



SYNTHESE DE LA STABILISATION DES ELEMENTS EN TERRE CRUE POUR LA CONSTRUCTION DE BATIMENTS

V. BOENY^{1, 2}, J.L. RAKOTOMALALA^{2, 3},

¹ Direction de l'Ecole du Génie Civil et Génie Naval de l'Institut Supérieur de
Technologie D'Antsirana

²EDT « Ingénierie et Geoscience » de l'Université d'Antananarivo

³ Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

Correspondante : volazaraboeny@gmail.com

Résumé :

En cette période de crise environnementale, construire en terre est l'une des moyens évident pour diminuer les l'émissions de CO₂ émanées par l'utilisation du ciment. Le problème de la construction en terre se pose sur sa résistance et de son insensibilité à l'eau. En somme, il existe trois groupes de modes de stabilisation de terre. La stabilisation physique et chimique est une stabilisation complémentaire. La stabilisation chimique regroupe tous les éléments qui peuvent être mélangés avec la terre qu'ils soient d'origine hydraulique, issus du déchet des usines ou obtenus à partir des liants biopolymères. Le matériel utilisé dépend du mode de stabilisations, Les méthodes ont pour but de diminuer ou obstruer les pores vides dans le sol en vue d'augmenter la densité sèche et d'augmenter la résistance du sol. Pour maximiser le résultat, il faut obtenir une valeur de teneur en eau optimale. Dans les liants biopolymère, ce sont les polysaccharides ou protéines qui améliorent le plus la résistance du sol, les lipides s'utilisent plus dans les enduits ou sur les chapes, car ce sont des matériaux hydrophobes.

Mot clés : construction en terre crue, stabilisation mécanique, stabilisation chimique, stabilisation physique, teneur en eau

I. Introduction

La terre est l'une des premiers matériaux de construction utilisée par l'homme, un matériau local par excellence, composé essentiellement par des grains solides, de l'eau et des vides. En présence d'eau, les terres ne se comportent pas de même manière. À cause de sa faible résistance, la construction en terre est devenue un peu délaissée au profit du ciment qui est plus résistant et de plus l'image que le développement fait de la construction en terre une construction pour pauvre ne le valorise pas. En cette période de crise environnementale beaucoup de chercheurs [3, 4,5] ont fait des études en vue d'améliorer la résistance du sol pour diminuer le taux d'émission de CO₂ par l'utilisation du ciment.

Cet article de synthèse regroupe trois différents modes de stabilisations possibles, l'article se divisera en trois parties en commençant par énumérer les différentes méthodes et matériels de stabilisation de terre. Puis on abordera en détails les résultats et discussions sur les stabilisations ; on terminera par une conclusion.

II. Méthodes et Matériels

La stabilisation de brique permet d'avoir une brique plus résistante en modifiant les propriétés terre eau air du sol sans pour autant cuire la brique. La terre est l'une des matériaux ancestraux. Depuis, il existe des centaines de produits utilisables dans le but de d'accroître la résistance d'un sol, mais on peut les regrouper en trois modes :

- Stabilisations mécaniques,
- Stabilisations physiques et,
- Stabilisation chimique.

II.1. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique augmente la résistance de la construction par le compactage. Plus l'effort de compactage augmente, plus la densité des matériaux augmentent. Mais attention, trop d'effort risque de casser la brique. La méthode modifie donc la densité, la résistance mécanique, sa porosité sans oublier sa compressibilité. (Guillaud, 1995) a mis au point quatre techniques de compactage, dont la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression par pétrissage et la compression dynamique par impact. La méthode consiste à mélanger un échantillon de sol avec sa teneur en eau optimale dans un malaxeur pendant une certaine durée pour assurer l'homogénéité du mélange. Une fois fait, on laisse reposer le mélange pendant 24h pour permettre de redistribuer l'homogénéité de l'eau. Durant ce temps de pose, on empêche l'eau de sortir. On place ensuite les échantillons dans un moule cylindrique assez résistant. Puis, on lui applique la pression de compactage à l'aide d'un piston ou une presse. Le compactage se fait de haut en bas ou inversement. Il est important que durant l'application de la charge de compression, la moule doit avoir un système pour libérer l'eau facilement de l'échantillon.

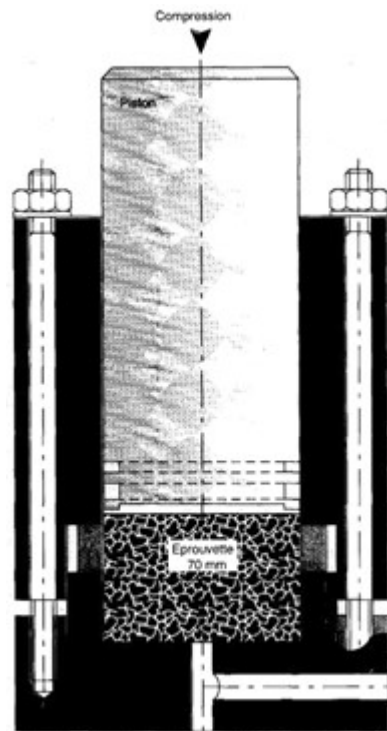


Figure 1 : Appareil de compactage

II.2. Stabilisation physique

Si la stabilisation mécanique permet de réduire les vides d'air ou les porosités, la stabilisation physique permet de modifier la structure du sol en obstruant les vides par ajout d'autres particules des grains comme du sable, des gravillons, de la pouzzolane, etc. Il permet aussi d'augmenter la densité des matériaux. Puisque grâce aux différents ajouts, il y a plus de cohésion entre eux et en même temps, cela modifie la courbe granulométrique de la particule. On n'a pas besoin de matériels spécifiques, mais de matériels nécessaires pour une bonne homogénéité des différentes particules des grains.

La stabilisation physique permet aussi de renforcer la structure des matériaux avec des ajouts de fibres végétales, qui vont créer une armature omnidirectionnelle afin de réduire le mouvement, cela empêche le sol de se fissurer.

II.3. Stabilisation Chimique

Tout comme la stabilisation physique, dans la stabilisation chimique, on fait appel à d'autres matériaux ou des produits chimiques susceptibles de modifier la propriété du sol en créant des réactions chimiques entre le sol et les éléments ajoutés. Les ajouts des matériaux modifient les caractéristiques des particules du sol en créant des réactions chimiques qui entraîneront des liaisons avec des particules des grains. Il existe au moins trois types des groupes de liants utilisables quand on parle de stabilisation chimique. On peut citer :

- Les liants minéraux,
- Les liants minéraux alternatifs et,
- Les liants biopolymères.

II.3.1. Liants minéraux

Un liant minéral est un matériau poudreux ou pâteux, qui durcit lentement en présence de l'eau comme les liants hydrauliques ou à l'air comme les liants aériens. Les liants minéraux les plus souvent utilisés sont le ciment pour le sol plus sableux et de la chaux pour des sols argileux.

II.3.2. Liants minéraux alternatifs

L'utilisation des liants minéraux alternatifs est une solution de recyclage, car il donne une seconde vie aux différents gros déchets industriels qui sont riches en silicium. Comme exemple des déchets industriels, on peut trouver des produits laitiers, des verres, des metakaolins, des fumées de silice, des cendres volantes. L'utilisation du liant alternatif nécessite un ajout de liant hydraulique actif et d'avoir des grands matériels.

II.3.3. Stabilisation biopolymère

On peut grouper au minimum trois groupes des liants capables d'être mélangé avec le sol :

- Les polysaccharides,
- Les protéines,
- Les lipides et,
- Les autres molécules complexes.

III.3.3.1. Polysaccharides

Les Polysaccharides, de formule générale $(CH_2O)_n$, sont des biopolymères de la famille des glucides, avec des longues chaînes de monosaccharides. Il peut être de forme linéaire (cellulose), ramifiée (gomme arabique) ou mixte. Ce sont les polymères les plus répandus et on les trouve souvent chez les bactéries, les champignons ; dans les cellules animales les glycogènes, et chez les produits végétaux les céréales, l'amidon. Les moins répandus sont ceux qu'on extrait des algues sans oublier ceux qui sont extraits des crustacés.

micronutriments (vitamines et minéraux). C'est pourq
conseillées dans le cadre d'alimentation saine et équ



Figure 2 : Polysaccharide végétale

III.3.3.2. Lipides

Les lipides sont composés des molécules hydrophobes ou amphiphiles qui ont la propriété de pousser l'eau (insoluble dans l'eau). Ils peuvent se présenter à l'état solide comme de la cire ou liquide comme des huiles. Selon leurs composantes, les lipides peuvent être regroupés en deux

catégories dont les lipides vrais et lipides complexes. Dans les deux, on retrouve des acides gras. Les lipides peuvent provenir des graisses animales ou à partir des grains végétaux tels que les lins, le karité, ...



Figure 3 : Extraits de produits lipides

III.3.3.3. Protéines

Les protéines sont des polymères formés d'un ou plusieurs chaînes d'acides animés. Ils peuvent être d'origine animale ou végétale. De l'origine animale, nous avons la viande, dans les poissons, les œufs, les laits et on peut aussi citer le soja, la céréale comme source des protéines végétales. A la différence des polysaccharides ou les lipides, on trouve de l'azote dans les protéines. Selon les types de ses liaisons, les protéines peuvent être :

- Fibreuse ou,
- Globulaire.

Les protéines fibreuses sont des protéines allongées, pratiquement insolubles dans l'eau, par exemple les kératines, qui sont formées des tissus de protections des corps (les plumes d'oiseaux, les poils, les ongles, l'épiderme), les collagènes, les élastines et des diverses fibroïnes qu'on peut trouver dans les soies, les cocons. La protéine globulaire a une forme sphérique, très soluble dans l'eau. On peut citer les albumines, les globulines, les glutélines, les lectines, ...

Posted on 15 Avr, 2021



Figure 4 : Extraits de produits riches en protéine

III.3.3.4. Stabilisation du sol par des molécules complexes

D'autres chercheurs sont allés plus loin avec des molécules qui ne sont ni polysaccharides, ni lipides et encore moins de protéines. Par contre, ce sont des éléments qui sont faciles à trouver dans les règnes végétaux, les tanins ou de la résine. Il n'a pas de formule miracle dans la stabilisation de la terre, les matériaux à ajouter dépend des matériaux qu'on possède, car sans une analyse bien déterminée, la construction peut nous revenir très cher. Il y a des matériaux qui demandent un ajout d'élément chimique pour pouvoir extraire l'additif concerné et d'autres d'une fermentation ; donc tout dépendra de l'état du liant à ajouter. Le mode de stabilisation dépend de la nature de construction que nous voulons. Par contre, le principe c'est de mélanger les produits secs jusqu'à l'homogénéisation, ensuite ajouter des liquides au fur et à mesure et les mélanger après. Certaines constructions nécessitent un temps de pause après le mélange pour permettre à tous les éléments terre et eau à de se mélanger. Une fois le temps de pause terminé, on met les mélanges dans la moule ou dans les coffrages ou directement sur la paroi. Là encore, tout dépendra du mode de constructions, c'est-à-dire en bloc de terre comprimé, en pisé en bauge. Etc. Les matériels de malaxage peuvent être un malaxeur à hélice, bétonnière, malaxeur à cuve verticale ou horizontale, ou on peut le piétiner. Pour le malaxer pour l'extraction de terre, les engins de creusage et des camions de transport sont nécessaires pour transporter la terre au lieu de construction.

III. Résultats et discussions

III.1. Stabilisation mécanique

La figure 5 représente l'une des courbes de compactage avec trois forces de compactage 25, 50 et 100Mpa. Ils sont en fonction de teneur en eau et après un compactage, on obtient une densité sèche en fonction de la quantité d'eau utilisée.

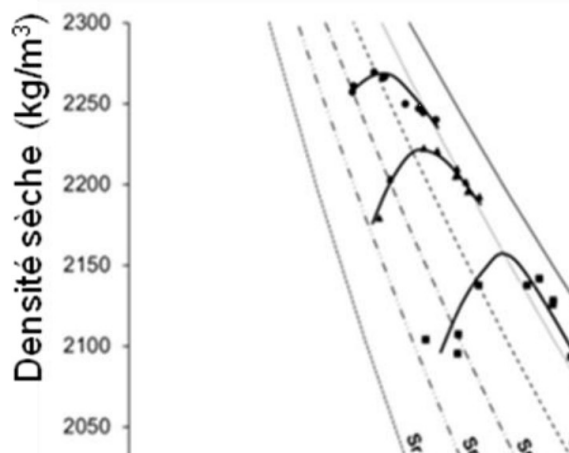


Figure 5 : Courbe de compactage pour 25, 50 et 100Mpa (Agostino Walter Bruno, 2015)

La courbe de compactage est de forme parabolique, le pique de la courbe correspond au teneur en eau maximum et a une densité maximum. La densité sèche dépend aussi de la force de compactage. La teneur en eau optimum, c'est la valeur à laquelle on obtient la valeur de densité sec maximum. Elle ne doit pas être ni trop petite ni trop grande.

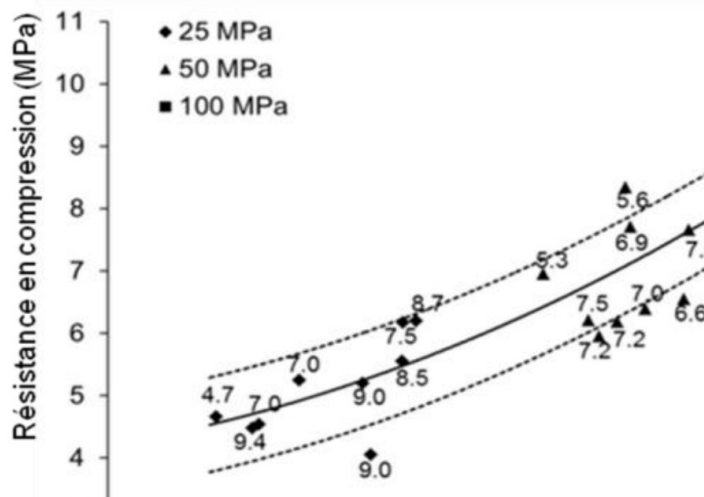


Figure 6 : Courbe de résistance de compression 100Mpa (Agostino Walter Bruno, 2015)

La figure 6 représente l'évolution de la résistance à la compression d'un sol compacté avec trois forces de compactage en fonction de la densité sèche et aussi de la teneur en eau obtenu après compactage. La courbe de résistance croit exponentiellement en fonction de la densité sèche, c'est-à-dire plus la densité augmente, plus la résistance augmente.

III.2. Stabilisation physique

La figure 7 montre l'effet d'ajout de sable sur le gonflement d'un sol en fonction du pourcentage et de la provenance du sable.

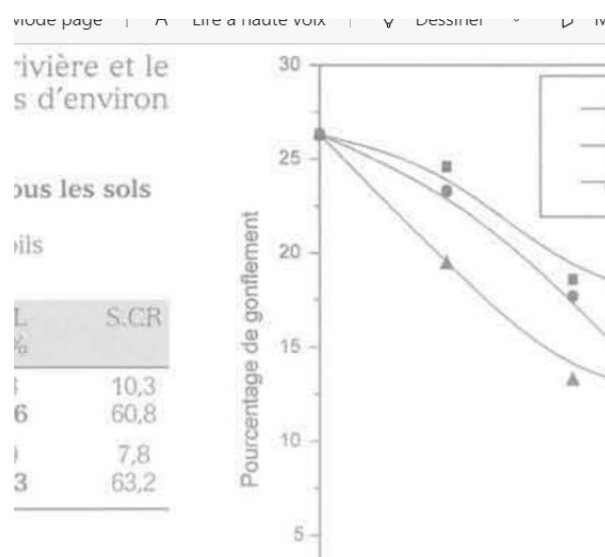


Figure 7 : Influence de l'ajout de sable sur le gonflement du sol de la région d'Oran (A.HACHICHI, S. B. (2007))

Il y a une interaction entre la stabilisation physique et chimique, la figure 7 montre l'effet d'ajout de sable dans le gonflement du sol, en effet par rapport la figure tous les sable favorise la diminution de gonflement du sol, mais c'est le fait de mélangé avec le sol le sable de mer qui arrive à le diminuer le plus.

Il faut savoir aussi qu'un matériau composé de mélange des granulats fins et gros donne un produit plus dense c'est ce que le chercheur (USACE, 2000) a pue justifier dans la figure 8, l'impétrant a utilisé sept types de sol différent à laquelle il a fait varié la teneur en eau.

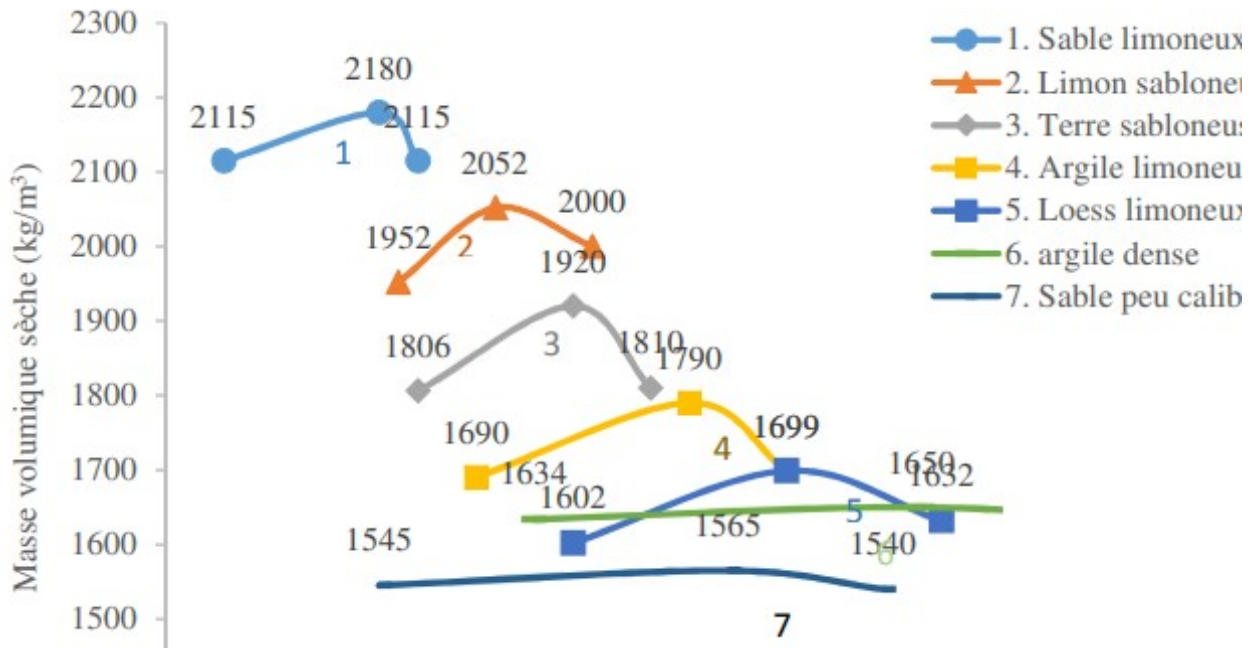


Figure 8: Relation entre la teneur en eau et masse volumique sèche de sol (USACE, 2000)

Selon (Millogo Y, 2014), la présence des fibres améliorent la résistance en compression.

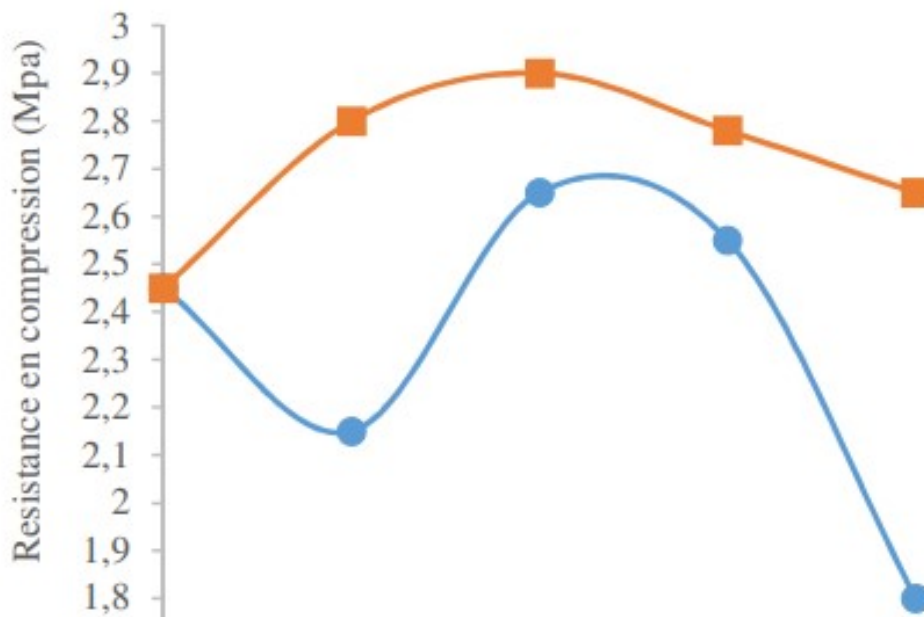


Figure 9: Influence du taux et de la longueur des fibres sur la résistance (Millogo Y, 2014)

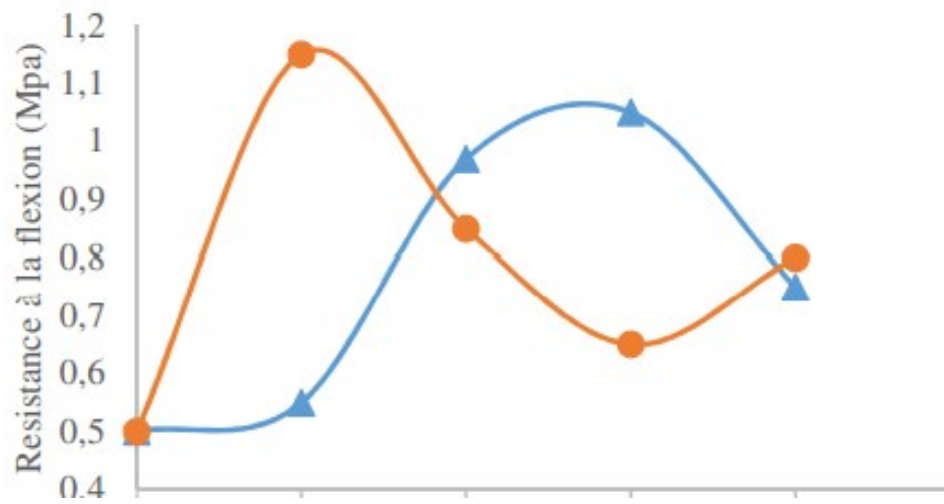


Figure 10: Influence du taux de la longueur des fibres sur la résistance à la flexion (Millogo Y, 2014)

l'augmentation de la résistance mécanique dépend du taux de fibres utilisé et aussi de la longueur de fibre, trop de fibre provoque une diminution de résistance.

III.3. Stabilisation chimique

Le tableau ci-dessous présente la synthèse de la stabilisation chimique du sol.

Tableau 1 : synthèse bibliographique des stabilisations chimiques du sol

Reference	Titre	Liant	% du liant	fc
Kouka Amed Jérémy OUEDRAOGO (2019)	Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux	Ciment Portland	2	4,8
			4	5,8
		chaux	2	3,4
			4	3,3
Thi-Thanh-Hang NGUYEN (2015)	Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel	Chaux	0	0,16
			1,5	0,82
			3	3,23
			5	5,19
IZEMMOUREN Ouarda (2016)	Effet des ajouts minéraux sur durabilité des briques de terre comprimée	laitier + 10% de la chaux	10%	8,5
			20%	9,5
			30%	10
			40%	10,9
		Poudre de verre + 10% de la chaux	10%	9,3
			20%	9,7
			30%	10,2
			40%	8,55

Reference	Titre	Liant	% du liant	fc
Amandine Rojo, Annabelle Phelipot-Mardelé (2015)	Procedé d'activation des sols argileux	matakaolin	15%	62,91
Antonio Soldo, Marta Miletic, Maria L.Auad (2020)	Les biopolymères comme solution durable pour amelioration des propriétés mécaniques du sol	Chitosan (5j de cures)	4	1,05
		Alginate (30j de cures)	2	2,6
		Gomme Xanthan (30j de cures)	4	7,1
		Gomme de guar (30j de cures)	4	3,2
		Beta 1,3/1,6 glucan (30j de cures)	4	2,46
Kouka Amed Jérémy OUEDRAOGO (2019)	Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre cruie par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux	Ovalbumine	4	11,8
Ali Abakar (2018)	Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz	Gomme arabique	15	12,12
Ghaith ALHAIK (2017)	Influence de l'amidon sur les propriétés rhéologiques mecaniqueet multiphysique de formulations terre -paille	Amidon	à 120°	7

La stabilisation du sol nous permet d'obtenir une assez bonne résistance, parmi les différentes méthodes de stabilisations citées au-dessus, le metakaolin est le plus résistant 62,91Mpa. Ce sont les polysaccharides ou protéines qui améliorent le plus la résistance du sol, les lipides s'utilisent plus dans les enduits ou sur les chapes, car ce sont des matériaux hydrophobes. Ce tableau nous prouve aussi qu'avec les liants biopolymères, on peut obtenir une résistance assez bonne qu'avec les liants minéraux.

IV. Conclusion

En somme, on peut regrouper en trois les méthodes de stabilisations du sol. Chaque stabilisation arrive à améliorer la résistance. La stabilisation mécanique améliore la résistance grâce à la compression. La stabilisation physique est une mode de stabilisation que nous utilisons habituellement lorsque nous mélangions les différentes tailles de granulat. Ici, la méthode permet d'obstruer les vides dans la terre. Quant aux stabilisations chimiques, ils existent de nombreuses recettes. Les liants à ajouter peuvent être mélangés avec d'autres éléments chimiques pour pouvoir extraire les éléments dans les liants biopolymères. Le mélange des trois méthodes de stabilisation n'est pas à exclure encore moins le mélange de plusieurs liants comme le mélange de stabilisant chimique de même nature ou de nature différente. Certaines de ces recettes ne sont pas adaptées à notre situation comme par exemple les ovalbumines. On peut en compter des centaines de recettes et encore des milliers à découvrir donc quand attend nous pour déterminer une recette qui nous est vraiment adaptée ? Une stabilisation qui existe en plusieurs quantités et facile à trouver et qui nous procurera une bonne résistance.

V. Remerciements

Il est temps pour moi de remercier toutes les personnes qui m'ont aidée à l'accomplissement de cet article. Merci à mon directeur de thèse, Pr Jean Lalaina RAKOTOMALALA, pour ses soutiens, son accompagnement et ses directives sur l'aboutissement de cet article. Mon remerciement s'adresse aussi au Dr RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa, pour le temps qu'il m'accordait sur le suivi de cet article. Je suis aussi très reconnaissant envers mes collègues de l'IST-D pour leurs différentes remarques.

VI. Références

- [1] A HACHICHI, S. B. (2007). Stabilisation Chimique de deux sols gonflants de la région d'Oran. Algerie: Université des sciences et de la technologie EL M'naouar Oran.
- [2] Abakar, A. (2018). Caractéristique mécaniques et thermiques de l'argile stabilisé par la gomme arabique et renforcé par la paille de riz. Nancy: Université de LORRAINE.
- [3] Agostino Walter Bruno, D. G.-B. (2015). Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. France: Universitaires de Génie Civil, Bayonne.
- [4] ALHAIK, G. (2017). Influence of starch on the rheological , mechanical and multiphysics properties of earth-straw mixes. France: Université d'Artois.
- [5] Amandine Rojo, A. P.-M. (2015). Procédé d'activation des sols argileux. France.
- [6] Amandine, R. a. (2015). Procédé d'activation de sol argileux.

- [7] Antonio Soldo, M. M. (2020). Biopolymers as a sustainable solutions for the enchancement of soil mechanical prperties .
- [8] Guillaud, H. (1995). Traité de construction en terre. Marseille: Parenthèses.
- [9] Millogo Y, M. J.-C. (2014). Experimental analysis of pressed adobe blocks reifonreced with Hibiscus cannabinus fibres. Constr Build Mater.
- [10] NGUYEN, T.-t.-H. (2015). Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel. FRANCE: Institut Francais des Sciences et Technologis des Transports de l'Amenagement et des Réseaux .
- [11] Osula, D. O. (1991). Lime modification of problem laterite. Engineering Geology, 30,141-154.
- [12] Ouarda, I. N. (2016). Effet des ajouts minéraux sur durabilité des brique de terre comprimée. Algerie: Université Mohamed Khider de Biskra.
- [13] Ouedraogo, K. A. (2019). Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux. Toulouse: l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- [14] Savastano Jr H, W. P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites.