

DETERMINATION DES EXIGENCES DES SOLS DU MALI POUR LA REALISATION DES BLOCS DE TERRE STABILISEE (BTS)

Yacouba DAOU¹, Esaii DAOU², Yaya TOUNKARA³, Abdoulaye DOUMBIA⁴

¹Ecole normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENTP), Bamako, Mali ;

²Université de Ségou (US), Mali ;

³Ecole normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENTP), Bamako, Mali ;

⁴Doctorant, Ecole doctorale des Sciences et Technologie du Mali (EDSTM), USTTB, Bamako, Mali.

*Correspondant : Yacouba DAOU, drdaouyacouba@yahoo.fr

Résumé

Ce travail de recherche vise à déterminer les exigences des blocs de terre stabilisée pour leur utilisation efficace dans les conditions du Mali.

En effet, afin de valoriser les matériaux locaux et de contribuer à la réduction des coûts de construction au Mali, les études de stabilisation de la terre sont essentielles. Le sujet d'étude se focalise sur la détermination des exigences de la stabilisation de la terre crue avec le ciment Portland CPJ 45 afin d'obtenir des blocs (ou briques) de terre stabilisée (BTS) qui constituent une technique très prometteuse parmi les diverses utilisations possibles des matériaux terre et ciment.

La terre crue utilisée dans la construction au Mali depuis des millénaires, présente des propriétés mécaniques et physico – chimiques qui peuvent être améliorées. Dans ce document, une étude d'analyse de l'impact du ciment et du dosage en eau sur différentes éprouvettes de BTS à différentes conditions de cure, a été menée dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques des BTS.

Pour ce faire, nous avons utilisé une latérite provenant de Sénou et se trouvant au Centre National de Recherche et d'Expérimentation en Bâtiment et Travaux Publics (CNREX-BTP) dont la granulométrie des grains se situe dans le fuseau du diagramme des terres recommandées, et dont la plasticité se situe dans le fuseau du diagramme des terres recommandées. Dans ce contexte, différents pourcentages de ciments (4%, 6%, 8%, 10%), et

de teneur en eau ($W_{opt} - 2\%$, W_{opt} , $W_{opt}+2\%$), ont été utilisés pour confectionner des éprouvettes de BTS afin de voir les variations des résistances à la compression, et à la traction par fendage à 7 et 28 jours de cure.

Les résistances à la compression et à la traction augmentent lorsque le pourcentage de ciment croît. La variation de la teneur en eau optimum de $\pm 2\%$ influe les résistances à la compression et à la traction, mais ces résistances sont maximales à 15,10% de dosage en eau qui correspond à la teneur en eau optimum.

La stabilisation avec le ciment dépend généralement de la granulométrie et de la plasticité de la terre utilisée, du dosage en ciment, de la teneur en eau, et de la cure des blocs.

Les essais décrits dans ce document ont été réalisés au Centre National de Recherche et d'Expérimentation en Bâtiments et Travaux Publics (CNREX-BTP), à Bamako.

Mots clés : Bloc de terre stabilisée, Stabilisation, Caractéristiques des matériaux, Résistance, Compression, Traction

Abstract

This research work aims to determine the requirements of stabilized earth blocks for their effective use in Malian conditions.

Indeed, in order to enhance the value of local materials and contribute to reducing construction costs in Mali, earth stabilization studies are essential. The subject of study focuses on determining the requirements for stabilizing raw earth with CPJ 45 Portland cement in order to obtain stabilized earth blocks (or bricks) (BTS) which constitute a very promising technique among the various possible uses of earth and cement materials.

Raw earth used in construction in Mali for thousands of years, has mechanical and physico-chemical properties that can be improved. In this document, a study analyzing the impact of cement and water dosage on different BTS specimens at different curing conditions was conducted in order to improve the mechanical characteristics of BTS.

To do this, we used a laterite from Sénou and located at the National Center for Research and Experimentation in Building and Public Works (CNREX-BTP) whose grain size is located in the spindle of the recommended earth diagram, and whose plasticity is located in the spindle of the recommended earth diagram. In this context, different percentages of cement (4%, 6%, 8%, 10%), and water content ($W_{opt} - 2\%$, W_{opt} , $W_{opt} + 2\%$), were used to make BTS specimens in order to see the variations in compressive strengths and tensile strengths by splitting at 7 and 28 days of curing.

The compressive and tensile strengths increase as the cement percentage increases. The variation in the optimum water content of $\pm 2\%$ influences the compressive and tensile strengths, but these strengths are maximum at 15.10% water dosage which corresponds to the optimum water content.

Stabilization with cement generally depends on the granulometry and plasticity of the earth used, the cement dosage, the water content, and the curing of the blocks.

The tests described in this document were carried out at the National Center for Research and Experimentation in Buildings and Public Works (CNREX-BTP), in Bamako.

Keywords : Stabilized earth block, Stabilization, Material characteristics, Resistance, Compression, Traction

1. Introduction

Compte tenu du pouvoir d'achat de la population malienne et la facilité d'accès des matériaux locaux au Mali (PAM, 2004), l'utilisation des blocs (ou briques) de terre stabilisée (BTS) est d'une grande importance. Une analyse des différentes exigences, est donc nécessaire pour la bonne réalisation de ces blocs de terre stabilisée.

Les briques doivent présenter un certain nombre de qualités, répondant à des performances minimales, pour pouvoir être utilisées comme matériau de construction. D'une terre à l'autre, les propriétés physiques et mécaniques sont changeantes et dépendent de la nature du mélange complexe des fractions granulaires qui les composent.

Préalablement au chantier et au laboratoire, il est indispensable de faire analyser le sol pour déterminer les caractéristiques (granulométrie, la teneur en argile, l'humidité, ...), dans le but d'adapter le dosage du liant et le mode opératoire à la situation convenue. Des essais et des mesures doivent être réalisés en amont afin de garantir la qualité du travail.

Cet article est consacré à l'analyse des résultats des essais de compressions et de traction sur des éprouvettes de blocs de terre stabilisée.

Pour mener à bien l'étude sur les blocs de terre stabilisée, nous avons choisi une latérite provenant de Sénou pour réaliser différents essais.

Ces essais ont pour but de savoir l'impact du ciment, de la teneur en eau et de la période de cure sur le matériau terre choisi afin d'avoir des blocs de terre stabilisée de bonne résistance à la compression sèche et humide, et à la traction.

Pour mener à bien ces analyses, nous avons, dans un premier lieu, confectionné des éprouvettes de blocs de terre stabilisée, avec une même masse de terre et des pourcentages de ciments différents (4%, 6%, 8%, 10%) selon les normes (Houben et al., 1996) afin d'analyser l'impact du ciment sur les qualités du matériau, et en second lieu, nous avons confectionné des éprouvettes de blocs de terre stabilisée avec des teneurs en eau différentes afin d'analyser l'impact de l'eau sur les mêmes qualités.

Les éprouvettes de blocs de terre stabilisée ont été testées à la compression ainsi qu'à la traction par fendage à 7 jours et 28 jours.

Outre l'introduction, cet article comprend les points suivants :

- les exigences des blocs terre stabilisée ;
- l'analyse des exigences des blocs de terre stabilisée ;
- la conclusion.

2. Les exigences des blocs de terre stabilisée

D'une façon générale, les blocs de terre stabilisée produits au laboratoire ou sur chantier doivent toujours répondre à des exigences avant d'être utilisés dans les constructions plus précisément dans les maçonneries d'élévation.

Selon différentes études sur les blocs de terre stabilisée, différentes exigences peuvent être énumérées à savoir :

2.1 Le choix de la terre

Matériau majoritairement utilisé dans les blocs de terre stabilisée, le choix de la terre est très important, car les propriétés des terres varient d'un endroit à l'autre, ce qui implique que les études de terre sont différentes d'un endroit à l'autre.

Que ça soit au chantier ou au laboratoire, généralement deux paramètres suffisent et sont très nécessaires pour choisir la terre : la granularité et la plasticité (CNREX-BTP, 2004) ²⁴.

2.1.1 La granularité ou texture

La granularité est définie par l'analyse granulométrique. La courbe granulaire du matériau doit s'inscrire de préférence dans le fuseau de référence ci-dessous appelé « diagramme de granularité ». (Figure 1)

Selon le type de technique utilisée, on choisira des terres avec des proportions variables.

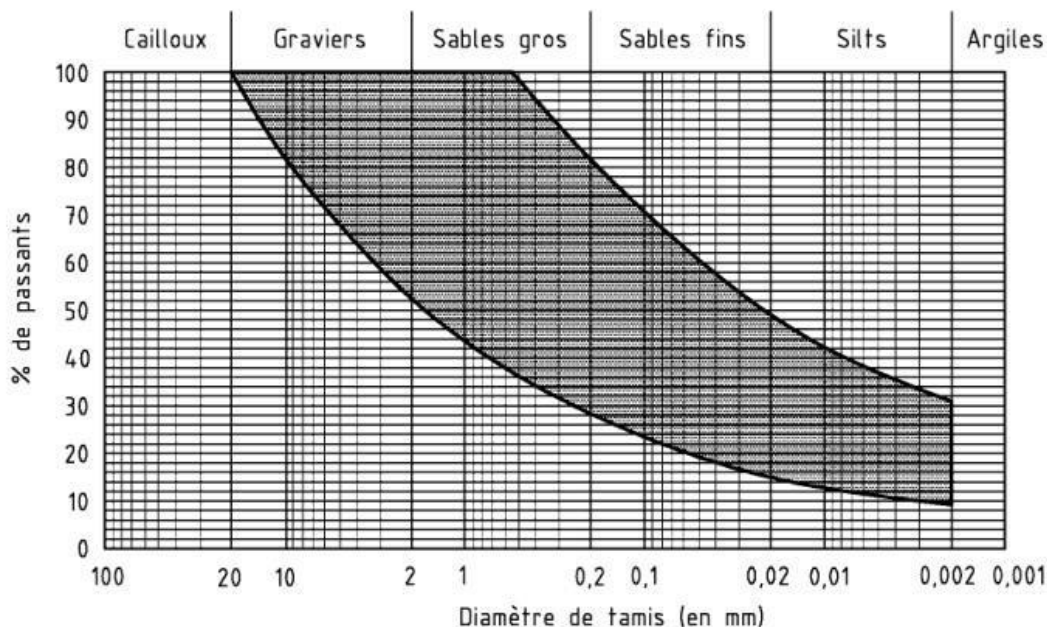


Figure 1 : Fuseau du diagramme des terres recommandées (Houben et al., 1996)

Selon la taille des briques, la terre utilisée pour la production des blocs de terre stabilisée doit contenir un mélange de graviers, de sables, de silts et d'argiles en différentes proportions.

La terre destinée à la construction en blocs de terre stabilisée doit être choisie de telle sorte qu'elle soit cohérente avec le fuseau du diagramme des terres recommandées par le CRATerre dans « Le Traité de Construction en Terre ». (Figure 1)

La terre choisit doit être composé majoritairement de graviers et de sables.

Tableau 1 : Proportion typique des grains (Houben et al., 1996).

	Graviers	Sables	Silts	Argiles
Proportion	0 à 40 %	25 à 80 %	10 à 25%	8 à 30 %

2.1.2 La plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notoire caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation.

Elle est définie par les limites d'Atterberg (limite de liquidité et la limite de plasticité). La plasticité du matériau doit s'inscrire de préférence dans le fuseau du diagramme de référence (CNREX-BTP, 2004) ci-dessous (Figure 2), appelé « diagramme de plasticité ».

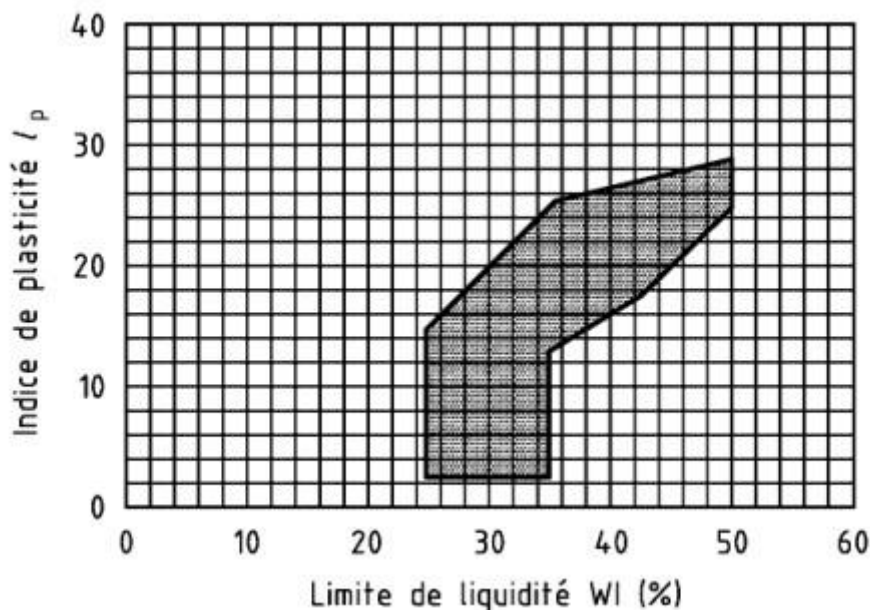


Figure 2 : Fuseau du diagramme plastique des terres (CNREX-BTP, 2004)

A l'aide de l'essai des limites d'Atterberg il faut toujours vérifier si l'indice de plasticité I_p et la limite de liquidité (W_L ou W_I) du matériau terre est comprise dans le fuseau du diagramme plastique des terres recommandées.

D'une façon générale, un sol est (La norme NF P 94-052-1):

- **Trop plastique si la limite de liquidité est supérieure à 50 et l'indice de plasticité inférieur à 20 ;**
- **Peu plastique si la limite de liquidité est inférieure à 50 et l'indice de plasticité inférieur à 20 ;**
- **N'est pas plastique si la limite de liquidité est inférieure à 20 et l'indice de plasticité inférieur à 7.**

2.2 Le dosage en eau

Afin d'éviter des blocs de terre stabilisée avec de faibles résistances mécaniques ou des fissurations précoces à cause de la quantité d'eau, l'essai Proctor est une des exigences à respecter.

Étant fonction de la densité sèche du matériau terre, l'essai Proctor (définie par la norme NFP 94-093, 1999)²³ s'exprime en pourcentage et est indispensable pour connaître la teneur en eau optimum du matériau.

À défaut de l'essai Proctor, pour obtenir le dosage en eau sur chantier, il est essentiel de procéder par un test de contrôle de la teneur en eau.

Le contrôle de la teneur en eau sur le chantier se fait de la façon suivante :

- Mouler une boule de mélange dans la main ;
- Laisser la boule tomber de la hauteur du coude ;
- Si la boule ne se brise pas : trop d'eau ;
- Si la boule se brise en plusieurs morceaux : c'est le mélange optimum ;
- Si elle s'effrite : pas assez d'eau.

2.3 Le dosage en ciment Portland CPJ 45

Les pourcentages de ciment utilisés généralement varient de 3% à 12%. En général, il faut au moins 5 à 6% de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants. Pour les faibles dosages (2 à 3%), certaines terres se comportent moins bien que si elles ne sont pas stabilisées. 8% de ciment constituent souvent une limite supérieure économiquement acceptable (Houben et al., 1996)

Préalablement pour des raisons économiques, il faut utiliser le plus petit dosage qui donne une résistance simple supérieure ou égale à 40 kg/cm^2 ($R \geq 40 \text{ kg/cm}^2$) et une résistance humide après 24h d'immersion totale supérieure ou égale à 12 kg/cm^2 ($R_h \geq 12 \text{ kg/cm}^2$) (Houben et al., 1996).

2.4 La cure et le stockage

Après production des blocs de terre stabilisée, la cure et le stockage requièrent des exigences à respecter pour avoir des éléments de qualité.

Les blocs démoulés doivent d'abord être soumis à une cure humide à l'abri du soleil et des pluies et à séchage à l'air libre.

Suivant l'humidité, la cure humide doit varier entre 1 et 3 jours et le séchage à l'air libre entre une et 2 semaines (CNREX-BTP, 2004).

Les blocs doivent être empilés en laissant un espace entre eux, ces espacements permettent de faire circuler l'air, mais la cure continue à l'air libre jusqu'à l'âge de 28 jours, date à laquelle ils sont prêts pour la construction.

Pour éviter le séchage rapide des blocs, il est nécessaire de les couvrir de plastic. Le stockage se fait de préférence après 14 jours.

2.5 Le test de contrôle des blocs de terre stabilisée

Le test de control des blocs de terre stabilisée permet d'apprécier leur qualité.

En effet, il permet de savoir à travers différents essais, si les blocs de terre stabilisée produits peuvent être utilisés pour la construction.

2.5.1 Le contrôle de compactage

Avant de procéder à tout test de contrôle, on doit vérifier d'abord l'aspect, les dimensions et le poids des blocs choisis parmi le lot.

- Le poids ne peut pas différer de plus de 5% à 10 % du poids espéré.
- Le retrait ne doit pas dépasser 5 mm (CNREX-BTP, 2004).

Après ces vérifications, on procède aux tests de contrôle.

Appuyer avec le centre de la surface :

- Si l'empreinte est très visible et la compression est facile : il manque de la terre ;
- Si l'empreinte est très visible bien que la compression soit difficile : la terre est trop humide ;
- Si l'empreinte est peu visible : la compression est correcte.

2.5.2 Essai de compression

Il permet de déterminer les capacités mécaniques des matériaux de construction (BTS). Dans le cadre de ce travail, la caractéristique prépondérante recherchée est la résistance à la compression car les briques de terre stabilisée travaillent essentiellement en compression. On procède par un écrasement à l'aide de l'appareil de compression afin d'obtenir les différentes résistances en compression.

Tableau 2 : Résistances à la compression exigées dans les conditions correctes des BTS (CNREX-BTP, 2004)

Age bloc (jours)	Résistance exigée (kg/cm ²)	Conditions de conservation
28	40	7 jours en cure humide 21 jours à l'air libre à l'abris du soleil
28	12	7 jours en cure humide 20 jours à l'air libre à l'abris du soleil 24 heures en immersion totale

D'une manière générale, les résistances exigées sont (Houben et al., 1996)²⁰ :

- ◆ Pour les bâtiments à un niveau non exposé à l'humidification : La résistance à la compression à sec **Rc ≥ 2 MPa**, la résistance à la compression humide **Rh ≥ 0,2 MPa**.
- ◆ Pour les bâtiments à étages (jusqu'à 2 Etages) et exposé à l'humidification : la résistance à la compression à sec **Rc ≥ 4 MPa**, la résistance à la compression humide **Rh ≥ 1,2 MPa**.

Pour les bâtiments en R+1, la descente de charge est d'environ 0,1 à 0,2 MPa, il n'est donc pas utile d'employer des matériaux résistant à une compression de 10 MPa ou plus. Néanmoins une résistance à la compression de 0,1 MPa ne suffit pas car d'autres contraintes ou sollicitations s'ajoutent à cette seule performance d'un BTS plein et d'une construction réalisée avec ce matériau (Houben et al., 1996)

2.5.3 Essai de traction

La résistance à la traction d'un BTS est sa capacité à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à la traction.

Dans les conditions correctes, les BTS doivent avoir une résistance à la traction sèche à 28 jours supérieur à 0,4 ou égale MPa ($0,4 \leq T_{r28}$) (Houben et al., 1996).

La résistance à la traction peut être mesuré par trois types d'essais : l'essai de traction directe, l'essai de traction par flexion et l'essai de traction par fendage.

Dans ce document, les résistances à la traction ont été obtenues en utilisant l'essai de la traction par fendage.

2.5.4 Essai d'absorption

La quantité d'eau absorbée par les blocs de terre stabilisée pendant 24h doit être inférieure ou égale à 15% pour un mur exposé à la pluie. Cet essai est sans objet quand le mur n'est pas exposé à la pluie (mur de cloisonnement) (CNREX-BTP, 2004).

L'immersion totale permet d'examiner visuellement les dégradations causées par l'eau. Le dosage en ciment peut être amélioré en fonction de leur ampleur.

Ce test permet de contrôler la résistance du bloc à l'eau pendant un temps donné (24h).

3. Analyse des exigences des BTS

Des analyses ont été menées sur des échantillons cylindriques de blocs de terre stabilisée de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm.

Différentes formulations ont été faites pour savoir les différentes résistances à des périodes de cure différentes.

Les différents essais effectués pour faire ces analyses sont :

☞ **L'essai de compression ;**

☞ **L'essai de traction par fendage d'éprouvettes.**

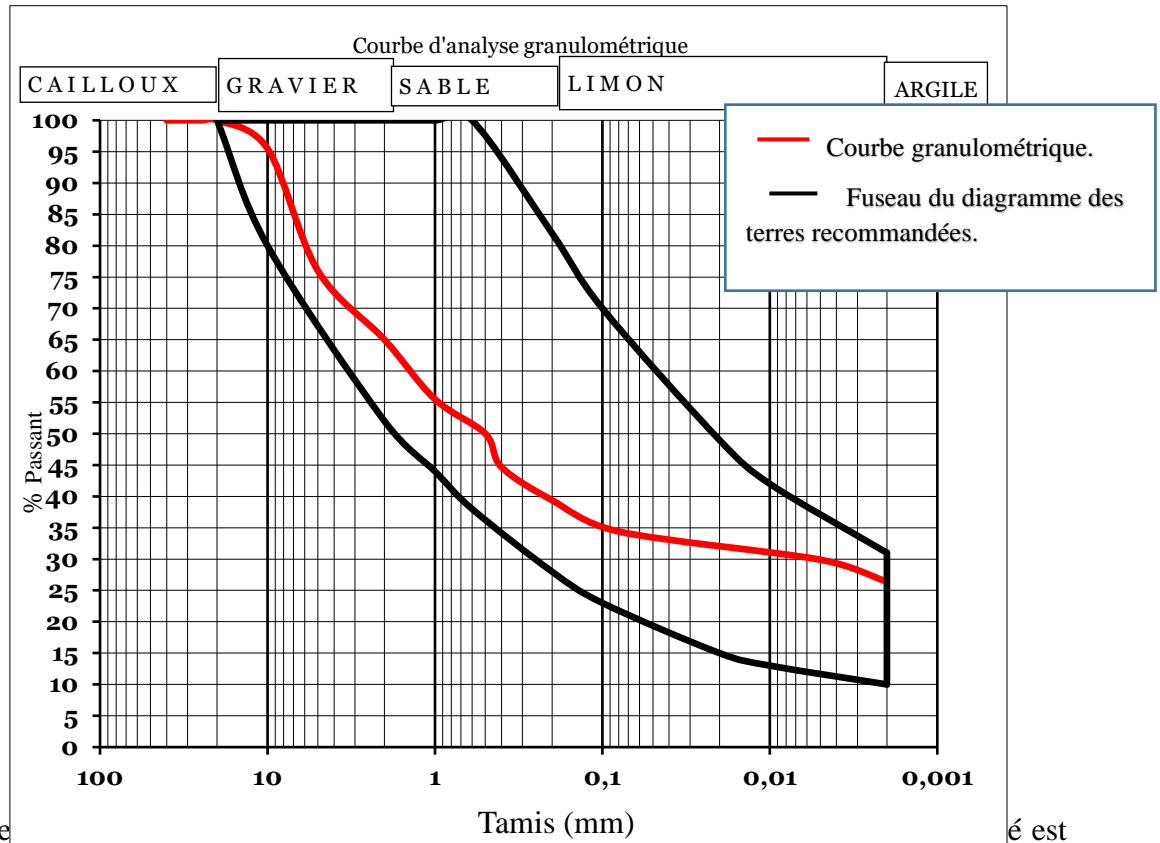
La teneur en eau optimum du matériau étant déjà connu après l'essai Proctor de la latérite effectué dans le chapitre 3 à la page 47 ($W_{opt} = 15,10\%$), on s'est fixé comme objectifs de connaître :

- en un premier lieu, l'effet du changement des pourcentages de ciments sur les BTS, en utilisant différents pourcentages de ciments (4% ; 6% ; 8% ; 10 %) recommandés¹⁹ ;
- en un second lieu, l'effet du dosage en eau sur les BTS. Pour ce faire, nous avons pris un pourcentage de ciment convenable après les résultats obtenus, afin de varier le pourcentage de la teneur en eau optimum ($W_{opt}=15,10\%$) de $\pm 2\%$.

3.1 Présentations des résultats de l'identification de l'échantillon

3.1.1 Résultat de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de l'échantillon de terre utilisée ont conduit au tracé de la courbe granulométrique (Figure 3).



On constate que la courbe granulométrique est continue et se situe bien dans le fuseau limite recommandé par la norme des blocs de terre comprimée¹⁹. Cette norme recommande pour un sol destiné à la fabrication des blocs de terre stabilisée, de ne pas être trop argileux au risque d'entraîner des fissurations et de retrait fragilisant les blocs.

3.1.2 Résultat de la plasticité

Les résultats de la limite de liquidité et de la limite de plasticité ont permis de vérifier, si la terre utilisée pour la production des échantillons est plastique. Le résultat est illustré sur la figure ci-dessous.

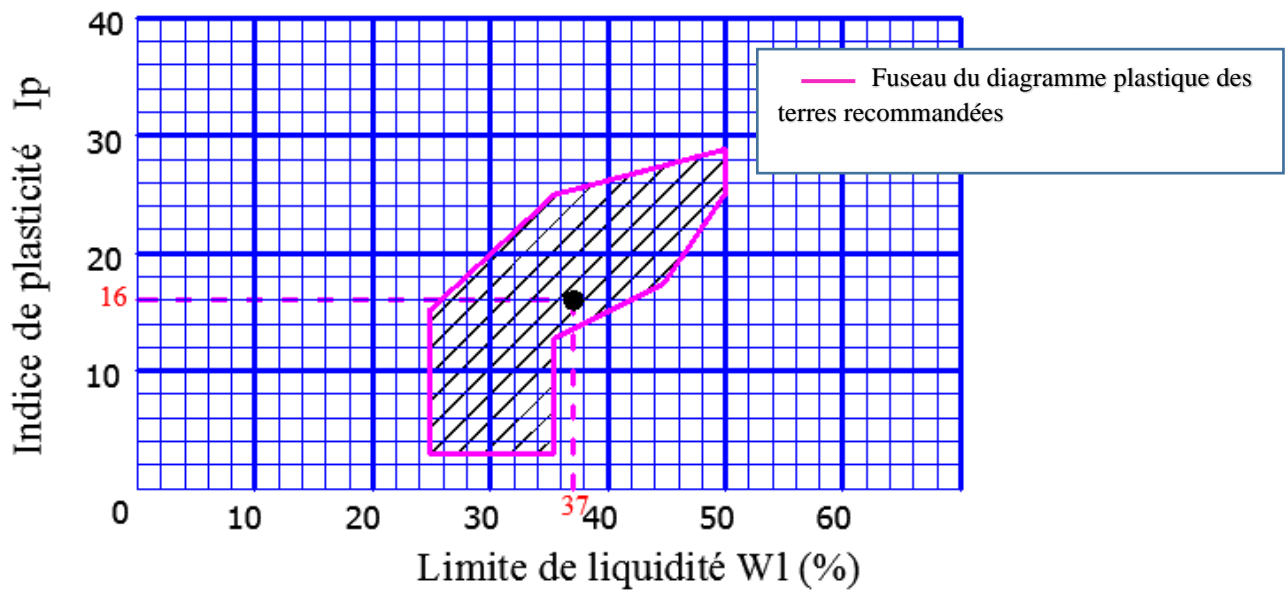


Figure 4 : Diagramme de plasticité du sol étudié.

Avec une limite de liquidité de 37% et un indice de plasticité de 16%, nous remarquons à partir des projections sur le fuseau du diagramme de plasticité des terres, que la latérite utilisée est plastique.

3.2 Analyse de l'impact du ciment sur les échantillons de blocs de terre stabilisée

Avec une teneur en eau de **15,10%** obtenue après l'essai Proctor du matériau, nous avons commencé l'analyse en confectionnant des blocs de terre stabilisée avec différents pourcentages de ciment de production locale CPJ 45 recommandés (4% ; 6% ; 8% ; 10 %).

3.2.1 Essai de compression sur les échantillons de blocs de terre stabilisée

La résistance à la compression des blocs de terre stabilisée est sa capacité à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression.

Pour connaître les résistances à la compression de nos blocs, nous avons confectionnés des éléments à des périodes de cure différentes.

La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Avec :

- ✓ **R_c** : résistance à la compression en MPa.
- ✓ **F** : charge maximale supportée par les deux briques en kilo newtons (KN).
- ✓ **S** : surface moyenne des faces d'essai en centimètres carrés (cm²).

NB : Les conditions de cures respectées sont celles décrites dans le Tableau 9.

Les blocs de terre stabilisée dosés aux différents pourcentages de ciment sont écrasés à leurs âges respectifs afin de connaître leurs résistances sèches et humides à la compression.

Les éprouvettes de blocs confectionnés pour la compression humide sont imbibées dans l'eau 24 heures avant leurs écrasements.

Pour chaque pourcentage de ciment, deux (2) éprouvettes ont été utilisées pour l'essai afin d'avoir une moyenne des résultats obtenus.

Les écrasements ont été faits à l'aide de la presse à compression, les résultats sont illustrés dans les tableaux suivants :

※ **Résistances à la compression sèche et humide à 7 jours**

Tableau 3 : Résultat de l'essai de compression sèche à 7 jours avec différents pourcentages de ciment.

% ciment	Eprouvette	F (KN)	R _{c7} (MPa)	Moyenne R _{c7} (MPa)
4	1	2,33	1,88	2,315
	2	5,39	2,75	
6	1	5,59	2,85	3,155
	2	6,79	3,46	
8	1	6,30	3,21	3,31
	2	6,69	3,41	
10	1	9,79	4,99	4,545
	2	8,05	4,10	

Tableau 4 : Résultat de l'essai de compression humide à 7 jours en fonction de différents pourcentages de ciment.

% ciment	Eprouvette	Poids avant imbibition dans l'eau (g)	Poids après imbibition dans l'eau (g)	F (KN)	R _{h7} (MPa)	Moyenne Rh (MPa)
	1	365	405	1,1	0,56	

4	2	362	415	1,96	0,45	0,505
6	1	370	425	1,27	0,65	0,63
	2	367	420	1,19	0,61	
8	1	360	420	2,31	1,18	1,175
	2	360	420	2,29	1,17	
10	1	380	430	2,86	1,46	1,365
	2	385	440	2,35	1,27	

* **Résistances à la compression sèche et humide à 28 jours**

Tableau 5 : Résultat de l'essai de compression sèche à 28 jours en fonction de différents pourcentages de ciment.

% ciment	Eprouvette	F (KN)	R _{c28} (MPa)	Moyenne Rc (MPa)
4	1	5,79	2,95	2,9
	2	5,59	2,85	
6	1	7,38	3,76	3,68
	2	7,06	3,60	
8	1	8,73	4,45	4,335
	2	8,28	4,22	
10	1	10,89	5,55	5,475
	2	10,60	5,40	

Tableau 6 : Résultat de l'essai de compression humide à 28 jours en fonction de différents pourcentages de ciment.

% ciment	Eprouvette	Poids avant imbibition dans l'eau	Poids après imbibition dans l'eau	F (KN)	R _{h28} (MPa)	Moyenne Rh (MPa)
----------	------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------	------------------------	------------------

		(g)	(g)			
4	1	374	430	1,41	0,72	0,61
	2	374	424	0,9	0,50	
6	1	370	366	1,47	0,75	0,725
	2	428	424	1,37	0,70	
8	1	326	386	2,65	1,35	1,26
	2	350	408	2,29	1,17	
10	1	356	412	2,29	1,17	1,33
	2	366	422	2,94	1,50	

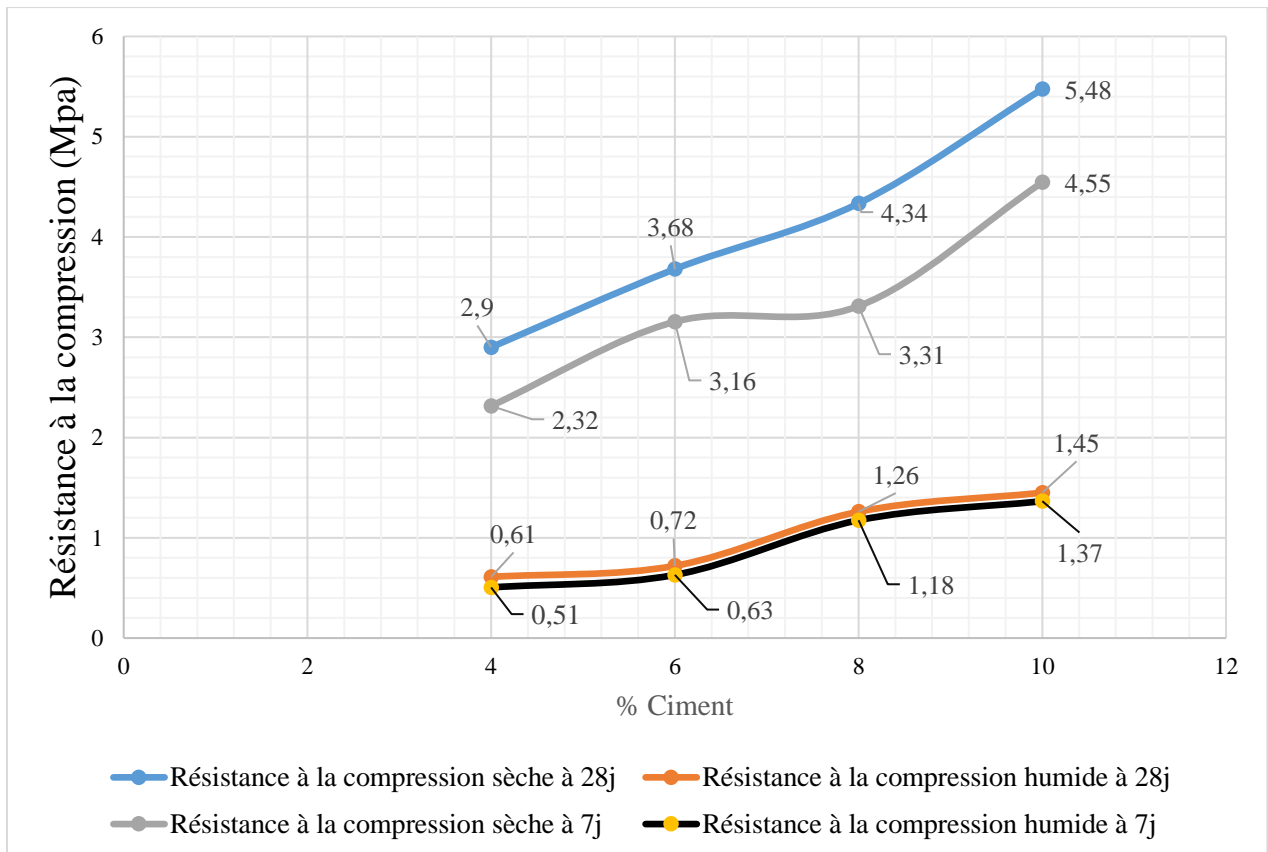


Figure 5 : Variations des résistances à la compression en fonction du pourcentage de ciment et de l'état d'humidité à 7 et 28 jours de cure.

La figure 5 illustre les différentes variations des résistances en fonction du pourcentage de ciment à 7 et 28 jours de cure. On observe un accroissement général de la résistance en

compression, nous remarquons que les résistances à la compression à 7 jours sont inférieures aux résistances à la compression à 28 jours, cela est due aux différentes conditions de cure.

Les résistances à la compression humide, sont aussi inférieures aux résistances à la compression à cause de l'immersion de 24 heures dans l'eau ($R_c < R_h$), en effet cette immersion fragilise le système terre-ciment-eau et doit toutefois avoir une résistance supérieure à celle exigée.

Les périodes de conservation des blocs de terre stabilisée diffèrent en fonction du temps, afin de voir le comportement du matériau à court et long terme.

La résistance des briques stabilisées au ciment augmente en fonction de la période de cure en raison de la réaction sol-ciment qui consolide progressivement les grains.

Quant au niveau de la résistance obtenue sur les briques, nous remarquons qu'à 28 jours, seuls 8% et 10% dépassent les valeurs de résistance exigées à la compression sèche et humide (4 MPa et 1,2 MPa).



Figure 6 : Echantillons de blocs de terre stabilisée à différents pourcentages de ciment.



Figure 7 : Ecrasement d'une éprouvette de blocs de terre stabilisée à l'aide de la presse de compression.

3.2.2 Essai de traction par fendage sur les échantillons de blocs de terre stabilisée

L'essai de traction par fendage est un essai où une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction.

Afin d'obtenir leur résistance à la traction, les éprouvettes de blocs de terre stabilisée ont été soumises à des essais de traction par fendage à l'âge de 7 jours et de 28 jours.

Pour chaque pourcentage de ciment, deux (2) éprouvettes ont été utilisées pour l'essai afin d'avoir une moyenne des résultats obtenus.

La résistance à la traction par fendage est donnée par la formule²⁵ :

$$f_{ct} = \frac{2xF}{\pi xLxd} \quad (2)$$

Avec :

- ✓ f_{ct} : La résistance en traction par fendage (MPa) ;
- ✓ F : La charge maximale (N) ;
- ✓ L : longueur de la ligne de contact de l'éprouvette (mm) ;
- ✓ d : dimension transversale nominale (mm).

Après la traction par fendage des échantillons les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux suivants :

*** Résistances à la traction par fendage à 7 jours**

Tableau 7 : Résultat de l'essai de traction par fendage à 7 jours en fonction de différents pourcentages de ciment.

% ciment	Eprouvette	F (KN)	f_{ct} (MPa)	Moyenne f_{ct} (MPa)
4	1	3,45	0,44	0,415
	2	3	0,38	
6	1	3,80	0,48	0,42
	2	2,82	0,36	
8	1	3,53	0,45	0,425
	2	3,2	0,40	
10	1	4,60	0,58	0,645
	2	5,60	0,71	

Tableau 8 : Résultat de l'essai de traction par fendage à 28 jours en fonction de différents pourcentages de ciment.

% ciment	Eprouvette	F (KN)	f_{ct} (MPa)	Moyenne f_{ct} (MPa)
	1	3,77	0,48	

4	2	2,90	0,37	0,42
6	1	3,14	0,40	0,49
	2	4,55	0,58	
8	1	4,87	0,62	0,6
	2	4,55	0,58	
10	1	6,67	0,85	1,5
	2	5,10	0,65	



Figure 8 : Variations des résistances à la traction en fonction des pourcentages de ciment et de l'état d'humidité des échantillons.

La figure 8 illustre l'évolution de la résistance à la traction à 7 et 28 jours des éprouvettes de blocs de terre stabilisée en fonction du pourcentage de ciment. Nous remarquons une croissance de cette résistance avec :

- Un minimum de 0,42 MPa et un maximum de 1,5 MPa à 28 jours de cure,
- Un minimum de 0,415 MPa et un maximum de 0,645 MPa à 7 jours de cure.

Cette évolution est due à la cure des éprouvettes, qui atteint sa résistance maximale à 28 jours.

Quant aux niveaux de résistances, nous remarquons que les résultats obtenus sont tous supérieures à celle exigée (0,4 MPa). Donc les pourcentages étudiés pour la traction sont idéals.

Après différents essais sur les éprouvettes, nous constatons qu'avec 8% et 10% de ciment, nous obtenons des blocs de terre stabilisée répondant aux exigences de compression et de traction.

3.3 Analyse de l'impact de la teneur en eau sur les blocs de terre stabilisée

Après les analyses précédentes sur les éprouvettes, qui confirment qu'avec 8% et 10% de ciment nous obtenons des BTS résistants, nous avons convenu de choisir 8% de ciment pour différents essais dans cette partie. Nous avons convenu de varier la teneur en eau du matériau, pour ainsi faire une bonne analyse de l'impact de l'eau sur les blocs de terre stabilisée.

Pour ce faire, nous avons varié le pourcentage de la teneur en eau optimum ($W_{opt}=15,10\%$) de $\pm 2\%$, c'est-à-dire 13,10% et 17,10%.

Pour ces essais, nous avons confectionné 36 éprouvettes de blocs de terre stabilisée dont deux éprouvettes pour chaque pourcentage de teneur en eau considérée.

3.3.1 Essai de compression sur les échantillons de blocs de terre stabilisée

Les éprouvettes confectionnées pour la compression humide sont imbibées dans l'eau 24 heures avant leur écrasement.

* Résistances à la compression sèche et humide à 7 et 28 jours

Tableau 9 : Résultat de l'essai de compression sèche à 7 jours en fonction de différentes teneurs en eau.

Teneur en eau (%)	Eprouvette	F (KN)	R _{c7} (MPa)	Moyenne R _{c7} (MPa)
$W_{opt} - 2\% = 13,10\%$	1	5,6	2,86	2,88
	2	5,7	2,90	
$W_{opt} = 15,10\%$	1	6,30	3,21	3,31
	2	6,69	3,41	
$W_{opt} + 2\% = 17,10\%$	1	5,85	2,98	3,04
	2	6,08	3,10	

Tableau 10 : Résultat de l'essai de compression humide à 7 jours en fonction de différentes teneurs en eau.

Teneur en eau (%)	Eprouvette	Poids avant imbibition dans l'eau (g)	Poids après imbibition dans l'eau	F (KN)	R _{h7} (MPa)	Moyenne R _{h7} (MPa)
13,10	1	376	432	1,39	0,71	0,94
	2	372	432	2,29	1,17	
15,10	1	360	420	2,31	1,18	1,175
	2	360	420	2,29	1,17	
17,10	1	362	420	2,08	1,06	1,08
	2	360	412	2,16	1,10	

Tableau 11 : Résultat de l'essai de compression sèche à 28 jours en fonction de différentes

Teneur en eau (%)	Eprouvette	F (KN)	R _{h28} (MPa)	Moyenne R _{h28} (MPa)
13,10	1	8,04	4,10	3,95
	2	7,46	3,80	
15,10	1	8,73	4,45	4,335
	2	8,28	4,22	
17,10	1	8,24	4,20	4,11
	2	7,89	4,02	

teneurs en eau.

Tableau 12 : Résultat de l'essai de compression humide 28 jours en fonction de différentes teneurs en eau.

Teneur en eau (%)	Eprouvette	Poids avant imbibition dans l'eau (g)	Poids après imbibition dans l'eau	F (KN)	R _{h28} (MPa)	Moyenne R _{h28} (MPa)
13,10	1	374	430	1,86	0,95	1,05
	2	374	426	2,27	1,16	
15,10	1	326	386	2,65	1,35	1,26
	2	350	408	2,29	1,17	
17,10	1	360	416	2,31	1,18	1,19
	2	360	416	2,35	1,20	

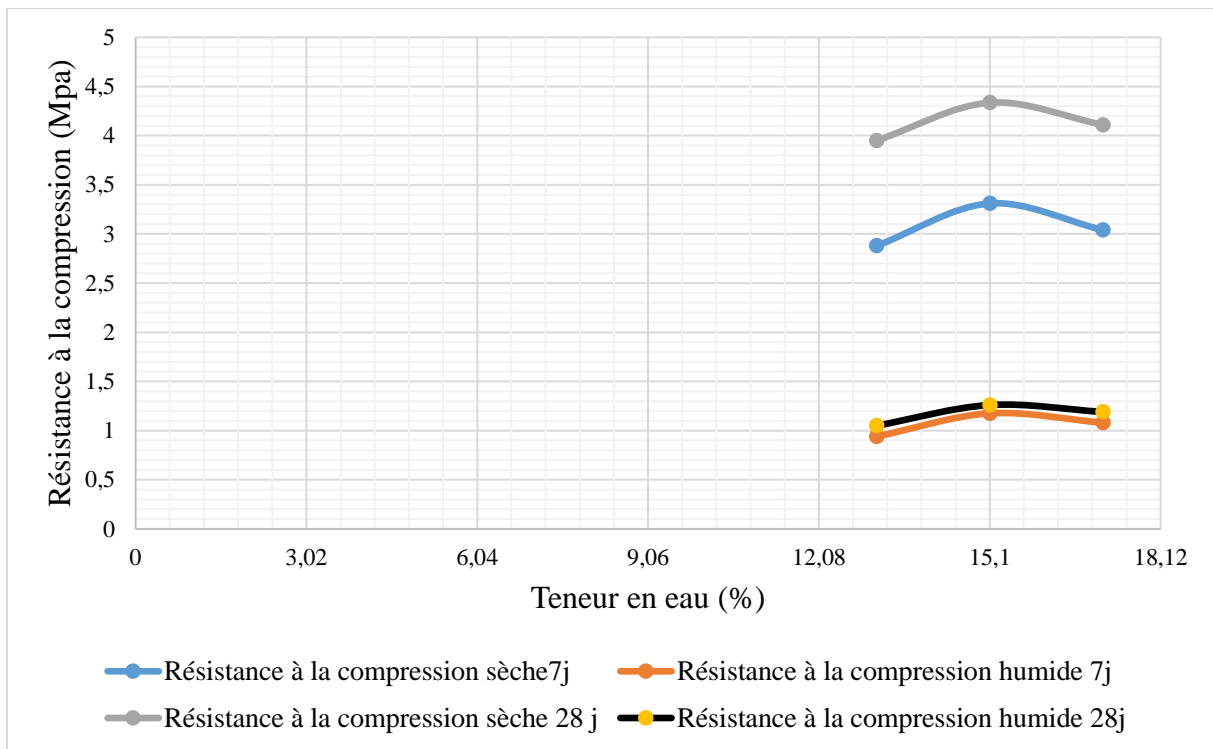


Figure 9 : Variations des résistances à la compression en fonction de la teneur en eau et de l'état d'humidité des échantillons.

La figure 9 montre les variations de la résistance à la compression sèche et humide en fonction de différentes teneurs en eau, nous remarquons que les différentes résistances sont maximales à 15,10% de teneur en eau qui est la teneur en eau optimum.

On observe également une évolution de la résistance entre 7 et 28 jours.

La résistance à la compression sèche est supérieure à celle exigée à 28 jours (**4 MPa**) avec 15,10 % et 17,10 % de teneur en eau, et est légèrement inférieure à celle exigée avec 13,10 % de teneur en eau (3,95).

Par rapport à l'immersion des blocs, nous remarquons une baisse de résistance par rapport à la résistance sèche des blocs, nous observons également que seul avec 15,10% de teneur en eau, la valeur exigée (**1,2 MPa**) à la compression humide à 28 jours est dépassée.

La variation de $\pm 2\%$ de la teneur en eau optimum a donc impacté sur les résistances à la compression sèche et humide.

3.3.2 Essai de traction sur les échantillons de blocs de terre stabilisée

12 échantillons ont été produits pour la réalisation de cet essai.

* Résistances à la traction par fendage à 7 et 28 jours

Tableau 13 : Résultat de l'essai de traction par fendage à 7 jours en fonction de différentes teneurs en eau.

Teneur en eau (%)	Eprouvette	F (KN)	f_{ct} (MPa)	Moyenne f_{ct} (MPa)
13,10	1	2,10	0,26	0,26
	2	2,10	0,26	
15,10	1	3,53	0,45	0,425
	2	3,2	0,40	
17,10	1	3,80	0,48	0,415
	2	2,80	0,35	

Tableau 14 : Résultat de l'essai de traction par fendage à 28 jours en fonction de différentes teneurs en eau.

Teneur en eau (%)	Eprouvette	F (KN)	f_{ct} (MPa)	Moyenne f_{ct} (MPa)
	1	2,59	0,33	

13,10	2	4,39	0,56	0,445
15,10	1	4,87	0,62	0,6
	2	4,55	0,58	
17,10	1	4,32	0,55	0,53
	2	4	0,51	

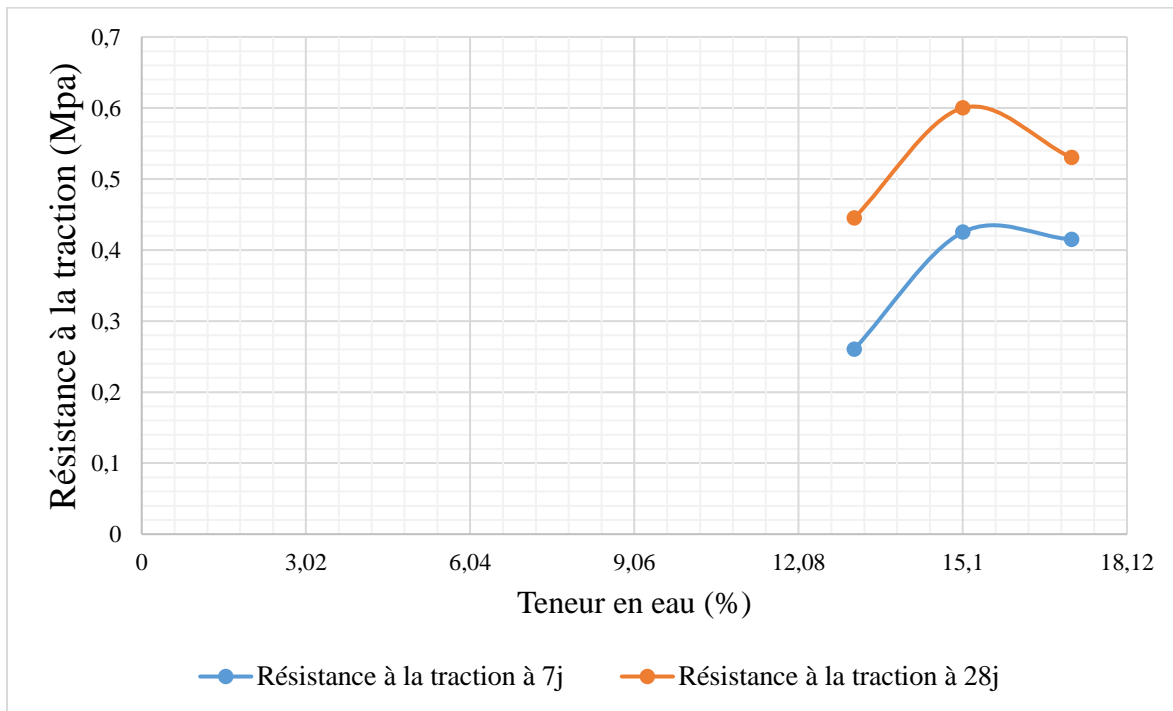


Figure 10 : Variations des résistances à la traction en fonction de la teneur en eau et de l'état d'humidité des échantillons.

La figure 10 illustre les variations de la résistance à la traction en fonction de différentes teneurs en eau. Nous remarquons que cette résistance est maximale avec 15,10 % de teneur en eau qui correspond à la teneur en eau optimum.

Donc les variations de la teneur en eau influencent les valeurs de la résistance à la compression.

Toute fois les variations de ± 2 de la teneur en eau optimum atteint des résistances à la traction supérieure à la résistance à la traction exigée (0,4 MPa).

3.4 Discussion des résultats

Les essais menés sur les éprouvettes de BTS ont permis d'analyser l'influence du dosage en ciment et de la teneur en eau sur les BTS dans différentes conditions de cure.

Les essais à la compression sur différentes éprouvettes de BTS montrent une évolution de la résistance à la compression sèche et humide lorsque le pourcentage de ciment augmente, on remarque également qu'avec 8% et 10% de ciment nous obtenons une résistance à la compression à 28 jours de cure supérieure à 4MPa qui est la résistance exigée.

Quant à la résistance à la traction elle croit également quand le pourcentage de ciment augmente, les résistances obtenues à 4% 6% 8% 10% de ciment sont tous supérieures à 0,4 MPa qui est la résistance à la traction exigée à 28 jours de cure.

Les variations de la teneur en eau de $\pm 2\%$ de la teneur en eau optimum montre une variation de la résistance à la compression et à la traction. Toute fois ces résistances sont maximales avec 15,10 % de teneur en eau qui correspond à la teneur en eau optimum. Nous remarquons que même avec cette variation de la teneur en eau les résistances à la traction obtenues sont tous supérieures à la résistance exigée (0,4 MPa). Donc cette variation a plus d'impact sur la compression que sur la traction.

On remarque également que les résistances à la compression et à la traction obtenues avec une teneur en eau de $W_{opt} - 2\%$ sont inférieures aux résistances obtenues avec une teneur en eau de $W_{opt} + 2\%$.

4. Conclusion

Dans cet article est décrit une analyse de différentes exigences des blocs de terre stabilisée qui doivent être respectées afin d'avoir des matériaux de qualité, c'est-à-dire des blocs de terre stabilisée avec des propriétés physico-chimiques et mécaniques appropriés aux conditions de construction du Mali. Ces analyses portent sur l'impact du ciment et de la teneur en eau sur les qualités des blocs de terre stabilisée.

Les essais que nous avons réalisés, nous permettent d'avancer certaines idées sur la stabilisation des blocs de terre stabilisée, la stabilisation dépend de plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- la terre utilisée pour la confection des blocs de terre stabilisée ;
- la qualité de ciment ;
- la teneur en eau utilisée pour la confection des blocs de terre stabilisée ;
- la cure et le stockage du matériau.

La courbe granulométrique de la latérite utilisée pour les essais est dans le fuseau granulométrique conseillé par CRA Terre pour les blocs de terre stabilisée ¹⁹.

L'analyse de l'impact du ciment sur les blocs de terre stabilisée nous montre une évolution de la résistance à la compression sèche et humide lorsque le pourcentage de ciment augmente, on remarque également qu'avec 8% et 10% de ciment nous obtenons une résistance à la compression à 28 jours de cure supérieure à 4 MPa qui est la résistance exigée. La résistance à la traction croît également avec l'augmentation du pourcentage de ciment. Toutefois les valeurs obtenues à la traction sont toutes supérieures à la valeur exigée qui est 0,4 MPa.

L'analyse de l'impact de la teneur en eau optimum sur les blocs de terre stabilisée nous montre une variation de la résistance à la compression et à la traction. Ces résistances sont maximales avec 15,10 % de teneur en eau qui correspond à la teneur en eau optimum.

De ce fait nous pouvons conclure que les variations du pourcentage de ciment et de la teneur en eau ont des impacts sur la résistance à la compression et à la traction des blocs de terre stabilisée.

L'analyse de ces différentes exigences montrent qu'avec des dosages bien déterminés et des étapes de production des blocs de terre stabilisée bien respectées, une nette augmentation des propriétés mécaniques de ce matériau est obtenue.

Généralement pour une bonne stabilisation, sont recommandés (Houben et al., 1996) :

- Une terre ayant 0 à 40 % de graviers, 25 à 80 % de sables, 10 à 25% de silts, 8 à 30 % d'argiles ;
- Un dosage en ciment se situant entre 3 et 12% pour la plupart des terres ;
- Une teneur en eau obtenue par essai Proctor au préalable.

Toutefois, après la production des blocs de terre stabilisée, les règles de cure, de stockage sont indispensables afin d'éviter des fissures, des dégradations précoces et une faiblesse de leur résistance mécanique.

Cette analyse des exigences des blocs de terre stabilisée a donc permis d'avoir la possibilité de production ce matériau de construction répondant aux exigences de résistance à la compression et traction dans les constructions au Mali.

Bibliographie

¹Programme alimentaire mondial (PAM) : Evaluation conjointe de l'efficacité et de l'impact de la politique "favoriser le développement" Etude Mali, volume 1, Décembre 2004, 80 Pages.

²Bahar, R. Séminaire International, « Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 23-25 Novembre 2011. admin.asso-web.com, consulté le 29/05/2015.

³JEHANNUE PAULUS, "Construction en terre crue : Dispositions qualitatives, constructives et architecturales" Mémoire pour l'obtention du grade Master en Ingénieur Civil Architecte, Université de Liège 2015.

⁴Pierre BOILLEY, François BOST, Christian COULON, « MALI », Encyclopaedia Universalis [en ligne], consulté le 04 mars 2020.

⁵Fiche technique Qualiremo, « La terre crue », « [www. tkTerreCrue.html](http://www.tkTerreCrue.html). », Avril 2008.

⁶Miracourt, D. (2017). Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso, 103. Retrieved from [https://matheo.ulg.ac.be/bitstream/2268.2/2539/1/TFE Miracourt David final 2.pdf](https://matheo.ulg.ac.be/bitstream/2268.2/2539/1/TFE_Miracourt_David_final_2.pdf).

⁷Houben H, G. H. (2006). *Traité de construction en terre*, CRATerre, éditions parenthèses. (France, Ed.) (Edition Pa).

⁸ADADJA, Christian Enagnon. « Caractérisation des matériaux de construction en milieu rural : cas du banco d'argile » mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, Université d'Abomey- Calavi (uac), décembre 2015.

⁹Anger & Fontaine, *bâtie en terre : du grain de sable à l'architecture*, 2009.

¹⁰CRATerre. (1991). *Le bloc de terre comprimée* Eléments de base.

¹¹B. TAALLAH, « Etude du Comportement Physico-Mécanique du Bloc de Terre Comprimée avec Fibres » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2014.

¹²GLOBAL ARCHICONSULT. *La terre crue en architecture*, Janvier 2013.

¹³TAALAH, B., GUETTALA, A H., Kriker, A, « Effet de la teneur en fibres de palmier dattier et de la contrainte de compactage sur les propriétés des blocs de terre comprimée. *Courier du Savoir – N°18*, 2014, pp.45-51 ».

¹⁴Festa Jean et Dreux Georges. (2007). *Nouveau guide du béton et de ses constituants.pdf* (EYROLLES).

¹⁵La norme NF P 15-301.

¹⁶Guillaud, H., & Houben, H. (1995). *Traité de construction en terre* (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses.

¹⁷Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Paris, Editions Parenthèses.

¹⁸P. WALKER Specification for stabilised pressed earth blocks. *Masonry international*, 10, 1996.

¹⁹H. Houben, H. Guillaud, 1995, traité de construction en terre, édition Parenthèse, Marseille, France, 355p.

²⁰H.Houben, V.Rigassi, Ph. Garnier, 1996, Blocs de terre comprimée : Equipements de production, CRATerre, Bruxelles, Belgique ,149p.

²¹La norme **NF P 94-056**.

²²La norme NF P 94-052-1.

²³La norme NF P 94-093.

²⁴CNREX-BTP, Technologie de Production et de mise en œuvre des Blocs de Terre Stabilisée, Octobre 2004, 64 Pages.

²⁵La norme NF EN 12390-6

ANNEXES



Annexe 1 : Latérite utilisée pour la production des éprouvettes de BTS (CNREX-BTP, Janvier 2020).



Annexe 2 : Dispositif de l'essai de traction par fendage d'éprouvettes.



Annexe 3 : Dispositif de l'essai de compression d'une éprouvette de BTS.



Annexe 4 : Blocs de terre stabilisée produit par la presse HYDRAFORM au CNREX-BTP.