

Etude de quelques propriétés physiques de briques en latérite compressées à l'état résiduel en fonction de la température

Hasina Andriatahina Ratrihoarisonina^{1,*}, Lovanirina Miary Andrianomanana²

¹Institut Supérieur de technologie d'Antananarivo (IST-t) Madagascar

²Science et Technique de l'Ingénierie et de l'innovation (STII) PhD School, Université d'Antananarivo Madagascar

Reçu: 19 Novembre 2021 / Reçu sous sa forme révisée: 14 Décembre 2021 / Accepté: 20 Décembre 2021

Résumé:

Deux séries de briques ont été fabriquées à partir de latérite avec 0% de ciment et 3% de ciment désignées respectivement par BTC et BTCS. Les briques ont été testées à l'état résiduel (après refroidissement), à l'état sec et à l'état humide. La variation des propriétés physiques et en particulier le module d'Young dans l'intervalle de températures 25°C à 1000°C a été évaluée.

Les résultats montrent que les masses de BTC et de BTCS diminuent quand la température augmente. En revanche, les taux de porosité de BTC et de BTCS augmentent avec la température. Quant au module d'Young, il diminue avec la température. Ces différentes variations observées sont en accord avec les propriétés mécaniques des matériaux de construction. L'addition du ciment dans le mélange apporte une amélioration des propriétés mécaniques de la brique en latérite compressée.

Mots-clés: Brique en latérite compressée; Propriétés physiques ; Module d'Young.

Study of some physical properties of compressed laterite bricks in the residual state as a function of temperature

Abstract:

Two series of bricks were made from laterite with 0% cement and 3% of cement designated by BTC and BTCS, respectively. The bricks have been tested in the residual state (after cooling), dry and wet. The variation of physical properties especially the Young's modulus in the temperature range 25 °C to 1000 °C was evaluated.

The results show that the masses of BTC and BTCS decrease when the temperature rises. In contrast, the porosity rates of BTC and BTCS increase with temperature. As for the Young's modulus, it decreases with temperature. These variations are consistent with the mechanical properties of construction materials. The addition of cement into the mixture improves the mechanical properties of the compressed laterite brick.

Keywords: Compressed laterite brick; Physical properties; Young's modulus.

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail: rahasinaa.istt@gmail.com (H.A. Ratrihoarisonina)

1. Introduction

La dégradation des briques en terre à cause des incendies qui affectent davantage les bâtiments, soulève la question du comportement physique et mécanique des briques (en terre naturelle ou stabilisée) compressées à haute température. Les transformations physico-chimiques et les déformations thermiques différentielles causées par l'augmentation de la température, conduisent à une altération des performances mécaniques [1, 2].

Cette dégradation se produit spécifiquement dans la phase de refroidissement de la brique en terre compressée [1, 2].

Plusieurs travaux ont traité du comportement à haute température des bétons [1-4]. Les études ont montré que les propriétés physiques et mécaniques des bétons baissent lorsque ces derniers sont soumis à des températures sévères [1, 2].

Par ailleurs, un tour dans les grands codes de dimensionnement a révélé qu'aucune recherche n'est relative aux constructions en terre crue stabilisée et compressée sous température sévère [3].

Cette étude vise à déterminer les propriétés physiques et le comportement mécanique (module d'Young) des briques en latérite naturelle et latérite stabilisée au ciment pendant le cycle de chauffage-refroidissement à l'état sec et à l'état humide.

Un des éléments clés pour la caractérisation de la brique en terre compressée (stabilisée) est de connaître les variations des propriétés physiques et du module d'Young à l'état résiduel sec et à l'état humide (arrosage à l'eau de l'éprouvette pendant 20 minutes à la sortie du four). Il est reconnu que l'évolution du module d'élasticité du matériau de construction résulte de nombreux facteurs tels que la valeur initiale du module d'Young, le taux de porosité et les températures maximales atteintes.

Ce travail de recherche contribue à une meilleure compréhension des variations des propriétés physiques et du module d'élasticité de la brique en latérite stabilisée soumise à des températures élevées.

2. Matériels et méthodes

2.1. Elaboration des échantillons

L'étude a porté sur un sol « latérite » d'une part, et un mélange de la latérite avec le ciment CEM IV /B-V 32,5 (ciment Portland à la pouzzolanique) fabriqué par Holcim Madagascar avec un taux de 3% de sa masse sèche, d'autre part. Les échantillons sont réalisés suivant la proportion : 380 g de latérite, 11,4 g de ciment et 15 ml d'eau, cette dernière valeur étant la teneur en eau optimale.

La latérite utilisée provient de la région d'Analamanga, en particulier près du complexe sportif CNAPS Vontovorona ; les coordonnées géographiques du site sont : 18°59'44,21''S en latitude et 47°24'20,31''E en longitude.

Pour la confection des éprouvettes, une presse hydraulique de capacité 50 kN est utilisée pour le compactage. Un moule métallique d'épaisseur 3 mm, de diamètre intérieur 35 mm et 70 mm de hauteur avec de l'huile minérale nécessaire au démoulage a été utilisé.

Pour les traitements thermiques, un four ENATT de capacité de chauffage jusqu'à 1100 °C est utilisé. Il est équipé d'un régulateur programmeur thermique et d'un régulateur de contrôle West 6700. Un thermomètre de marque RS 1384 avec quatre entrées et quatre thermocouples de type K sont utilisés pour mesurer l'évolution des températures au cœur et à la surface de l'échantillon.

Toutes les pesées ont été effectuées avec deux types de balances : une balance de précision à 0,01 g Euromatest Stinco de capacité 4200 g et une balance hydrostatique de précision à 0,01 g Euromatest Stinco de capacité 2000 g.

2.2. Caractérisations géotechnique et chimique

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains selon la taille d'un matériau. Elle s'effectue :

- Par tamisage (tamis à maille carrée) pour des grains de diamètre supérieur à 80 µm.
- Par sédimentométrie pour les grains les plus fins. Elle consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente (loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de

temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie ont été réalisées respectivement selon les normes NF P18-560 [2] et NF P94-057 [2].

L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présents dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme NF P94-051 [4, 5].

L'analyse chimique de la latérite est réalisée par la méthode de dosage en HCl selon la norme NF P14-869 [5, 6].

2.3. Analyses thermiques

L'analyse thermique différentielle (ATD) et l'analyse thermo-gravimétrique (ATG) ont été effectuées simultanément entre 20 et 1250 °C sous balayage d'air à l'aide d'un dispositif de marque Setaram Scientific & Industrial Equipment, série Setsys 24. Le matériau de référence est l'alumine préalablement calcinée à 1500 °C. La vitesse de chauffage/refroidissement est de 10 °C/min.

L'échantillon et la référence sont placés dans deux creusets identiques en platine.

La perte au feu et le résidu ont été également déterminés dans ce travail.

La perte de masse se définit comme la variation de masse résultant du chauffage d'un échantillon. Elle s'exprime en pourcentage de matière sèche. Le résidu quant à lui traduit la masse restante

après chauffage d'un échantillon. Le résidu s'exprime également en pourcentage de matière sèche.

2.4. Détermination de la perte de masse

La détermination de la perte de masse en fonction de la température est réalisée par la pesée de l'éprouvette avant le traitement thermique et dès que l'éprouvette sort du four. L'équation (1) permet de déterminer la perte de masse après le traitement thermique des éprouvettes [3, 7]:

$$\Delta m[\%] = \frac{m_{av} - m_{ap}}{m_{av}} \times 100 \quad (1)$$

Avec,

Δm : perte de masse de l'échantillon (%).

m_{av} : masse de l'échantillon avant traitement thermique (g).

m_{ap} : masse de l'échantillon après traitement thermique (g).

2.5. Détermination de la porosité

Pour la porosité, nous avons utilisé la technique par pesée hydrostatique suivant la norme NF P 18-554 [7, 8]. Cette méthode permet une estimation de la porosité globale ou porosité ouverte, mais ne permet pas de déterminer la distribution des pores [5, 7]. Les essais se font à température ambiante et après le refroidissement des éprouvettes pour les deux formulations.

La porosité à l'eau a été déterminée après un séchage jusqu'à masse constante à 60 °C sur une moyenne de 3 échantillons.

La porosité est déterminée selon l'équation (2) [4, 7, 8]:

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat}^{imm}} \times 100 \quad (2)$$

Avec,

P : porosité à l'eau (%).

M_{sat} : masse saturée (g).

M_{sec} : masse sèche (g).

M_{sat}^{imm} : masse saturée immergée (g).

2.6. Détermination du module d'Young

Pour le module d'Young, l'essai présente l'évolution de la déformation axiale en fonction de la charge (contrainte) sur une éprouvette cylindrique de dimensions 35/70 mm confectionnée en adéquation avec la formulation du mélange (NF EN 12390-1) [2, 9] et conservée pendant 28 jours suivant la recommandation RILEM (RIL 95) [1, 9]. Dans cette étude, une seule contrainte de compactage de 30 kN (150 MPa) est appliquée pour la réalisation des éprouvettes.

Le principe de l'essai consiste à placer l'éprouvette cylindrique sur une embase rigide sans disque drainant à l'intérieur d'une enceinte étanche (cellule triaxiale). Ensuite, l'éprouvette est sollicitée axialement en déplacement contrôlé à vitesse constante de 0,0001 mm/s avec des cycles partiels de chargement-déchargement selon la recommandation RILEM (RILEM 72) [1, 9], jusqu'à la rupture. Dans le même temps, les déformations axiales de l'éprouvette, ainsi que la force axiale appliquée sont enregistrées à l'aide de l'anneau dynamométrique de charge

maximale de 500 kg et de 100 divisions. Le module d'Young est déterminé à partir de la pente des courbes contrainte-déformation dérivées de l'essai en compression selon l'équation (3) [2, 10] :

$$E \text{ [MPa]} = \frac{\Delta\sigma_{el}}{\Delta\varepsilon_{el}} \quad (3)$$

Avec,

E : module d'Young.

$\Delta\sigma_{el}$: contrainte.

$\Delta\varepsilon_{el}$: déformation.

La figure 1 ci-dessous donne une vue de la cellule triaxiale pour la mesure de contrainte.



Fig. 1. Vue de la cellule triaxiale pour la mesure de contrainte.

Tableau 1

Granulométrie du sol utilisé

Gravier (>2mm)	Sable (0,063 – 2 mm)	Limon (0,002 - 0,063 mm)	Argile (<0,002 mm)
0,4%	41,5%	43,5%	14,3%

Tableau 2

Limite d'Atterberg du sol

Limite de liquidité W_L	Limite de plasticité W_P	Indice de plasticité I_P
29	17	12

3. Résultats et discussions

3.1. Caractéristiques de la latérite utilisée

3.1.1. Les caractéristiques géotechniques

Les résultats relatifs à la granulométrie sont consignés dans le tableau 1. Ce tableau montre que le taux de fine (argile) est inférieur à 30%. C'est l'une des conditions nécessaires pour la fabrication de la BTC et de la BTCS d'après la norme XP P 13-901 [5, 6].

Les limites d'Atterberg présentées dans le tableau 2 montrent que la latérite utilisée se situe dans la zone limite de liquidité ($25 < W_L < 50$) et dans la zone limite de l'indice de plasticité ($25 < I_P < 29$). C'est la deuxième condition nécessaire pour la fabrication de la BTC et de la BTCS selon la norme XP P 13-901 [5, 6].

3.1.2. Analyse chimique

Le tableau 3 présente la composition chimique de la latérite utilisée dans cette étude. Seuls les constituants prépondérants sont présentés. Il ressort un faible pourcentage en SiO₂ et Al₂O₃, mais un taux élevé de Fe₂O₃.

Ces trois composants influencent la qualité mécanique de la brique en latérite compressée [5, 6].

Le tableau 3 présente également les résultats de la perte au feu et des résidus.

Tableau 3

Composition chimique de la latérite (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	Perte au feu	Résidus
11,32	13,09	19,13	1,07	0,14	0,11	10,87	43,70

3.1.3. Résultats d'analyse thermique

Les résultats ATD/ATG de la latérite utilisée sont présentés par la figure 2.

Cette figure montre un certain nombre d'effets thermiques (courbe ATD) associés à des pertes de masse (courbe ATG).

Sur la figure 2, est présenté l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui ont lieu. Les pertes de masse observées sont dues respectivement à la déshydroxylation des oxydes ferriques à 295 °C et de la kaolinite à 307 °C

d'une part, et au départ d'eau d'humidité et d'eau adsorbée aux alentours de 150 °C, d'autre part.

Entre 150 °C et 500 °C, en plus des phénomènes de déshydroxylation, l'on peut également noter la combustion des matières organiques entrainant une augmentation brusque de la perte de masse jusqu'à 13%.

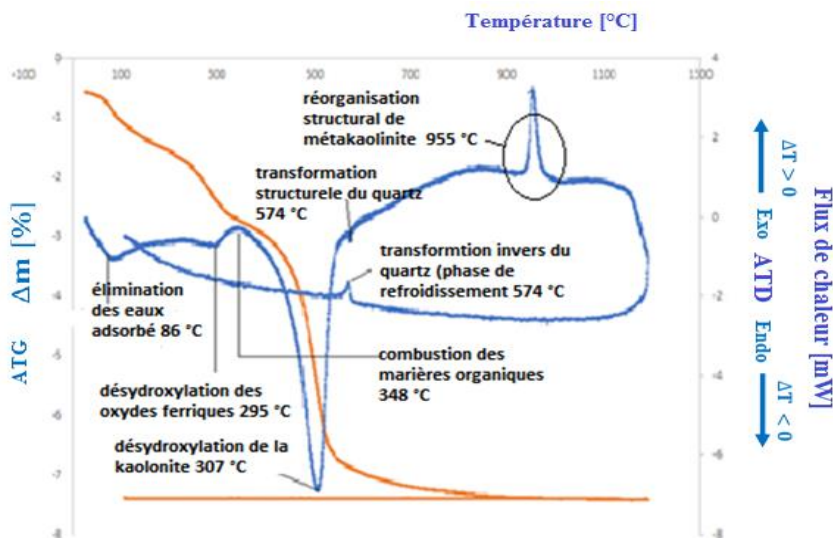


Fig.2. Courbe ATD/ATG de la BTC.

3.2. Evolution relative des propriétés physiques de la BTC et de la BTCS en fonction de la température

3.2.1. Evolution de la perte de masse

Dans la présente étude, seule la perte de masse à l'état sec a fait l'objet d'une investigation.

L'évolution de la masse en fonction de la température est présentée à la figure 3. Sur cette figure, la courbe en orange représente l'évolution de la masse de BTC en fonction de la température et celle en bleu représente l'évolution de la masse de la BTCS en fonction de la température.

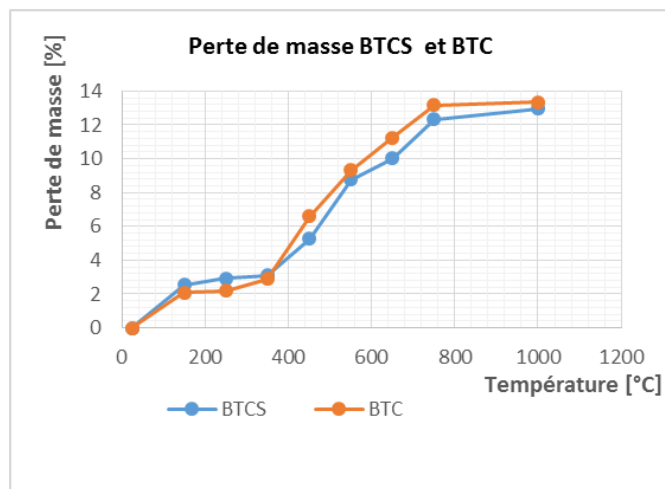


Fig. 3. Evolution relative de la perte de masse en fonction de la température.

3.2.1.1. La BTC

En dessous de 150 °C, la perte de masse est de 2,07% suite au départ d'humidité et d'eau adsorbée.

Entre 150 °C et 350 °C, la perte de masse atteint 2,88% due à la déshydroxylation des oxydes ferriques à 295 °C et de la kaolinite à 307°C, et le départ de l'eau libre et de l'eau

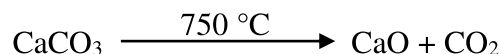
chimiquement liée. Ces phénomènes continuent progressivement jusqu'à 750 °C.

Au-delà de 750 °C, la masse de la BTC se stabilise due à une réorganisation structurale de la métakaolinite [10, 11].

3.2.1.2. La BTCS

En dessous de 150 °C, la perte de masse est de 2,93% suite au départ d'humidité et d'eau adsorbée.

Entre 150 °C et 750 °C la masse de la BTCS se stabilise suite à la réhydratation de la pâte du ciment avec l'humidité atmosphérique [1, 7, 11]. Par la suite, la masse de la BTCS diminue suite aux diverses réactions des minéraux constitutifs du ciment en fonction de la température telles que la déshydratation des granulats siliceux et la décarbonatation de la calcite selon la réaction chimique ci-dessous [1,2]:



Au-delà de 750°C, la masse semble se stabiliser.

L'étude de la perte de masse des briques a permis de distinguer trois zones de départ de l'eau. La première zone se situe entre 25 °C et 350 °C ; elle présente une faible perte de masse due au départ de l'eau capillaire. Entre 350 °C et 750 °C, on observe une importante perte de masse. Cette perte de masse est attribuée au départ de l'eau adsorbée due aux forces de Van der Waals. Au-delà de 750 °C, la cinétique de perte de masse ralentie.

Cela peut être expliqué par le départ de l'eau fortement (chimiquement) liée.

3.2.2. Evolution de la porosité

La figure 4 présente la variation de la porosité de la BTC et de la BTCS en fonction de la température. La mesure de cette propriété physique est réalisée à l'état résiduel sec et à l'état résiduel humide.

A l'état sec à 750 °C, le taux de porosité de la BTCS est de 23,74% tandis qu'à l'état humide il atteint 28,26%. A 1000 °C, les taux de porosité de la BTCS à l'état résiduel sec et à l'état résiduel humide sont respectivement de 26,33% et de 31,13%.

Pour la BTC, les mesures à 1000 °C ne sont plus possibles, car l'éprouvette se liquéfie durant l'immersion dans l'eau. Mais à 750 °C à l'état sec, le taux de porosité atteint la valeur de 28,76% ; quant à l'état humide, le taux de porosité est de 35,76%.

La différence du taux de porosité entre l'état sec et l'état humide peut être expliquée par le choc thermique durant l'humidification de l'éprouvette. Ce phénomène crée des pores et fissures supplémentaires au sein de la brique [8]. Dans tous les cas, la brique stabilisée avec 3% de ciment montre une porosité plus faible que celle à base de latérite seule. Les différences sont attribuées à la quantité d'eau apportée pendant la fabrication, qui conditionne la taille des pores capillaires, ainsi qu'à la réaction pouzzolanique qui a lieu dans la BTCS. Selon ces résultats,

nous pouvons conclure que la BTCS présente un volume poreux inférieur à celui de la BTC.

Les résultats montrent que les briques sont très sensibles à la température et que la porosité à l'eau augmente avec l'augmentation de la température. A 150 °C, la porosité des deux briques (BTC et BTCS) est d'environ 5%. Ensuite, elle augmente avec la température jusqu'à atteindre des valeurs comprises entre 26,33% et 31,13% à 1000 °C pour la BTCS. Dans le cas de la BTC, la porosité atteint des valeurs comprises entre 28,76% et 35,75%.

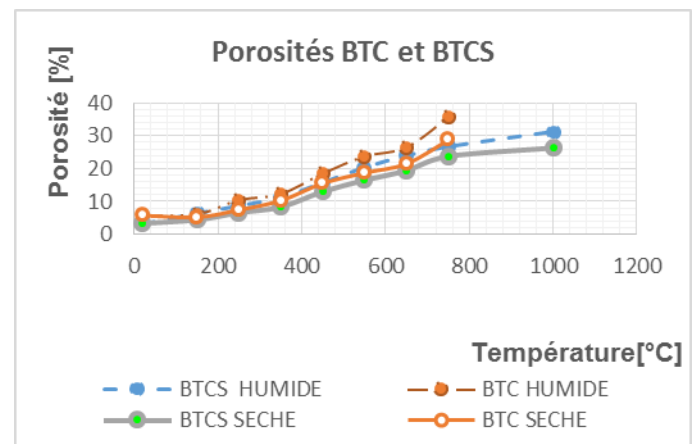


Fig. 4. Variation relative de la porosité en fonction de la température.

3.3. Evolution du module d'Young en fonction de la température

Les modules d'Young à la température ambiante sont pris comme référence. Ces valeurs sont de 88,25 MPa pour la BTC et de 107,1 MPa pour la BTCS.

Les figures 5a et 5b montrent respectivement l'évolution relative des modules d'Young de la BTC et de la BTCS en fonction de

la température par rapport aux valeurs de référence. Les valeurs obtenues par compression axiale à l'état résiduel sec et humide sont portées sur le même graphique (Figure 5).

Il y a une similarité entre l'allure des deux courbes de variation du module d'Young des deux états de la brique. Le module d'Young diminue progressivement dans tous les cas. Il peut être noté qu'à l'état sec, les briques ont un module d'Young supérieur à celui de l'état humide.

La diminution relative de module d'Young est moins élevée pour la BTCS, 20% par rapport à sa valeur initiale. Elle semble particulièrement s'accélérer entre 350 °C et 750 °C puisque la diminution du module est de 40%, c'est-à-dire la vitesse de variation est deux fois plus rapide que

dans l'intervalle de températures plus basses. Dans le domaine de températures plus élevées (750 °C à 1000 °C), la diminution des propriétés est ralentie et est d'environ 20%.

Dans le cas de la BTC, la vitesse de la diminution du module d'Young est presque linéaire (environ 40%). Elle est identique dans les deux premières gammes de températures (350°C à 550°C et 550°C à 750°C). Au-delà de 750 °C, le module d'Young résiduel de la BTCS est environ de 20% et celle de la BTC est de 5% en moyenne. Sur la figure 6 est présenté l'état de la BTC et de la BTCS après un traitement thermique à 350°C.

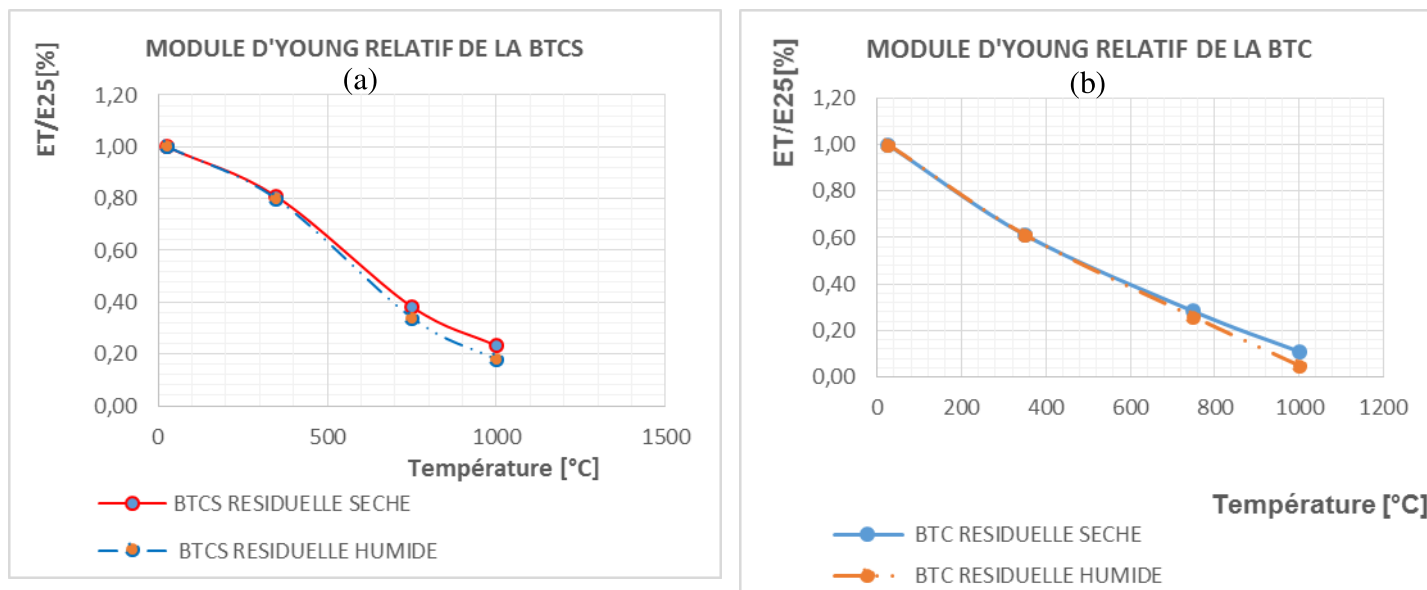


Fig. 5. Evolution relative du module d'Young à l'état résiduel. (a) BTCS; (b) BTC.



Fig. 6. BTCS (à gauche) et BTC (à droite) après traitement à 350 °C.

4. Conclusion

Ce travail a permis de montrer que les propriétés physiques des briques en latérite compressées se détériorent avec l'augmentation de la température. Ainsi, les modules d'Young de la brique stabilisée avec 3% de ciment (BTCS) et de la brique en latérite (BTC) après 28 jours de maturation diminuent.

A la température de 1000 °C, le module d'Young de la BTC est de 5% de sa valeur à la température ambiante (25°C) à l'état résiduel humide et de 20% à l'état résiduel sec.

Pour la BTCS le module d'Young résiduel après le traitement à haute température est de 18% de sa valeur à 25 °C à l'état humide et de 23% à l'état sec.

Dans les deux états résiduels (sec et humide), l'ajout de ciment à la latérite améliore les propriétés physiques ainsi que le module d'Young de la brique en terre compressée.

Il a été également montré que contrairement au module d'Young, la porosité des briques augmentent avec la température.

D'une manière générale, la porosité de la BTCS est inférieure à celle de la BTC. La porosité est l'un des paramètres importants caractérisant la durabilité de la brique. La différence observée est associée aux modifications physico-chimiques et aux microfissures qui se produisent au niveau de la cohésion des différents grains de la latérite et de la pâte de ciment.

Remerciements

- Nous remercions l'équipe de recherche et développement des matériaux du Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) Antananarivo Madagascar pour sa participation durant la campagne expérimentale de ce travail de recherche.
- Nous remercions aussi le Professeur Phillippe BLANCHART du laboratoire IRCE de l'Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle (ENSCI) de l'Université de Limoges pour ses conseils et la réalisation de l'analyse ATD/ATG.

Références bibliographiques

- [1] R.N. Razafinjato, Comportement des bétons à haute température ; influence de la nature de granulat, Thèse de doctorat, Université Cergy Pontoise, France (2015).
- [2] S. Hachemi, Etude du comportement du béton soumis à haute température influence du type du béton et de la nature des constituants, Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheder Biskra, Algérie (2015).
- [3] H. Sabeur, Etude du comportement du béton à haute température : une nouvelle approche thermo-hygro-mécanique couplée pour la modélisation du fluage thermique transitoire, Thèse de doctorat, Université Marne-la-Vallée, France (2006).

[4] I.G. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Cracovie, Pologne (2004).

[5] Center for Development of Enterprise (C.D.E), Compressed earth blocks: Testing procedures. In: C.D.E., ENTPE et CRATerre Code, Brussels, Belgium (2000).

[6] A. P'kla, Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (btc) : application aux maçonneries BTC-mortier de terre, Thèse de doctorat, 2002, Université de Lyon, France (2002).

[7] L. Missemmer, Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France (2011).

[8] N. Yamark, Comportement à haute température des bétons additionnés de fibres, Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France (2015).

[9] P.-M. Nigay, Etude des transformations microstructurales de mélanges argile/biomasse lors de la cuisson et relations avec les propriétés mécaniques et thermiques, Thèse de doctorat INP Toulouse, France (2015).

[10] D. Kobor, L.G. Ndiaye, M. Touré, R. Ndioukane, A. Diédhiou, A. Bayo, Etude de quelques paramètres physiques et thermophysiques de briques en terre cuite à différentes températures, Workshop : Energies Renouvelables et Développement Durable, Mai 2014, ScienceLib - Editions Mersenne – ISSN : 2111-4706, UASZ, Ziguinchor, Sénégal (2014).

[11] T.H Nguyen, Contribution à l'étude du comportement thermomécanique à très haute température des matériaux composites pour la réparation et/ou le renforcement des structures de Génie Civil, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, France (2015).