voie sèche, la résistance baisse entre 0 et 2 % de ciment. Elle varie de 3,7 MPa à 3,2 MPa en passant par 2,9 MPa pour 1 % de ciment. A partir de 3 % de ciment la résistance croît. Elle passe d'environ 3,8 MPa à 9 MPa. Pour les blocs humides, entre 0 et 3 %, la résistance n'a pu être déterminée car les blocs sont totalement ou partiellement dissous sous l'action de l'eau au bout de 4 jours d'immersion. Les premières valeurs de résistance sont obtenues à partir de 4 % de ciment. Ici, la résistance croît. Elle passe de 0,92 à 5,5 MPa.

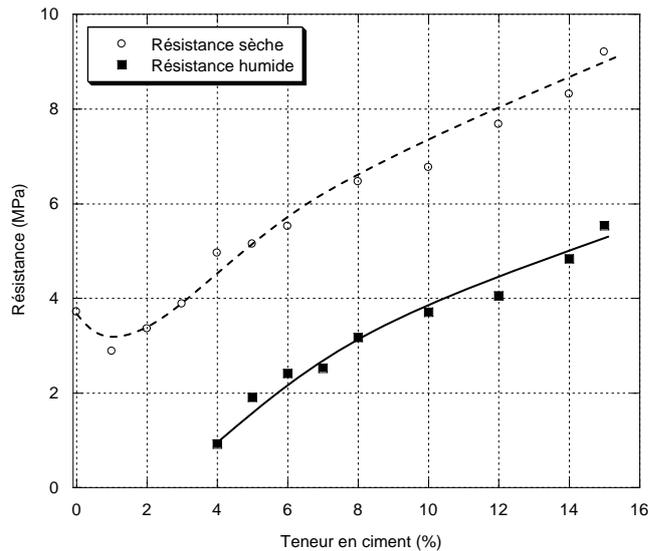
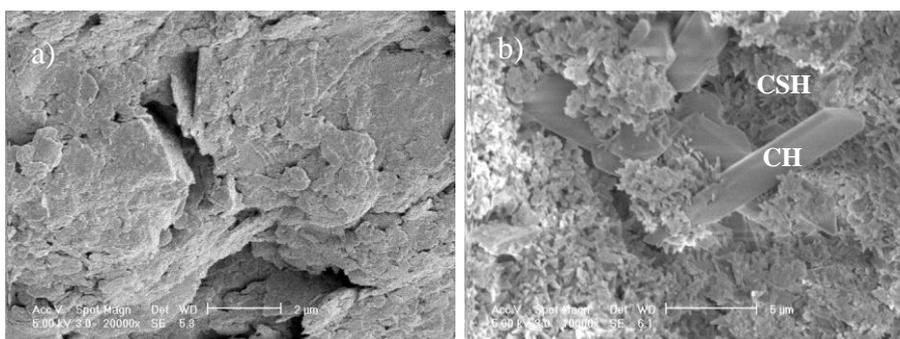


Figure 2 : Influence du ciment sur la résistance à la compression des blocs

Entre 0 et 2 % de ciment, la baisse de la résistance peut s'expliquer par le fait que le ciment Portland est en faible quantité. Ainsi sa répartition serait inégale dans l'ensemble du bloc. Il se forme donc par endroits dans le bloc, des matrices renforcées d'argile-ciment ou argile-sable-ciment et à d'autres endroits uniquement un amas de particules d'argile. Ces amas de particules d'argile sont des zones de faiblesse par lesquelles la fissure due à l'application de la force (de compression) va se propager pour entraîner la rupture. L'augmentation de la résistance à partir de 3 % de ciment, est liée au fait que la proportion du ciment dans le bloc augmentant, il se produit une meilleure répartition des hydrates. Ceux-ci renforcent les liaisons entre les constituants (particules d'argile et particules de sable) du bloc (**Figure 3**). Afin de mettre en évidence l'action du ciment dans le renforcement de la cohésion entre les différents constituants des blocs, des observations au MEB ont été effectuées (**Figure 3**). Ainsi la figure 3a montre une structure interne d'un échantillon ne contenant pas de ciment. Sur cette image, les micelles d'argile sont collées les unes aux autres formant une matrice compacte avec des pores par endroits. En présence d'eau, les hydrates de ciment se forment (**Figure 3b**). Ces hydrates, composés de plaquettes de portlandite (CH) et des silicates de calcium hydratés (CSH) plus ou moins compacts se développent aussi bien dans la zone de contact argile-sable (**Figure, 3c**) que dans la matrice argileuse (**Figure 3d**). Leur présence montre qu'il se forme dans les blocs des liaisons argile-ciment et/ou argile-sable-ciment qui renforcent l'aptitude des blocs à résister aux sollicitations mécaniques. Ce renforcement des liaisons augmente avec la teneur en ciment ce qui explique que les résistances sont plus élevées pour les teneurs en ciment importantes.



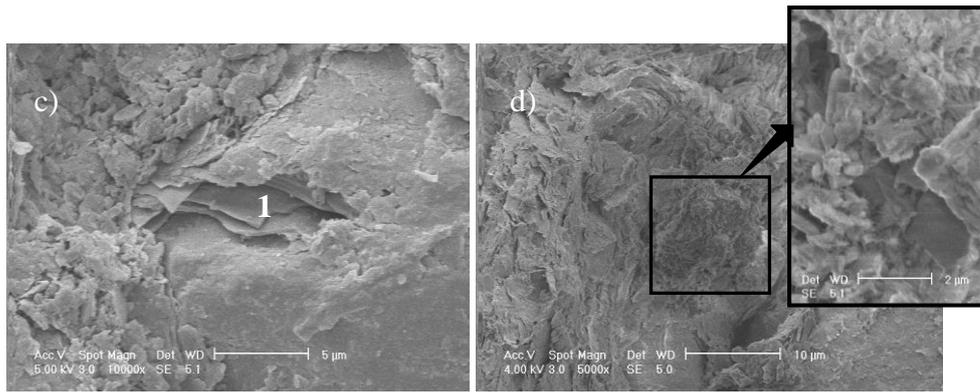


Figure 3 : Influence du ciment sur la cohésion des blocs

- a) bloc sans ciment : Particules d'argile compactée*
b) ciment hydraté : morphologie des CSH (silicate de calcium hydraté) et CH (Portlandite).
c) Bloc d'argile-sable-ciment : 1 Contact matrice argileuse-sable renforcé par les hydrates de ciment
d) Matrice argileuse renforcée par les hydrates de ciment, le cadre montre un zoom fait sur les hydrates de ciment

La comparaison de la courbe de « résistance sèche » à la courbe de « résistance humide » montre que pour une même teneur en ciment, la « résistance sèche » est supérieure à la « résistance humide ». Cette différence de résistance constatée dans de nombreuses études relatives à la stabilisation des blocs de terre ou d'argile [1;8-10] est liée selon [11] à la pression exercée par l'eau au niveau des pores et à la dissolution partielle des probables zones non stabilisées dans les blocs immergés. L'immersion des blocs montre qu'il faut une teneur seuil en ciment de 4 % pour pouvoir mesurer des résistances humides. Les résultats montrent également que pour les sols à dominance argileuse, une teneur trop faible en ciment peut fragiliser ces matériaux. En référence à la norme sur les blocs de terre comprimée (géobéton) en Côte d'Ivoire [12], il faudrait une teneur minimale en ciment de 5 % pour que les blocs confectionnés puissent être utilisés pour réaliser des murs faiblement porteurs ou pour des cloisonnements.

3-2. Détermination de la conductivité thermique

Pour une teneur en ciment donnée la résistivité thermique et la conductivité thermique sont déterminées comme le montre la figure 4. Ainsi pour un bloc sans ciment, λ est déterminé de la manière suivante : à partir de la courbe de régression $R^* = f(e)$

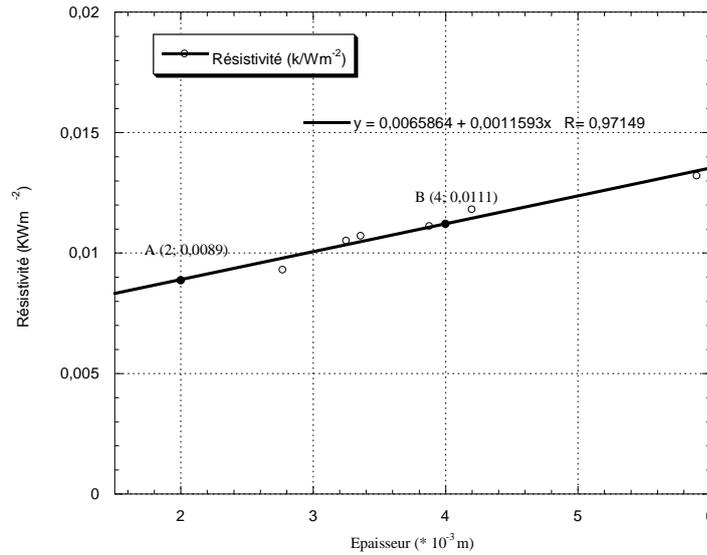


Figure 4 : Courbe de détermination de la conductivité thermique

$$\lambda = \frac{e_2 - e_1}{R^*_2 - R^*_1}$$

$$\lambda = \frac{4 - 2}{0,0111 - 0,0089} \tag{6}$$

$$\lambda = 0,91 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

3-3. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en ciment

Les résultats sont présentés à la **Figure 5**.

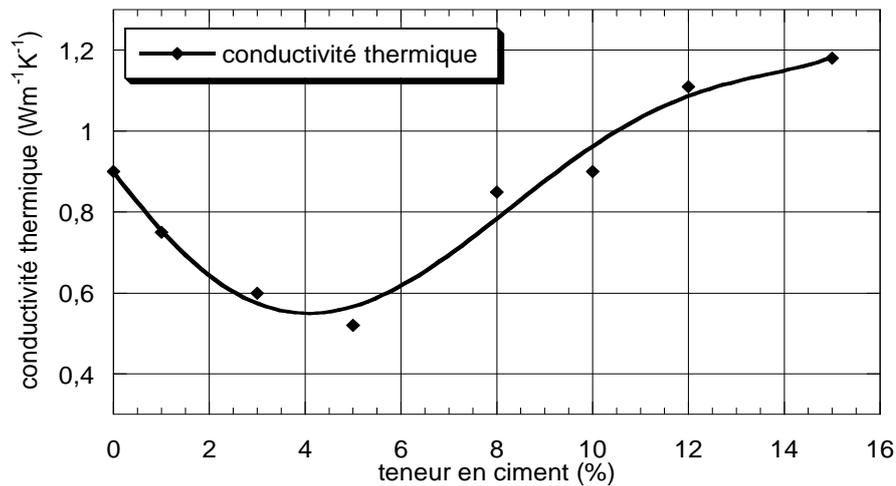


Figure 5 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en ciment

La courbe obtenue montre que la conductivité thermique varie en fonction de la teneur en ciment. On note une baisse de la conductivité entre 0 et 5% de ciment. De $0,91 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les blocs sans stabilisant, elle passe à $0,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ quand la teneur en ciment est de 5 %.

On observe ensuite que la conductivité thermique augmente pour des teneurs de ciment variant entre 5% et 15%. Pour ces teneurs en ciment, la conductivité thermique varie de $0,54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à $1,18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. La conductivité thermique d'un matériau dépend de plusieurs paramètres [13] tels que : la nature des éléments constitutifs du matériau [2], la teneur en eau [3] la température et la porosité [14,15]. Les blocs étant réalisés dans les mêmes conditions ($\frac{E}{A+C}$ constant) et les mesures de conductivité effectuées en régime stationnaire, la variation de la conductivité pourrait être liée à une variation de la porosité des matériaux, à la composition intrinsèque de chaque échantillon et à la cohésion du matériau. La baisse de la conductivité thermique pourrait être liée à l'augmentation de la quantité de pores ou à l'augmentation du diamètre des pores occasionnée par une mauvaise répartition du ciment [1]. En effet, on estime que pour cet intervalle la quantité de ciment est insuffisante pour favoriser la mise en place d'une structure homogène [5]. Dans les conditions de mesure de la conductivité thermique mise en œuvre (régime stationnaire), on estime que le transfert de la chaleur se fait principalement par conduction [16]. Alors les pores représentent donc des gaps au niveau du transfert, une augmentation de leur diamètre ou de leur quantité entraîne le ralentissement du transfert de la chaleur d'où la faible conductivité thermique mesurée.

Quant à l'augmentation de la conductivité thermique au delà de 5 % de ciment, elle peut être engendrée par une augmentation de la cohésion au niveau des différents constituants du bloc [17]. En effet, l'hydratation du ciment permet la formation de composés (les CSH et la portlandite) qui permettent un renforcement des liaisons entre constituants (argile et sable) et favorise donc une diminution de la porosité (soit en quantité soit en taille) cela a pour conséquence de créer une structure interne continue et homogène. Cette structure va donc être favorable au transfert de la chaleur. Ce qui explique donc l'augmentation de la conductivité thermique. Il est à remarquer cependant que l'augmentation de la conductivité thermique liée au ciment demeure dans des proportions proches de la conductivité thermique du bloc sans ciment. En effet, les résultats obtenus montrent qu'à 10 % de ciment, la conductivité thermique est de $0,89 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$; valeur très proche de celle obtenue pour le bloc sans ciment ($0,91 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Il faudrait donc ajouter au-delà de 10 % de ciment pour avoir une conductivité thermique supérieure à celle du bloc sans ciment.

4. Conclusion

L'étude des propriétés thermomécaniques des blocs d'argile stabilisée au ciment montre que ces blocs présentent des bonnes résistances et de faibles conductivités thermiques. Ces paramètres varient en fonction de la teneur en ciment. En effet en faible quantité (0 à 2 %), le ciment engendre la diminution la résistance à la compression et de la conductivité thermique. Au-delà de 5 %, on observe une augmentation de ces deux propriétés. La simulation de l'utilisation de ces blocs dans les conditions extrêmes (mesure de la résistance par voie humide) permet de dire qu'il faudrait une teneur minimale en ciment de 5 % pour que les blocs soient conformes à la norme d'utilisation des blocs de terre stabilisée en Côte d'Ivoire. Il en est de même pour la conductivité thermique qui augmente à partir de 5 % de ciment mais reste toutefois dans des proportions voisines du matériau sans ciment. Ces valeurs étant relativement faibles, nous pouvons dire que l'apport du ciment tout en améliorant les propriétés physiques et mécaniques n'altère pas les propriétés thermiques. Ce qui constitue donc un avantage pour ce matériau.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'Agence Universitaire de la Francophonie pour avoir financé ces travaux à travers la bourse de formation à la recherche et le Prof David S. SMITH du GEMH de l'Ecole Nationale de Céramique Industrielle de Limoges (France) pour nous avoir permis d'effectuer les mesures au sein de son laboratoire.

Références

- [1] - C. H. KOUAKOU. Valorisation des argiles de Côte d'Ivoire : Etude de la stabilisation de blocs d'argile comprimée et stabilisée au ciment à l'aide de liants hydrauliques. Doctorat Sciences de la terre, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2005), 186 p.
- [2] - I. ABOUBOU, L. DIABATE et G. MENGUY: Détermination de la conductivité thermique de matériaux locaux de construction à Bamako. Journal des sciences pour l'ingénieur, n°4, (2004), pp 1-6.
- [3] - P. MEUKAM, A. NOUMOWE, Y. JANNOT et R. DUVAL: Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisée en vue de l'isolation thermique de bâtiment. Materials and structures/ matériaux et Construction, vol, 36, (2003), pp 453-460.
- [4] - E. EMERUWA, K. C. KOUADIO, C. H. KOUAKOU, M. O. BOFFOUE, A. A. ASSANDE, OUATTARA S, Y. COULIBALY, DAUSCHER A et LENOIR B. Caractérisation des argiles de la région d'Abidjan: Etude comparée de quelques gîtes et leur perspective de valorisation. Revue ivoirienne des Sciences et Techniques, n°11, (2008), pp 177-192.
- [5] - K.C. KOUADIO, Elaboration et caractérisation de blocs d'argile comprimée et stabilisée au ciment (CIMARG): Influence de l'apport de dégraissant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs Doctorat Sciences de la terre, Université de Cocody, Abidjan ; Côte d'Ivoire, (2009), 172 p.
- [6] - J. SIMONNET et P. H. BARRIERE Constructions en géobéton dans la réserve d'Azagny. LBTP, Abidjan, (1984), 67p.
- [7] - SIMONNET J. et P. SEREY Emploi du béton de terre (géobéton) pour la construction économique en Côte d'Ivoire. Annales de l'ITBTP n°386, Nouvelles presses du centre, 87, Limoges, (1979) pp 105-140.
- [8] - M. TITECAT, Avant-projet de norme : blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment "géobéton" Bulletin du LBTP n° 3, Abidjan, (1986), pp 39-46.
- [9] - A. DON-MELLO ET M. N'DRI Caractérisation de résistance et comportement des géopavés. African journal of building materials, volume 4 n° 1 et 2, Yaoundé, Caméroun, (2000), pp 19-24.
- [10] - K. C. KOUADIO Elaboration et caractérisation de blocs d'argile comprimée et stabilisée au ciment. (Cas de l'argile de Dabou). DEA Sciences de la terre option Géomatériaux, Université de Cocody, Abidjan, (2003), 58 p.
- [11] - WALKER P. STRENGTH, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. Cement and concrete composites, 17, (1995), pp 301-310.
- [12] - CODINorm NI 0511002 Définition et spécification, bloc de terre comprimée et stabilisée au ciment « géobéton » Abidjan, (1994), 4 p.
- [13] - L. MARMORET, A. BOUGUERRA, K. AL-RIM ET M. QUENEUEDEC Conductivité thermique d'un béton argileux cellulaire : Cas d'un allégement par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Revue générale de thermique, tome 34, n°402, (1995), pp 393-400.
- [14] - P. POUILLAIN, P. MOUNANGA, G. BASTIAN ET A. KHELIDJ. Propriétés de transfert thermique de pâtes de ciment durcissantes et de mortiers durcis — prise en compte du séchage. XXIII^e Rencontres universitaires de Génie Civil- Risque et Environnement, (2005), 8 p.
- [15] - I. DJERAN-MAIGRE, B. BAZARGAN-SABET et S. CHANCHOLE Etude expérimentale de la conductivité thermique d'une argile en fonction de la temperature. Bulletin de la société géologique de France, tome 3, (1997), pp 325-330.
- [16] - C. LANGLAIS et S. KLARSFELD : Isolation thermique à température ambiante : transfert de chaleur. Techniques de l'Ingénieur, BE 9859, (2004), 17 p.
- [17] - M. L. Camara, A. Vianou et M. Keita: Mesure de la conductivité thermique de la boue rouge stabilisée au ciment et à l'argile. Journal des sciences pour l'ingénieur, n°5, (2005), pp 40-45.