

# *Amélioration Des Qualités Mécaniques D'une Brique De Terre Comprimée Stabilisée Au Ciment Par Trempe De Consolidation Au Silicate De Soude*

Tantelinaiina Mbolanirina RAMANANDRAIBE<sup>(1)</sup>, Pierre RAKOTOMAMONJY<sup>(2)</sup>, Guy Joël ROBISONARISON<sup>(3)</sup>, Edouard Ravalison ANDRIANARISON<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation de l'Université d'Antananarivo,

<sup>(2)</sup> Laboratoire du Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

<sup>(3)</sup> Laboratoire des Matériaux du Centre National des Recherches Industriels et Technologiques de Tsimbazaza Antananarivo.

Correspondant\*: tantelyh2005@gmail.com



**Résumé** – Le ciment constitue un stabilisant courant pour la stabilisation des briques en terre crue, pourtant sa production dégage beaucoup de gaz à effet de serre nuisibles pour l'environnement. De plus, son coût élevé limite son utilisation dans la stabilisation des matériaux en terre. En effet, une brique de terre comprimée stabilisée au ciment BTCSC nécessite l'ajout d'une teneur assez élevée supérieur à 5% de ciment pour assurer une bonne résistance mécanique à la compression. Cependant, ces BTCSC ont la faiblesse de ne pas résister à l'immersion dans l'eau. Notre objectif est de maintenir à 5% la quantité de ciment apportée pour stabiliser les BTCSC et d'améliorer sa qualité mécanique par traitement avec la solution de silicate de soude ou d'autres silicates solubles préparés à partir de la cendre de balle de riz CBR comme agent de consolidation des BTCSC par géopolymérisation. La méthode innovante apportée dans nos expérimentations consiste à augmenter les résistances mécaniques des BTCSC par trempe de consolidation de 24 heures dans une solution diluée de silicate de soude SSS. Par cette méthode, les briquettes de terre comprimée stabilisée au ciment consolidées à la solution de silicate de soude BTCSCS ont alors acquis un surcroît de résistance mécanique à la compression à sec atteignant 40,39% comparée à celle des BTCSC à 7 jours de prise. Leur capacité de résistance mécanique à l'immersion de 48 heures dans l'eau a augmenté jusqu'à 43,17% par rapport à celle des BTCSC.

**Mots clés** – *Sol Latéritique, Brique De Terre Compressée, Stabilisation, Ciment, Silicate De Soude, Trempe De Consolidation, Immersion, Résistance A La Compression*

**Abstract** – Cement is a common stabilizer for stabilizing mud bricks, yet its production releases a lot of greenhouse gases that are harmful to the environment. In addition, cement high cost limits its use in stabilizing earth materials. Indeed, a compressed earth brick stabilized with cement BTCSC requires the addition of cement content greater than 5% to ensure good compressive strength. However, these BTCSC have the weakness of not resisting immersion in water. Our objective is to maintain the quantity of cement brought to stabilize the BTCSC at 5% and to increase its mechanical quality by treatment with the solution of sodium silicate or other soluble silicates prepared from the ash of rice husk CBR as a consolidation agent for BTCSC by geopolymerization. The innovative method adduced in our experiments consists in increasing the mechanical resistance of the BTCSC by hardening for 24 hours in a dilute solution of sodium silicate SSS.

The cement-stabilized compressed earth briquettes consolidated with the sodium silicate solution BTCSCS then acquired an increase in mechanical dry compressive strength reaching 40.39% compared to that of the BTCSC after 7 days setting. Their 48-hour water immersion mechanical strength ability increased by up to 43.17% compared to that of BTCSC.

**Keywords** – *Lateritic Soil, Compressed Earth Brick, Stabilization, Cement, Sodium Silicate, Consolidation Quenching, Immersion, Compressive Strength.*

## INTRODUCTION

Dans un pays en voie de développement comme MADAGASCAR, le développement des infrastructures est souvent biaisé par le coût élevé des matériaux de construction. La terre est souvent considérée comme le matériau du pauvre malgré leur abondance naturelle et les matériaux en terre ne disposent pratiquement pas de résistance aux intempéries comme la pluie, le vent, l'humidité [1]. Ainsi, les recherches actuelles dans les constructions en terre sont orientées vers les méthodes contribuant à améliorer les résistances mécaniques à la compression à sec et humide des briques de terre notamment la recherche sur les briques de terre comprimée BTC et stabilisée par le ciment. Cependant, l'utilisation du ciment présente deux inconvénients par son coût élevé et l'impact négatif de sa production sur l'environnement. De plus, la stabilisation des BTC ne sont pas assurées qu'à des taux élevés supérieurs à 5% d'adjonction de ciment mais encore, ces BTCSC stabilisées au ciment présentent encore le principal inconvénient en leur détérioration sous l'action des intempéries notamment la succession des phénomènes climatiques : pluie, soleil, froid, humidité et vent [1]. En bref, ces BTCSC ne disposent pas d'assez bonne résistance à l'eau.

De ce fait, la recherche d'une alternative plus abordable et contribuant à lutter contre des intempéries et la succession des phénomènes climatiques est de rigueur. Notre étude consiste à l'utilisation de la terre comme matière première en utilisant la stabilisation au ciment à laquelle nous associons la consolidation par trempe dans une solution diluée de silicate de soude (silicate soluble). L'objectif est d'obtenir un nouveau matériau de BTC disposant des résistances mécaniques à la compression et des résistances à l'immersion dans l'eau améliorées comparées aux BTC stabilisées au ciment.

## I. MATERIELS ET METHODES

### I.1 Matériels

Les échantillons utilisés dans nos travaux de recherche ont été confectionnés à partir du matériau terre, notamment les sols latéritiques locaux. Le ciment a servi comme liant hydraulique de base de la stabilisation et le silicate de soude a été employé pour contribuer à la consolidation mécanique des briquettes d'essai.

#### I.1.1 Sol latéritique

Le sol latéritique utilisé dans cette étude provient de Soamanandrany dans la commune rurale d'Ambohimangakely, district d'Antananarivo Avaradrano, à environ 10 km de la ville d'Antananarivo capitale de Madagascar. Les coordonnées géographiques de la zone de prélèvement sont 18°53'79'' de latitude et 47°34'06'' de longitude. Le sol latéritique est de type limon argileux jaunâtre selon la classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) d'Alarobia Antananarivo. L'échantillon de sol prélevé a été soumis à un séchage préliminaire de 7 jours à l'air libre.

#### I.1.2 Ciment

Le ciment Portland de type CEM I 52,5 R CE CP2 (NF EN 197-1, 2012) [2] fourni par l'usine du Teil de la Société Lafarge Holcim Madagascar a été choisi pour notre étude sur la stabilisation de sol latéritique. Ce choix est justifié par l'usage fréquent de ce type de ciment dans le domaine de construction à Madagascar.

#### I.1.3 Silicate de soude

Le silicate de soude est préparé à partir de la cendre de balle de riz, résidu de rizerie très abondant localement, collecté dans la Commune de Fenoarivo, district d'Antananarivo Atsimondrano. L'usage de la CBR est justifié par la teneur élevée en dioxyde de silicium ou silice  $\text{SiO}_2$  [3].

### Les principales caractéristiques physico-chimiques des solutions de silicate de soude

- Module  $R_m$  : il est défini par le rapport [3] [4] :

$$R_m = \frac{n_{\text{SiO}_2}}{n_{\text{Na}_2\text{O}}}$$

où  $n_{\text{SiO}_2}$  représente le nombre de mole de  $\text{SiO}_2$  et  $n_{\text{Na}_2\text{O}}$  l'équivalent en nombre de mole d'oxyde de sodium  $\text{Na}_2\text{O}$  de la soude caustique  $\text{NaOH}$  ayant servi à la préparation du silicate de soude.

- Teneur en matières sèches  $T_{MS}$  : Elle se détermine par prélèvement d'une masse  $m_0$  de SSS que l'on évapore à sec à 105°C jusqu'à masse constante  $m_1$ . Le taux TMS indiquant la teneur en matières solides en suspension est défini par le rapport [3] :

$$T_{MS} (\%) = \frac{m_1}{m_0} .100$$

**Préparation** : Les silicates de soude appelée également silicates solubles respectivement de module  $R=2,6$  et  $R=3,5$  ayant servi à nos études expérimentales, ont été préparés au Laboratoire du Génie des Procédés Chimiques et Industriels de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo à partir de la cendre de balle de riz (CBR).

- *Etape 1* : Incinération de la balle de riz issue à la température comprise entre 550 et 650°C permettant d'obtenir la cendre de balle de riz (CBR) à teneur en  $SiO_2$  de 88 à 92%
- *Etape 2* : Broyage fin à granulométrie de 0,1 mm de la CBR provenant de l'incinération. Cette CBR finement broyée a servi de matière première, source de silice, dans la préparation du silicate de soude.
- *Etape 3* : Le silicate de soude est préparé par cuisson à ébullition à 100°C durant 4 heures du mélange CBR, de la quantité de soude caustique NaOH équivalente à celle de l'oxyde de sodium  $Na_2O$  avec la quantité d'eau nécessaire pour avoir une bonne dilution de la solution de silicate de soude de module  $R_m$  [3].

Après cuisson, suite à une évaporation partielle de la solution de silicate de soude ainsi préparée, l'ajout d'un appoint d'eau a été nécessaire afin d'obtenir une solution de module  $R_m$  à teneur en matières sèches (TMS) de 25%. La solution SSS ainsi préparée est alors conservée dans des bouteilles fermées hermétiquement en matière plastique avant son utilisation [3] [4].

## **I.2 Méthode expérimentale**

### **I.2.1 Méthode d'identification des sols**

Le sol latéritique prélevé a fait l'objet d'essais en laboratoire pour déterminer ses caractéristiques : propriétés physiques, géotechniques et chimiques [1] [5].

L'analyse granulométrique selon la méthode de tamisage par voie humide a permis de déterminer la répartition granulométrique du sol latéritique essayé. Elle consiste à diviser le sol latéritique ayant servi à la confection des éprouvettes de BTC en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes au moyen de série de tamis d'ouverture allant de 5 mm à 2  $\mu$  selon la norme XP P 94-041 [6].

Les propriétés géotechniques du sol sont identifiées à l'aide des limites d'Atterberg qui consiste à déterminer la plasticité du sol en tenant compte de la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP) selon la norme NF EN ISO 17892-12, Juillet 2018 [7] [8].

La composition chimique élémentaire du sol a été déterminée par la méthode de spectrométrie de fluorescence X à dispersion de longueurs d'ondes S4 BRUCKER. L'échantillon a été calciné à 1000°C pendant 24 heures [9]. Les résultats d'analyse chimique exprimés en pourcentage massique d'oxyde des échantillons ainsi que la perte au feu LOI (loss of ignition) sont donnés dans le Tableau 1. Les analyses élémentaires permettent d'exprimer les teneurs en oxydes des éléments majoritaires constituant le sol latéritique utilisé :  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  et  $P_2O_5$ .

### **I.2.2 Processus de confection des éprouvettes d'essai mécanique**

La confection des éprouvettes se réalise par voie semi-humide à l'aide d'une moule à piston cylindrique de dimensions : hauteur  $h= 5$  cm, diamètre  $d= 5$ cm. Après quantification des matériaux servant à l'essai (sol latéritique, stabilisant : ciment, silicate de soude), le mélange est humecté de la quantité d'eau suffisante puis malaxé jusqu'à l'obtention d'une matière homogène semi-humide. Dans tous nos essais, le compactage des éprouvettes d'essai est réalisé avec la machine universelle multifonctionnelle de marque TESTWELL à la pression de 10 MPa. Après compactage, les éprouvettes sont démoulées puis laissées exposer à l'air libre à l'abri du soleil pour permettre leur prise [3] [5].

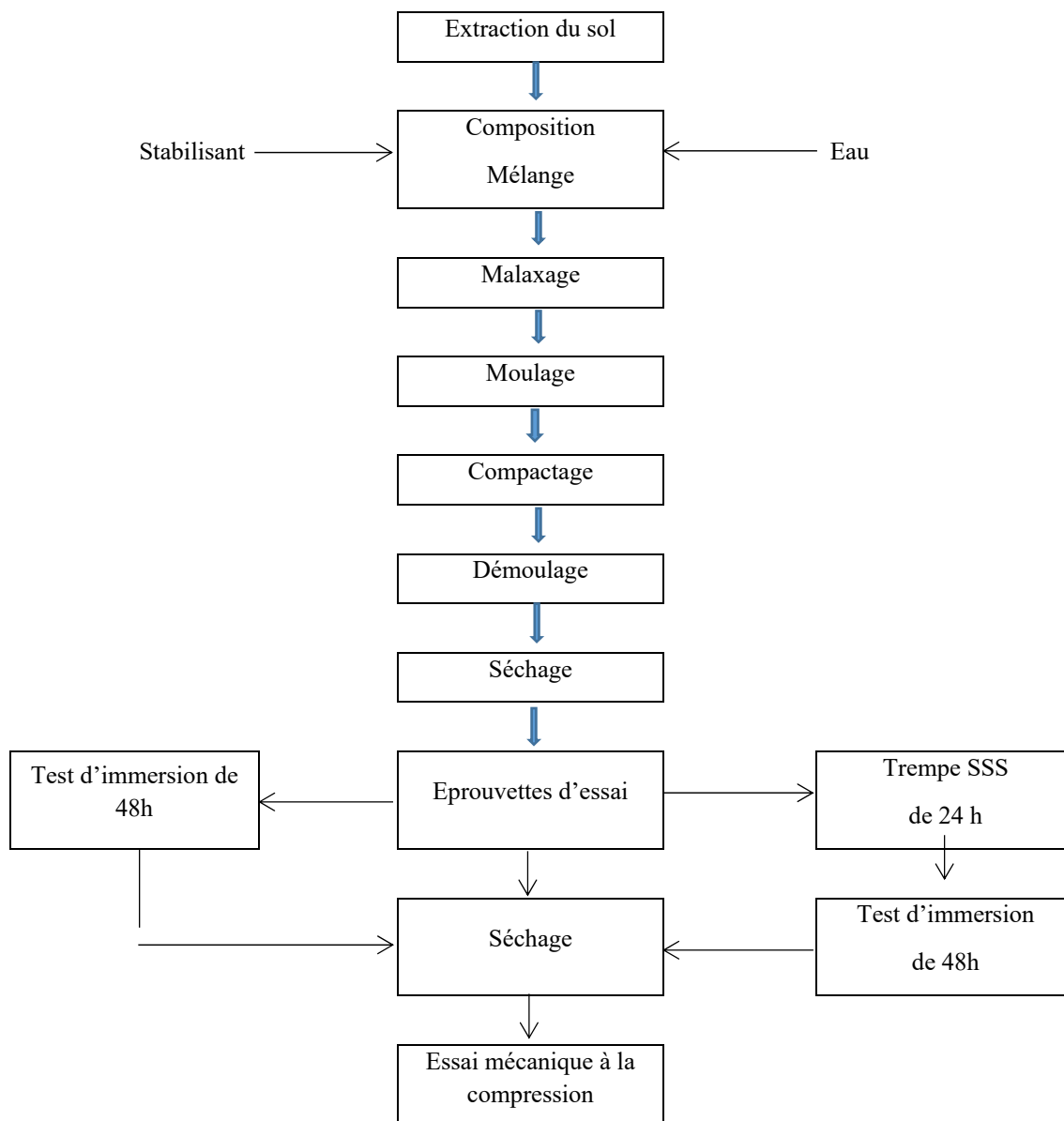


Figure 1 : Processus de fabrication et de tests des éprouvettes de BTC

Le processus de fabrication et de tests des éprouvettes de BTC est résumé sur la *Figure 1*.

### 1.2.3 Les différents essais de stabilisation et de consolidation réalisés

Dix (10) essais différents ont été menés pour les études comparatives permettant de suivre l'évolution des comportements des BTC par stabilisation au ciment BTCSC et par consolidation au silicate de soude BTCSCS selon les compositions suivantes :

- Essai 1 : préparation d'éprouvettes de terre compressée sans aucun liant stabilisant BTC confectionnée avec le sol latéritique prélevé en variant la teneur en eau d'humidification. Cet essai a pour objectif de connaître la teneur en eau d'humidité optimale permettant un bon compactage des BTC ;
- Essai 2 : confection d'éprouvettes de BTCSC composées de 95% de terre latéritique et 5% de ciment humectée avec 16% d'eau. L'essai est mené afin de confirmer l'effet d'addition de ciment dans la stabilisation des BTC.

- Essais 3 à 4 : préparation d'éprouvettes BTCSS par stabilisation au silicate de soude de module R=3,5 à teneur en matières sèches de 25% dans les proportions de 5, 10 et 15 %. Ces deux essais vont permettre d'élucider la contribution du silicate de soude dans la stabilisation des BTC.
- Essais 5 et 6 : Ces deux essais sont réalisés sur les éprouvettes de BTCSC. Ils ont pour objectif de démontrer la consolidation par trempe de 24 h à froid dans des solutions de silicate de soude de module respectif R=2,6 ou R2.6 et R=3,5 ou R3.5 des éprouvettes de BTCSC, permettant alors d'obtenir des éprouvettes de BTCSCS.

Les résultats de ces essais sont récapitulés dans le Tableau 8.

#### **I.2.4 Mesure de la résistance mécanique à la compression**

Après 7 jours de séchage, les éprouvettes confectionnées sont soumises aux tests de résistance à la compression afin de déterminer leur résistance par écrasement.

Les essais mécaniques à la compression sont réalisés sur la machine universelle multifonctionnelle de marque TESTWELL. Ils consistent à procéder à l'écrasement sous charge axiale des éprouvettes de BTC à sec ou à l'état humide après immersion de 48h dans l'eau. En effet, l'éprouvette placée entre les plateaux de la presse est chargée progressivement jusqu'à l'écrasement par compression. La résistance à la compression simple  $R_c$  en mégapascal [MPa] s'exprime par le rapport de la force appliquée à la section de l'éprouvette exprimée conventionnellement par la formule suivante [5] [10] :

$$R_c = \frac{0,1 \cdot F_{max}}{S}$$

Avec :  $R_c$  : résistance à la compression [MPa] ;  $F_{max}$  : force de compression maximale supportée par le matériau [daN] et S : Section de l'échantillon [cm<sup>2</sup>].

Deux séries de mesure de la résistance mécanique à la compression ont été menées pour chaque type d'essai des éprouvettes de BTC, BTCSC, BTCSS et BTCSCS :

- la résistance mécanique à la compression RCSx à sec après séchage à l'air libre de 7 jours de l'échantillon x ;
- et la résistance mécanique à la compression RCI après immersion de 48h dans l'eau suivie d'un séchage de 7 jours à l'air libre de l'éprouvette.

Les différents taux d'amélioration T1, T2 et T3 des résistances mécaniques des BTC à la compression par stabilisation et trempe de consolidation sont calculés à partir des formules suivantes :

- Taux d'amélioration de RCSx comparé aux BTC :

$$T1 (\%) = \frac{RCSx - RCS(BTC)}{RCS(BTC)} \cdot 100$$

- Taux d'amélioration de RCS des BTCSCS comparé aux BTCSC :

$$T2 (\%) = \frac{RCS(BTCSCS) - RCS(BTCSC)}{RCS(BTCSC)} \cdot 100$$

- Taux d'amélioration de RCI humide des BTCSCS comparé aux BTCSC :

$$T3 (\%) = \frac{RCI(BTCSCS) - RCI(BTCSC)}{RCI(BTCSC)} \cdot 100$$

## II.1 Caractéristiques du sol latéritique

### II.1.1 Caractéristiques chimiques

La composition chimique du sol latéritique prélevé pour notre étude, exprimée par les teneurs équivalentes en oxydes, est donnée dans le *Tableau 1* suivant.

Tableau 1 : Composition chimique (%) du sol latéritique prélevé pour les essais de confection de BTC

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
%	42,96	31,50	6,44	1,03	2,69	0,02	0,157	0,11	0,102	0,08	0,01	14,91

Ces résultats d'analyse du *Tableau 1* montrent que la terre latéritique utilisée dans nos expérimentations est majoritairement constituée de 42,96% d'oxyde de silicium SiO<sub>2</sub>, 31,50% d'oxyde d'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 6,44% d'oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tandis que les autres oxydes (K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ne sont présents qu'en moindres quantités. Ce tableau d'analyse indique également la présence à un taux de perte au feu assez élevé de 14,91% dans l'échantillon de sol étudié. Cette teneur en eau élevée serait due à la granulométrie assez fine, comprise entre 2μ et 2mm, de l'échantillon et en conséquence une assez grande surface spécifique provoquant une importante rétention capillaire et nécessitant un séchage préliminaire avant la confection des BTC.

### II.1.2 Caractéristiques granulométriques du sol

Les résultats des essais d'étude de la répartition granulométrique du sol latéritique utilisé dans nos essais sont présentés dans le *Tableau 2*. La *Figure 2* présente la courbe de répartition granulométrique du sol obtenue par tamisage par voie humide.

Tableau 2 : Caractéristiques granulométriques du sol utilisé pour la confection des éprouvettes de BTC

Granulométrie									
Ouverture de tamis (mm)	5	2	1	0,315	0,2	0,08	0,02	0,01	0,002
Pourcentage cumulé de tamisat (%)	100	99	95	79	73	66	38	30	18

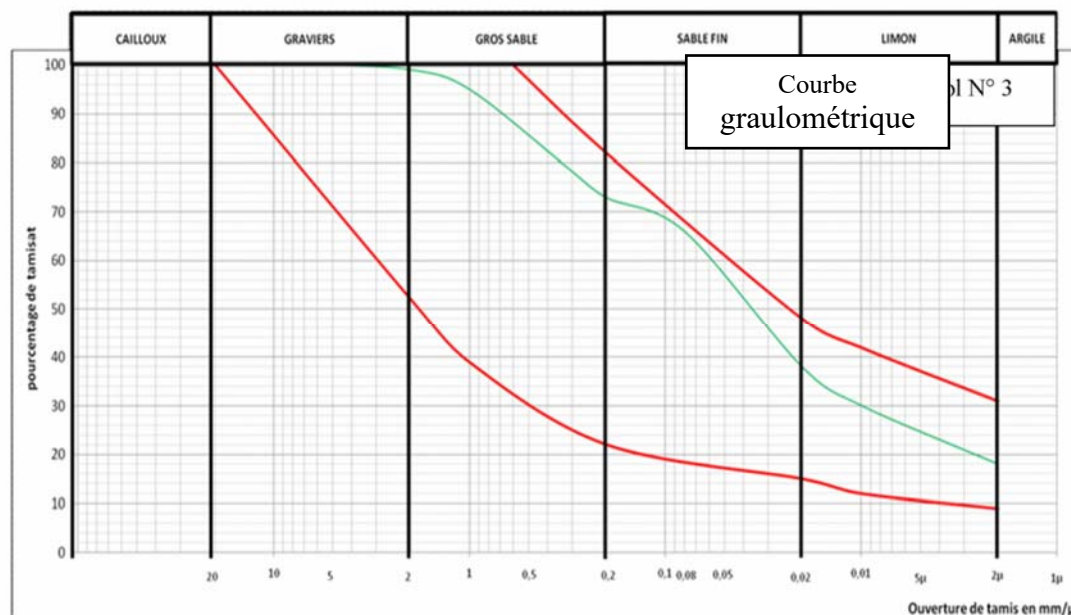


Figure 2 : Courbe de répartition granulométrique du sol utilisé pour la confection des éprouvettes de BTC

L'analyse des résultats présentés dans le *Tableau 2* et sur la *Figure 2* montre que le sol latéritique utilisé est plutôt constitué de fins à granulométrie maximum de 2 mm. Toutefois, sa courbe granulométrique est incluse dans la limite des spécifications granulaires proposées par la norme française NF XP 13-901 sur CEB (AFNOR 2001) [11]. Ainsi, du point de vue granulométrique, le sol prélevé dans notre étude est alors utilisable pour la confection de BTC [12][13].

### II.1.3 Caractéristiques géotechniques du sol

La classification du sol essayé a permis de déduire les résultats donnés dans le *Tableau 5* par les méthodes de classification LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées) et GTR (Guide des terrassements Routiers)

Tableau 3 : Classification géotechnique du sol latéritique prélevé

Désignation	Classification LCPC	Classification GTR
Limon argileux jaunâtre	AP (Argile plastique)	A2

Par ailleurs, la détermination des limites d'Atterberg permet de connaître la plasticité du sol utilisé.

Tableau 4 : Limites d'Atterberg du sol prélevé pour l'étude

Limites d'Atterberg		
Limite de liquidité [W <sub>L</sub> (%)]	Limite de plasticité [W <sub>P</sub> (%)]	Indice de plasticité [I <sub>P</sub> (%) ]
35,6	21,7	14

La classification globale du sol utilisé est définie sur la base de ces résultats de caractéristiques géotechniques. A défaut de classifications dédiées à la construction en terre crue, on utilise en général celles développées pour les applications routières. D'après la classification LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées) et la classification GTR (Guide des terrassements Routiers) permettant de classer le sol selon la nature [14], il en découle que : l'échantillon prélevé est un sol argileux plastique de type A2. Ceci démontre la cohérence des résultats obtenus avec la limite d'Atterberg et ceux déduits de la détermination de

l'indice de plasticité. Les sols de type A2, réputés pour leur sensibilité à l'eau, sont utilisables dans les constructions routières et dans les constructions en terre mais nécessitent des traitements complémentaires comme la correction granulométrique et l'introduction de stabilisant.

Dans le domaine de la construction de bâtiment, les caractéristiques géotechniques trouvées indiquent que le sol prélevé pour nos études s'apprête bien à la fabrication des briques de terre comprimées. Cependant, des risques de fissure de retrait au séchage et de gonflement en présence d'humidité peuvent survenir d'où la nécessité d'ajout d'agent stabilisant et de consolidation. Dans nos études, le ciment Portland a été choisi comme stabilisant et le silicate de soude issu de la cendre de balle de riz comme agent de consolidation.

**II.2 Résistance mécanique à la compression à sec des BTC**

Les résultats de mesure des résistances mécaniques à la compression des BTC lors des dix essais menés dans nos travaux sont décrits dans les paragraphes suivants. En effet, l'enchaînement des étapes d'études réalisées a pour objectif de démontrer comment évoluent les résistances mécaniques d'une BTC : sans liant, avec liant de ciment Portland, avec liant de silicate de soude et par trempe dans une solution de silicate de soude.

**II.2.1 Impact de la teneur en eau d'humidification dans la préparation des BTC sans adjonction de liant**

Cette première étape d'étude nous informe sur la nécessité d'adopter une teneur en eau d'humidification  $T_w$  (%) suffisante pour la mise en forme des éprouvettes d'essai et afin d'avoir des BTC compacts sans adjonction de stabilisant.

Tableau 5 : Résultats des essais de compression à l'état sec à 7 jours des éprouvettes du sol latéritique étudié en fonction de la variation de la teneur en eau  $T_w$  d'humidification pour une pression de compactage de 10 MPa

Teneur en eau $T_w$ [%]	13	14	15	16	17
Résistance RCS [MPa]	1,511	1,835	2,514	2,931	0,951

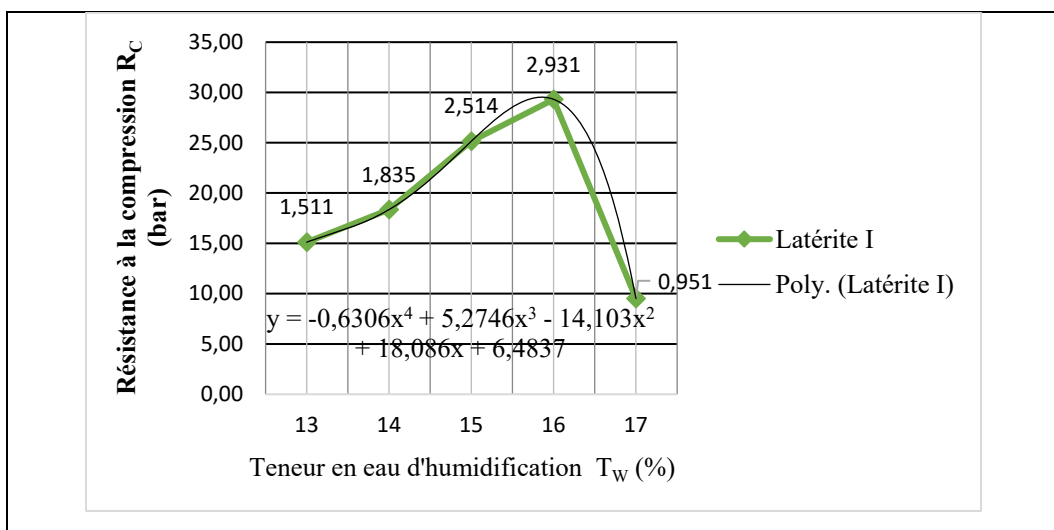


Figure 3 : Graphe de l'évolution de la résistance à la compression à l'état sec à 7 jours des éprouvettes lors des essais du sol latéritique en fonction de la variation de la teneur en eau d'humidification pour une pression de compactage de 10 MPa.

Les résultats de mesure des RCS des BTC en fonction de la teneur en eau d'humidification lors de l'essai n°1 de nos étapes d'étude sont représentés dans le *Tableau 5* et la *Figure 3* ci-dessus.



Les résultats issus de l'analyse de la courbe de tendance polynomiale d'ordre 4 de la résistance mécanique à la compression donnée par la Figure 3 indiquent que la confection des BTC nécessite d'adopter la teneur en eau d'humidification optimale voisine de 16% des BTC par rapport à la masse de terre latéritique utilisée. En effet, cette teneur en eau optimale attribue aux BTC une résistance maximale à l'écrasement à sec de 2,931 MPa. Ainsi, dans la suite de nos études, la teneur en eau d'humidification de 16% a été adoptée lors de la confection des éprouvettes d'essai des BTC et des BTCSC.

### II.2.2 Stabilisation des BTC au ciment Portland : mesure des RCS et RCI

L'objectif de cette deuxième étape de nos essais est de montrer l'effet de l'amélioration de résistance mécanique des BTC par ajout de 5% de ciment Portland comme agent stabilisant des BTC. Ainsi, nos essais ont été effectués en adoptant la composition massique expérimentale du mélange terre latéritique-ciment à 95% de sol latéritique, 5% de ciment humectée avec un taux  $T_w$  de 16% d'eau.

La résistance à la compression à l'état sec RCS mesurée après 7 jours de séchage des éprouvettes de BTCSC ainsi préparées est de 3,449 MPa et leur RCI après immersion dans l'eau de 48 heures est de 1,172 MPa.

D'une part, ce résultat indique l'amélioration de la résistance mécanique RCS de 17,67% des BTCSC stabilisées au ciment comparée aux BTC sans liant dont RCS maximale est de 2,931 MPa (voir Tableaux 5 et 8). D'autre part, malgré de leur faible résistance à l'eau, les éprouvettes de BTCSC disposent d'une assez bonne tenue à l'eau comparées aux BTC sans addition de ciment qui n'ont pas tenu à l'immersion dans l'eau.

### II.2.3 Stabilisation des BTC au silicate de soude

#### II.2.3.1 Résistance à la compression RCS et RCI des BTCSS

La troisième étape de nos expérimentations a pour objectif de démontrer l'effet stabilisant du silicate de soude dans les BTC. En effet, les résultats du Tableau 6 et de la Figure 4 ci-après démontrent l'augmentation de la résistance à la compression RCS à sec des BTC du sol latéritique après séchage de 7 jours des éprouvettes BTCSS préparées par stabilisation au silicate de soude SS de module R3.5 à TMS de 25% dans les proportions de 5, 10 et 15%.

Tableau 6 : Résultats d'étude de la stabilisation des BTC au silicate de soude de module R3.5

Taux d'ajout de SS [%]	5	10	15
Résistance RCS [MPa]	2,548	2,956	3,510
Résistance RCI [MPa]	0,713	1,834	2,140

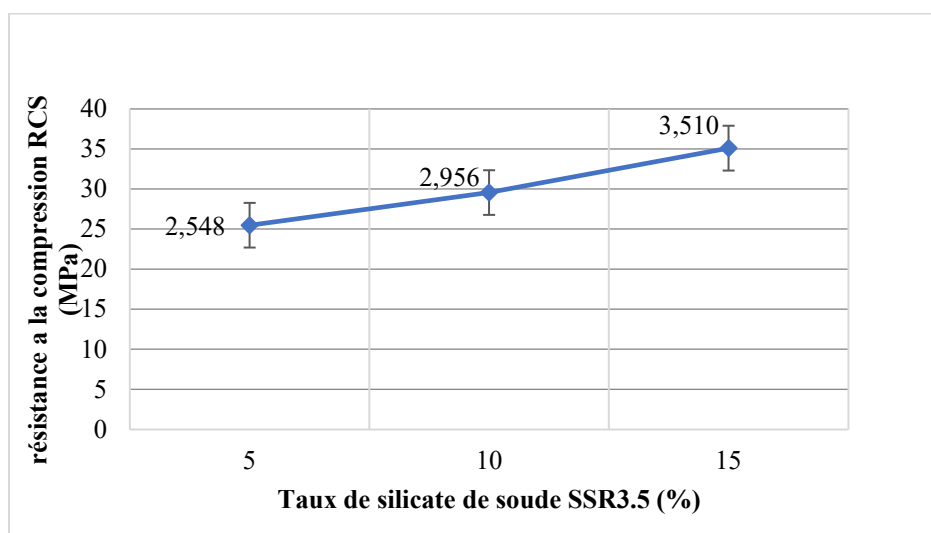


Figure 4 : Evolution de la RCS des BTC avec le taux d'ajout de silicate de soude SS R3.5

La stabilisation du sol latéritique par adjonction des taux variés de silicate de soude de module R3.5 sans dilution à TMS de 25% avec une pression de compactage de 10 MPa ont montré des résultats concluants selon le *Tableau 7* et représentés sur le graphe de la *Figure 5*. La résistance à la compression à l'état sec RCS après sept (07) jours de séchage des éprouvettes obtenues au cours des essais varie de manière croissante allant de 2,548 MPa à 3,510 MPa pour des taux d'ajout de silicate de soude R3.5 de 5% à 15%. Plus le taux d'adjonction de silicate de soude est élevé, plus la résistance à la compression est accrue de manière significative.

Des tests d'immersion ont été menés afin de permettre d'observer la tenue à l'eau des BTCSS par mesure de leurs RCI après immersion de 48h dans l'eau. Les résultats sont affichés dans le *tableau 6* et schématisés par la *Figure 5*.

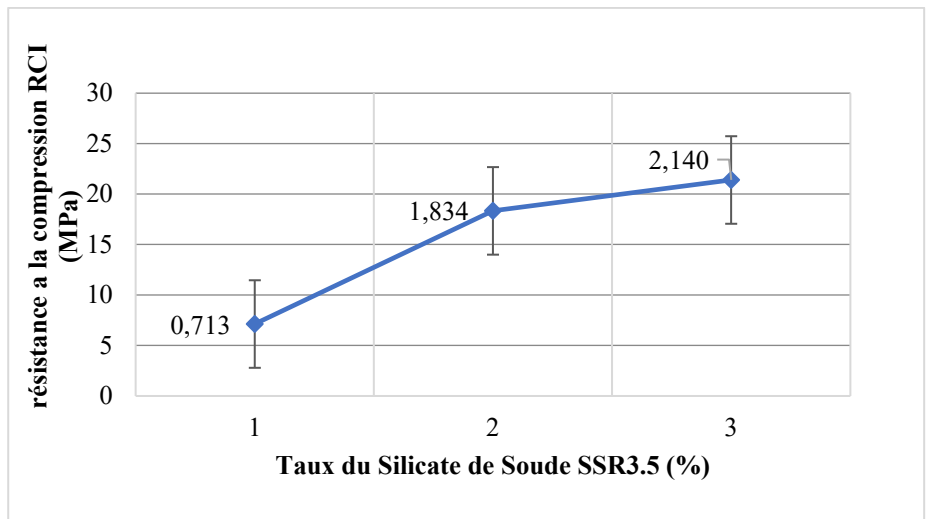


Figure 5 : Résistance à la compression RCI après immersion de 48h dans l'eau des éprouvettes d'essai de stabilisation au silicate de soude SS R3.5

Ces résultats indiquent que les BTCSS à faible taux d'adjonction de silicate de soude inférieur à 5% ne résistent que faiblement à l'immersion de 48h dans l'eau avec RCI = 0,713 MPa, alors que les éprouvettes d'essai de terre latéritique étudiée stabilisée à des taux supérieurs à 10% de SS de module R3.5 disposent de bonne tenue à l'immersion de 48h dans l'eau avec des RCI supérieures à 1,834 MPa.

Cependant, l'usage du silicate de soude est limité par la teneur optimale en eau du mélange compressé ne devant pas excéder les 16% d'eau (voir paragraphe III.2.1) et son pouvoir collant élevé (forte viscosité) rend sa manipulation difficile au cours de la confection des éprouvettes d'essai de BTCSS.

Toutefois, les résultats obtenus démontrent que le silicate de soude à module élevé (R3.5) constitue un bon liant pour la stabilisation du sol latéritique et justifient les intérêts portés aux études suivantes sur l'emploi du silicate de soude pour la stabilisation des BTC.

Ces résultats obtenus lors de la stabilisation par la solution de silicate confirment les informations bibliographiques indiquant que les solutions de silicates de soude à module élevé disposent de pouvoir liant plus significatif que la solution de silicate de soude à module faible (proche ou inférieur à 2,5).

### II.2.3.2 Comparaison de la stabilisation au ciment et au silicate de soude

Le graphique de comparaison des résultats de mesure de résistance à la compression des BTCSC et des BTCSS indiquée par la figure 6 ci-dessous montre que les RCS par stabilisation du sol latéritique à 5% de ciment et celles par stabilisation à 15% de SSS de module R3.5 sont pratiquement identiques (respectivement 3,449 MPa et 3,510 MPa) avec un résultat plus meilleur de liaison par la SSS.

Par contre, les résistances RCI des BTCSS (2,140 MPa) et des BTCSC (1,172 MPa) nous montrent de manière significative que les BTCSS à 15% de SSS (module R3.5 et TMS = 25%) résistent mieux à l'immersion dans l'eau de 48 h que les BTCSC à 5% de ciment avec une différence de 82, 59%.

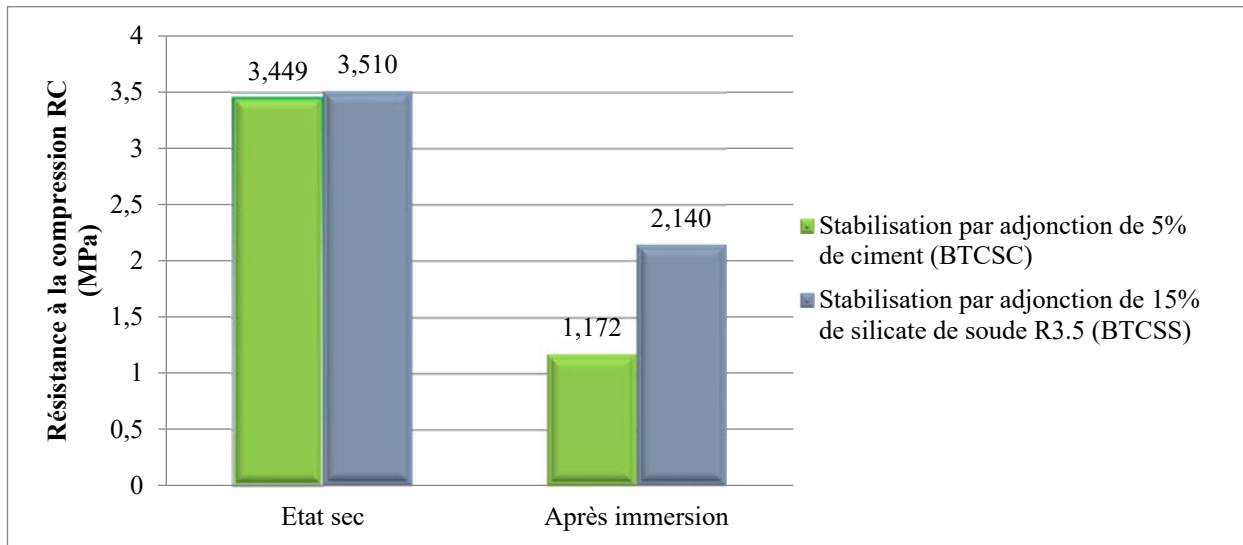


Figure 6 : Comparaison de la RCS des éprouvettes de BTCSC à 5% de ciment par rapport aux éprouvettes BTCSS à 15% de silicate de soude R3.5

Notons que les comparaisons de résultats ont été réalisées à la base de durée de prise du ciment de 7 jours alors que la durée de prise normale des ciments doit être 28 jours afin d'acquérir la résistance à la compression RCS proche de la valeur maximale.

Nos expérimentations ont permis de constater que la solution de silicate de soude est trop collante (à viscosité élevée) et le moulage des BTCSS se trouve difficile. Cependant, nos études ont démontré que les solutions SSS sont de très bon stabilisant des sols latéritiques (cf paragraphe II.2.3). La stabilisation par adjonction de silicate de soude R3.5 au taux de 15% peut remplacer la stabilisation par adjonction de ciment au taux de 5% du sol latéritique étudié.

#### II.2.4 Consolidation des BTCSC par trempe dans une solution de silicate de soude

La difficulté de manipulation des solutions SSS nous a ainsi amené à essayer et adopter une autre méthode de stabilisation en utilisant le ciment comme agent stabilisant des BTC et en pratiquant une consolidation des BTCSC par simple trempe dans des solutions diluées de silicate de soude. Les résultats obtenus sont tangibles montrant des améliorations nettes des RCS et RCI des BTC.

Ainsi, en troisième étape de nos travaux expérimentaux, des essais de consolidation des éprouvettes de BTCSC ont été effectués avec la solution de silicate de soude préparée à partir des CBR selon la méthode de préparation décrite dans le sous-paragraphe II.1.3.

En premier lieu, la solution de silicate soluble concentrée est diluée à 2 fois son volume par ajout d'eau de robinet. La solution diluée SSS ainsi obtenue a alors servi aux essais de consolidation des BTCSC. La méthode consiste à tremper à froid les BTCSC issues de séchage et de prise de 7 jours dans la solution diluée de silicate de soude pendant 24 heures. Après cette trempe, les éprouvettes de BTCSCS sont laissées sécher à l'air libre pendant 7 jours puis reprises pour les essais mécaniques de résistance à la compression. Ces essais de consolidation des BTCSC ont été réalisés avec deux types de solution de silicate soude de module respectif R2.6 et R3.5.

Tableau 7 : Récapitulation des résultats d'évolution des résistances à la compression des BTC selon la méthode de consolidation des BTCSC par trempe au silicate de soude

	Eprouvettes de BTC ( $T_w$ de 16%)		Eprouvettes de BTCSC (5% de ciment)		Eprouvettes de BTCSCS (trempe SS R2.6)		Eprouvettes de BTCSCS (trempe SS R3.5)	
	RCS	RCI	RCS	RCI	RCS	RCI	RCS	RCI
Résistance à la compression [MPa]	2,931	-	3,449	1,172	4,188	1,631	4,842	1,678
T1 (%)	-		17,67		42,89		65,20	
T2 (%)			-		21,43		40,39	
T3 (%)				-		39,16		43,17

où RCS représente la résistance à la compression à sec des éprouvettes d'essai après séchage de 7 jours et RCI la résistance à la compression humide après 48h d'immersion dans l'eau.

Les résultats des essais de consolidation des BTCSC à 7 jours de séchage composées de ciment à 5% avec un taux d'humidification  $T_w$  de 16% par la méthode de trempe avec la solution de silicate de soude sont présentés dans le Tableau 7 et par l'histogramme de la Figure N°7.

Les différents résultats et les taux d'amélioration T1, T2 et T3 des résistances mécaniques à la compression des types de BTC confectionnées par stabilisation au ciment et par trempe de consolidation au silicate de soude sont récapitulés dans le Tableau 7.

La Figure 7 permet de visualiser l'amélioration des résistances à la compression des BTCSC préparées par stabilisation à 5% de ciment puis traitées par trempe de consolidation aux solutions de silicate de soude de modules respectifs R2.6 et R3.5.

Les résultats de trempe des briquettes de BTCSC dans une solution de silicate de soude de 24h sont donnés dans le Tableau 7 alors que les RCS et RCI des BTC, des BTCSC et des BTCSCS sont schématisées par la Figure 7. En effet, nous constatons d'après ces résultats des améliorations de RCS des BTCSCS par rapport aux BTCSC allant de 21,43% à 40,39% faisant suite à la consolidation par trempe dans SSS de modules respectifs R2.6=2,6 et R3.5=3,5. L'augmentation de la résistance à la compression à sec et après immersion de 48 heures dans l'eau des BTCSCS provient probablement du mécanisme de géopolymérisation entre la latérite, le ciment et le silicate de soude.

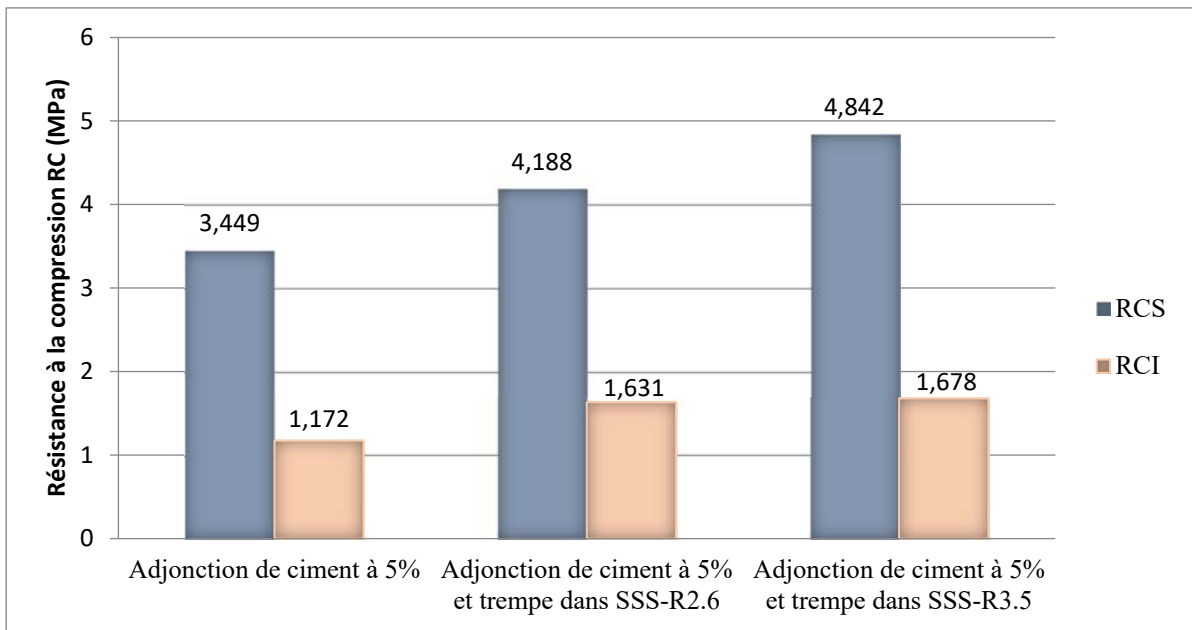


Figure 7 : Comparaison de la résistance à la compression RCS à sec de sept (07) jours et RCI après immersion de 48h dans l'eau des BTCSC et des BTCSCS par trempe de 24h dans les solutions de silicate de soude

En outre, ces résultats démontrent l'effet de l'augmentation du module de silicate SSS ayant servi à la trempe sur la RCS et la RCI des BTCSCS : plus le module de SSS est élevé, plus la RCS est élevée. En effet les RCS des BTCSCS consolidées par trempe dans la SSS de module R=2,6 et R=3,5 sont respectivement de 4,188 MPa et 4,842 MPa. Les échantillons ont montré des meilleures tenues à l'eau, avec des RCI respectifs de 1,631 MPa et 1,678 MPa), comparées aux BTCSC (1,172 MPa).

Nos résultats ont démontré les intérêts portés aux études sur la stabilisation au ciment suivie d'une consolidation des BTCSC par trempe dans une solution de silicate de soude.

## II. CONCLUSION

Les études expérimentales nous a permis de confirmer les analyses à réaliser afin d'avoir une brique de terre comprimée à résistance mécanique acceptable et de connaître quelques caractéristiques du sol latéritique à connaître pour la confection des matériaux de construction comme les BTC. En effet, le fait que le sol latéritique utilisé possède une répartition granulométrique comprise dans la limite des spécifications granulaires proposées par la norme française NF XP 13-901 sur CEB (AFNOR 2001) et sa classification au type A2 selon la classification du Guide des terrassements Routiers (GTR) indiquent que ce sol s'apprête bien à la confection des BTC moyennant l'application d'une teneur en eau optimale TEO voisine de 16%.

Des essais de BTCSC à la stabilisation classique au ciment de 5% avec une durée de prise de 7 jours ont servi de base des études de consolidation des BTCSCS par trempe de 24 heures dans des SSS de modules R=2,6 et R=3,5. Les solutions de silicate de soude SSS employées dans nos essais ont été préparées par cuisson de CBR dans des solutions diluées de soude caustique.

Les expérimentations réalisées ont permis de démontrer d'une part l'effet stabilisant de l'adjonction de silicate de soude à module élevé R=3,5 à un taux de 15% comparé à la stabilisation des BTC à 5% de ciment. La méthode de consolidation par trempe dans une solution SSS diluée nous a permis d'obtenir des BTCSCS avec de nettes améliorations de RCS et de RCI comparées aux BTCSC.

La perspective de nouvelles recherches dans nos études est l'utilisation de la méthode de consolidation à la SSS dans la confection des matériaux en terre crue non comprimés stabilisés au ciment (briques, tuiles, etc.) et dans la construction des routes en terre latéritique.

**REFERENCES**

- [1] J. Paulus. 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 – Faculté des Sciences Appliquées, année académique 2014 – 2015.
- [2] NF EN 197-1. Composition des ciments courants, 2012
- [3] M. Y. Razanamparany, R. J. Razafimahaleo, E. R. Andrianarison, P. Rakotomamonjy. Contribution aux études sur la valorisation de la silice et des silicates solubles. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur. Filière Génie Chimique - Etablissement d'Enseignement Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Université de Madagascar, Année 1984, 119 p.
- [4] J. Randriantseheno. Etude et essai de fabrication d'un matériau géopolymère anti-feu à base de métakaolin, silicate de soude et de cendre de balle de riz. Mémoire de Master, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA Antananarivo), 2019, 113 p.
- [5] H. M. Ratsimbazafy. Valorisation des ressources naturelles pour élaborer et formuler des matériaux nouveaux : ces des bétons géopolymères. Ensemble des travaux pour l'obtention du Diplôme d'HDR. Ecole Doctorale en Sciences et techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation. EAD Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières. Université d'Antananarivo, Novembre 2022.
- [6] Norme XP P94-041. Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. Décembre 1995.
- [7] NF EN ISO 17892-12. Reconnaissance et essais- Essais de laboratoire sur les sols - Détermination des limites de liquidité et de plasticité.7, 2018.
- [8] Le CRATerre, P. Doat, A. Hays, H. Houben, S Matouk, F. Vitoux. « Construire en terre ». Centre de Recherche et d'Application pour la Construction en Terre - 3<sup>ème</sup> édition, Editeur l'Harmattan, 2000.
- [9] F. El Fgaier. Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2013. Français. NNT : 2013ECLI0023. tel-01242549. 123p.
- [10] M. Ouedraogo, K. Daob, Y. Millogo, J.-E. Aubert, A. Messand, M. Seynoub, L. Zerbob, M. Gominæ. « Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw ». Journal Of building Engineering 23, 250-258, 2019.
- [11] Norme XP P 13-901. Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR 37, 2001
- [12] K. Oqaidi. Règles de formulation d'éléments en terre crue. Influence du squelette granulométrique sur le retrait de la terre crue. ENSAPM – Département Transitions- Séminaire de recherché sur l'éco-conception, 2018/2019. 26 p.
- [13] D. Miraucourt. Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées, année académique 2016 – 2017
- [14] P. Rossi. Classification des matériaux du 03/01/2017, NF XP 13-901 sur CEB. AFNOR 2001.