

Construction en terre, ressources secondaires et matériaux biosourcés: un avenir pour l'Afrique*

par

Luc COURARD**

MOTS-CLÉS. — Argile; Chaux; Cendre de balle de riz; Briques de terre comprimée; Bâtiments.

RÉSUMÉ. — 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 croître, 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 de 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 pourront 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 comprimée (BTC), stabilisées avec de la chaux résiduelle et de la cendre de balle de riz.

TREFWOORDEN. — Aarde; Kalk; Rijstschilas; Samengeperste aardeblokken; Woningen.

SAMENVATTING. — *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. Naarmate de bevolking, vooral op het Afrikaanse continent, blijft groeien, wordt het steeds moeilijker om kwalitatieve, comfortabele en duurzame woningen te vinden. De beschikbaarheid en de hoge kosten van bouwmaterialen zoals cement, staal of hout beperken de toegang tot woningen voor een groeiend deel van de bevolking die zich in sloppenwijken verdringt. Grondterugwinning als bouw materiaal is een deel van de oplossing. Door de kwaliteit te verbeteren, door het gebruik van secundaire bronnen van industriële of agrarische 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 blocks* (CEB), gestabiliseerd met restkalk en rijstschilas.

* Communication présentée à la séance de la Classe des Sciences technique tenue le 27 février 2020. Texte reçu le 30 mars 2020, soumis à *peer-review*. Version définitive, approuvée par les *reviewers*, reçue le 7 février 2021.

** Université de Liège, *Building Materials*, Unité de recherche *Urban and Environmental Engineering*, allée de la Découverte 9, B-4000 Liège (Belgique).

KEYWORDS. — Earth; Lime; Rice Husk Ash; Compressed Earth Blocks; Housing.

SUMMARY. — *Earth Building, 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 becomes increasingly difficult. The availability and high cost of building materials such as cement, steel or wood limit access to housing for a growing share of the population crowding into slums. Reclaiming earth as a building material is part of the solution. By improving its performance, through the use of secondary resources from industrial or agricultural by-products, 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 blocks (CEB), stabilized with residual lime and rice husk ash.

Introduction

Lorsque le colonisateur français est arrivé à Ouagadougou, il a baptisé 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 & Carrillo, 2020) (fig. 1). La construction en terre peut aussi répondre au besoin de densification par des constructions collectives jusqu'à six étages comme en témoigne la ville de Shibām au Yémen, surnommée «Manhattan du désert» (XVI^e 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 Arts* de Londres. Plusieurs écoles et hôpitaux ont été construits avec la technique dite de briques de terre comprimée (BTC) (Sipane, 2014): elles offrent des conditions thermohygrométriques compatibles avec l'environnement local (fig. 1b).



Fig. 1. — Illustration d'édifices en terre: (a) arche de Ctésiphon (Irak) [<http://www.telegraph.co.uk/travel/news/Iraq-targets-tourists-with-restoration/>]; (b) école primaire de Gando, *Kéré Architecture* [<https://www.kinderweltreise.de/kontinente/afrika/burkina-faso/alltag-kinder/schule-in-burkina-faso/>].

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 WorldMap, 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.*, 2019). 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 im



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

portées, 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, contribuant 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 leur 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, 2007), la population urbaine a dépassé la population rurale à l'échelle mondiale et près de 75 % des citoyens 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 citoyen sur trois selon l'ONU (UN-Habitat, 2006). La *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 subsaharienne, 72 % des habitants vivent dans des bidonvilles, soit la plus forte proportion dans le monde (UN-Habitat, 2006). Les principales problématiques relatives aux difficultés de vie des individus en milieu urbain sont le surpeuplement, 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 sept cent soixante millions d'ici 2030 (UN-Habitat, 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 de l'habitat informel s'inscrira dans une logique de résolution du 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.

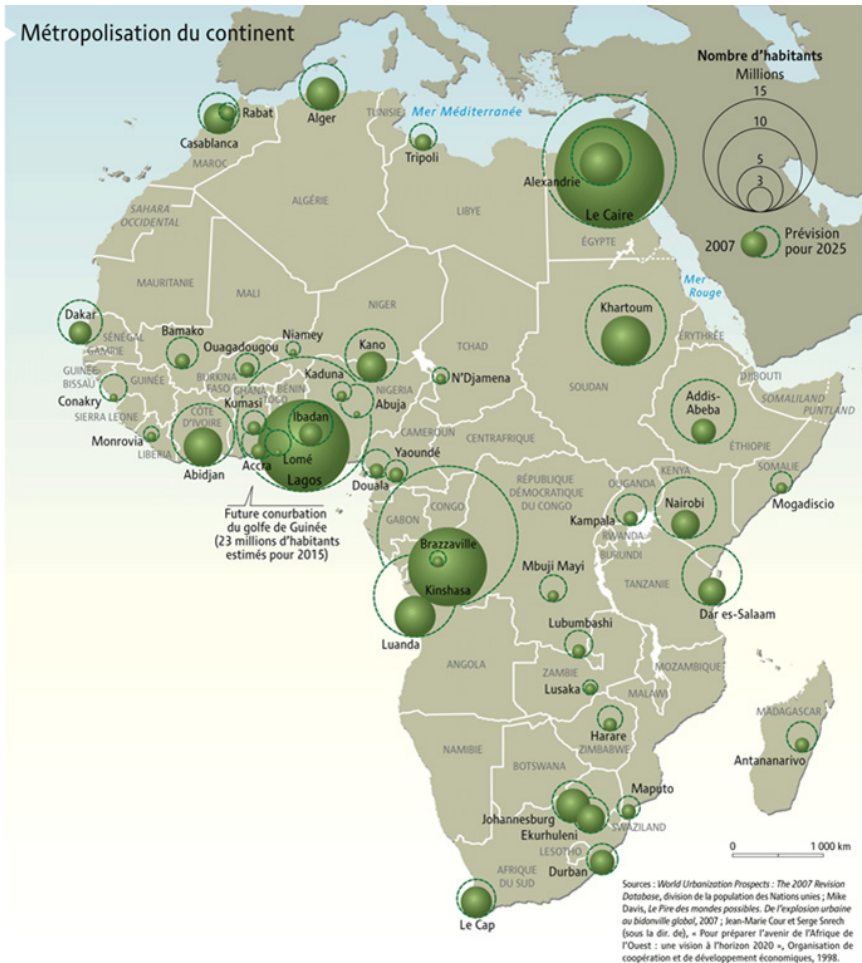


Fig. 3. — Évolution des mégapoles et de la population en Afrique à l'horizon 2020 (OCDE, 2008).

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 œuvre, comme la bauge, l'adobe, le torchis ou le pisé (Fabbri *et al.*, 2018). La brique de terre comprimée (BTC) constitue 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 là 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.



Fig. 4. — Fabrication de briques de terre comprimée à l'usine Zi-Matériaux à Ouagadougou (d'après l'auteur, 2017) – Presse à main de type TESTARAM.

L'argile, principal constituant de ces BTC, possède en effet des propriétés liantes dues 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. Cela 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 éléments stabilisants (Nshimiyimana *et al.*, 2020a). Une étude récente autour de gisements dans l'environnement de la ville de Ouagadougou a montré que deux matériaux, l'un contenant une teneur en kaolinite plus élevée et l'autre une teneur en quartz plus élevée (tab. 1), offrent des comportements assez semblables, à condition d'être correctement stabilisés (Nshimiyimana *et al.*, 2020b).

Tableau 1

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

Type	Kamboinsé	Pabré
Teneur en minéraux principaux (%)	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/m³)	17,4 (1760)	15,6 (1850)
Densité	2,75	2,66

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 parpaing) 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 [1]^{*} ou pouzzolanique [2], 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.

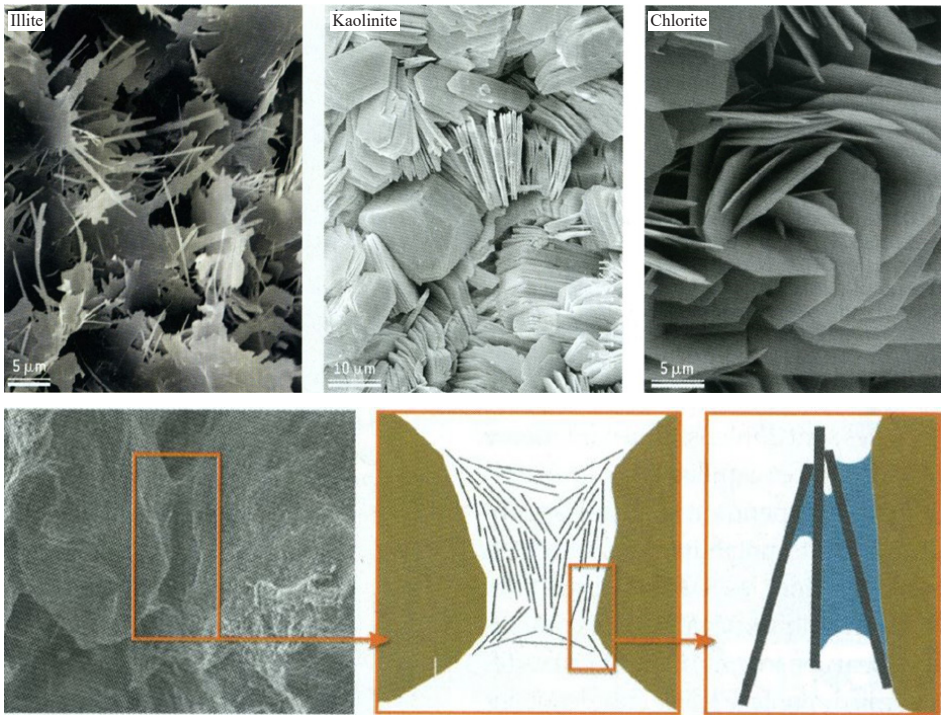


Fig. 5. — Structure de l'argile (Van Damme, 2013). Ligne du haut: structures en plaquettes de particules argileuses (vue sous microscope électronique à balayage). Ligne du bas: ponts capillaires entre plaquettes d'argile (de quelques microns à quelques angstroms).

^{*} Les chiffres entre crochets [] renvoient aux notes, p. 116.



Fig. 6. — Érosion des murs en BTC non stabilisées, exposées à la pluie, Ouagadougou, Burkina Faso (d'après Nshimiyimana *et al.*, 2020c).

Amélioration des propriétés des briques en terre

De nombreux efforts ont été faits pour améliorer les performances physico-mécaniques des BTC en condition sèche et humide 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 aluminosilicatés comme la kaolinite et les fines particules de quartz (< 50 mm) que l'on retrouve dans le matériau argileux (Diamond *et al.*, 1963; Ciano *et al.*, 2014).

L'amélioration des propriétés mécaniques des BTC passe en outre par une meilleure compacité de la brique (*cf.* fig. 4), ce qui entraîne une augmentation de la densité et, par là même, des résistances mécaniques (Nshimiyimana *et al.*, 2020a). Cela doit néanmoins être tempéré par les propriétés hygrothermiques requises pour ce genre de construction. En fait, dans l'environnement subsahélien, 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 (Marincic *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 λ [3]). Or, c'est un matériau léger qui va contribuer à une bonne

isolation thermique (Moussa *et al.*, 2019). À l'inverse, un matériau plus lourd offre une meilleure inertie thermique, permettant une régulation de la température intérieure (c'est-à-dire une limitation de l'impact des variations de température extérieure). 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 qu'il faut non seulement 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 température et l'humidité relative de l'air extérieur, les températures de paroi (deux de surface, une entre isolant et BTC) et 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 trois configurations décrites dans la méthodologie. La porte et les fenêtres du pilote sont restées fermées durant l'expérimentation (sans 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 BTC à l'extérieur offre une meilleure ambiance thermique.

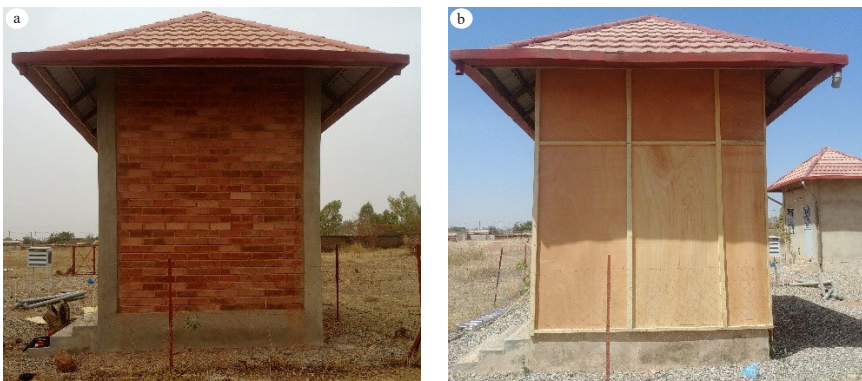


Fig. 7. — Bâtiment pilote: (a) paroi BTC. (b) isolant extérieur + BTC intérieure (Hema *et al.*, 2020).

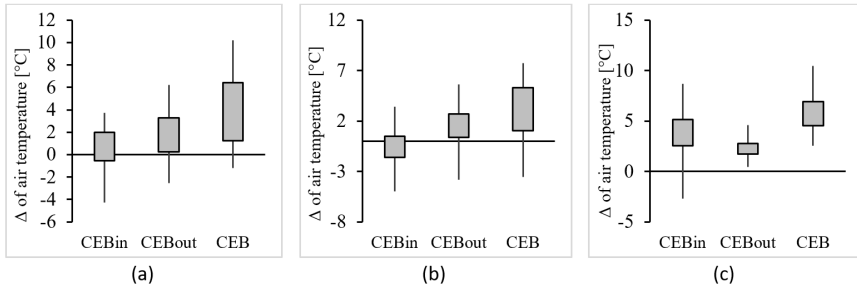


Fig. 8. — Évaluation expérimentale de l'ambiance intérieure du bâtiment pilote mis en œuvre avec les trois configurations de paroi: monocouche en BTC (CEB), isolant extérieur + BTC intérieur (CEBin) et BTC extérieur + isolant intérieur (CEBout): (a) sans prise en compte de l'occupation (toutes les heures);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

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 s'opère, aussi en Afrique, par l'utilisation de matériaux locaux et la valorisation de ressources secondaires, notamment au travers du recyclage (McDonough & Braungart, 2002). Dans le cadre d'un projet d'amélioration de l'habitat au Burkina Faso, soutenu par l'ARES-CCD, le carbure de calcium résiduel (CCR), un sous-produit industriel riche en chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 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, l'ajout de cendres de balles de riz (RHA), provenant de la calcination des résidus du battage du riz, a permis de fournir un matériau riche en silice réactive (Riza & Rahman, 2015), capable d'apporter une pouzzolanité au mélange. À 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 par le processus de production et de durcissement.

L'étude réalisée au Burkina Faso a permis notamment de mettre en évidence l'effet des paramètres de production et de durcissement sur la performance mécanique des blocs de terre comprimée 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 ($30 \pm 5^\circ \text{C}$) et à 40°C , respectivement, pendant nonante jours (Nshimiyimana *et al.*, 2020b).

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 $30 \pm 5^\circ \text{C}$ pendant quarante-cinq jours (Nshimiyimana *et al.*, 2020b). De même, une résistance à la compression de 4,4 MPa a été atteinte par les BTC stabilisées avec 10 et 20 % de CCR, après vingt-huit et quarante-cinq jours de durcissement, respectivement. À 40°C , la résistance à la compression augmente de 3,3 fois (de 1,1 à 4,7 MPa et 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.

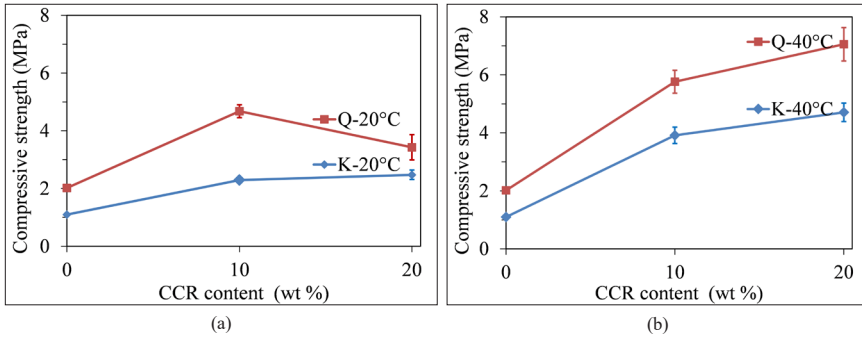


Fig. 9. — Résistance en compression des BTC à base de kaolinite (K) et de terre contenant du quartz (Q) stabilisées avec CCR et conservation à 20°C (a) et à 40°C (b) pendant quarante-cinq jours (Nshimiyimana *et al.*, 2020b).

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). Cela permet d'atteindre aisément les valeurs minimales requises pour la construction de bâtiments à un étage (4 MPa). Il est également observé que le comportement en présence d'eau (fig. 12) est nettement amélioré par la stabilisation.

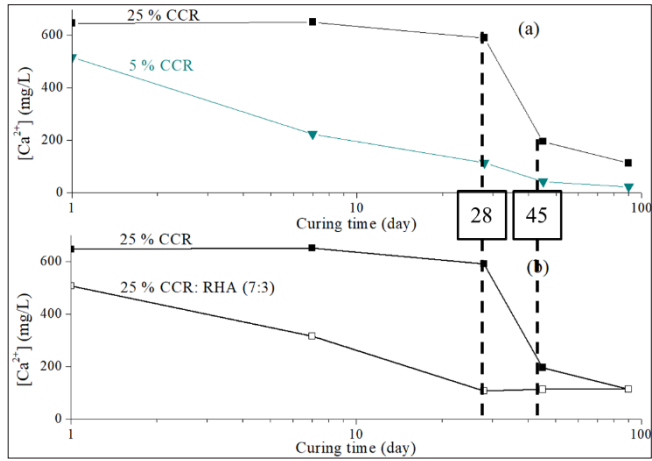


Fig. 10. — Évolution avec le temps de la concentration en calcium (Ca^{2+}) dans les mélanges (Nshimiyimana *et al.*, 2019).

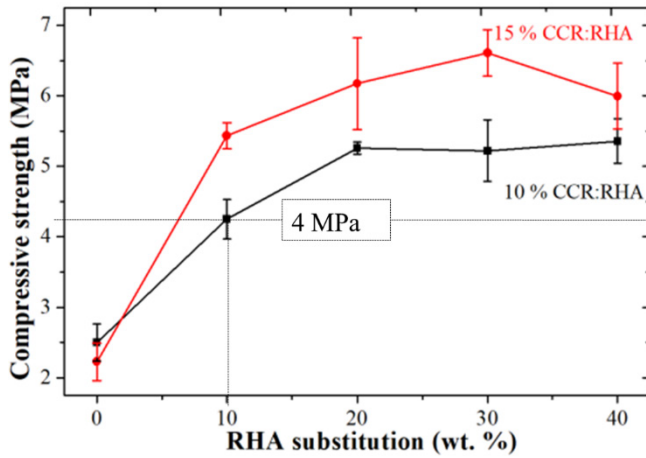


Fig. 11. — Propriétés mécaniques des briques de terre comprimée avec 10 et 15 % de substitution du matériau terreux par un mélange de chaux (CCR) et de cendres de balles de riz calcinées (RHA) (Nshimiyimana *et al.*, 2018).

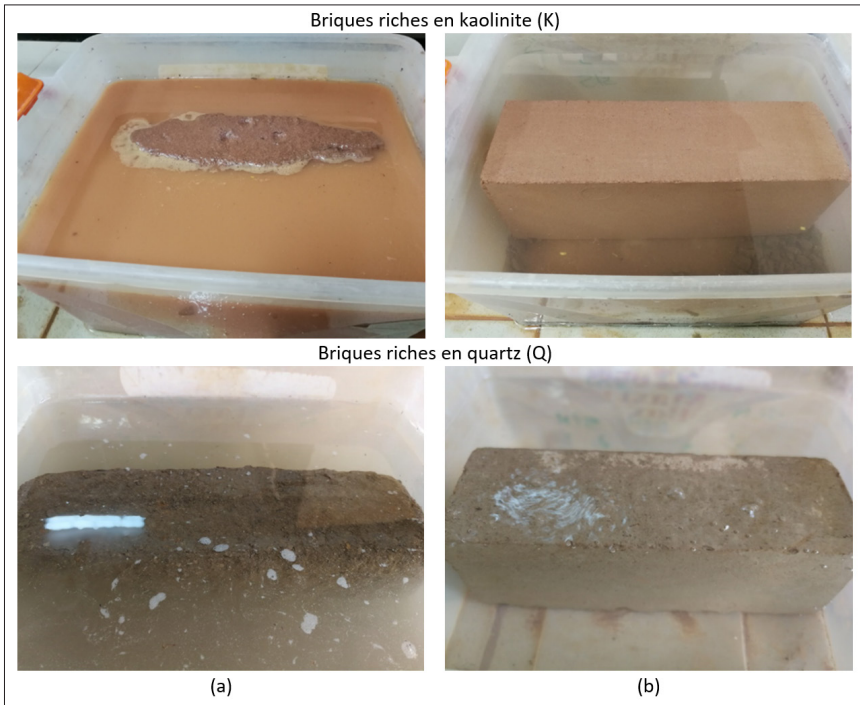


Fig. 12. — Comportement dans l'eau des briques non stabilisées (a) et des briques stabilisées (b).

Conclusion

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 cimentaire ou importés. Cela implique toutefois la prise en compte de la spécificité des matériaux terreux et leur disponibilité en quantité suffisante. Mais le développement harmonieux des villes, avec 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 a pu se concrétiser 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 Philibert Nshimiyimana, Ousmane Zoungrana et Césaire Hema.

NOTES

- [1] Hydraulicité: aptitude d'un produit à faire prise et durcir en présence d'eau avec formation de composés stables.
- [2] Pouzzolanicité: aptitude d'un produit à fixer la chaux à température ambiante pour former une structure rigide.
- [3] Le coefficient λ s'exprime en W/m.K, pour Watt par mètre et degré Kelvin: plus le coefficient λ est faible, plus la résistance thermique du matériau est élevée et, donc, plus ses performances sont importantes en termes d'isolation thermique.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- Bloom D. E. & Khanna, T. (2007). Révolution urbaine. *Finances & Développement*, 44(3), 9-14.
- Bogas, J. A., Silva, M. & Gomes, M. G. (2018). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(1), 1-16.
- Ciancio, D., Beckett, C. T. S. & Carraro, J. A. H. (2014). Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 53, 59-65.
- Davis, M. (2007). *Le pire des mondes possibles: de l'explosion urbaine au bidonville global*. Paris: La Découverte.
- Diamond, S., White, J. L. & Dolch, W. L. (1963). Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. *Clays and Clay Minerals*, 12, 359-379.
- Egentti, C. & Khatib, J. (2016). Sustainability of compressed earth as construction material. In J. Khatib (Ed.), *Sustainability of construction materials* (2nd ed., pp. 309-341). Elsevier, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
- Fabbri, A., Morel, J.-C. & Gallipoli, D. (2018). Assessing the performance of earth building materials: A review of recent developments. *Rilem Technical Letters*, 3, 46-58.
- Giddings, S. W. (2007). *Housing challenges and opportunities in sub-Saharan Africa*. Washington, DC: International Housing Coalition.

- Habitat WorldMap (2019). *Fiche Burkina Faso*. <https://habitat-worldmap.org/pays/afrique/burkina-faso>.
- Hema, C. M., Van Moeseske, 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 Procedia*, 122, 535-540.
- Hema, C., Messan, A., Lawane, A. & Van Moeseske, 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.
- Houben, H. & Guillaud, H. (2006). *Traité de construction en terre*. Marseille: éd. Parenthèses.
- Jorge, F. (2015). Contemporary rammed earth construction. Alexandre Bastos – creativity and maturity. In C. Mileto, F. Vegas, L. García Soriano & V. Cristini (Eds.), *Earthen architecture: Past, present and future* (pp. 205-208). London: Taylor & Francis Group.
- Marincic, I., Ochoa, J. M., Alpuche, M. G. & González, I. (2014). Comparative analysis of the thermal behavior between cellular concrete blocks and stabilized earth blocks as wall materials. *Energy Procedia*, 57, 1783-1791.
- McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. New York: North West Point.
- Meyer, P. E. (2008). De Bancoville à la ville moderne. In F. Fournet, A. Meunier-Nikiema & G. Salem (éds), *Ouagadougou (1850-2004): une urbanisation différenciée* (pp. 25-37). Marseille: IRD Éditions.
- Minke, G. (2006). *Building with earth, design and technology of a sustainable architecture*. Berlin: Birkhäuser Publishers for Architecture, 18.
- Moussa, H. S., Nshimiyimana, P., Hema, C., Zoungana, O., Messan, A. & Courard, L. (2019). Comparative study of thermal comfort induced from masonry made of stabilized compressed earth block vs conventional cementitious material. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7, 385-403.
- 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. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 54-61.
- Nshimiyimana, P., Miraucourt, D., Messan, A. & Courard, L. (2018). Calcium carbide residue and rice husk ash for improving the compressive strength of compressed earth blocks. *MRS Advances*, 3(34-35), 1-6.
- Nshimiyimana, P., Messan, A., Zhao, Z. & Courard, L. (2019). Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 216, 622-631.
- Nshimiyimana, P., Fagel, N., Osomba Wetshondo, D., Messan, A. & Courard, L. (2020a). Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 241, 118097.
- Nshimiyimana, P., Moussa, H. S., Messan, A. & Courard, L. (2020b). Effect of production and curing conditions on the performance of stabilized compressed earth blocks: Kaolinite vs quartz-rich earthen material. *MRS Advances*, 5(25), 1277-1283.
- Nshimiyimana, P., Messan, A. & Courard, L. (2020c). Physico-mechanical and hygro-thermal properties of compressed earth blocks stabilized with industrial and agro by-product binders. *Materials*, 13(17), 3769.
- Nkwaju, R. Y., Djobo Yankwa, J. N., Huisken Mejouyo, P. W., Deutou Nemaleu, J. G. & Courard, L. (2019). Iron-rich laterite-bagasse fibers based

- geopolymer composite: Mechanical, durability and insulating properties. *Applied Clay Science*, 183, 105333.
- OCDE (2008). *World urbanization prospects: The 2007 revision*. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division.
- Ouédraogo, E., Coulibaly, O., Messan, A. & Ouédraogo, A. (2013). Étude des blocs de terre comprimée (BTC) stabilisés au papier (cellulose) et au ciment (poster 23). In *Écomatériaux de construction: pilier de la croissance verte en Afrique?* (conf. intern., Ouagadougou, Burkina Faso, 10-12 juin 2013). Ouagadougou: éd. Sud Sciences et Technologies.
- Paulus, J. (2015). *Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique: Ouagadougou* (travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en ingénieur civil architecte). Université de Liège.
- Reeves, G. M., Sims, I. & Cripps, J. C. (Eds.) (2006). *Clay materials used in construction*. London: The Geological Society, Engineering Geology Special Publication, 21.
- Riza, F. V. & Rahman, I. A. (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. In F. Pacheco-Torgal, P. B. Lourenço, J. A. Labrincha, S. Kumar & P. Chindapasirt (Eds.), *Eco-efficient masonry bricks and blocks: Design, properties and durability* (pp. 379-392). Elsevier, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
- Sauer, M. & Carrillo, G. (2020). Retrospective: Martin Rauch. *The Architectural Review*, 1468, 28-37.
- Shubbar, A. A., Sadique, M., Kot, P. & Atherton, W. (2019). Future of clay-based construction materials – A review. *Construction and Building Materials*, 210, 172-187.
- Sipane, K. H. (2014). Innovation ou retour aux sources? Diébédo Francis Kéré. Détails d'architecture. <https://www.detaillsdarchitecture.com/innovation-ou-retour-aux-sources>.
- Sore, O. S., Messan, A., Prud'homme, E., Escadeillas, G. & Tsobnang, F. (2018). Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Construction and Building Materials*, 165, 333-345.
- UN-Habitat (2006). *State of the world's cities 2006/2007*. London: Earthscan.
- Van Damme, H. (2013). La terre, un béton d'argile. *Pour la Science*, 423, 51-57.
- Van der Linden, J., Janssens, B. & Knapen, E. (2019). Potential of contemporary earth architecture for low impact building in Belgium. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1), 012018.
- Vercher, J., Cubel, F., Lerma, C., Mas, A. & Gil, E. (2015). Contributions of traditional façades to thermal comfort. In C. Mileto, F. Vegas, L. García Soriano & V. Cristini (Eds.), *Earthen architecture: Past, present and future* (pp. 367-371). London: Taylor & Francis Group.
- Wyss, U. (2005). *La construction en «matériaux locaux»: état d'un secteur à potentiel multiple*. Ouagadougou, Burkina Faso: Swiss Agency for Development and Cooperation.
- Zoungrana, O., Bologo, M., Pirotte, G. & Messan, A. (2019). *Habitat durable en milieu urbain: étude de cas du recours à la Brique Terre Comprimée dans la construction du logement dans la ville de Ouagadougou*. Ouagadougou, Burkina Faso: 1^{er} colloque international sur le nexus Eau-Energie-Alimentation-Habitat (12-14 déc. 2018).