

# **Construction en terre, ressources secondaires et matériaux bio-sourcés : un avenir pour l'Afrique**

par

Luc COURARD

Université de Liège, Building Materials, Research Unit *Urban and Environmental Engineering*, Allée de la Découverte, 9 – 4000 LIEGE

La terre est à la fois un matériau ancestral et contemporain pour la construction d'habitations voire de bâtiments et édifices civils et religieux. Alors que la population, en particulier à l'échelle du continent africain, ne cesse de grandir, trouver une habitation de qualité, confortable et durable devient de plus en plus difficile. La disponibilité et le coût élevé des matériaux de construction tels que le ciment, l'acier ou le bois, restreignent l'accès au logement d'une part grandissante de la population qui s'entasse dans des bidonvilles. Se réapproprier la terre comme matériau pour l'édification des bâtiments constitue une partie de la solution. C'est en améliorant ses performances, grâce à l'utilisation de ressources secondaires provenant de sous-produits industriels ou agricoles, que l'architecte et l'ingénieur peuvent convaincre la population que la terre est et reste un matériau d'avenir. Cette réflexion est illustrée spécifiquement à partir de la réalisation de Briques de Terre Comprimées (BTC), stabilisées avec de la chaux résiduelle et de la cendre de balle de riz.

Mots-clés : argile, chaux, cendre de balle de riz, briques de terre comprimée, bâtiments

## **Building with earth, secondary resources and bio-sourced materials: a future for Africa**

Earth is both an ancestral and contemporary material for the construction of dwellings but also civil and religious buildings. As the population, especially across the African continent, continues to grow, finding quality, comfortable and sustainable housing is becoming increasingly difficult. The availability and high cost of building materials such as cement, steel or wood are limiting access to housing for a growing share of the population who crowd into slums. Reclaiming earth as a building material is a part of the solution. It is by improving its performance, through the use of secondary resources from industrial or agricultural by-products, that the architect and the engineer can convince the population that earth is and remains a material of the future. This reflection is illustrated specifically from the production of Compressed Earth Bricks (CEB), stabilized with residual lime and rice husk ash.

Keywords: earth, lime, rice husk ash, stabilized compressed earth blocks, housing

## **Aarde constructies, secundaire bronnen en materialen van biologische oorsprong: een toekomst voor Afrika**

Aarde is zowel een voorouderlijk als hedendaags materiaal voor de bouw van woningen en zelfs van burgerlijke en religieuze gebouwen. Terwijl de bevolking, vooral op het Afrikaanse continent, blijft groeien, wordt het steeds moeilijker om kwalitatieve, comfortabele en duurzame woningen te vinden. De beschikbaarheid en hoge kosten van bouwmateriaal zoals cement, staal of hout beperken de toegang tot woningen voor een groeiend deel van de bevolking dat zich in sloppenwijken verdringt.

Grondterugwinning als bouwmateriaal is een deel van de oplossing. Door de kwaliteit te verbeteren, door het gebruik van secundaire bronnen van industriële of landbouw bijproducten, kunnen de architect en de ingenieur de bevolking ervan overtuigen dat aarde een materiaal van de toekomst is en blijft. Deze reflectie wordt specifiek geïllustreerd door de productie van Compressed Earth Bricks (CEB), gestabiliseerd met restkalk en rijstschilas.

Sleutelwoorden: aarde, kalk, rijstschil, samengeperste aardstenen, gebouwen

## Introduction

Lorsque le colonisateur français est arrivé à Ouagadougou, il a appelé la ville "*Bancoville*", en référence à l'utilisation généralisée de l'argile dans la construction, sous la forme d'adobe, de banco ou de briques moulées (Meyer 2008; Wyss 2005). L'habitat en terre crue est en effet l'un des plus répandus dans le monde depuis des millénaires: un tiers de l'humanité vit dans des habitations en terre, un matériau disponible et accessible partout (Atoke 2013). Il permet un hébergement dans des conditions très confortables et durables, comme en témoignent les architectures du passé telles que le palais de l'Alhambra à Grenade (patrimoine mondial de l'UNESCO) ou les constructions plus contemporaines de l'architecte Martin Rauch (Sauer 2020) (Fig. 1). La construction en terre peut aussi répondre au besoin de densification par des constructions collectives jusqu'à 6 étages comme en témoigne la ville de Shibām au Yémen, surnommée "Manhattan du désert" (XVII<sup>e</sup> siècle). Cela montre à quel point cette technique, mise à jour avec nos moyens modernes et notre force mécanique, a un grand potentiel de développement. Les constructions en terre crue sont aujourd'hui «à la mode» (Van der Linden et al. 2019) pour les bâtiments publics et privés (Jorge 2015). L'architecte burkinabé D. F. Kéré a construit plusieurs bâtiments et exposé sur ce thème à la Royal Academy of the Arts de Londres. Plusieurs écoles et hôpitaux ont été construits avec la technique des Briques en Terre Comprimée (BTC) (Sipane 2014): elles offrent des conditions thermo-hygrométriques compatibles avec l'environnement local (Fig. 1(b)).

Au Burkina Faso, pays enclavé aux ressources limitées et soumis à des conditions climatiques extrêmes, les logements sont majoritairement construits à partir de matériaux locaux (Habitat 2019). En effet, près de 70% des logements possèdent des murs en terre crue (Fig. 2) tandis que seulement 14% sont construits «en dur». La grande majorité des ménages est confrontée au coût très élevé des matériaux de construction (ciment, barres et barres d'armature en acier, granulats) et le marché intérieur est dominé par quelques sociétés d'importation. Cependant la population reste sceptique quant à la résistance et la durabilité des constructions en terre : le terme «local», contrairement à «importé», a souvent une signification plutôt négative (Zoungrana et al. 2018). C'est pour cette raison que les maisons d'habitation burkinabé de milieu de gamme sont actuellement constituées de blocs de béton avec un toit en tôle, ce qui est une ineptie, tant du point de vue esthétique que thermique. En pratique, la majorité de ces maisons dites "dures" ne durent pas plus de quelques années, alors qu'une villa construite en terre crue selon les normes et les règles de l'art résiste largement au-delà (Houben & Guillaud 2006).

Les avantages économiques de l'utilisation de la terre crue sous forme de briques (BTC) sont nombreux: réduction des matières importées, utilisation de ressources naturelles non transformées, patrimoine et savoir-faire ancestral, production manuelle caractérisée par une forte intensité de main-d'œuvre, qui favorise l'économie locale et la création d'emplois, et contribue concrètement à la lutte contre la pauvreté (Minke 2006). Une telle technique permet également de répondre à la demande de logements et de lutter contre sa précarité. De plus, ces matériaux contribuent au confort des habitations en assurant une réduction de l'amplitude et de la vitesse des variations climatiques, grâce à une forte inertie thermique et une excellente capacité de régulation de l'humidité intérieure (Vercher et al. 2015).

D'autre part, en 2008, pour la première fois dans l'histoire (Bloom & Khanna 2008), la population urbaine a dépassé la population rurale à l'échelle mondiale et près de 75 % des citadins vivent dans les pays en développement (Fig. 3). Côté pile, les économistes reconnaissent qu'une bonne gestion de l'urbanisation permet de stimuler la croissance et d'améliorer la qualité de vie. Côté face, une urbanisation mal gérée peut non seulement freiner le développement, mais aussi favoriser l'expansion des bidonvilles, où vit déjà un citadin sur trois selon l'ONU (UN 2006). L'International Housing Coalition relève que, dans plusieurs villes d'Afrique, moins de 10 % de la population habite des quartiers viables et des logements décents (Giddings 2007). Les statistiques de l'ONU-Habitat sont révélatrices: actuellement, en Afrique sub-saharienne, 72% des habitants vivent dans des bidonvilles, soit la plus forte proportion dans le monde (UN 2006). Les principales problématiques relatives aux difficultés de vie des individus en milieu urbain sont le surpeuplement urbain, le manque d'infrastructures, la difficulté d'approvisionnement ainsi que l'insuffisance des structures sanitaires et sociales. Or, il apparaît, d'après les projections, que la population urbaine de la région devrait plus que doubler pour atteindre 760 millions d'ici 2030 (UN 2006).

Dans l'évolution sociopolitique actuelle, beaucoup d'indicateurs sont réunis pour dire que la question de l'habitat doit être une préoccupation majeure pour les autorités municipales et nationales. La solution à l'habitat informel s'inscrira dans une logique de résolution de problème de l'habitat d'une manière générale. Or, sur ce plan, beaucoup de problèmes auxquels il va falloir trouver des réponses appropriées subsistent. La terre crue, stabilisée et rendue plus durable grâce à des sous-produits industriels et agricoles, représente une partie de la solution.

### **La terre comme matériau de construction**

La terre utilisée pour la construction est généralement un sol bien calibré avec une quantité appropriée d'argile, de limon, de sable et de fins agrégats. Différentes techniques sont proposées pour la mise en oeuvre, comme la bauge, l'adobe, le torchis ou le pisé (Fabbri et al. 2018). La brique de terre comprimée (BTC) représente une autre technique (Egentti & Khatib 2016) qui consiste à compresser dans un moule le mélange de terre et d'eau entre les deux plateaux d'une presse (Fig. 4). La pression a pour effet d'augmenter la densité du squelette granulaire et, par la même, la résistance mécanique du mélange (Ouedraogo et al. 2013). Les molécules d'eau, disposées entre les plaquettes d'argile, vont alors permettre d'assurer la cohésion du mélange.

L'argile, principal constituant de ces BTC, possède en effet des propriétés liantes liées à sa structure et sa minéralogie (Fig. 5). Le matériau argileux utilisé pour la production de BTC devrait avoir une certaine fraction de particules fines et une plasticité suffisante pour lier les particules plus grossières afin d'assurer la stabilité mécanique de la matrice. Ceci correspond à 10 à 50% des particules d'argile et un indice de plasticité de 10 à 30, selon la présence, le type et la teneur en élément stabilisant (Nshimiyimana et al. 2020(a)). Une étude récente autour de gisements dans l'environnement de la ville d'Ouagadougou a montré que deux matériaux, l'un contenant une teneur en kaolinite plus élevée et l'autre une teneur en quartz plus élevée (Tableau 1), offrent des comportements assez semblables, à condition d'être correctement stabilisés (Nshimiyimana et al. 2020(b)).

Le problème principal de l'utilisation de l'argile en construction provient de sa mauvaise tenue en atmosphère humide, en particulier vis-à-vis de la pluie (Paulus 2015). Une augmentation de la teneur en eau entraîne la perte de cohésion et une dilution du matériau (Fig. 6). Ce comportement explique en grande partie le rejet de ce matériau par la population, par rapport à l'usage de blocs de béton (ou parpaings) qui sont insolubles dans l'eau. Il convient donc de réhabiliter l'usage de l'argile en apportant une amélioration significative à son comportement en présence d'eau : la stabilisation au moyen d'un

liant hydraulique<sup>1</sup> ou pouzzolanique<sup>2</sup>, ainsi que des dispositifs architecturaux adaptés comme une toiture débordante et une base de mur en matériau rocheux (Hema et al. 2017) pourraient contribuer à terme à une meilleure acceptation de la terre en construction.

### Amélioration des propriétés des briques en terre

De nombreux efforts ont été faits pour améliorer les performances physico-mécaniques des BTC en conditions sèches et humides ainsi que leur durabilité. L'opération passe principalement par la stabilisation avec des liants chimiques tels que le ciment, la chaux voire les géopolymères (Nkwaju et al. 2019 ; Sore et al. 2018) ainsi que des sous-produits industriels et agricoles (Shubbar et al. 2019 ; Nagaraj et al. 2014). La résistance en compression, considérée comme un indicateur approprié des performances des BTC stabilisées, devrait être d'au moins 4 MPa et 2 MPa, respectivement, dans des conditions sèches et humides pour une utilisation dans la construction de murs porteurs (Bogas et al. 2018).

Avec le ciment et la chaux, l'amélioration de la résistance en compression est liée à la formation de produits non solubles tels que les hydrates de silicate de calcium (CSH) et les hydrates d'aluminate de calcium (CAH), provenant soit de la réaction d'hydratation du ciment, soit de la réaction pouzzolanique entre la chaux et les minéraux alumino-silicatés comme la kaolinite et les fines particules de quartz (<50 mm) que l'on retrouve dans le matériau argileux (Diamond et al. 1963 ; Ciancio et al. 2014).

L'amélioration des propriétés mécaniques des BTC passe en outre par une meilleure compacité de la brique (Fig. 4), ce qui entraîne une augmentation de la densité et, par là-même, des résistances mécaniques (Nshimiyimana et al. 2020 (a)). Ceci doit néanmoins être tempéré par les propriétés hygrothermiques demandées à ce genre de construction. En fait, dans l'environnement sub-sahélien, mais plus généralement tropical ou équatorial, la terre peut jouer un rôle essentiel dans le confort de vie à l'intérieur des bâtiments : grâce à la fois à son caractère isolant et ses propriétés d'inertie thermique, le matériau est capable de réguler la température et l'humidité (Alpuche et al. 2014). Malheureusement, augmenter la densité a tendance à diminuer la quantité d'air dans le matériau et donc à augmenter sa conductibilité thermique (coefficient lambda<sup>3</sup>). Or c'est un matériau léger qui va contribuer à une bonne isolation thermique (Moussa et al. 2019). A l'inverse, un matériau plus lourd offre une meilleure inertie thermique, qui permet une régulation de la température intérieure (c'est-à-dire une limitation de l'impact des variations de températures extérieures). Un système à double paroi (forte inertie thermique à l'intérieur et isolation à l'extérieur) constitue une solution efficace. Des études réalisées par Hema et al. (2017) montrent que, non seulement, il faut tenir compte du mode d'occupation des pièces de vie (jour ou nuit par exemple) mais aussi des conditions de ventilation pour pouvoir définir correctement les caractéristiques hygrothermiques des BTC à utiliser.

Un bâtiment pilote mettant en œuvre des parois en BTC et de l'isolant, illustré à la figure 7, est instrumenté avec capteurs hygrothermiques. Trois configurations de paroi extérieure font l'objet de l'expérimentation : monocouche en BTC, isolant extérieur + BTC intérieur et BTC extérieur + isolant intérieur. Les données mesurées concernent la température et l'humidité relative de l'air intérieur, la

<sup>1</sup> Hydraulicité: aptitude d'un produit à faire prise et durcir en présence d'eau avec formation de composés stables

<sup>2</sup> Pouzzolanicité: aptitude d'un produit à fixer la chaux à température ambiante pour former une structure rigide

<sup>3</sup> Le coefficient lambda s'exprime en W/m.K, pour Watt par mètre et degré Kelvin : plus le coefficient lambda est faible, plus la résistance thermique du matériau est élevée et donc plus ses performances sont importantes en termes d'isolation thermique

température et l'humidité relative de l'air extérieur, les températures de parois (2 de surface, 1 entre isolant et BTC), la radiation solaire. Sur la période de l'expérimentation, la température moyenne intérieure est comparée à la température extérieure, en fonction du type de paroi et de l'occupation – diurne ou nocturne – de la pièce d'habitation: une différence entre la température moyenne intérieure et la température extérieure (heure par heure) supérieure à zéro indique que l'ambiance intérieure est globalement plus chaude que la moyenne de température extérieure. Une différence inférieure à zéro indique que l'ambiance intérieure est globalement moins chaude que la moyenne de température extérieure (Fig. 8). De plus, les résultats confirment les tendances en ce qui concerne le niveau de confort thermique dans les habitats dont les parois extérieures seraient mises en œuvre suivant les 3 configurations décrites dans la méthodologie. La porte et les fenêtres du pilote sont restées fermées durant l'expérimentation (pas de ventilation). Lorsque la pièce est occupée de jour, la couche en BTC doit être en contact avec l'ambiance intérieure tandis que pour une occupation de nuit, la configuration de paroi avec la BTC à l'extérieur offre une meilleure ambiance thermique.

### Ressources secondaires et sous-produits industriels et agricoles

Le bon compromis entre propriétés thermiques et mécaniques passe le plus souvent par une stabilisation physique par compression des briques et par une liaison chimique des particules. La circularité de l'économie passe, aussi en Afrique, par l'utilisation de matériaux locaux et la valorisation de ressources secondaires, notamment au travers du recyclage (McDonough et al. 2002). Dans le cadre d'un projet d'amélioration de l'habitat au Burkina Faso, soutenu par l'ARES-CCD, le carburé de calcium résiduel (CCR), un sous-produit industriel riche en chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) provenant de la fabrication d'acétylène, a été identifié et a montré un certain potentiel à améliorer la résistance à la compression des BTC par les interactions chimiques dans le mélange avec le matériau argileux (Nshimiyimana et al. 2018). De plus, des ajouts de la cendre de balle de riz (RHA), provenant de la calcination des résidus du battage du riz ont permis de fournir un matériau riche en silice réactive (Riza & Rahman 2015), capable d'apporter une pouzzolanité au mélange. A ce stade, la caractérisation des matériaux argileux doit être réalisée afin de vérifier leur aptitude à la fabrication de briques de terre (Houben & Guillaud 2006) car les performances des BTC sont largement influencées par les caractéristiques du matériau en terre, du type et de la teneur en stabilisant ainsi que le processus de production et de durcissement.

L'étude, réalisée au Burkina Faso, a permis de mettre en évidence notamment l'effet des paramètres de production et de durcissement sur la performance mécanique des blocs de terre comprimée (BTC) stabilisée avec 0-20% en poids de CCR. Riche en kaolinite (K) et en quartz (Q), deux matériaux terreux ont été mélangés avec le CCR et utilisés pour mouler les BTC à une teneur en humidité optimale (OMC) et OMC + 2% de matière sèche. Les BTC ont été stockées à 20 °C, à la température ambiante en laboratoire à Ouagadougou ( $30 \pm 5$  °C) et à 40 °C, respectivement, pendant 90 jours (Nshimiyimana et al. 2020(b)).

Après durcissement, la réactivité des matériaux et la résistance à la compression des BTC ont été testées (Fig. 9). L'augmentation de l'humidité au moulage (d'OMC à OMC + 2%) a engendré une diminution de la résistance à la compression de 4,4 à 3,3 MPa pour les CEB stabilisés avec 20% de CCR et stockés à  $30 \pm 5$  °C pendant 45 jours (Nshimiyimana et al. 2020(b)). De même, une résistance à la compression de 4,4 MPa a été atteinte par les BTC stabilisés avec 10 et 20% de CCR, après 28 et 45 jours de durcissement, respectivement. À 40 °C, la résistance à la compression augmente de 3,3 fois (de 1,1 à 4,7 MPa de 0 à 20% CCR) pour les matériaux riches en kaolinite et 2,5 fois (de 2 à 7,1 MPa) pour les matériaux riches en quartz. Cette augmentation est plus faible à 20°C. Ces essais suggèrent

que le CCR est utile pour la stabilisation et l'amélioration des performances des BTC dans les régions chaudes.

L'ajout de cendres de balles de riz à ces mélanges permet d'améliorer encore les performances mécaniques et surtout plus rapidement (Fig. 10): la consommation de chaux, signe du développement de la stabilisation, est en effet plus rapide dans les mélanges terre-chaux-balle de riz calcinée. Les résistances mécaniques sont améliorées en présence de RHA (Fig. 11) ce qui atteste à nouveau de l'efficacité des réactions pouzzolaniques dans le développement des résistances (Nshimiyimana et al. 2019). Ceci permet d'atteindre les valeurs minimales requises pour la construction de bâtiments à 1 étage (4 MPa) sont aisément atteintes. Il est également observé que le comportement en présence d'eau (Fig. 12) est nettement amélioré par la stabilisation.

## Conclusions

L'avenir de la construction de bâtiments et le défi de l'urbanisation galopante nécessitent une réflexion de la part des autorités en charge des métropoles africaines. Cette gestion passe notamment par la prise en compte du coût – économique, environnemental et social – des matériaux de construction. L'amélioration des propriétés de la terre, matériau inépuisable et recyclable, grâce à la compression manuelle et l'ajout de stabilisants provenant de sous-produits industriels et agricoles, constitue une alternative intéressante aux produits à base cimentaires ou importés. Cela nécessite toutefois la prise en compte de la spécificité des matériaux terreux et leur disponibilité en quantités suffisantes. Mais le développement harmonieux des villes, la construction d'habitats confortables et vivables, durables face aux changements climatiques et résistants face aux sollicitations exceptionnelles, est à ce prix.

## Remerciements

Cette contribution est rendue possible grâce au support financier de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles (Belgique) - Commission de la Coopération au Développement (ARES-CCD) dans le cadre du Projet de Recherche et Développement (PRD) Amélioration de la qualité de l'habitat en terre crue au Burkina Faso (*Improving the quality of earth-based housing in Burkina Faso*), 2016-2021. L'auteur souhaite adresser des remerciements particuliers à Adamah Messan, professeur à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à Ouagadougou, ainsi qu'aux chercheurs-doctorants Philbert Nshimiyimana, Ousmane Zoungrana et Césaire Hema.

## Bibliographie

- Alpuche, M., Gonzalez, I., Marincic, I., Ochoa, J.-M. 2014. Comparative analysis of the thermal behaviour between cellular concrete blocks and stabilized earth blocks as wall materials. Energy Procedia 57, p. 1783-1791.
- Atoke, R. 2013. La terre crue en architecture : mieux connaître le matériau pour mieux l'adapter et l'utiliser. [https://issuu.com/atoke/docs/la\\_terre\\_crue\\_en\\_architecture\\_global\\_archiconsult](https://issuu.com/atoke/docs/la_terre_crue_en_architecture_global_archiconsult) (consulté le 20/03/20).
- Bloom D.E., Khanna, T. 2008. Révolution urbaine. In : Finances & Développement, Magazine du Fonds Monétaire International, 44(3), p. 9-14.

Bogas, J.A., Silva, M., Gomes, M.G. 2018. Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *Int. J. Archit. Herit.* 3058, 1–16 (<https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>).

Ciancio, D., Beckett, C.T.S., Carraro, J.A.H. 2014. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Constr. Build. Mater.* 53, 59–65 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077>).

Diamond, S., White, J.L., Dolch, W.L. 1963. Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. in: Twelfth Natl Conf Clays Clay Miner, 359–379. (<https://doi.org/10.1346/CCMN.1963.0120134>).

Egentti, C., Khatib, J. 2016. Sustainability of compressed earth as construction material. *Sustainability of Construction Materials* (Second edition), Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (Elsevier), p. 309-341.

Fabbri, A., Morel, J.C., Gallipoli, D. 2018. Assessing the performance of earth building materials: a review of recent developments. *Rilem technical letters* 3, p. 46-58.

Giddings, St. 2007. Housing Challenges and Opportunities in Sub-Saharan Africa. *IHC Newsletter* 1(4).

Habitat WorldMap. 2019. Fiche Burkina Faso. <https://habitat-worldmap.org/pays/afrique/burkina-faso>. (consulté le 22/03/20)

Hema, C.M., Van Moeseke, G., Evrard, A., Courard, L., Messan, A. 2017. Vernacular housing practices in Burkina Faso: Representative models of construction in Ouagadougou and walls hygrothermal efficiency. *Energy Proc.*, p. 535–540 (<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.398>).

Hema, C.M., Messan, A., Lawane, A., Van Moeseke, G. 2020. Impact of the Design of Walls Made of Compressed Earth Blocks on the Thermal Comfort of Housing in Hot Climate. *Buildings*, 10(9), 157. (<https://doi.org/10.3390/buildings10090157>).

Houben, H., Guillaud, H. 2006. *Traité de construction en terre*. – Marseille, Ed. parenthèse, 355 pp.

Jorge, F. 2015. Contemporary rammed earth construction. Alexandre Bastos – creativity and maturity. *Earthen Architecture: Past, Present and Future* - Mileto, Vegas, Garcia Soriano & Cristini (Eds), Taylor and Francis Group, London, p. 205-208.

McDonough, W., Braungart, M. 2002. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. North West Point (ed.), 193p.

Meyer, P.E. 2008. De Bancoville à la ville moderne. In *Ouagadougou (1850-2004)*, IRD éditions, p. 25-37.

Moussa, H.S., Nshimiyimana, P., Hema, C., Zoungrana, O., Messan, A., Courard, L. 2019. Comparative study of thermal comfort induced from masonry made of stabilized compressed earth block vs conventional cementitious material. *J Miner Mater Charact Eng.* 7, p. 385–403 (<https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76026>).

Nagaraj, H.B., Sravan, M.V., Arun, T.G., Jagadish, K.S. 2014. Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *Int. J. Sustain Built. Environ.* 3, p.54-61. (<https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.03.001>).

Nshimiyimana, Ph., Miraucourt, D., Messan, A., Courard, L. 2018. Calcium carbide residue and rice husk ash for improving the compressive strength of compressed earth blocks. *MRS Adv.* 3, p. 2009–2014 (<http://hdl.handle.net/2268/226552>).

Nshimiyimana, Ph., Messan, A., Zhao, Z., Courard, L. 2019. Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* 216, p.622–631. (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.037>)

(a) Nshimiyimana, Ph., Fagel, N., Osomba Wetshondo, D., Messan, A., Courard, L. 2020. Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks. *Construction and Building Materials* 241, 118097 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118097>).

(b) Nshimiyimana, Ph., Moussa, H.S., Messan, A., Courard, L. 2020. Effect of production and curing conditions on the performance of stabilized compressed earth blocks: kaolinite vs quartz-rich earthen material. *MRS Advances*, Cambridge University Press, New York (<http://hdl.handle.net/2268/245637>).

Nkwaju, R.Y, Djobo Yankwa, J. N., Noupin, J. N., Huisken, W., Deutou, J., Courard, L. 2019. Iron-rich laterite-bagasse fibres based geopolymers composite: mechanical, durability and insulating properties. *Applied Clay Sciences* 183, 105333 (<https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105333>)

Ouedraogo, E., Coulibaly, O., Messan, A., Ouedraogo, A. 2013. Etude des blocs de terre comprimée (BTC) stabilisés au papier (cellulose) et au ciment. *Ecomatériaux de construction : pilier de la croissance verte en Afrique*, 10-12 Juin 2013, Ouagadougou.

Paulus, J. 2015. Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. *Travail de Fin d'Etudes délivré dans le cadre du diplôme de Mst Ing. Civ. Architecte*, Université de Liège, 223pp.

Reeves, G.M., Sims, I. Cripps, J.C. 2006. *Clay materials used in construction*. - London, Publ. The geological society, 525 pp.

Riza, F.V., Rahman, I.A. 2015. The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In: *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks – Design, Properties and Durability*. Woodhead Publishing (eds. P.B. Lourenço, J.A. Labrincha, S. Kumar, P. Chindaprasirt), p. 379-392 (<https://doi.org/10.1016/C2014-0-02158-2>).

Sauer, M. 2020. Retrospective Martin Rauch. *The Architectural Review* 1468, EMAP Publishing Limited London, p. 28 - 37

Shubbar, A.A., Sadique, M., Kot, P., Atherton, W. 2019. Future of clay-based construction materials – A review, *Constr. Build. Mater.* 210, p. 172–187 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.206>).

Sipane, K.H. 2014. Innovation ou retour aux sources ? Diébédo francis Kéré. *Détails d'architecture* (<https://www.detailsdarchitecture.com/innovation-ou-retour-aux-sources>). (consulté le 23/03/20)

Sore, O.S., Messan, A., Prud'homme, E., Escadeillas, G., Tsobnang, F. 2018. Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymers binder based on local materials from Burkina Faso, *Constr. Build. Mater.* 165, p. 333–345 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>).

UN United Nations Human Settlements Programme 2006. *State of the world's cities 2006/7*. Earthscan Publications London, 202 pp.

Van Damme, H. 2013. La terre, un béton d'argile. *Pour la Science* (423), p.51-57.

Van der Linden, J., Janssens, B., Knapen, E. 2019. Potential of contemporary earth architecture for low impact building in Belgium. Sustainable built environment conference SBE19, Graz, Austria. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323, 9 pp.

Vercher, J., Cubel, F., Lerma, C., Mas, A., Gil, E. 2015. Contributions of traditional façades to thermal comfort. Earthen Architecture: Past, Present and Future - Mileto, Vegas, Garcia Soriano & Cristini (Eds), Taylor and Francis Group, London, p. 367-371.

Wyss, U. 2005. La construction en « matériaux locaux »: état d'un secteur à potentiel multiple. Swiss Agency for Development and Cooperation (Ouagadougou, Burkina Faso).

Zoungrana, O., Bologo, M., Pirotte, G., Messan, A. 2018. Habitat durable en milieu urbain : Etude de cas du recours à la Brique Terre Comprimée dans la construction du logement dans la ville d'Ouagadougou. 1er Colloque International sur le nexus Eau-Énergie-Alimentation-Habitat (SustainEng 2018), Ouagadougou, 12-14 décembre 2018.

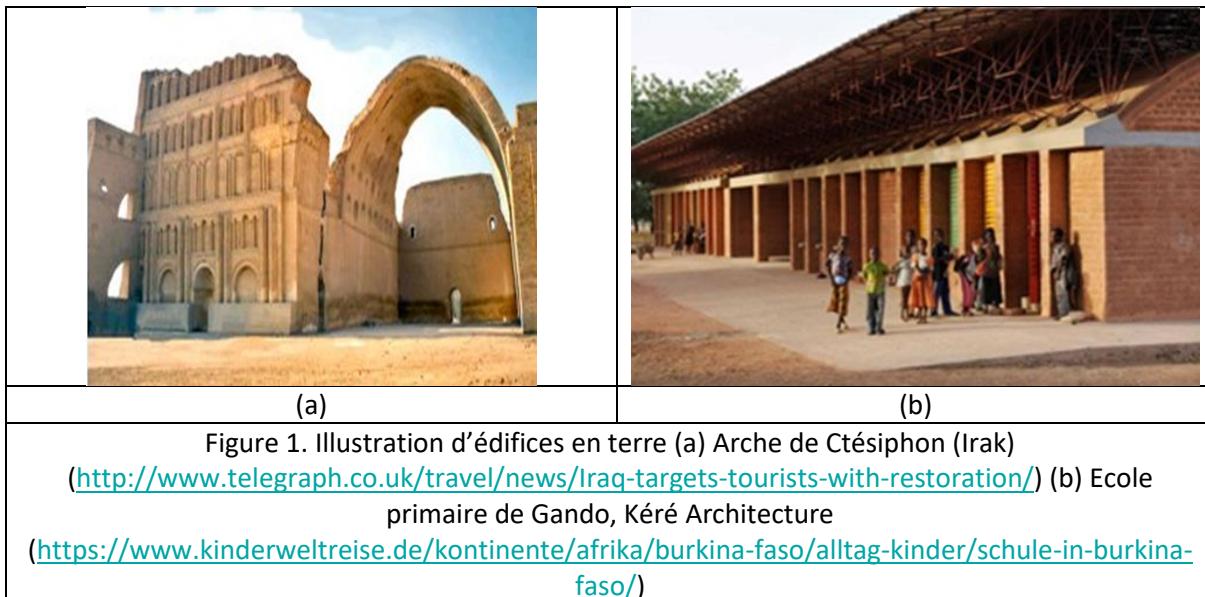




Figure 2. Habitation traditionnelle en terre crue (d'après l'auteur, région de Kaya, Burkina Faso (2013))

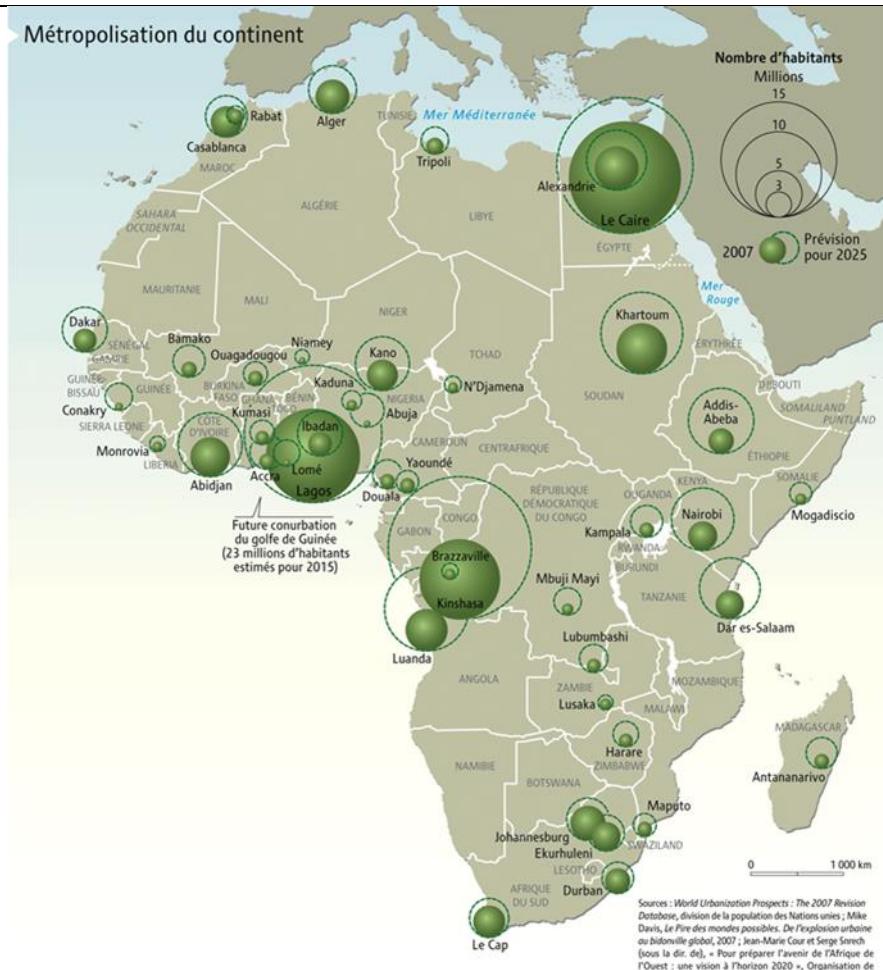
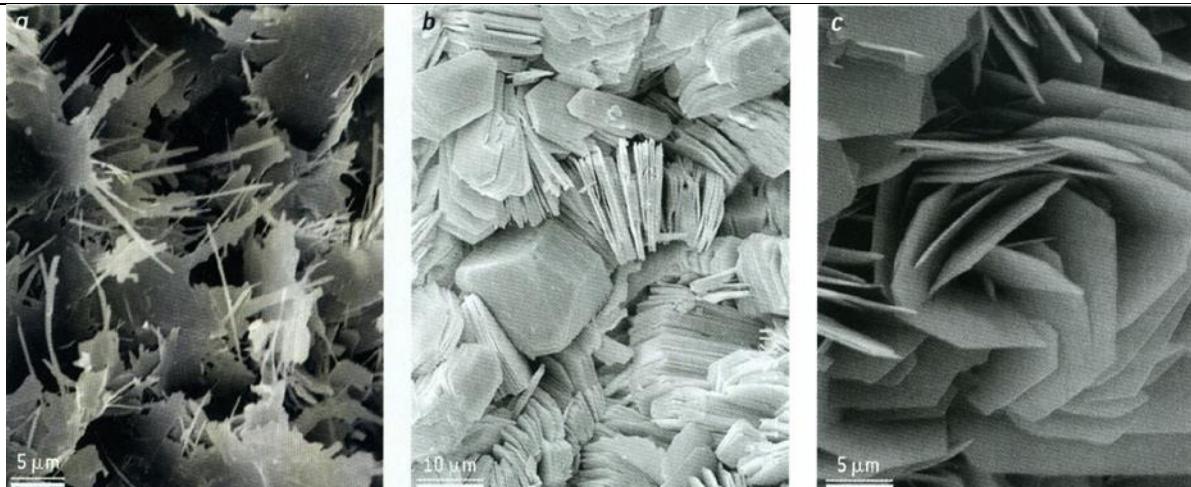


Figure 3. Evolution des mégalopoles et de la population en Afrique à l'horizon 2020 (OCDE, 1998)

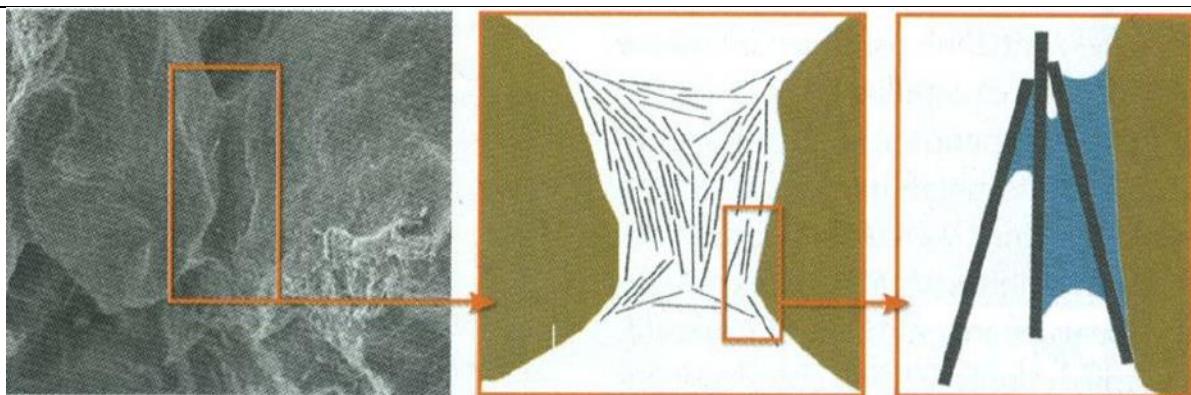


Figure 4. Fabrication des Briques de Terre Comprimée à l'usine Zi-Matériaux à Ouagadougou  
(d'après l'auteur, 2017) – Presse à main de type TESTARAM



Structures en plaquettes de particules argileuses (vue sous microscope électronique à balayage)

(a) Illite, (b) kaolinite, (c) chlorite



Ponts capillaires entre plaquettes d'argile (de quelques microns à quelques Angstroms)

Figure 5. Structure de l'argile (Van Damme 2013)



Figure 6. Érosion des murs en BTC non stabilisées exposées à la pluie, Ouagadougou, Burkina Faso (d'après O. Zoungrana, 2017)

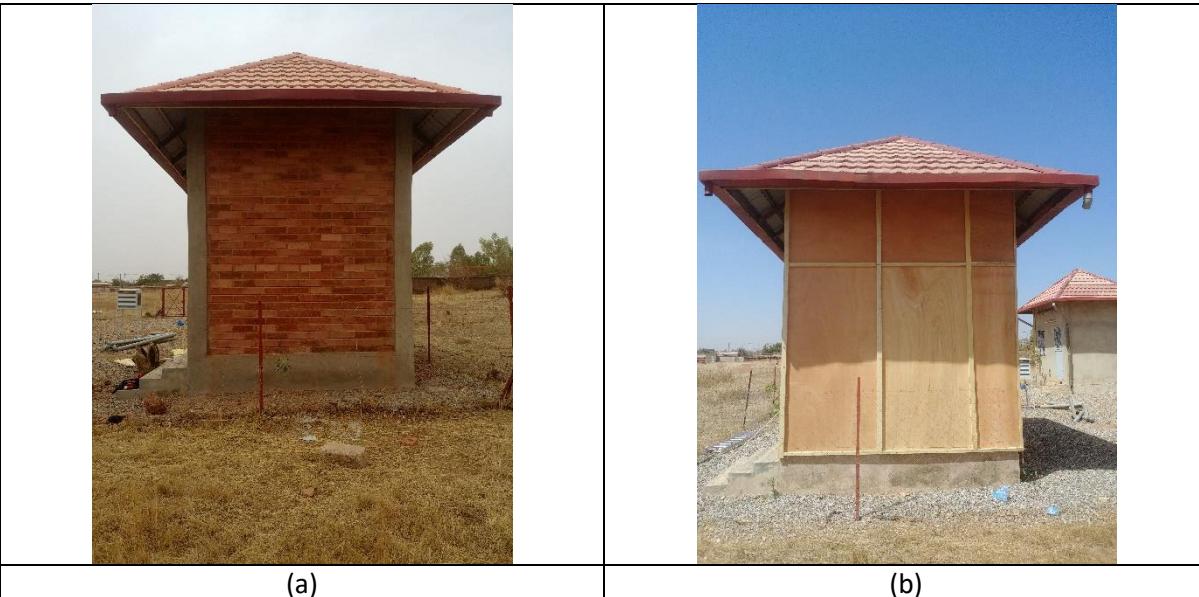


Figure 7. Bâtiment pilote (a) paroi BTC et (b) Isolant extérieur + BTC intérieure (Hema 2020, rapport interne)

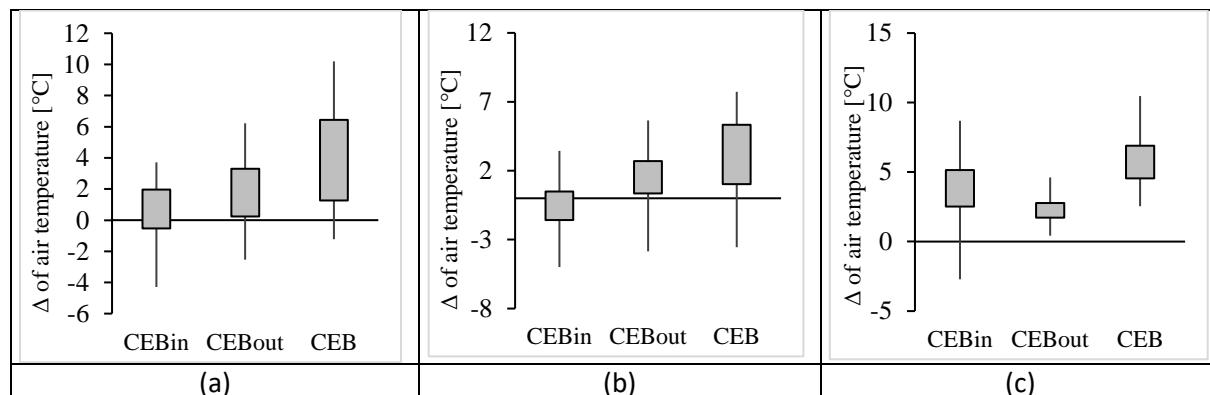


Figure 8. Évaluation expérimentale de l'ambiance intérieure du bâtiment pilote mis en œuvre avec les 3 configurations de parois : monocouche en BTC (CEB), isolant extérieur + BTC intérieur (CEBin) et BTC extérieur + isolant intérieur (CEBout) - (a) sans prise en compte de l'occupation (toutes les heures), (b) occupation de jour, (c) occupation de nuit (Hema et al. 2020).

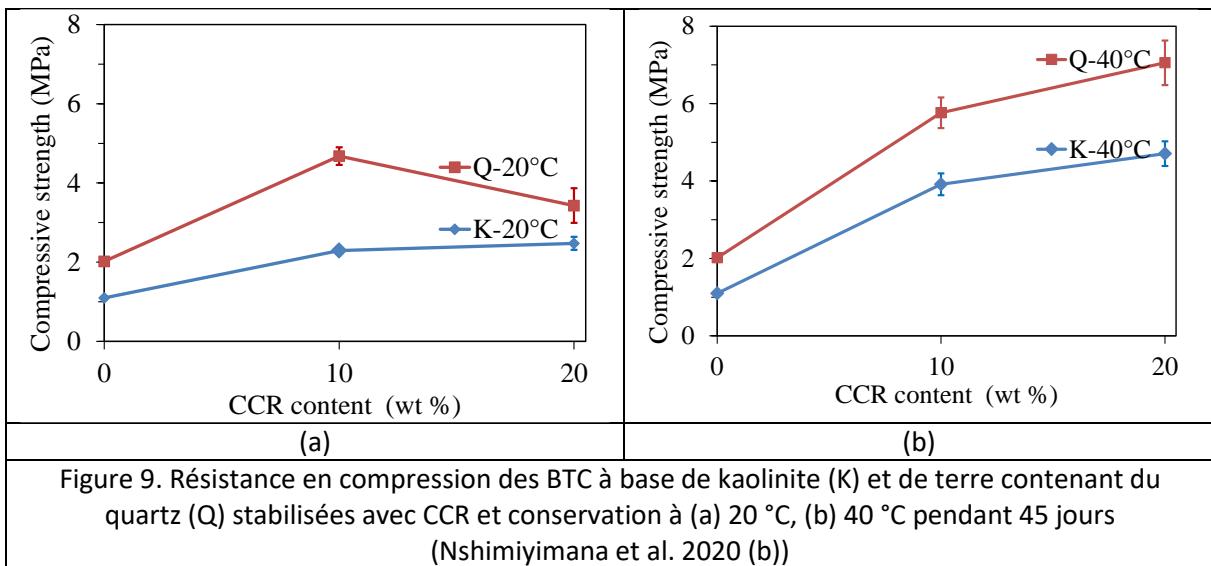


Figure 9. Résistance en compression des BTC à base de kaolinite (K) et de terre contenant du quartz (Q) stabilisées avec CCR et conservation à (a) 20 °C, (b) 40 °C pendant 45 jours  
(Nshimiyimana et al. 2020 (b))

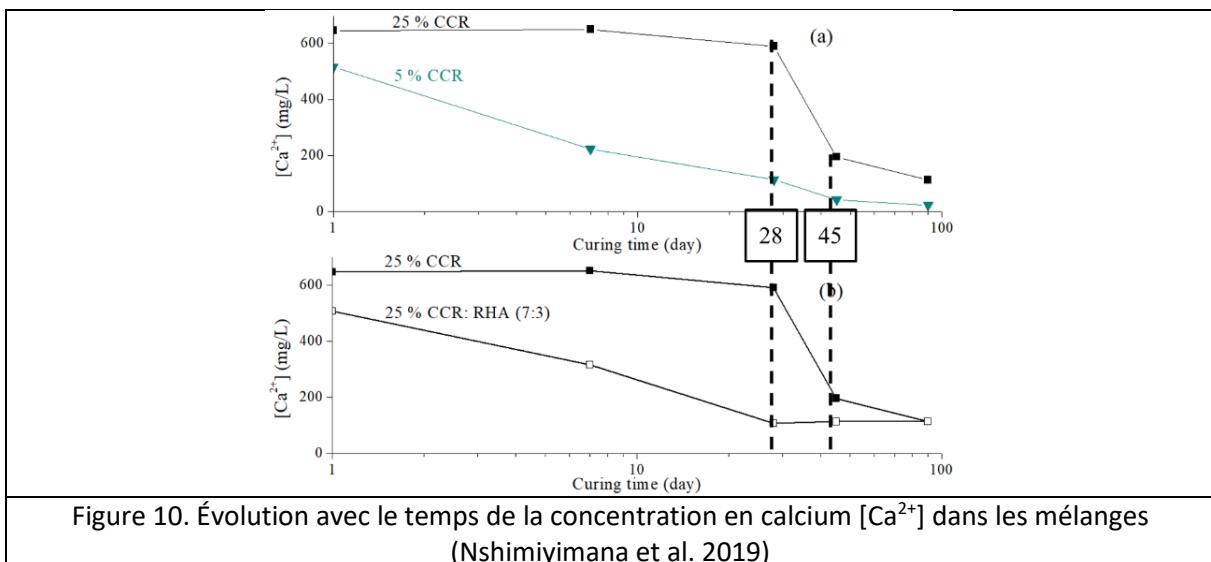


Figure 10. Évolution avec le temps de la concentration en calcium  $[Ca^{2+}]$  dans les mélanges  
(Nshimiyimana et al. 2019)

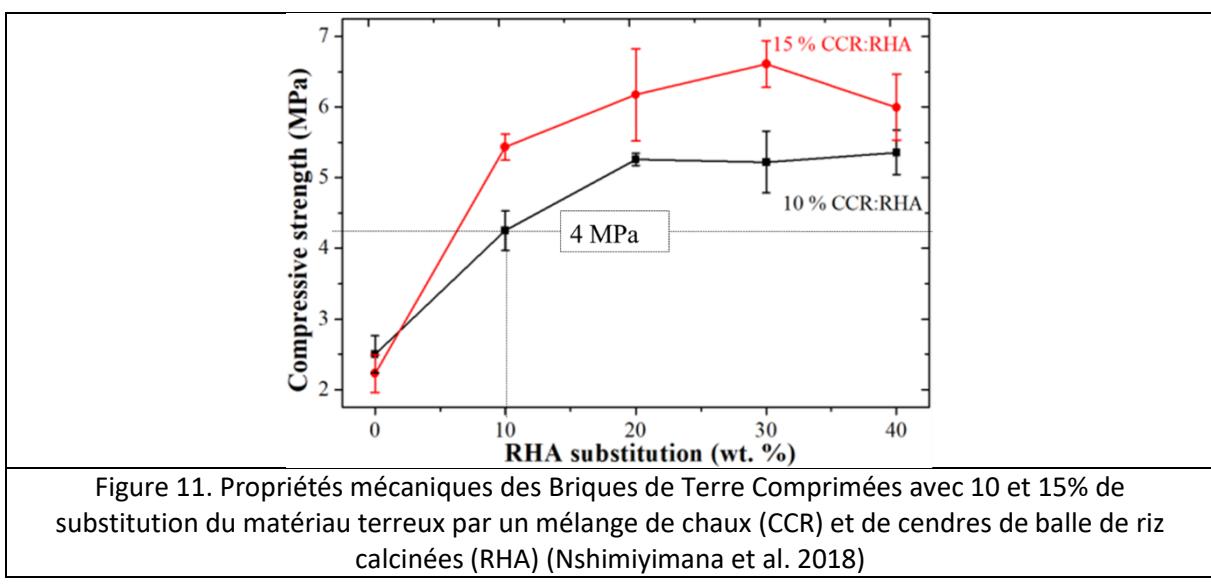


Figure 11. Propriétés mécaniques des Briques de Terre Comprimées avec 10 et 15% de substitution du matériau terrestre par un mélange de chaux (CCR) et de cendres de balle de riz calcinées (RHA) (Nshimiyimana et al. 2018)

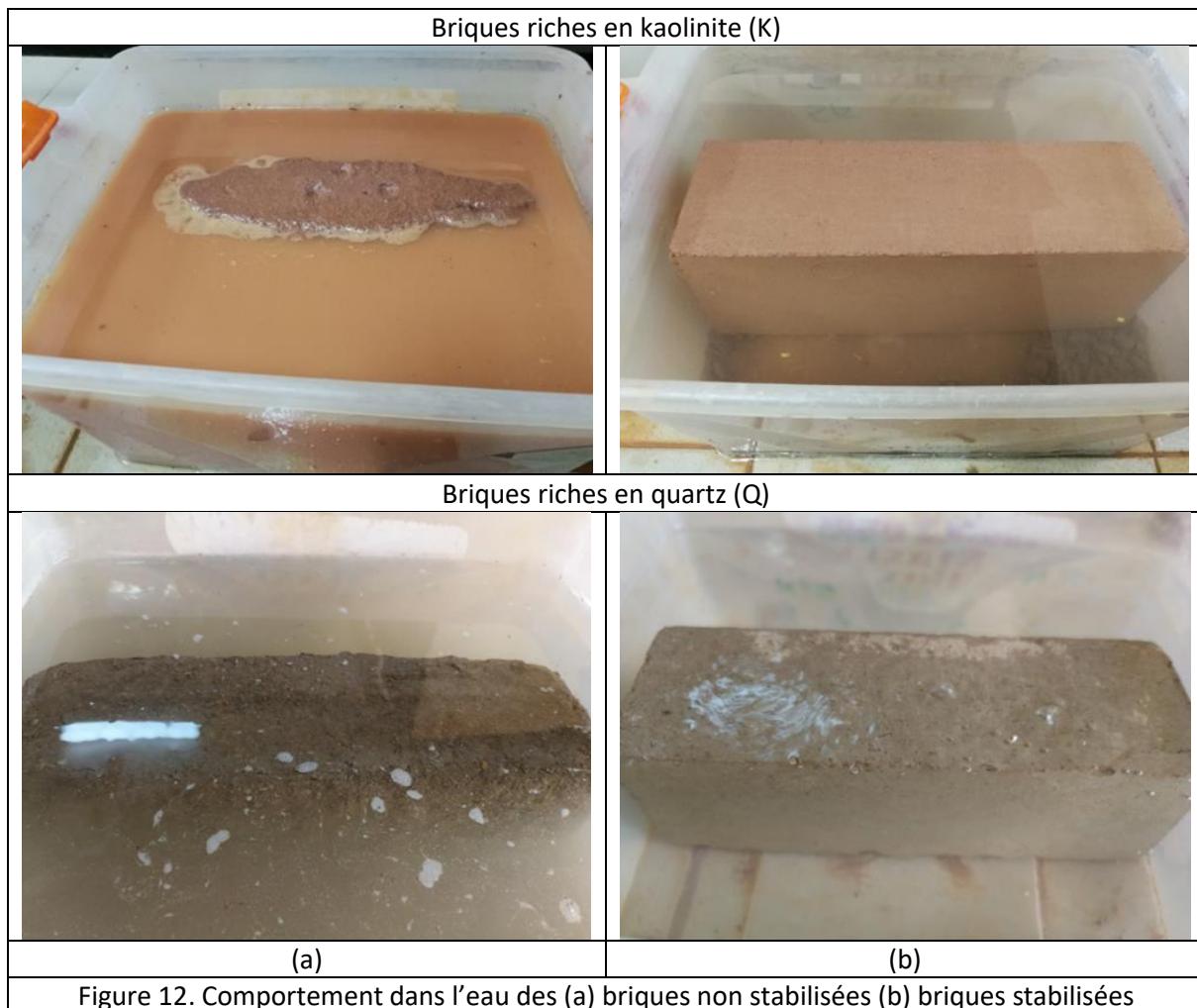


Tableau 1

Composition et caractéristiques de deux terres argileuses de la région d’Ouagadougou, contenant de la kaolinite (K) provenant du site de Kamboinsé et du quartz (Q) provenant de Pabre (Nshimiyimana et al. 2020 (a) (b))

Type	Kamboinsé	Pabre
Teneur en minéral principal (%)	65 (Kaolinite)	20 (Quartz)
Teneur en fines (< 80 µm) (%)	67	83
Limite de plasticité (liquidité)	15 (50)	20 (35)
Teneur en eau optimum (%) pour masse volumique maximum (kg/m <sup>3</sup> )	17,4 (1760)	15,6 (1850)
Densité	2,75	2,66