

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الدكتور مولاي طاهر - سعيدة -
Université Dr Moulay Tahar - Saida-



Faculté de Technologie

Département de Génie civil et hydraulique

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en Génie civil

Option : Géotechnique

Thème

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA CONSTRUCTION EN TERRE :
Techniques de construction, moyens d'identification et aspects de
comportement.**

Présenté par:

Mr. Boulanouar Mohamed Ayoub

Mlle. Rahmani Nouzha

Soutenu en Octobre 2020, devant le jury composé de :

M BELOUADI Larbi	M.C.B	Président
M. DERFOUF Feth Ellah Mounir	M.C.A	Encadreur
M TOUIL Brahim	M.C.B	Examineur

Année universitaire 2019/2020

إهداء

في منتصف الطريق و حين أوشتك على
التراجع و ترك كل ما بنيت طيلة سنوات دراستي كانت
كلماتك التي لازلت أذكرها بمثابة طوق النجاة الذي تمسكت به حتى أصل
الى هذه اللحظة التي طالما انتظرتها.

نعم لا زلت اذكر حين قلت لي " يا وليدي جيبلي الديبلوم و روح شوف حياتك "
أمي الغالية أهديك هذا العمل المتواضع أهديك كل شهاداتي الدراسية
و أهديك حبي الدائم.

محمد ايوب بولنوار

Dédicace

Ce travail est pour moi une grâce d'Allah, J'ai bénéficié de l'encouragement et du soutien constant de nombreuses personnes. Je trouve ici l'occasion de leur exprimer mes sincères gratitude.

Ce projet fin d'étude est dédié à mes chers parents qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Sans eux, je n'aurais certainement pas fais d'études longues.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur de mémoire, Monsieur DERFOUF MOUNIR, je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Je remercie mes très chères sœurs Lamia, Amani, Dounia et mon frère Taha Abdelaziz et Je remercie aussi ma tante Zakia pour ses encouragements.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mon binôme Boulanouar Mohamed Ayoub pour sa confiance et son soutien inestimable.

Enfin, je remercie mes amies Ines, Souhila, Assia, Rejia qui ont toujours été là pour moi, ainsi toute la promo.

Rahmani Nouzha



Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous voulons remercier nos très chers parents pour leurs sacrifices qu'ils ont consentis pour notre éducation et notre formation. Et qu'Allah les bénisse pour nous.

Un remerciement très chaleureux s'adressent à notre encadreur monsieur DERFOUF F-E-Mounir, Maitre de conférences à l'université de Saida, pour ses encadrements, ses orientations, sa disponibilité et ses encouragements pour mener à bien ce travail. Nous lui sommes très reconnaissants pour la qualité des nombreux conseils, et son attention.

On n'oublie pas de remercier aussi nos familles pour leur soutien et leurs encouragements pour poursuivre la réalisation de mémoire. Et on les félicite de cette réussite qui est la siennes

Avant propos

Notre mémoire était à l'origine destiné à réaliser un travail expérimental permettant de caractériser les propriétés mécaniques et hydriques d'un matériau local stabilisé avec la chaux et ceci pour la fabrication des briques de terre comprimées. La pandémie Covid 19 nous a forcés à réorienter notre travail vers un travail de recherche bibliographique traitant la construction en terre d'une manière générale en mettant le point sur l'objectif principal de l'étude expérimental via une revue bibliographique.

Résumé

Depuis près de 10 000 ans, la terre est l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. Plus d'un tiers des habitants du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre.

En ce présent mémoire, on présente les différentes techniques de construction en terre et leurs avantages environnementaux, sociaux et culturels et ses inconvénients et faiblesse notamment face à l'eau. A cet effet, nous avons cité les principaux essais nécessaires pour son identification et caractérisation ainsi que les différents moyens de stabilisations lui permettant d'acquérir des performances hydromécaniques ainsi qu'hygrothermiques satisfaisantes. Pour exemple, nous avons présenté l'effet de la chaux sur les caractéristiques mécaniques et hydriques des briques de terre comprimée via les résultats de la littérature.

Mot clé :

Terre crue, caractérisation, brique de terre comprimée, stabilisation, caractéristiques mécaniques, caractéristiques hydriques.

Abstract

For nearly 10,000 years, Earth has been one of the main building materials used on our planet. More than a third of the world's inhabitants today live in earthen habitats.

In this thesis, we present the different techniques of earth construction and their environmental, social and cultural advantages and its disadvantages and weakness especially facing water.

For this purpose, we have cited the main tests necessary for its identification and characterization as well as the various means of stabilizations allowing it to acquire satisfactory hydromechanical as well as hygrothermal performances. For example, we presented the effect of lime on the mechanical and hydric characteristics of compressed earth bricks from the results of the literature.

Key words:

Raw earth, characterization, compressed earth brick, stabilization, mechanical characteristics, hydric characteristics.

ملخص

منذ ما يقرب من 10.000 سنة, تعتبر الأرض واحدة من مواد البناء الرئيسية المستخدمة على كوكبنا. حيث يعيش ثلث سكان العالم اليوم في مساكن ترابية.

في هذه المذكرة, نقدم مختلف التقنيات البناء بإستعمال الأرض و مزاياها البيئية, الاجتماعية و الثقافية و عيوبها و ضعفها خاصة بمواجهة المياه. و تحقيقا لهذه الغاية, استشهدنا بالتجارب الرئيسية اللازمة لتحديد خصائصها و مميزاتها, فضلا عن وسائل طرق التثبيت المختلفة التي تسمح بالحصول على أداء هيدروميكانيكي و حراري مرضي. على سبيل المثال, قدمنا تأثير مادة الجير على الخصائص الميكانيكية و المائية للطوب الارضي المضغوط من خلال النتائج المدونة في ابحاث سابقة.

كلمات مفتاحية:

الأرض الخام, التوصيف, الطوب الأرضي المضغوط, التثبيت, الخصائص الميكانيكية, الخصائص المائية

Introduction générale	01
I. Le matériau terre	
1 Introduction	02
2 Rappel historique :	02
3 Les différents techniques de construction :	03
3.1 Pisé :	04
3.2 Torchis :	06
3.3 Adobe :	07
3.4 Bauge :	08
3.5 La brique de terre cru compressée (BTC) :	09
4 Les formes de brique plus fréquentées	12
5 Les types de presses.	14
6 Les avantages de la construction en terre crue	15
7 Les inconvénients de la construction en terre crue.	16
8 Conclusion :	16
II. Techniques expérimentales pour caractérisation de la terre crue	
1 Introduction	17
2 Essais d'identification	17
2.1 Distribution granulométrique	17
2.2 Limites d'Atterberg	17
2.3 Surface spécifique	18
2.4 Valeur au bleu.	19
2.5 Le compactage(Essai Proctor)	19
2.6 Mesure de pH	19
3 Essais mécaniques	20
3.1 Résistance a la compression simple	20
3.2 Résistance a la traction	22
4 Essais du durabilité	23
4.1 Isotherme de sorption	23
4.2 Absorption capillaire	24
4.3 Test d'érosion (SPRAY TEST)	25
4.4 Swinburne Accelerated Erosion Drip Test (SAET)	25
4.5 Essais de la brosse métallique (Wire Brush Tests)	26
5 Essais spécifiques	27
5.1 Diffractomètre a rayon x (DRX)	27

5.2	La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	28
5.3	Analyse thermique différentielle et gravimétrie (ATD/ATG)	29
5.4	Spectrofluorescence X	30
6	Conclusion	30
III. Les Techniques de stabilisation		
1	Introduction	31
2	Définition	31
3	Objectifs	31
4	Les techniques principales	31
4.1	La stabilisation mécanique.....	31
4.2	La stabilisation physique	32
4.3	La stabilisation chimique	33
4.4	La stabilisation par les fibres	42
5	Conclusion	43
IV. Les caractéristiques mécaniques et hydriques de la brique en terre stabilisée et non stabilisée		
1	Introduction.....	44
2	Caractéristiques mécaniques	44
2.1	Résistance à la compression	44
2.1.1	Résistance à la compression sèche	44
2.1.2	Résistance à la compression humide	48
2.2	Résistance à la traction.....	51
2.3	Le module d'élasticité	53
2.4	Le module de cisaillement maximal	55
3	Caractéristiques hydriques.....	58
3.1	Coefficient d'absorption à l'eau.....	58
3.2	Essais de sorption désorption.	60
4	Conclusions.	62
Conclusion générale		63
Bibliographie		65

Table des figures:

Figure I.1: a- la ziggurat de Babylone en Irak. b- La Grande Muraille de Chine. c- pyramide d'El-Lahoun. d- La ville de Shibam au Yémen.	02
Figure I.2: "Roue" des techniques de construction en terre.	03
Figure I.3: Coffrage utilisé dans la conception d'un mur en pisé.	04
Figure I.4: Les étapes de construire un mur en pisé.	05
Figure I.5: Patrimoines en pisé	05
Figure I.6: Les Vestiges de El-Mahalla El-Manssoura, « Le camp Victorieux ». Tlemcen.	06
Figure I.7: Techniques de construction en Torchis.	06
Figure I.8: Nord de la France, Normandie, Alsace Torchis traditionnel.	07
Figure I.9: Exemple de Fabrication d'Adobe.	07
Figure I.10: (a), (b) Maison traditionnelle en Adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye.	08
Figure I.11: Un mur en bauge en construction en France.	08
Figure I.12: Construction en terre empilée.....	09
Figure I.13: Maison construite avec des BTC (dont la tour est en pisé) en Rhône-Alpes, France.....	09
Figure I.14: le fuseau granulaire des terres utilisables pour les BTC	10
Figure I.15: Le fuseau des indices de plasticité des terres utilisables pour les BTC	11
Figure I.16: Classification des matériaux selon leur nature (selon la norme NF P 13-901).	12
Figure I.17: Exemple des briques en terre crue creuses.	13
Figure I.18: la Briques alvéolaires.	13
Figure I.19: Brique en terre crue plein.	13
Figure I.20 : Les différents types de la brique de terre crue.	14
Figure I.21 : La première presse classique innovée par Raul Ramirez.	14
Figure I.22 : Presses manuelles CINVA-RAM.	15
Figure I.23 : Une presse mécanique.	15
Figure I.24 : Une presse hydraulique.	16
Figure II.1 : Tamisage par voie humide.	18
Figure II.2: tamisage par voie sèche.	18
Figure II.3 : Détermination des limites d'Atterberg :a) Méthode de la coupelle de Casagrande) b) La méthode de cône.	19
Figure II.4: Perméamètre de Blaine.	19
Figure II.5 : Appareillage de l'essai de bleu, (ente-aix.fr).	20
Figure II.6: Courbe de l'essai de Proctor.	20
Figure II.7: PH-mètre.	21
Figure II.8: Schéma du principe de l'essai de compression.	21
Figure II.9: coupe du bloc en deux demi –blocs.	22
Figure II.10: la superposition des deux demi-blocs.	22
Figure II.11: Essai de traction par fendage.	23
Figure II.12 : Principe de l'essai de flexion 3 points.	24
Figure II.13: Isotherme de sorption-désorption.	24
Figure II.14: L'appareil BELSORP-aqua3 avec un exemple de résultat d'Isothermes de sorption-désorption.	25
Figure II.15: Montage expérimental d'absorption capillaire.	25
Figure II.16: SPRAY TEST.	26
Figure II.17: SAET Drip Test.	26
Figure II.18: cycle mouillage-séchage.	27
Figure II.19: la brosse métallique pour l'essai d'abrasion.	27
Figure II.20: Schéma simplifié d'un diffractomètre de poudre de rayon X.	28
Figure II.21: DRX du sol de Tours-Bordeaux.	28
Figure II.22: appareillage de MEB.	29
Figure II.23: Cristaux de chlorite et de kaolinite vus au microscope électronique à balayage.	29
Figure II.24: L'analyse thermique gravimétrique d' un matériau.	30

Figure II.25: SETARAM Scientific &Industrial Equipement série Setsys 24.	30
Figure II.26: Spectromètre de fluorescence X.	30
Figure III.1: Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol. 33	
Figure III.2: courbe granulométrique des mélanges (sol, sable) avec la courbe idéale et le fuseau limite pour les briques de terre stabilisée.	33
Figure III.3: Choix de la méthode de stabilisation.	34
Figure III.4: la chaux éteinte.	35
Figure III.5: la pouzzolane naturelle.	35
Figure III.6: Réaction pouzzolanique.	37
Figure III.7 : Capacité de captation des ions Ca^{2+} par les argiles et quantité d'ion Ca^{2+} libérés par le ciment au cours du temps.	39
Figure III.8: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine.	41
Figure IV.1: Évolution de la résistance de compression en fonction du temps de cure.....	43
Figure IV.2: Évolution de la résistance en fonction de la chaux ajoutée.....	44
Figure IV.3: Evolution de la résistance à la compression simple du sol A1 non traité et traité à différents dosages en chaux.	45
Figure IV. 4: Evolution de la résistance à la compression simple du sol A2 non traité et traité à différents dosages en chaux.....	45
Figure IV. 5: Evolution de la résistance à la compression simple du sol A3 non traité et traité à différents dosages en chaux.	45
Figure IV.6: Effet de la teneur en eau de compactage ($w = 8,5\%$ et $w = 13,5\%$), du temps de cure et de la teneur en chaux sur la résistance à la compression simple d'un limon.	46
Figure IV.7: résistance en compression sèche en fonction de la durée de cure des briques non stabilisées de C1 et C2.	47
Figure IV.8: Résistance en compression humide en fonction de la durée de cure des briques stabilisées à la chaux (C1).	47
Figure IV.9: Résistance en compression humide en fonction de la durée de cure des briques stabilisées à la chaux (C2).	48
Figure IV.10 : Résistance à la compression humide du BXPD curé à 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).	48
Figure IV.11: Résistance à la compression sèche et humide à 45 jours.	49
Figure IV.12: Résistance à la compression sèche et humide à 70 jours.	49
Figure IV. 13: Evolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A1 non traité et traité à différents dosages en chaux.	50
Figure IV. 14: Evolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A2 non traité et traité à différents dosages en chaux.	51
Figure IV.15: Evolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A3 non traité et traité à différents dosages en chaux.	51
Figure IV.16: diagramme contrainte-déformation d'un matériau ductile.....	52
Figure IV.17: Évolution de la résistance en fonction de la chaux ajoutée.	53
Figure IV.18: schéma de principe du cisaillement.	54
Figure IV.19: Évolution des paramètres de cisaillement des sols traités à 21 jours.	55
Figure IV. 20: Module de cisaillement maximal du sol A1 non-traité et traité au cours du temps.	55
Figure IV. 21: Module de cisaillement maximal du sol A2 non-traité et traité au cours du temps.	56
Figure IV. 22: Module de cisaillement maximal du sol A3 non-traité et traité au cours du temps.	56
Figure IV.23: Eprouvette à 2% chaux(NHL3,5) à 90 jours après test de remontée d'eau par capillarité.....	57
Figure IV.24 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des cylindres et chaux.	57
Figure IV.25: Isothermes d'adsorption (ads) / désorption (des) des briques en terre comprimée (BTC) ..	59
Figure IV.26: Courbes d'adsorption/désorption des éprouvettes BTC, BTSL8, BTSL10 et BTSL12.	59

Liste des tableaux:

Tableau II.1 : valeurs indicatives de surface spécifique pour les argiles.	19
Tableau II.2: Limites de masse perdue proposé par Fitzmaurice, 1958.	27
Tableau III.1: Compositions Chimiques (%) de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes.	36
Tableau III.2: Évolution de la CEC d'une kaolinite et d'une montmorillonite en fonction de la quantité de chaux.	38
Tableau III.3: Mesures de résistance à la compression simple d'un limon et de trois sols micacés traité à 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique.	39
Tableau III.4: Gonflements volumiques et résistances à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (nitrate et phosphate).	40
Tableau III.5: Gonflement volumique et résistance à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (potasse).	40
Tableau IV.1: dosage en matériau et les teneurs en eau optimal.	46
Tableau IV.2 : Les moyennes des valeurs du module de Young de l'échantillon écrasé.	52
Tableau IV.3: Essais triaxiaux des sols traités à 21 jours après le traitement.	54
Tableau IV.4: Résultats de capillarité et d'absorption d'eau.....	58

Introduction Générale

La terre est un des premiers matériaux utilisés par l'Homme dans le domaine de la construction. Ce n'est que depuis l'apparition du ciment que les techniques de construction en terre ont été délaissées dans les zones urbaines et dans les pays industrialisés. L'utilisation de la terre dans le secteur de la construction, dans une optique de développement durable, implique l'analyse de la situation qui motive ce choix ; en prenant en considération les aspects écologiques, environnementaux et économiques, la viabilité culturelle et temporelle des impacts positifs et négatifs qui résultent de ce choix.

L'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de CO₂ et on prévoit que ce chiffre atteigne 10% à l'horizon 2050. Ces émissions proviennent à plus de 80% des pays émergents, le continent asiatique en tête, du fait de la forte consommation nécessaire à leur développement. Pourtant, de nombreux efforts sont faits depuis 1990, à tous les niveaux de la fabrication du ciment, pour diminuer ces émissions. Mais la marge de progrès est encore conséquente. Toutefois, des chercheurs soutiennent que la technologie actuelle de production des matériaux cimentaires ne pourra pas atteindre des objectifs satisfaisants et qu'une réforme technologique est inévitable.

Le matériau terre connaît actuellement un regain d'intérêt suite à la crise du logement. Contrairement au béton ou à l'acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. Cependant le majeur inconvénient est que ce matériau ne résiste pas toujours aux intempéries et beaucoup de bâtisses en terre crue et particulièrement celles construites avec des matériaux sans aucun traitement sont emportées par les pluies.

Il est présenté dans ce mémoire les résultats et analyses relatives aux possibilités d'utilisation des matériaux stabilisés avec la chaux dans la construction. De plus il sera analysé la mise en œuvre de ces matériaux tout en spécifiant les techniques et les mesures qu'il faut prendre en compte pour une bonne exécution.

La présente recherche a pour objectif principal la valorisation des matériaux locaux et leur caractérisation en vue de vulgariser à vaste échelle leur utilisation. Les objectifs spécifiques sont la présentation :

- Les techniques de construction et fabrication en terre.
 - Les différents essais pour identifier les caractéristiques physiques, chimique, mécanique...etc. des briques en terre comprimées.
 - Les moyens de stabilisation.
 - Les caractéristiques mécaniques présentées par les briques stabilisées avec la chaux et non stabilisées.
-

Chapitre I

Le matériau terre

Contenu

I.1	Introduction	02
I.2	Rappel historique.	02
I.3	Les différents techniques de construction.	03
I.3.1	Pisé.....	04
I.3.2	Torchis	06
I.3.3	Adobe	07
I.3.4	Bauge	08
I.3.5	La brique de terre cru compressée (BTC).	09
I.3.5.1	Critère de choix de la terre pour la fabrication du BTC	10
I.4	Les formes de brique plus fréquentées.	12
I.5	Les types de presses	14
I.6	Les avantages de la construction en terre crue.	15
I.7	Les inconvénients de la construction en terre crue	16
I.8	Conclusion	16

I.1. INTRODUCTION :

La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction. Le terme terre crue permet de marquer la différence avec la terre cuite. La brique en terre crue ou la brique compressée, de même que le pisé, l'adobe ou le torchis, sont les techniques de construction en terre qui ont été les plus utilisées dans l'histoire de la construction jusqu'à nos jours. Dans ce chapitre, une description de ces techniques sera développée avec une mise au point particulière sur la brique de terre comprimée.

I.2. Rappel historique:

On construit en terre crue depuis des millénaires. Dans les régions où les pluies sont rares, des édifices en terre crue peuvent même exister encore aujourd'hui. C'est le cas des grandes ziggurats de Mésopotamie comme la ziggurat d'Ur ou celle de Babylone (Figure I.1a), ces immenses constructions à étages faites de briques crues liées avec du bitume ou de l'asphalte, et intercalées avec des roseaux. En Égypte aussi, certaines pyramides ont un cœur de briques crues comme pyramide d'El-Lahoun (Figure I.1c), recouvert de pierres calcaires. La Grande Muraille de Chine (Figure I.1b), commencée au III^e siècle avant Jésus-Christ, est en partie construite en terre. Elle s'étend sur près de 7 000 km et ses matériaux varient suivant le terrain.

Au Moyen Âge, la construction en terre est la technique la plus couramment employée pour les maisons, car elle coûte quatre fois moins cher que la pierre et offre la meilleure isolation thermique. On a surtout recours à la technique du torchis.

Mais des édifices très prestigieux peuvent aussi être faits de terre. Ainsi A Grenade, en Espagne, les remparts de l'Alhambra sont en partie construits en pisé. La tour de Comares, haute de 45 m, est la plus haute construction d'Europe en terre crue. Mais le plus haut bâtiment du monde en terre crue se trouve au Yémen : il s'agit du minaret de la mosquée Al Muhdharqui se dresse à 53 m de haut.

À partir du XIII^e siècle apparaît la technique des pans de bois : une ossature en bois, souvent montée à l'avance, est remplie de plâtre ou de torchis. Cette évolution, qui allège l'ensemble, permet de construire des édifices à plusieurs étages.

Les premiers gratte-ciel du monde datent du XVI^e siècle et ils sont en briques crues ! On les trouve dans la ville de Shibam au Yémen (Figure I.1d). Ces bâtiments hauts de 30 m comptent huit étages et datent pour certains du XVI^e siècle.

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, les pays les plus riches abandonnent majoritairement la construction en terre crue pour reconstruire en béton ou en acier, cependant la construction en terre crue reste la règle dans de nombreux pays du monde. (Source : <http://passerelles.bnf.fr>).



Figure I.1 : **a-** la ziggurat de Babylone en Irak.**b-** La Grande Muraille de Chine.
c- pyramide d'El-Lahoun.**d-** La ville de Shibam au Yémen.(Source: Benchenna K, 2017).

I.3. Les différentes techniques de construction en terre

Les constructions en terre sont diverses : la terre fournit des matériaux de compositions différentes suivant les régions, et les techniques de construction ont évoluées pendant des milliers d'années. Chaque technique diffère en fonction de la composition de la terre utilisée, de la méthode de compactage, de la teneur en eau de fabrication, et du processus de séchage. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC). Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise ; **Guillaud et Houben (1995)** ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des technique (**Fig I.2**), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité. Ce tableau circulaire ne présente pas seulement les techniques traditionnelles mais aussi les techniques nouvelles. (**Benchenna K, 2017**).

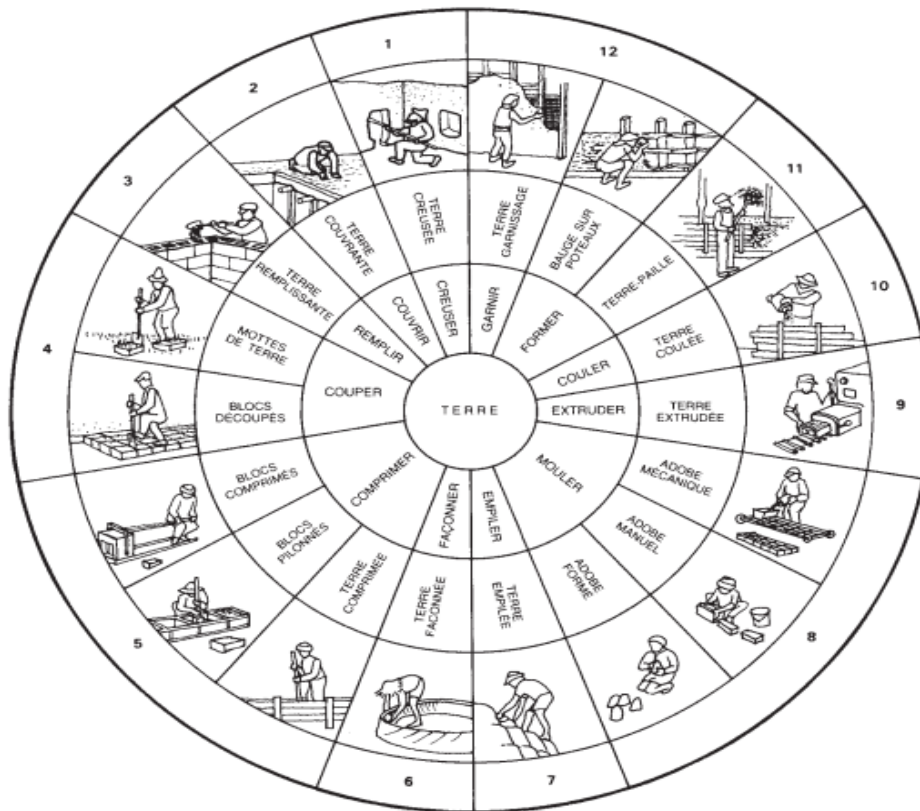


Figure I.2 : "Roue" des techniques de construction en terre
(Source :d'après Anger& Fontaine, 2009).

I.3.1. Le pisé:

Le pisé est une technique qui consiste à damer des couches successives de terre crue à l'intérieur d'un coffrage. Il en résulte une superposition de couches, placées entre un soubassement et un grand toit. Le pisé offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes.

Cette technique permet d'utiliser la terre généralement issue du site de la construction, et ne nécessite pas de transformation (pas d'utilisation d'énergie pour altérer ses propriétés basiques). Des « lits de chaux » ou « cordons de chaux » font souvent office de liant entre les différentes « banchée ». En revanche, cette technique n'est pas applicable avec toutes les terres. En effet, on estime que la meilleure terre doit se composer de : 0 à 15% de gravier, 40 à 50% de sable, 35 à 20% de limon et 15 à 25% d'argile. Comme le rapportent d'anciens piseurs de la région d'Izeaux, on choisit une terre « rouge », non organique, pas trop humide (Doat, Hays, 1979).

La mise en œuvre consiste en premier temps à « frasser » la terre extraite, c'est-à-dire qu'on la répartit en fines particules et on la débarrasse de ses plus gros cailloux. On construit ensuite un soubassement de galets, de briques ou parfois de pierres, bâti au mortier de chaux. La Figure 1.3 montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé. (Champire, 2017).

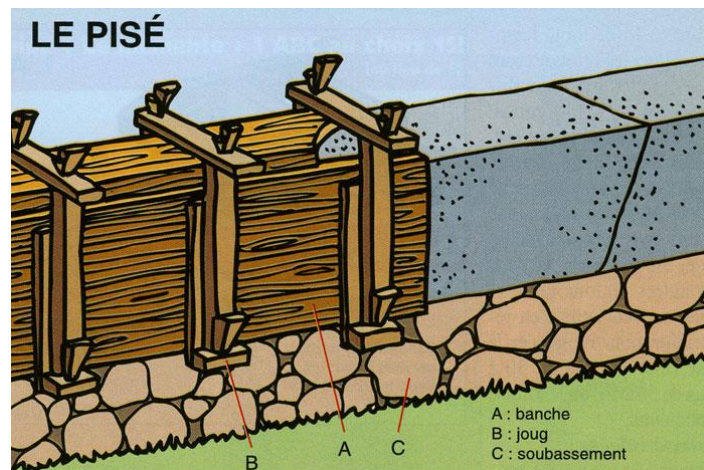


Figure 1.3 : Coffrage utilisé dans la conception d'un mur en pisé.

(Source : www.batirama.com)

Les aiguilles et lassonniers sont positionnées à intervalles réguliers afin d'accueillir les banches. On dispose un coffrage (**Figure I.4**), nommé la « banche », haut de 90 cm et constitué de clés, de poteaux et de planches, serré par des coins et des cordes. On remplit ensuite ce coffrage avec une couche de terre argileuse qui contient du sable, du limon et du gravier pour obtenir une épaisseur de 12 à 15 cm. Le maçon à l'aide de son « pisoir », « pisou » ou « dame » compacte la terre et la tasse jusqu'à obtenir une épaisseur de 8 à 10 cm. Traditionnellement, la dame était manuelle et en bois, composée d'un manche et d'un sabot rectangulaire pour épouser au mieux les formes du coffrage. Le sabot était en bois pour ne pas abimer le coffrage et limiter les nuisances sonores. De nos jours, la dame est devenue pneumatique ce qui facilite le travail. Pour les mêmes raisons, un sabot en bois est utilisé. La dame pneumatique ainsi pour faire une hauteur de banchée (80 à 90 cm), il faut une dizaine de couches compactées puis Le maçon décoffre pour permettre à la terre de sécher et de solidifier et recommence la même opération pour la banchée supérieure. Entre chaque banchée, il coule un lit de chaux qui sert de joint, les étapes de construire un mur en pisé sont représenter dans la (**Figure I. 4**). (**Champire, 2017**).



Figure I. 4: Les étapes de construire un mur en pisé. (Benchenna K, 2017).

Il existe un patrimoine très riche de constructions en pisé dont bon nombre d'entre elles sont inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. On peut citer quelques exemples parmi les plus connus comme certaines parties de la grande muraille de Chine (**Figure. I.5 a**), l'Alhambra de Grenade (**Figure I.5 b**), les tulous des Hakkas (**Figure I.5 c**), Meknes et Aït Ben Haddou à Marrakech (**Fig. I.5 d**), et de nombreuses fermes, églises, habitations rurales et manoirs en France (**Figure. I.3e**). El-Mahalla El-Manssoura, «le camp victorieux». Tlemcen (**Figure .I.6**). (**Benchenna K, 2017**).



Figure I. 5 : Patrimoine en pisé: (a) la grande muraille de Chine; (b) l’Alhambra de Grenade; (c) les tulous des Hakkas; (d) Meknes et Aït Ben Haddou à Marrakech; (e), (f) habitations rurales et manoirs en France (Benchenna K, 2017).



Figure I.6: Les Vestiges de El-Mahalla El-Manssoura, « Le camp Victorieux ». Tlemcen (Benchenna K, 2017).

I.3.2. Le torchis:

Torchis ou terre de garnissage est considéré comme le premier matériau composite de l’histoire car il est composé d’une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales ou poils d’animaux). Il est un matériau de remplissage non-porteur. C’est un béton naturel qui est utilisé pour les murs et les cloisons dans les constructions à ossature en bois qui est aussi utilisé pour faire des plafonds. A sec, il est très résistant mais ne résiste pas bien à l’humidité. (Wikipédia.com).

Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes et contiennent peu de sable de granulométrie élevée. De ce fait, elles fissurent facilement au séchage. C’est pourquoi on y ajoute des fibres végétales (généralement de la paille). On malaxe la terre-paille avec de l’eau jusqu’à obtenir une consistance plastique. Ce mélange est alors appliqué sur le lattis de bois fixée entre les poteaux, appelés colombes jusqu’à le remplir complètement puis on laisse sécher l’ensemble (Figure I.7). Une fois sec, on enduit généralement les murs avec de la terre stabilisée ou non. (Paulaus, 2015). On trouve de nombreuses maisons “à colombages” dans l’est et le nord de la France (Figure I.8).

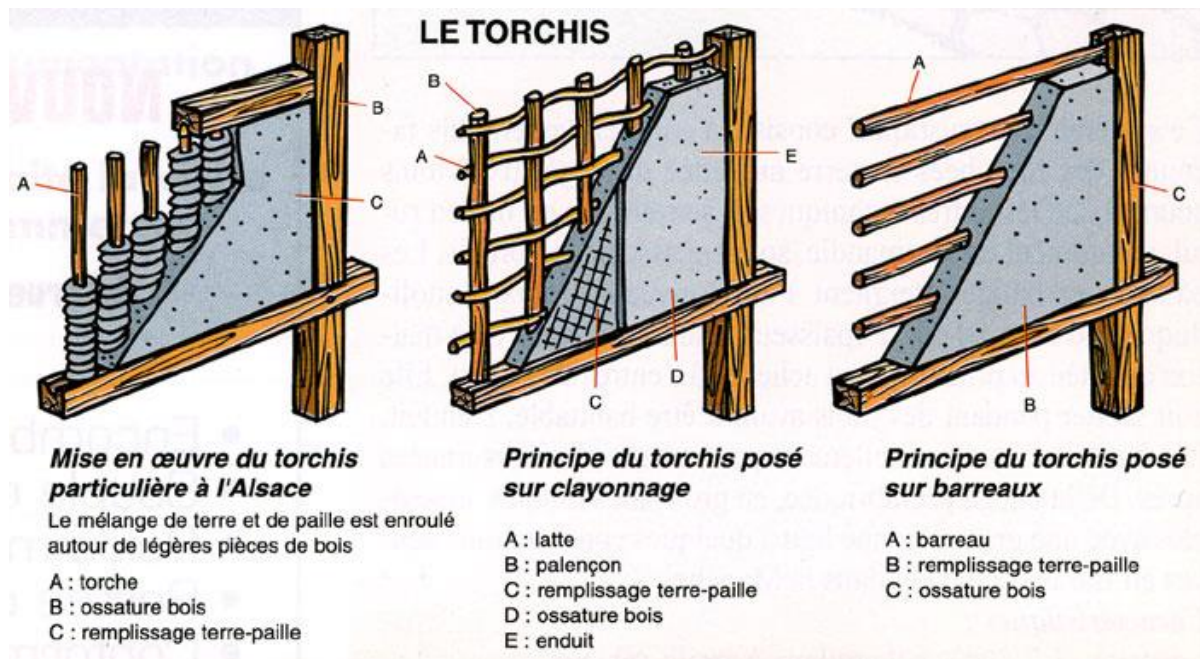


Figure I.7 : Techniques de construction en Torchis. (Source : www.batirama.com)



Figure I.8: Nord de la France, Normandie, Alsace Torchis traditionnel. (Source : www.maisonapart.com)

I.3.3. L'adobe :

Les adobes, également appelés banco en Afrique, sont « des briques de terre crue, façonnées à la main ou moulées à l'état plastique, puis séchées à l'air libre » (**Anger & Fontaine, 2009**). La terre utilisée pour la fabrication des adobes est de granulométrie relativement fine : elle ne doit contenir ni cailloux ni graviers étant donné les petites dimensions des moules et le travail manuel de la terre. Elle ne doit pas non plus être trop argileuse pour éviter les fissurations au séchage, en voici les proportions : 55 à 75% de sable, 10 à 28% de limon, 15 à 18% d'argile et moins de 3% de matière organique (**Doat, Hays, 1979**). Pour fabriquer des briques prismatiques, la terre est moulée à l'état plastique puis tassée à la main afin de chasser l'air. Elle peut alors être directement démoulée. On

laisse sécher les briques au soleil durant quelques jours (**Figure I.9**), Dès qu'elles peuvent être manipulées sans se déformer, on les dresse sur les panneresses afin qu'elles sèchent uniformément sur les faces de pose et d'appui. Une fois sèches, les briques sont stockées puis maçonnées avec un mortier de terre extrêmement collant (**Paulaus,2015**). Il s'agit de la technique de construction en terre la plus rapide. On recense une vingtaine de centres historiques bâtis en adobes (**Figure I.10 a, b**), comme Shibam au Yémen (surnommé le Manhattan du désert), Ghadamès en Libye (**Figure I.10 c**), ou encore Lima au Pérou.



Figure I.9 : Exemple de Fabrication d'Adobe.
(Benchenna k, 2017).



Figure I.10: (a), (b) Maison traditionnelle en Adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye.(Benchenna k, 2017).

I.3.4. La bauge :

La bauge est montée en piles de terre autoportantes sans l'aide de mortier ou de coffrage. Pour ce type de constructions, la terre est légèrement humidifiée et est souvent mélangée à des fibres végétales (**Figure I.11**). Cette terre ne doit pas contenir trop de cailloux ni de graviers. Selon la région, la terre sera donc sableuse ou plus fine et argileuse, La terre est ensuite piétinée par les hommes ou des animaux afin d'y incorporer les végétaux (paille, bruyère, ajonc, fougère, etc.). Une fois ce mélange réalisé, on dresse des couches successives sur le mur qui sont tassées au fur et à mesure à coup de trique (sorte de manche en bois). Ces couches dépassent largement de la largeur finie du mur. On réalise ainsi une "levée" d'environ 60 cm de hauteur. On laisse ensuite deux semaines s'écouler afin que la levée se tasse puis on rectifie ensuite la rectitude du mur grâce à un outil tranchant, la paroir (sorte de bêche plate), en se tenant debout sur le haut de la levée et en tranchant l'excédent de terre (**Champire, 2017**). La faible énergie de compactage conduit à de faibles densités, même si le retrait tend à l'augmenter. Des exemples de constructions utilisant la technique de bauge sont représentés dans la **Figure I.12**.



Figure I.11 : Un mur en bauge en construction en France. (Champire, 2017).



Figure I.12: Construction en terre empilée: (a) Maison à Sa'dah Yémen, (b) Bourrine de Vendée ; (c) Mosquée de Bobo Dioulasso. (Champire, 2017).

I.3.5. La brique de terre cru comprimée (BTC):

La brique de terre comprimée souvent dénommée BTC est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe, elle est composée de terre non-végétale (graviers, sable, limon, argile), un additif peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques finales des BTC dépendent de la qualité des matières premières (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure) » (Boubekeur & Houben, 1998). La terre est ensuite comprimée à l'aide d'une presse qui peut être manuelle ou motorisée, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique de dimensions et de forme bien définies. La brique de terre crue compactée est apparue en France au 18ème siècle avec le développement de la "Crécise", presse à brique dérivée d'un pressoir à vin, par l'architecte français Jean-François Cointeraux qui fut chargé de la construction de la ville de la Roche-Sur-Yon de 1804 à 1808. En 1952, la presse à brique manuelle du chilien Raul Ramirez du nom CINVA RAM, ouvre de réelles perspectives et est largement diffusée sur le continent africain.(Champire, 2017).

On trouve des constructions utilisant cette technique partout dans le monde et particulièrement en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie. Un exemple de maison moderne construite en Rhône-Alpes avec des BTC est reporté dans la **Figure I.13**.



Figure I.13: Maison construite avec des BTC (dont la tour est en pisé) en Rhône-Alpes, France. (Champire, 2017).

I.3.5.1. Critère de choix de la terre pour la fabrication du BTC:

Toutes les terres ne conviennent pas à la production de BTC. Le choix d'une bonne terre est essentiel. Les principaux critères de sélection sont la granularité et la plasticité. La présence de sels ou de matière organiques doit être évitée. Le producteur potentiel peut effectuer des tests de terrain simples, mais, dans le cas d'un projet de production à une certaine échelle, il est préférable de respecter les critères suivants :

- **Critère granulométrique**

La granularité du matériau utilisé sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture représenté sur la **Figure I-14** et dont elle épousera l'allure générale. Les matériaux dont la texture est inscrite dans le fuseau recommandé donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants (Selon la norme XP P13-901).

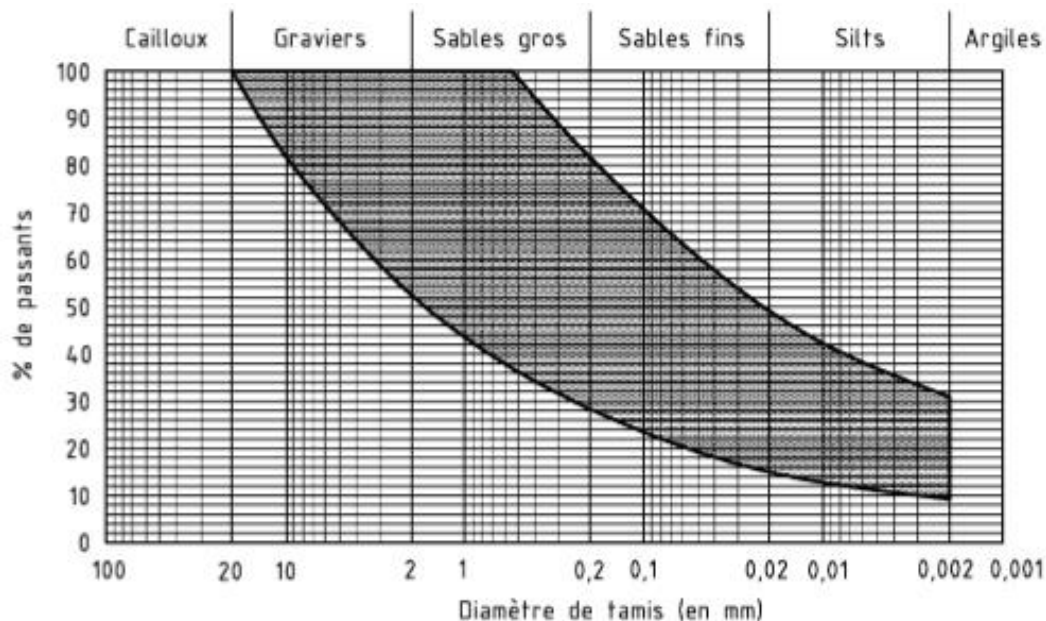


Figure I.14: le fuseau granulaire des terres utilisables pour les BTC (Selon la norme XP P13-901).

- **Critère de plasticité :**

La plasticité du matériau sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité de la **Figure I.15**. Les matériaux dont la plasticité n'est pas inscrite dans le fuseau peuvent quand même donner des résultats acceptables, mais il est recommandé de les soumettre à un ensemble d'essais permettant de vérifier leur convenance (selon la norme **AFNOR XP P13-901 :2001**).

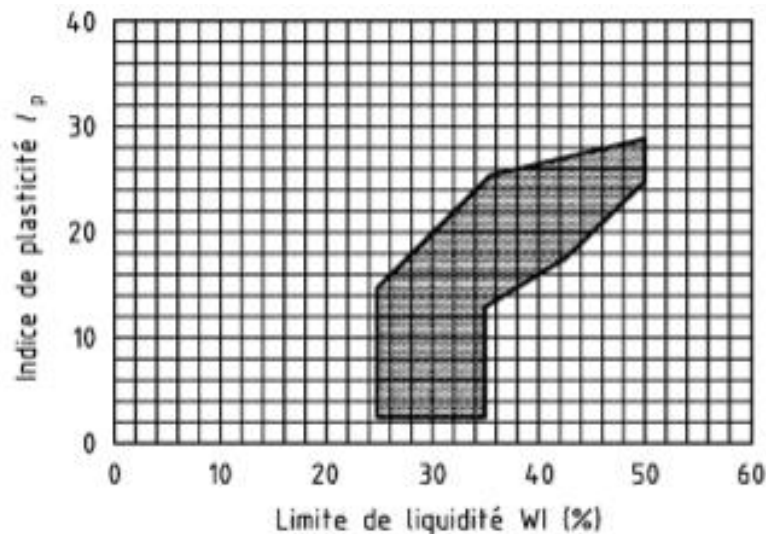


Figure I.15 : Le fuseau des indices de plasticité des terres utilisables pour les BTC (Selon la norme XP P13-901).

- **Nature des matériaux:**

Hormis les critères de granulométrie et de plasticité, le constructeur peut en avoir recours à l'utilisation de la classification des sols selon la norme **NF P 13-901**, et ceci pour avoir une idée claire concernant la nature du matériau utilisé (**Figure I.16**). Cette classification se base sur la combinaison de valeurs issues des essais de granulométrie, plasticité et valeur de bleu de méthylène. Elle débouche sur vingt-deux types de sol classés en six catégories (Classe A, B, C, D, R et F) :

A1 : matériau acceptable mais ayant un peu trop de fines.

A2 : matériau acceptable mais ayant trop de fines.

A3 : matériau acceptable mais demandant une attention particulière car relativement actif.

A4 : matériau délicat à utiliser car très actif.

B1 : matériau sableux demandant un rajout de fines pour être acceptable.

B2 : matériau acceptable ayant un léger déficit de fines.

B3 : matériau sableux demandant un rajout considérable de fines pour être acceptable.

B4 : matériau acceptable ayant un déficit de fines.

B5 : matériau acceptable mais manquant un peu de fines.

B6 : matériau acceptable mais manquant un peu de fines.

C1 : matériau trop graveleux, doit être criblé pour changer sa nature.

C2 : matériau trop graveleux, doit être criblé pour changer sa nature.

D1 : matériau sableux demandant un rajout de fines pour être acceptable.

D2 : matériau sableux demandant un rajout considérable de fines pour être acceptable.

D3 : matériau graveleux demandant un criblage pour changer sa nature et un rajout considérable de fines pour être acceptable.

R : matériaux qui ne conviennent pas.

F : matériaux qui demandent des essais d'identification poussés notamment en ce qui concerne leur analyse chimique et les essais mécaniques avant de pouvoir déterminer leur convenance.

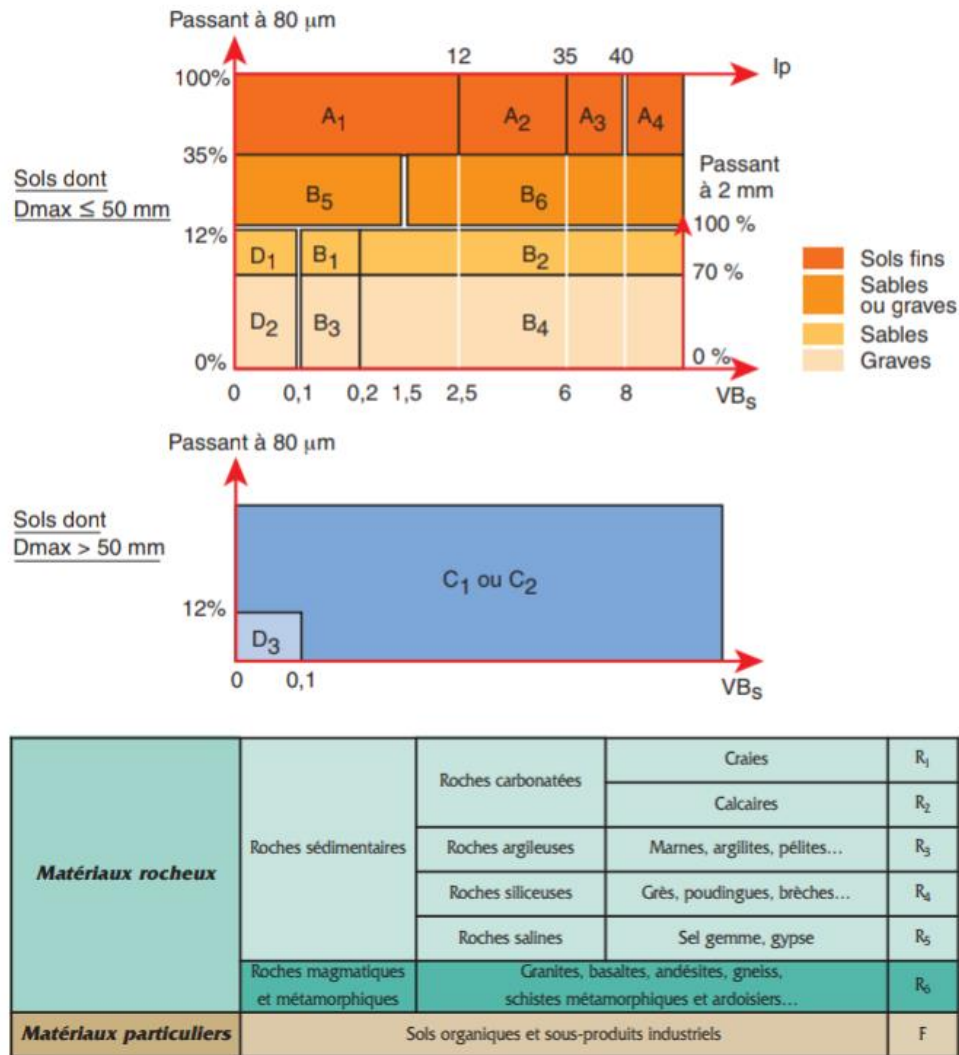


Figure I.16 : Classification des matériaux selon leur nature (selon la norme NF P 13-901).

I.4. Les formes de brique plus fréquentées :

Il existe pour les presses plusieurs sortes de moules produisant différents types de briques. Selon le travail qui sera réalisé (maçonnerie porteuse, maçonnerie de remplissage, maçonnerie armée, travaux particuliers, pose par juxtaposition, pose par emboîtement, ...), la brique la mieux adaptée sera choisie. Il existe ainsi

- **Les blocs évidés:** Ce type correspond à des briques de terre crue creuse (Figure I.17). Il ressemble aux corps creux utilisés dans les planchers de constructions.



Figure I.17: Exemple des briques en terre crue creuses. (Source : <http://www.amaco.org>).

- **Les blocs alvéolaires:** (Figure I.18) se sont des briques adaptées à la maçonnerie armée parce que la main d'œuvre trouve des facilités dans la mise en œuvre. (Benchenna k, 2017).



Figure I.18 : la Briques alvéolaires.(Amara et Belarbi, 2016)

- **Les blocs pleins :** Comme la brique de terre cuite, elle peut être de forme parallélépipédique (figure I.19) ou cubique. Ce type peut-être le meilleur qui résiste bien à la compression. (Benchenna k, 2017).

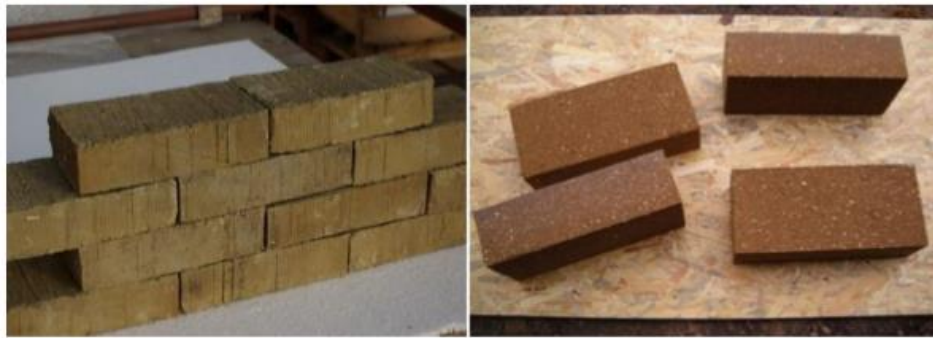


Figure I.19 :Brique en terre crue plein.(Amara et Belarbi, 2016)

- **Les blocs spéciaux :** Sont utilisées répondre à certaines besoins architecturaux. Ces formes sont illustrées sur la Figure I.20.(Benchenna k, 2017).

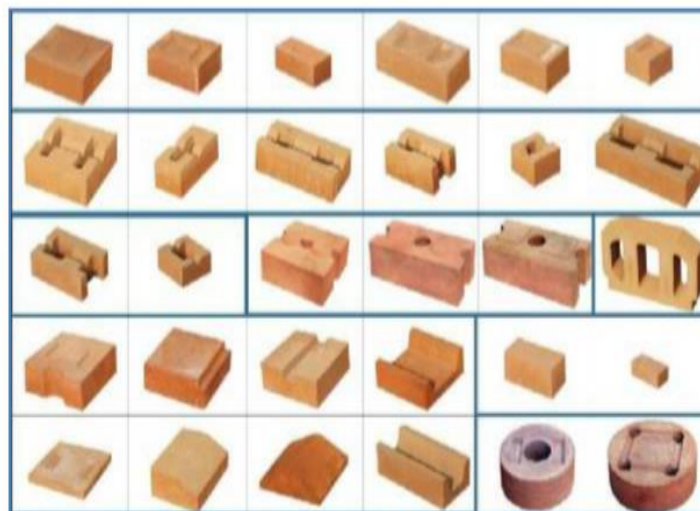


Figure I.20 : Les différents types de la brique de terre crue.(Benchenna k, 2017).

I.5. Les types de presses:

La presse utilisée dans la fabrication de brique est innovée après la 2^{ème} guerre mondiale. Plus exactement en 1956, un ingénieur colombien du nom de Raul Ramirez, invente une presse manuelle d'une conception extrêmement simple, qui permet avec une grande facilité de mise en œuvre (**Projet pavillon cinva-ram, 2010**). Cette appareil manuelle s'appelle CINVA-RAM (**Figure I.21**) donne une technique permet de fabriquer une brique de terre qui a remplacé le moule d'adobe. Dès les années 1970 et 1980 il y a eu l'apparition d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées et qui a permis un développement considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée.



Figure I.21: La première presse classique innovée par Raul Ramirez.
(Amara et Belarbi, 2016).

Le compactage de la terre crue se fait à l'aide des trois catégories de presses classées comme suite :

1. Presses manuelles :

En général, les contraintes appliquées lors d'un compactage par des presses manuelles sont de l'ordre de 2 MPa. Elles sont disponibles en abondance dans les pays pauvres qui ne coûtent pas cher et en plus elles sont faciles à transporter. La majorité des presses manuelles ont une structure fragile et facile à maintenir (**Figure I.22**). (Amara et Belarbi, 2016).

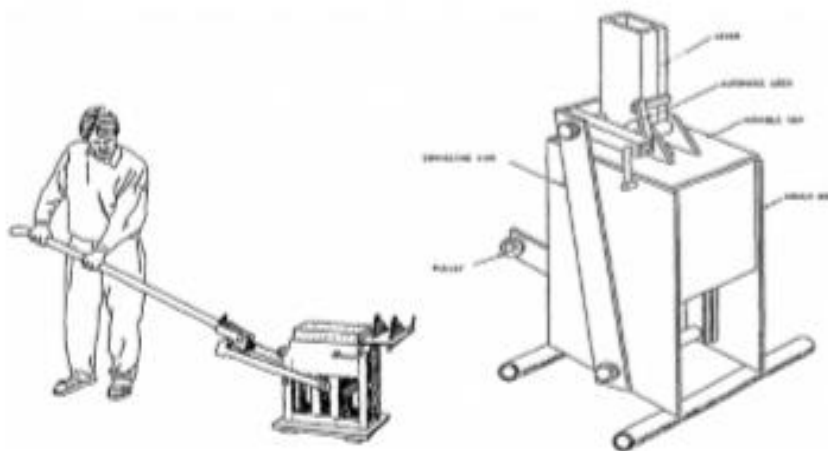


Figure I.22: Presses manuelles CINVA-RAM.
(Source : <https://unmaterialstudio.wordpress.com>)

2. Presses mécaniques:

Ces presses(**Figure I.21**) permettent de compresser des briques de terre crue par le déplacement d'un piston sur une course imposée mais là plus part de ces presses exercent des contraintes qui ne sont pas connues. (Amara et Belarbi, 2016)



Figure I.23: Une presse mécanique.(Source : <https://www.mecoconcept.com/fr/>)

3. Presses hydrauliques :

Les presses hydrauliques (**Figure I.24**) sont des machines nouvelles et commerciales ont une capacité d'appliquer une contrainte ou une pression qui peut aller jusqu'au 20 MPa Cette grande force de compression traduit le bon fonctionnement de ces outils lors d'un compactage de la brique de terre crue. Le système hydraulique permet de transférer l'énergie du moteur à un plateau de compactage. La production journalière de blocs est fort semblable dans les deux cas avec un minimum de 800 briques et un maximum de 3000 pour les premières et de 2000 pour les secondes. (Amara et Belarbi, 2016).



Figure I.24 : Une presse hydraulique.(Source : <http://www.cpmo.fr/fr>)

I.6. Avantages de la terre crue:

La terre crue compte plusieurs avantages, on peut citer par exemples.

- Économiques :
 - Réduction des couts de réalisation suite à l'utilisation de matériaux locaux.
 - une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre qui favorise l'économie locale.

- Écologiques :
 - réduction d'émission de CO₂, dont 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment.
 - réduction importante d'énergie consommée pour le transport du matériau de construction.
- Disponibilité :
 - la terre est disponible en quantités quasiment illimitées dans la plupart des régions.
 - production possible de l'échelle artisanale à l'échelle industrielle, possibilité de produire directement sur le chantier.
- Confort :
 - atténuation de l'amplitude et de la rapidité des variations climatiques à l'intérieur des bâtiments, grâce à une grande inertie thermique.
 - autorégulation du taux d'humidité à l'intérieur des réalisations grâce aux matériaux.
- Qualité architecturale :
 - produits aux dimensions standardisées, modulaires, réguliers et précis,
 - permet la réalisation des architectures aux murs apparents (**Mekkaoui, 2019**)

I.7. Les inconvénients de la terre crue:

La terre crue présente cependant quelques inconvénients :

- Grande disparité : En fonction de l'emplacement géographique, la composition de terre peut varier très fortement. Ceci empêche une "standardisation" de la préparation de la terre crue, et nécessite une certaine connaissance du terrain. Les techniques d'analyse récentes permettent de combler cette lacune, et les méthodes d'analyse moderne permettent de déterminer avec exactitude, au cas par cas, ce qu'il faut rajouter au mélange, afin d'obtenir avec précision les caractéristiques souhaitées.
- En fonction de sa composition, la terre crue est plus ou moins sensible aux variations de son état hydrique. (Source : <http://yaamsolidarite.blogspot.com>).

I.8. Conclusion:

La terre crue est utilisée pour la construction de bâtiments depuis reculée, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés. Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques s'il est employé de façon raisonnée et avec des moyens modernes.

Chapitre II

Techniques expérimentales pour caractérisation de la terre crue

Contenu

1	Introduction	17
2	Essais d'identification	17
2.1	Distribution granulométrique	17
2.2	Limites d'Atterberg	17
2.3	Surface spécifique	18
2.4	Valeur au bleu.....	19
2.5	Le compactage(Essai Proctor)	19
2.6	Mesure de pH	19
3	Essais mécaniques	20
3.1	Résistance a la compression simple	20
3.2	Résistance a la traction	22
4	Essais du durabilité	23
4.1	Isotherme de sorption	23
4.2	Absorption capillaire	24
4.3	Test d'érosion (SPRAY TEST)	25
4.4	Swinburne Accelerated Erosion Drip Test (SAET)	25
4.5	Essais de la brosse métallique (Wire Brush Tests)	26
5	Essais spécifiques	27
5.1	Diffractomètre a rayon x (DRX)	27
5.2	La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	28
5.3	Analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD/ATG)	29
5.4	Spectrofluorescence X	30
6	Conclusion	30

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

II.1. Introduction:

Construire en terre veut dire que la matière première est la terre. La question qui s'impose d'elle-même est la suivante : toutes les terres sont-elles constructibles ? La terre crue, autant qu'un matériau de construction à des caractéristique physiques et mécaniques ainsi que hygrothermiques dont la détermination et la connaissance influe directement le rendement et le fonctionnement du bâtiment construit avec. Dans ce chapitre nous allons citer l'ensemble des essais à effectuer pour une caractérisation du matériau terre.

II.2. Essais d'identification:

II.2.1. Distribution granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentage pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Il y a deux méthodes de tamisage:

- Tamisage par voie humide (NFP P 94-041) (**Figure II.1**).
- Tamisage à sec après lavage (NFNP P 94-056) (**Figure II.2**).



Figure II.1: Tamisage par voie humide.



Figure II.2: tamisage par voie sèche.

II.2.2. Limites d'Atterberg:

Pour caractériser une terre, il est nécessaire de déterminer ses limites d'Atterberg. Ces limites définissent les teneurs pondérales en eau correspondant à des états particuliers d'un sol :

- Limite de liquidité (WL) : teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état liquide.
- Limite de plasticité (WP) : teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide.

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

On définit aussi l'Indice de plasticité (IP) et qui représente le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité. Il est déterminé par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité (**Equation II.1**).

$$IP = WL - WP \text{ ----- (II.1)}$$

Il y a deux méthodes pour la détermination de WL (**Figure II.3**) :

- La Méthode de la coupelle de Casagrande (NF P94-051).
- La méthode de cône (NF P94-052-1)

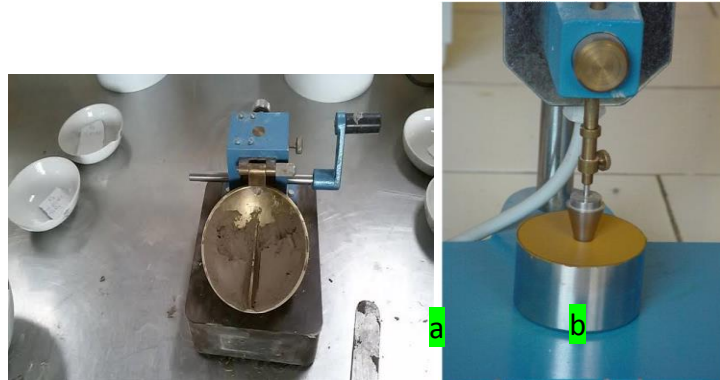


Figure II.3: Détermination des limites d'Atterberg :a) Méthode de la coupelle de Casagrande), b) La méthode de cône (wikipedia.org).

II.2.3. Surface spécifique:

La surface spécifique est définie comme la surface totale réelle d'une matière par unité de masse. Elle est généralement exprimée en m^2/kg ou m^2/g . C'est une mesure physique importante influençant les propriétés d'un matériau, particulièrement pour l'adsorption et les réactions de surface. En effet, la réactivité d'une poudre est fortement corrélée avec la finesse de ses particules car plus un matériau présente une grande surface de contact, plus il pourra agir avec d'autres composés. On peut déterminer la surface spécifique à l'aide d'un perméamètre de Blaine (norme NF EN 196-6) (**Figure II.4**), ou par la méthode Brunauer-Emmett-Teller (BET) (norme ISO 9277. 2010)

Tableau II.1: valeurs indicatives de surface spécifique pour les argiles, Vulliet et al, 2016.

Argile	Surface spécifique (m^2/kg)
Montmorillonite	400000-800000
Illite	80000-100000
Chlorite	80000
Kaolinite	10000-20000



Figure II.4: Perméamètre de Blaine(proviteq.com)

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

II.2.4. Valeur au bleu:

Les minéraux argileux présents dans les sols sont principalement issus de l'altération physico-chimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement lié à leur affinité pour l'eau (appelée activité), ce qui entraîne les phénomènes de gonflements, de plasticité et de cohésion constatés sur ces sols.

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 94 068. Il consiste à doser la quantité de bleu de méthylène absorbée par 50 à 80g de la fraction 0/5mm du matériau mise en suspension dans l'eau (**Figure II.5**). Cette quantité est rapportée à la fraction 0/50 mm du matériau.

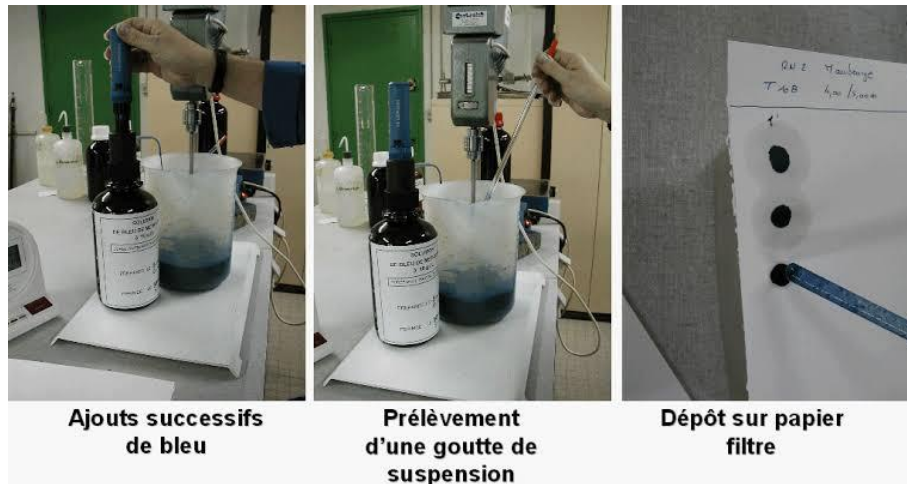


Figure II.5: Appareillage de l'essai de bleu, (ente-aix.fr).

II.2.5. Le compactage(Essai Proctor):

L'essai est mené selon la norme NF P 94-093. Il a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identique des échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes.

La **figure II.6** montre que la densité sèche (γ_d) varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale (W_{OPM}). Il existe deux types d'essais Proctor. Selon l'intensité de compactage utilisé, l'essai sera appelé essai Proctor normal ou essai Proctor modifié. (Babatounde,2017).

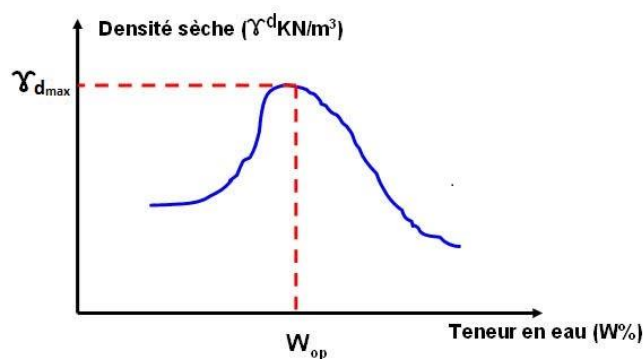


Figure II.6: Courbe de l'essai de Proctor

II.2.6. Mesure de pH:

La mesure du PH est déterminée à l'aide d'un pH-mètre (**Figure II.7**) sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évoluées ou carbonates.



Figure II.7: PH-mètre

II.3. ESSAIS MECANQUES:

II.3.1. Résistance à la compression simple:

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre crue compressée. Il est réalisé conformément à la norme **NF XP 13-901**. Il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de terre à une compression simple jusqu'à la rupture (Figure II.8), (Olivier et al, 1997).

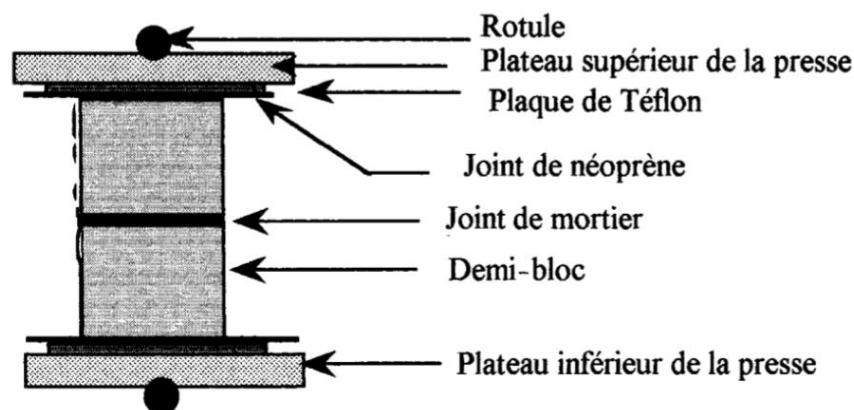


Figure II.8: Schéma du principe de l'essai de compression, (Olivier et al, 1997).

- **Résistance à la compression sèche**

Appareillage l'appareillage est constitué :

D'une presse pour matériaux durs, conforme aux normes NF p 18-411 (classe c) et NF p 18-412, et étalonnée dans les conditions de ces normes (en particulier, la planéité des plateaux de chargement et le centre d'application des forces ont dû être vérifiés) ; il est souhaitable que l'on puisse régler la vitesse de déplacement des plateaux pour que le bloc ne casse pas avant les quinze premières secondes de l'essai ;

-sable 0/3 mm, ciment alumineux fondu (ca, NF p 15-315) et ciment portland artificiel (cpa-cem i) ou feuilles de carton plein ou de contreplaqué, d'épaisseur de 3 ou 4 mm ;

-d'une balance de portée 20 kg, précision des lectures : 5 g ;

-d'une étuve ventilée à 40 °c 5 °c ;

-d'un réglet de précision gradué en millimètres ;

-d'une massette et d'un couteau pour obtenir deux demi-blocs. (Selon la norme : XP p13-901).

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

Préparation de l'échantillon:

Placer les blocs dans l'étuve et les dessécher jusqu'à masse constante, la masse est considérée constante lorsque deux pesées successives effectuées à 24 h d'intervalle font apparaître une diminution de masse $< 0,1 \%$ de la masse initiale. Laisser les blocs se stabiliser dans le laboratoire durant 2 h. Peser chaque bloc, soit : p_0 (en grammes) et mesurer chacune des dimensions effectives. Découper transversalement par sciage chacun des blocs en deux parties égales ou casser les blocs en deux de la manière suivante : poser le bloc sur un lit de sable fin, tracer une entaille sur les quatre faces du bloc indiquant l'endroit de la cassure. Poser un couteau en acier sur l'une des entailles et donner un coup de massette sur le couteau pour obtenir les deux demi-blocs(**Figure II.9**).

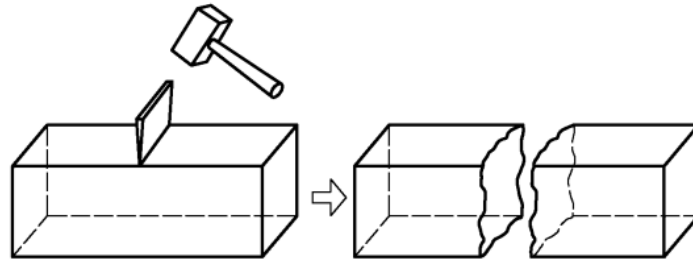


Figure II.9: coupe du bloc en deux demi –blocs, (selon la norme : XP p13-901).

Superposer les deux moitiés correspondantes de chaque bloc par leur face de pose préalablement humidifiée en prenant soin de les inverser(**Figure II.10**), la boutisse de l'une étant dans le même plan que la section de coupe de l'autre, en interposant entre elles une couche de mortier de ciment de 10 mm d'épaisseur maximale. Le mortier est constitué par un mélange de sable 0/3 mm et de ciment portland artificiel à raison de 1 volume de ciment pour 5 volumes de sable, de manière à ce que l'essai puisse se faire après 48 h de cure.(selon la norme : XP p13-901).



Figure II.10: la superposition des deux demi-blocs. (Selon la norme : XP p13-901).

Mode opératoire

Après prise et durcissement du mortier, mesurer les dimensions des surfaces haute et basse des éprouvettes ainsi constituées et calculer, pour chacune des éprouvettes, la moyenne entre ces deux surfaces. Surfacier les faces de pose inférieure et supérieure de chaque éprouvette au moyen d'un enduit.

Note il est possible d'utiliser un autre type de surfacage (feuilles de carton plein ou de contreplaqué, d'épaisseur de 3 ou 4 mm).

Effectuer l'essai sur une presse pour essais de matériaux durs.

Assurer le centrage en vérifiant sur les quatre côtés les distances entre les bords de l'éprouvette et les extrémités des plateaux à l'aide d'un réglet. Appliquer la charge d'une manière continue et sans à-coup, à une vitesse régulière de 0,02 mm/s, ou correspondant à une montée en pression de 0,15 et 0,25 Mpa/s jusqu'à rupture complète de l'éprouvette. Aucune correction ne doit être apportée aux

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

commandes de la machine d'essai immédiatement avant la rupture. Relever la charge maximale supportée par l'éprouvette au cours de l'essai. **(Selon la norme : XP p13-901).**

Expression des résultats

La contrainte de rupture r du bloc dans la section brute minimale, exprimée en méga pascals, s'obtient en divisant la valeur en déca newtons de la charge de rupture du bloc c , par 10 fois la valeur en centimètres carrés de la section brute minimale du bloc S_b : $R = \frac{c}{S_b \times 10}$ **(selon la norme : XP p13-901).**

• Résistance à la compression humide

Principe de l'essai:

Cet essai est identique à l'essai de compression sèche, à la seule différence que les éprouvettes testées ont été préalablement humidifiées selon le mode de préparation décrit au point suivant et en utilisant l'appareillage de l'essai de la résistance de la compression à voie sèche.

Préparation de l'échantillon:

Découper transversalement par sciage chacun des blocs en deux parties égales ou casser les blocs en deux de la manière décrite pour l'essai de la résistance de la compression à voie sèche. Immerger complètement les demi-blocs dans l'eau. Après 2 h, retirer le bloc de l'eau et l'essuyer avec un linge humide ou une peau de chamois. Superposer les deux moitiés correspondantes de chaque bloc par leur face de pose préalablement humidifiée en prenant soin de les inverser, la boutisse de l'une étant dans le même plan que la section de coupe de l'autre, en interposant entre elles une couche de mortier de ciment, tel que décrit dans pour l'essai de résistance à la compression sèche. Emballer les éprouvettes ainsi préparées dans un sac hermétique pendant au moins 48 h. Suivre ensuite le mode opératoire décrit pour l'essai de compression sèche et la même expression des résultats décrites. **(Selon la norme : XP p13-901).**

II.3.2. Résistance à la traction:

a) Résistance à la traction par fendage:

L'essai de traction par fendage (ou essai Brésilien) consiste à soumettre un bloc de terre cylindrique à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre **(Figure II.11)** Ce ci qui se traduit par une contrainte de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes.

$$R_t = 0,9 \times 10 (2F / \pi.l.h) \quad \text{II.2}$$

R_t : Résistance à la traction des blocs en (MPa);

F : Charge maximale supportée par les demi- blocs en kN;

l : Largeur du bloc en (cm).

h : Epaisseur du bloc en (cm).

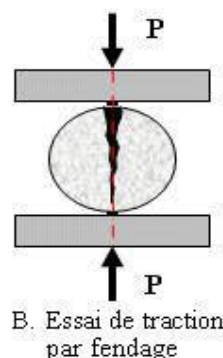


Figure II.11: Essai de traction par fendage.

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

b) Résistance à la traction par flexion:

L'éprouvette à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de l'éprouvette une force croissante jusqu'à rupture. Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure est en traction (Figure II.12). On ne peut donc utiliser l'équation II.3 pour obtenir des valeurs de résistance à la traction par flexion.

$$\sigma = \frac{3PL}{2e^2l} \quad (\text{II.3})$$

P: la charge à la rupture en kN

e: épaisseur du bloc en cm

L: la longueur du bloc en cm

l: la largeur du bloc en cm

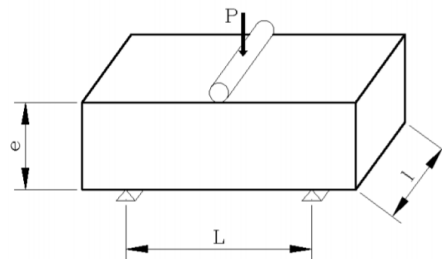


Figure II.12: Principe de l'essai de flexion 3 points (Claude et al 2003).

II.4.Essais de durabilité:

II.4.1. Isotherme d'adsorption-désorption:

Définition:

L'activité a_w de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température T. La courbe (**Figure II.13**) représentant, pour une température T donnée, la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR est appelée:

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec;
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.(JANNOT,2003)

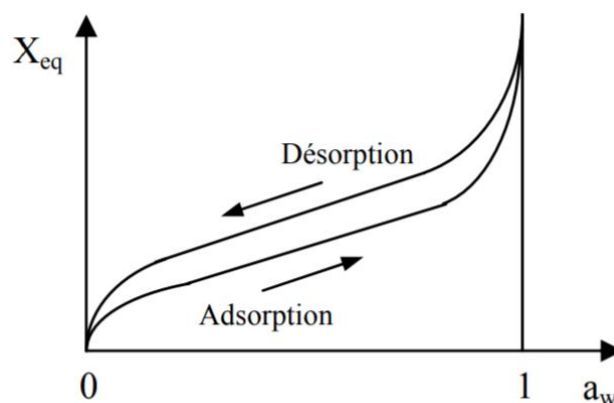


Figure II.13: Isotherme de sorption-désorption

chapitre II: Techniques expérimentales pour caractérisation du matériau terre

Il ya plusieurs méthodes de mesure d'isothermes de d'adsorption-désorption:

Méthodes gravimétriques:

- Méthode des solutions salines saturés.
- Méthode des solutions salines non saturés.

Méthodes dynamiques:

- Dynamic Vapor Sorption (DVS).
- Vapor Sorption Analyzer (VSA).

D'autres méthodes nommées « méthodes volumétriques » permettent aussi de réduire considérablement le temps de mesure. BELSORP-aqua3 dans la figure II.14 est l'un des équipements qui utilisent la théorie volumétrique pour la mesure des isothermes de sorption désorption.

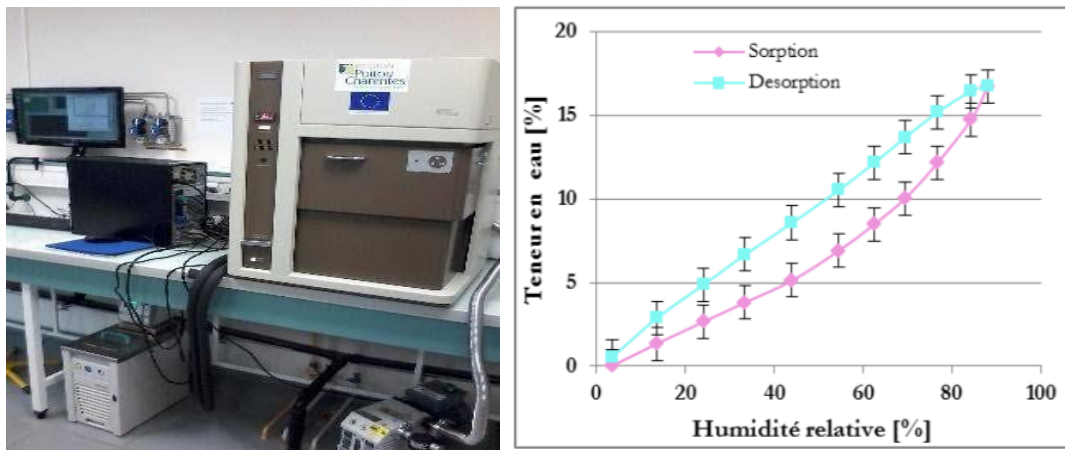


Figure II.14: L'appareil BELSORP-aqua3 avec un exemple de résultat d'isothermes de sorption-désorption (Alhabri, et al, 2015)

II.4.2. Absorption capillaire:

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13-901. Le principe est d'immerger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm (**Figure II.15**) et mesurer la quantité d'eau absorbée en fonction du temps. Le coefficient d'absorption d'eau C_b correspond au taux d'absorption après un temps égal 10 min. Il est exprimé par la formule(II. 2):

$$C_b = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(P_2 - P_1)}{S\sqrt{10}} \quad (\text{II.4})$$

Dans laquelle :

M: est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai ;

S: est la surface de la face immergée, en centimètres carrés ;

t: est la durée d'immersion du bloc, en minutes.

P1: la masse de la brique avant l'immersion, en grammes.

P2: la masse de la brique après l'immersion, en grammes.

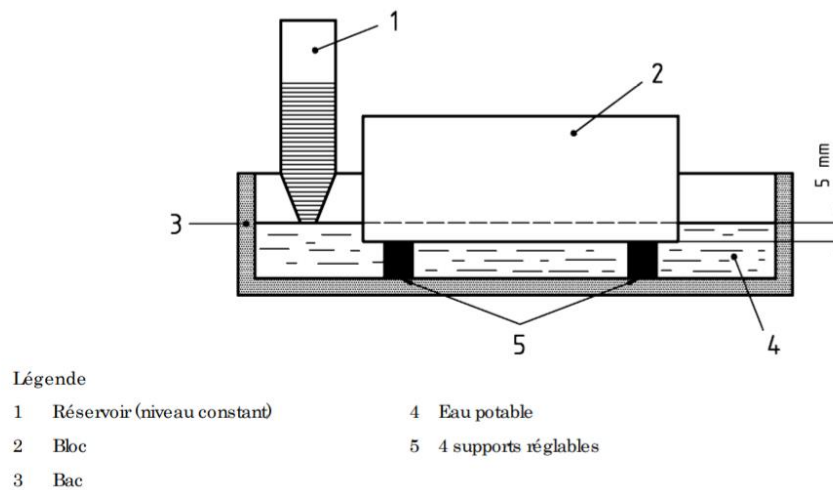


Figure II.15: Montage expérimental d'absorption capillaire.(Norme-NF-XP-P13-901)

II.4.3. Test d'érosion (spray test):

Cet essai est normalisé pour les murs en terre en Zimbabwe et en Australie, ([Norme SAZS-724, 2012]et [Norme-NZS-4298, 1998], (**Figure II.16**). Les essais sont effectués à partir d'une douche à une distance de 470 mm par rapport à la surface de l'échantillon, pendant une heure à des jets d'eau horizontaux. La pression appliquée est de l'ordre de 50 kPa constante durant l'essai avec une vitesse initiale des jets d'eau de 9.9m/s. La douche a 35 trous dont le diamètre est de 1.3 mm. La zone d'impact est comprise dans un cercle de diamètre 150 mm. La profondeur d'érosion maximale acceptable par heure est de 60 mm. Pour chaque 15 minutes, l'essai est interrompu pour mesurer la profondeur d'érosion et le taux d'érosion. (**Serbah, 2018**)

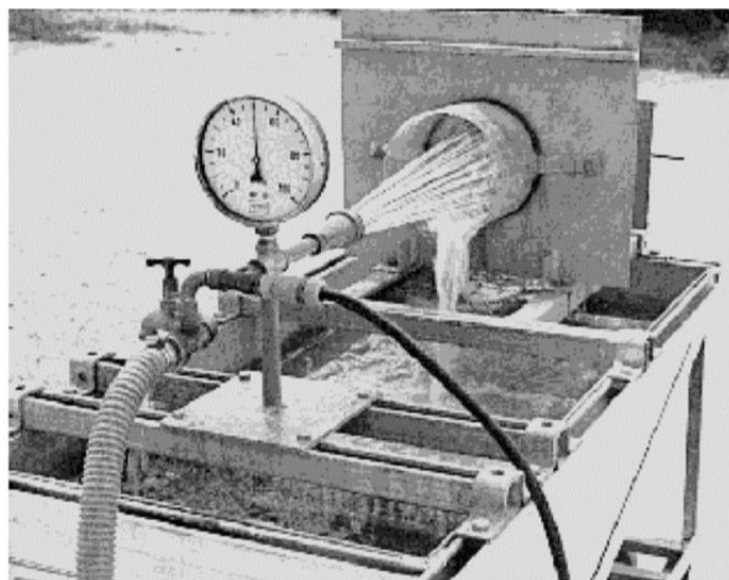


Figure II.16: SPRAY TEST(Serbah, 2018).

II.4.4. Swinburne Accelerated Erosion Drip Test (SAET):

Dans ce test, le jet d'eau est appliqué pendant 10 minutes avec la charge hydraulique de 1500 mm (**Figure II.17**). Le débit de ce test est approximatif de 1 l/min. Ce test est similaire que celui développé par Yttrup,1981 mais avec un jet d'eau continu via un tube de 5mm de diamètre au lieu des gouttes d'eau, (**Serbah, 2018**).

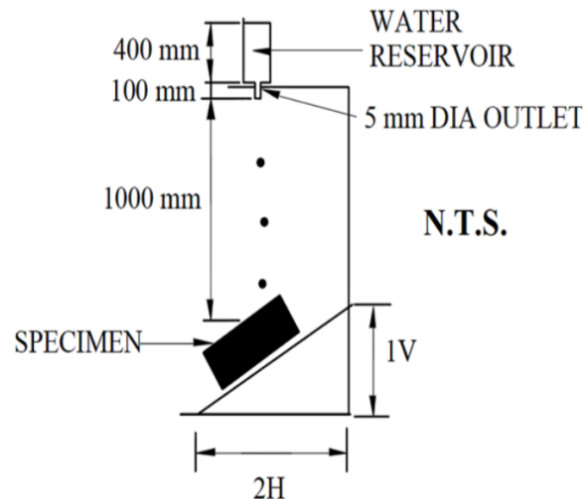


Figure II.17: SAET Drip Test(Serbah, 2018).

II.4.5. Essais d'abrasion (Wire Brush Tests):

Wire Brush Test est réalisé conformément à la norme ASTM D559(aussi la norme NF XP 13-901). Selon cette norme, le sol est compacté en trois couches dans un moule Proctor normal. Après le compactage, l'échantillon est stocké dans un environnement à humidité élevée, il est ensuite immergé dans l'eau pendant 5-6 heures. Ensuite, il est séché dans une étuve à 105 °C pendant 42 heures (**Figure II.18**). L'échantillon est alors brossé avec une brosse métallique (**Figure II.19**) par deux coups fermes avec une pression de brosse verticale de 1.5 kg (13 newton) pour enlever toutes les particules perdues durant le cycle de séchage-mouillage. Après avoir effectué 12 cycles de séchage- mouillage, la masse du matériau perdue est calculée en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon. Sur la base de ses résultats, Fitzmaurice, 1958 a proposé une limite acceptable pour la masse perdue maximale pour ce test, (tableau II.1)(**Serbah 2018**).

Tableau II.2:Limites de masse perdue proposé par Fitzmaurice, 1958 citer dans Serbah, 2018.

Type de développement	Perte de poids	
	En n'importe quel climat	En climat sec (500 mm par an)
Bâtiments permanentes	<5%	<10%
Bâtiments ruraux	<10%	<10%



Figure II.18: cycle mouillage-séchage.(Izemouren,2016)

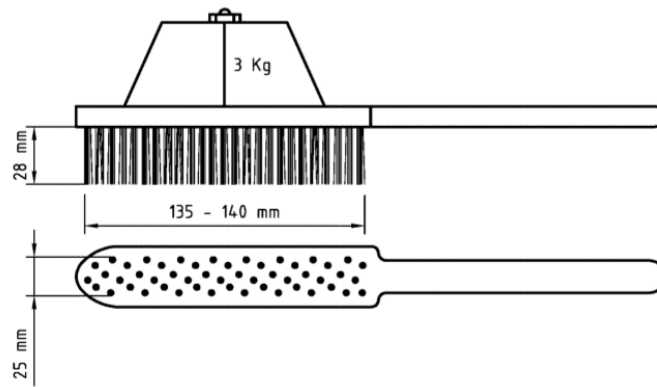


Figure II.19: la brosse métallique pour l'essai d'abrasion(Olivier, 2016)

II.5.ESSAIS SPECIFIQUES:

II.5.1. Diffractomètre a rayon X (DRX):

La diffraction des rayons X est une méthode d'identification des phases minérales cristallines présentes dans des échantillons(**Figure II.20**). Elle peut permettre la mise en évidence des phases amorphes et la semi quantification des minéraux identifiés.(**Miraucourt, 2017**) Elle consiste en l'enregistrement (**Figure II.21**) de l'intensité des rayons diffractés par un échantillon en fonction de l'angle entre les rayons incidents et l'échantillon placé sur un support. La position des pics de diffraction évolue en fonction de la distance inter-réticulaire (d). Chaque pic est associé à un plan atomique imaginaire passant par les atomes désigné par les indices de Miller (hkl).(**Mazhoud 2017**).

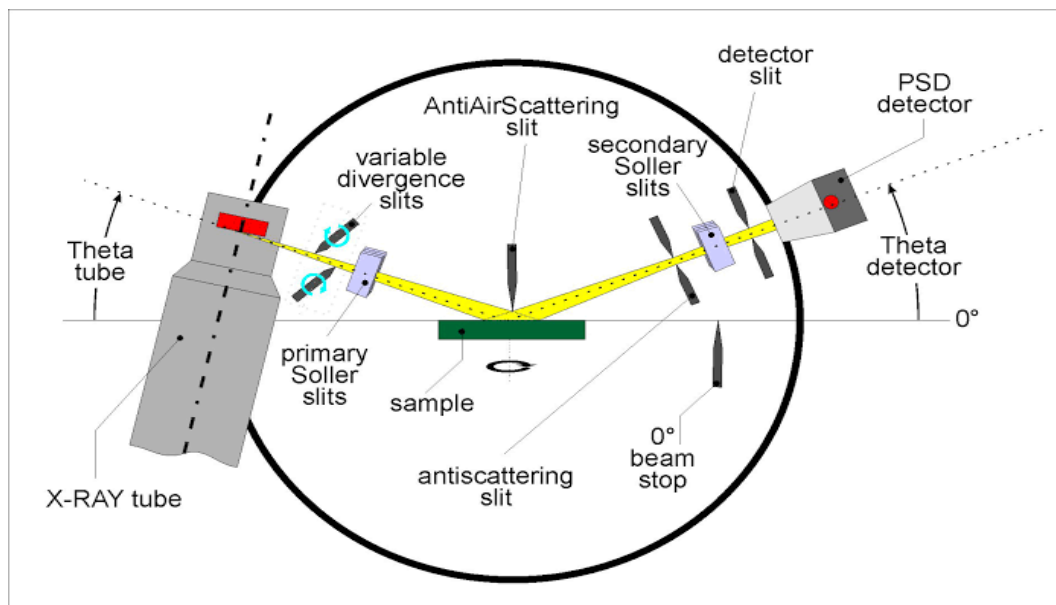


Figure II.20: Schéma simplifié d'un diffractomètre de poudre de rayon X, (cdalpha.univ-lyon1.fr).

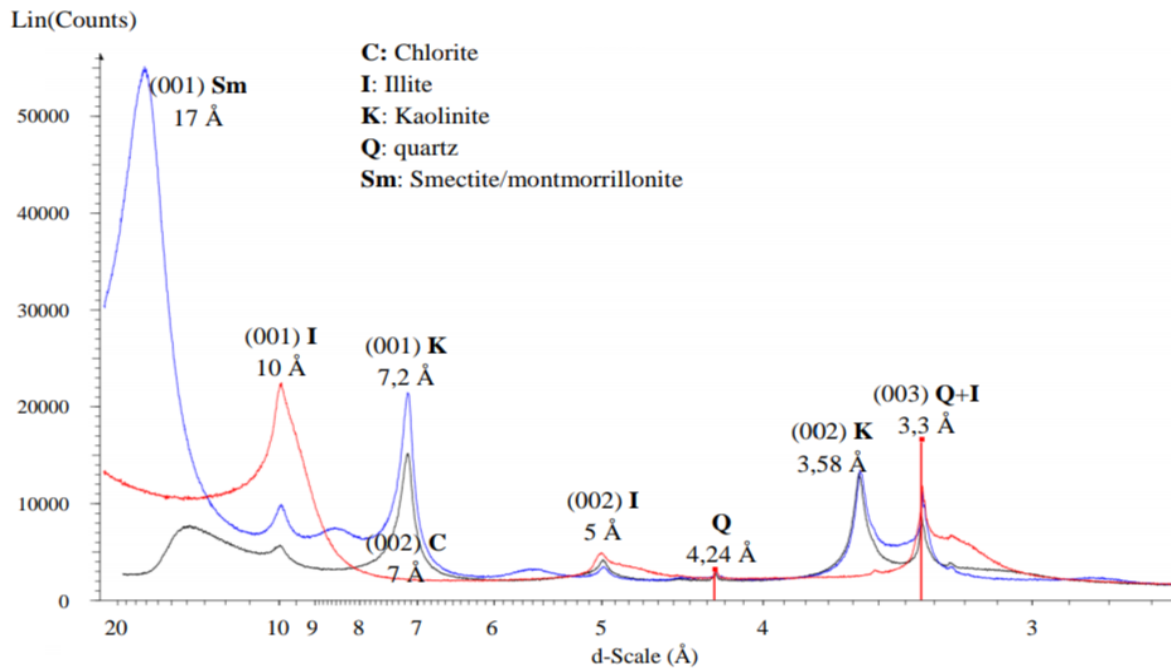


Figure II.21: DRX du sol de Tours-Bordeaux (Nguyen, 2015).

II.5.2. La Microscopie Electronique à Balayage (MEB):

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière (**Figure II.23**).

Le MEB (**Figure II. 22**) permet de fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition élémentaire d'un objet solide. La qualité des images obtenues en microscopie électronique à balayage dépend grandement de la qualité et de la préparation de l'échantillon à caractériser. (**Babatounde, 2017**)



Figure II.22: appareillage de MEB.(<https://www.marocmicroscopie.ma>)

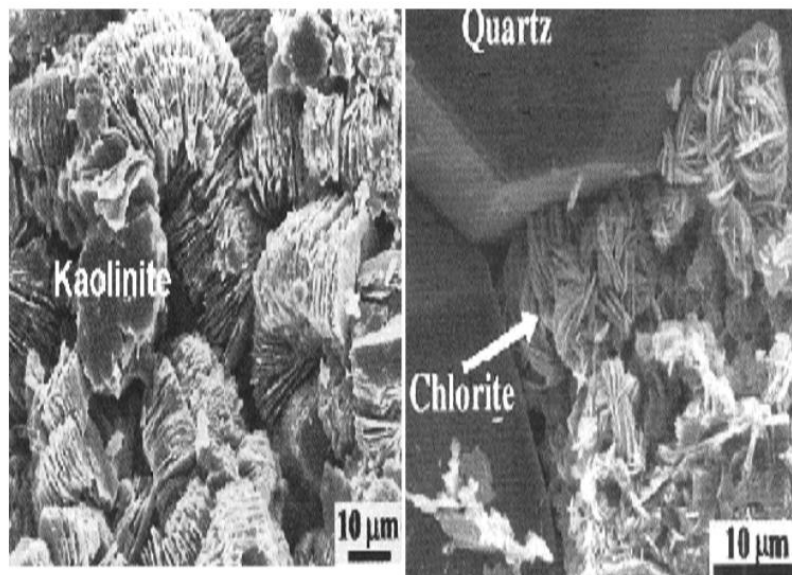


Figure II.23: Cristaux de chlorite et de kaolinite vus au microscope électronique à balayage, (Djadouf).

II.5.3. Analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD/ATG):

L'ATD est une méthode d'analyse qualitative et quantitative basée sur l'étude des phénomènes thermiques qui se produisent au sein d'une substance chauffée ou refroidie de manière régulière (Babatounde, 2017). Elle apporte une contribution à la détermination de la composition minéralogique des matériaux et est complémentaire à l'analyse par diffraction de rayons X. Lors des différentes réactions chimiques et transformations minéralogiques qui interviennent par exemple au cours de la cuisson d'un minéral argileux, les phénomènes thermiques se traduisent par un dégagement de chaleur (réaction exothermique) ou une absorption de la chaleur (réaction endothermique). Ces phénomènes sont déterminés en fonction de l'évolution de la température (Figure II.24). (Babatounde, 2017)

L'ATG permet de suivre les variations de masse d'un échantillon lors d'un traitement thermique. Elle peut donc être utilisée dans ce cas pour suivre l'évolution de la masse d'un composé pendant un cycle thermique (Babatounde, 2017).

L'ATD et L'ATG sont effectuées simultanément entre 20°C et 1250°C à l'aide du dispositif SETARAM Scientific & Industrial Equipment série Setsys 24 (Figure II.25) ou équivalent. Cet appareil permet de coupler l'analyse thermique différentielle et l'analyse thermogravimétrique. (Babatounde, 2017)

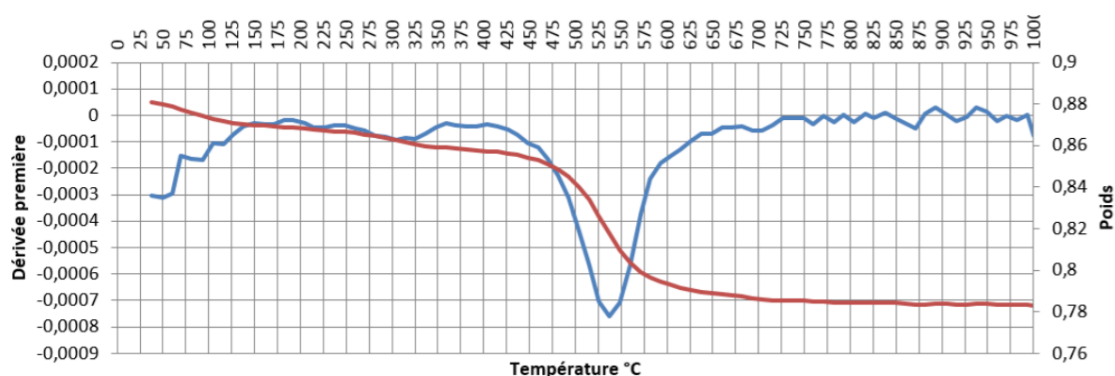


Figure II.24: L'analyse thermique gravimétrique d'un matériau (Miraucourt, 2017)

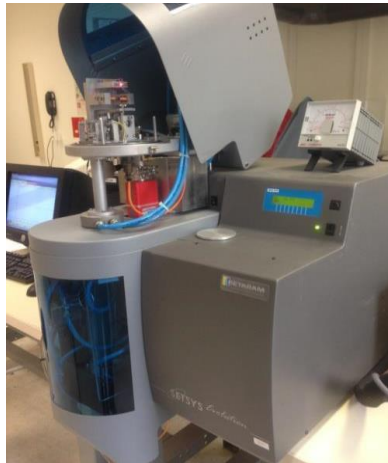


Figure II.25: SETARAM Scientific & Industrial Equipment série Setsys 24.(Babatounde, 2017)

II.5.4. Spectrofluorescence X:

La Spectrofluorescence X (**Figure II.26**) permet de connaître la composition chimique élémentaire de la matière. Les majeurs s'expriment en oxydes et dénote de la présence de certains éléments du tableau périodique plus lourds que le fluor (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O et P_2O_5) (**Miraucourt, 2017**).



Figure II.26: Spectromètre de fluorescence X. (<https://images.app.goo.gl/YodpZbegnbQ9ATBR6>)

II.6.CONCLUSION:

Ce chapitre a permis de présenter les différentes techniques de caractérisation physiques, chimiques, mécanique et hydrique. Ces essais sont nécessaires pour une bonne caractérisation du matériau terre.

Chapitre III

Les techniques de stabilisation

Contenu

1.	Introduction	31
2.	Définition	31
3.	Objectifs.	31
4.	Les principales techniques.	31
4.1.	La stabilisation mécanique(Le compactage).....	31
4.1.1.	Mode de compactage	31
4.1.2.	Contrainte de compactage.....	32
4.2.	La stabilisation physique.	32
4.3.	La stabilisation chimique.	33
4.3.1.	La stabilisation au ciment.	34
4.3.2.	La stabilisation à la chaux.	34
4.3.3.	La stabilisation à la pouzzolane.	35
4.3.3.1.	La composition chimique de la pouzzolane.	36
4.3.4.	Processus physico-chimiques induits.	36
4.3.4.1.	Hydratation et ionisation de la chaux.	36
4.3.4.2.	Échanges cationiques.....	37
4.3.4.3.	Carbonatation.	37
4.3.4.4.	Floculation/agrégation des particules argileuses.	37
4.3.4.5.	Réaction pouzzolanique.	38
4.3.4.6.	Modification de la capacité d'échange cationique.	38
4.3.5.	Eléments perturbateur de la stabilisation.	39
4.3.6.	La stabilisation au bitume.	41
4.4.	La stabilisation par les fibres.	42
4.4.1.	Les fibres naturelles.	42
4.4.1.1.	Les fibres végétales.....	43
4.4.1.2.	Les fibres animales.	43
4.4.1.3.	Les fibres minérales.....	43
5.	Conclusion	43

III.1. Introduction:

Le choix de la matière première avec des caractéristiques bien défini n'est pas suffisant dans le domaine de construction en terre. Couramment on est obligé d'aller vers la stabilisation pour résoudre certains problèmes reliés généralement à la durabilité du matériau notamment en contact avec de l'eau.

Ce chapitre sera consacré à la définition des différents techniques de stabilisation utilisée pour la stabilisation du matériau terre.

III.2. Définition:

La stabilisation est l'ensemble des modifications et des traitements effectués sur le mélange ordinaire (terre-eau-air) de la brique pour obtenir des caractéristiques favorables en connaissant la capacité économique et les techniques de mise en œuvre disponibles.

III.3. Objectifs:

La stabilisation doit permettre:

- la réduction de la porosité ;
- la diminution du retrait et gonflement ;
- l'obtention d'une meilleure cohésion ;
- l'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface ;
- l'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.
- L'amélioration de la durabilité du matériau notamment en contact avec de l'eau.

III.4. Les principales techniques:

On dénombre trois principaux procédés de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

III.4.1. La stabilisation mécanique (Le compactage):

La stabilisation du sol par compactage est utilisée comme un terme général pour la stabilisation mécanique. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques développées malgré qu'il reste sensible à l'eau. Alors ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure. (IZEMMOUREN, 2016).

Le compactage est le moyen de stabilisation mécanique le plus utilisé. Il peut être associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par les paramètres suivants : le mode de compactage, la teneur en eau, l'énergie et la texture de la terre.

III.4.1.1. Modes de compactage:

Il y a quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre. Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de l'ordre de 50 % par rapport à la vibro-compression et d'environ 20 % par rapport à la compression statique. (Babatounde, 2017).

Mesbah et al. (1999), ont montré qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux. En conséquence, l'essai Proctor s'est avéré peu utilisable et non représentatif des conditions de fabrication des briques compressées. En effet, d'autre part, il est à peu près impossible de fabriquer des éprouvettes à partir du moule Proctor, mais surtout, il a été démontré qu'il n'existe pas de relation entre l'« énergie Proctor » et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs. Il est préférable de procéder comme sur chantier, c'est-à-dire rechercher la teneur en eau optimale avec la presse à bloc directement. (Babatounde,2017).

III.4.1.2. Contrainte de compactage:

Quels que soient le type de terre et la méthode de compactage utilisé, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale (w_{opt}), et conduit à une plus grande densité sèche, comme le montre la **Figure III.1**. Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi, à la presse, les très fortes pressions peuvent produire un laminage des blocs fabriqués.

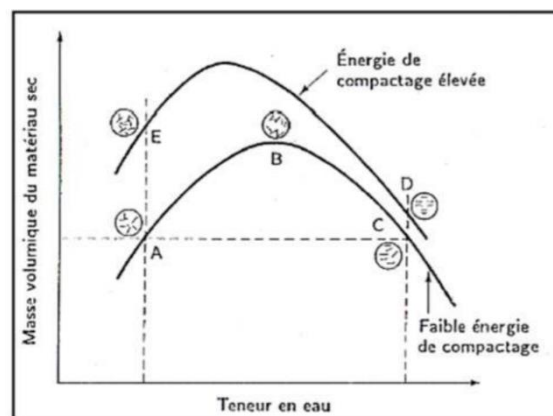


Figure III.1: Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Babatounde,2017).

III.4.2. La stabilisation physique:

Elle se pratique par la modification des propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas, on intervient directement sur la texture. Le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.(Babatounde,2017).

La **Figure III.2** présente la courbe granulométrique d'un sol utilisée dans la fabrication de briques comprimée ainsi que des mélanges (sol, sable) avec la courbe idéale et le fuseau limite pour des briques de terre stabilisée (Izemmourena et Guettala, 2014). L'analyse des courbes granulométriques montre que l'ajout du sable permet de corriger de la granularité de la terre étudiée de façon à se localiser parallèlement à la courbe idéale. On constate aussi que l'augmentation du pourcentage de sable induit un dépassement de la limite inférieure du fuseau.

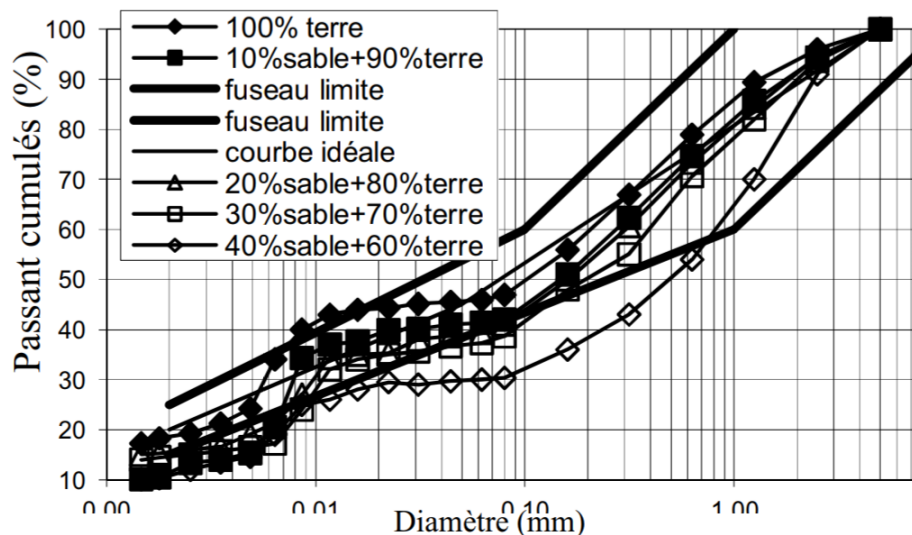


Figure III.2: courbe granulométrique des mélanges (sol, sable) avec la courbe idéale et le fuseau limite pour les briques de terre stabilisée, (Izemmouren et Guettala, 2014).

III.4.3. La stabilisation chimique:

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre par l'intermédiaire de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles (Izemmouren, 2016). De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent des améliorations différentes à la terre selon leur propriété. Il existe deux manières de traitement de la terre par les produits chimiques:

- Un traitement dans la masse: (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- Un traitement de surface: (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari, 1989).

Le choix du stabilisant dépend de plusieurs facteurs dont les critères sont résumés dans la **Figure III.3**. Le choix de la stabilisation hydraulique est basé sur le passants N°200 et l'indice de plasticité.

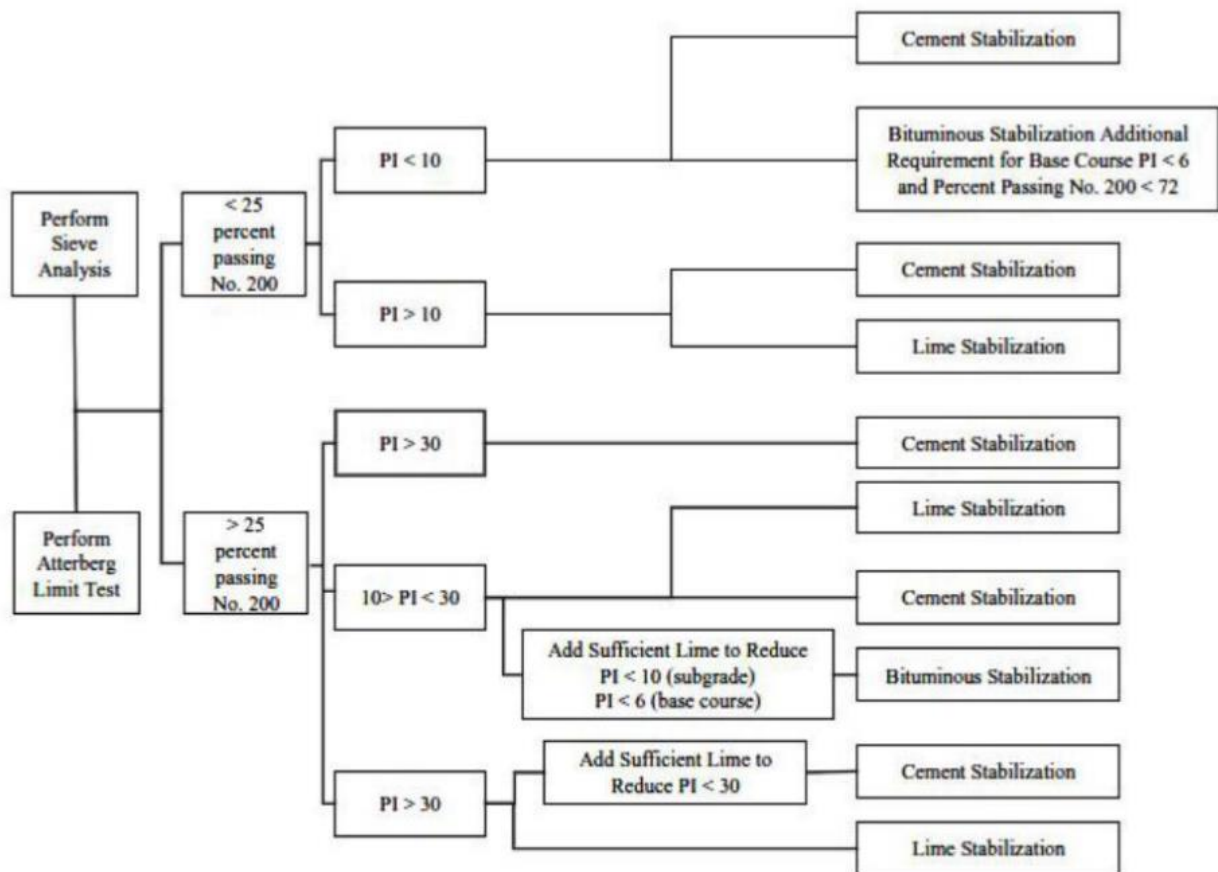


Figure III.3: Choix de la méthode de stabilisation (Curin et al. 1976; Bensalem Ahmed, 2010).

III.4.3.1. La stabilisation au ciment:

Le ciment est sans doute l'un des stabilisants les plus utilisés pour les blocs de terre comprimés. L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa durabilité à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %) (Houben, 1996). D'après Venuat (Venuat, 1980), tous les ciments normalisés conviennent en principe pour la stabilisation des sols, mais la préférence est donnée aux ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire. Alors que d'autres auteurs (Doat, 1979), préconisent un type de ciment selon la nature du sol : - Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite C_3S et bélite C_2S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, $Ca(OH)_2$. Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % ($I_p < 25\%$) (Verdeyen, 1971).

Concernant le dosage préconisé, en général, un dosage de 5 à 6 % de ciment est utilisé pour obtenir des résultats satisfaisants. Un dosage à 8 % de ciment constitue souvent une limite supérieure économiquement acceptable (Doat, 1979). D'après Gooding (Gooding, 1993), le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12 % en masse de ciment, semble être le bloc le plus courant (Taallah, 2014).

III.4.3.2. La stabilisation à la chaux:

La chaux est parmi les matériaux les plus anciens, utilisés par les humains. Le premier usage documenté de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 ans av. J.-C., alors que les Égyptiens l'utilisaient pour plâtrer les pyramides (Izemmouren, 2016). La stabilisation à la

chaux des chaussées a été utilisée par les Romains et autres civilisations. Aujourd'hui, elle rencontre un intérêt croissant dans le domaine de la construction (**Izemouren,2016**). On distingue différents types de chaux utilisés dans la stabilisation des sols:

- La chaux vive ;
- La chaux éteinte ;
- La chaux hydraulique

La chaux éteinte (**Figure III.4**) est couramment utilisée dans la stabilisation, par contre la chaux vive, son emploi est limité et il faut la manipuler avec précaution. Elle doit être maintenue à l'abri de l'humidité. Cependant, elle est très efficace par rapport à la chaux éteinte vu qu'elle apporte plus d'ions calcium (Houben et Guillaud, 1994).

Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre (**Houben, 2006**).



Figure III.4: la chaux éteinte .(www.all.biz)

III.4.3.3. La stabilisation à la pouzzolane:

Les pouzzolanes naturelles(**Figure III.5**)sont des roches volcaniques (pyroclastites) possédant une texture scoriacée et alvéolaire de couleur rouge ou noire avec toutes les teintes intermédiaires. Leur formation peut résulter de l'expansion rapide d'un magma en surface accompagnée d'un dégazage ou d'une interaction entre le magma et de l'eau (**Izemouren,2016**). On les distingue des basaltes qui ont un aspect massif alors que les matériaux pouzzolaniques sont poreux, leur refroidissement rapide provoque la présence d'une structure amorphe vitreuse. Le terme pouzzolane est étendu à tous les matériaux inorganiques, naturels ou artificiels qui ont des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire la capacité d'un matériau à faire prise en présence de chaux et de l'eau c'est la réaction pouzzolanique que vous devez ajouter avec es processus chimiques induits. (**Izemouren,2016**).



Figure III.5: la pouzzolane naturelle. (www.construction-maison.ooreka.fr)

III.4.3.3.1. La composition chimique de la pouzzolane:

La composition chimique des pouzzolanes volcaniques incohérentes varie dans de larges proportions, la silice et l'alumine sont toutefois les constituants majoritaires. Les éléments suivants sont des oxydes de fer, de calcium et des oxydes de magnésium. La teneur en alcalis n'est pas élevée, mais peut varier entre 3 % et 10 %. La perte au feu est généralement faible, mais peut atteindre à 9 % dans certaines pouzzolanes. L'analyse de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes est présentée au **(Tableau III.1)**.

Tableau III.1: Compositions Chimiques (%) de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes, (Izemouren,2016).

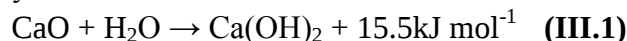
	Pouzzolane	Pays	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
Incohérentes	Bacoli	Italie	53,1	17,9	4,3	9,1	1,2	3,1	7,6	0,65	3,1
	Barile	Italie	44,1	19,2	9,8	12,3	6,7	1,6	1,1	tr	4,4
	Salone	Italie	46,8	18,4	10,3	8,5	4,8	1,0	6,4	tr,	3,8
	Vizzini	Italie	50,5	16,8	11,6	4,9	5,2	0,9	0,2	0,15	9,7
	Volvic	France	54,3	16,8				4,5	2,6		
	Terre de Santorin	Grèce	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1				3,5
	Rhine	Allemagne	58,9	19,5	2,9	2,5	1,3	6,1	4,5		2,2
	Rhyolite	USA	65,7	15,9	2,5	3,4	1,3	5,0	1,9		3,4
	Furue shirasu	Japon	69,3	14,6	1,0	2,6		3,0	2,4		1,9
	Higashi Matsuyama	Japon	71,8	11,5	1,1	1,1	0,5	1,5	2,6		6,5

III.4.3.4. Processus physico-chimiques induits:

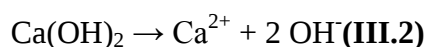
L'addition de chaux à un sol conduit au développement de différents processus physico-chimiques. Trois grands processus peuvent être cités : l'hydratation et l'ionisation de la chaux, les réactions d'échanges cationiques menant à la floculation/agrégation des particules argileuses, et les réactions pouzzolaniques. En plus de ces processus, un autre mécanisme non recherché peut se produire : il s'agit de la carbonatation de la chaux. Ce mécanisme n'est pas systématique et dépend des conditions dans lesquelles le traitement est réalisé. **(Barbara,2008)**.

III.4.3.4.1. Hydratation et ionisation de la chaux:

L'ajout de chaux vive, CaO, à un sol humide peut entraîner une réaction exothermique **(Equation1)**. Celle-ci conduit à la formation d'hydroxyde de calcium, Ca(OH)₂, lorsque les conditions nécessaires à sa formation sont atteintes (pH de 12,4 et concentration en calcium de la solution de 22 mmol.L⁻¹) **(Barbara,2008)**. L'ampleur de cette réaction d'hydratation, c'est-à-dire la quantité de chaux vive s'hydratant reste toutefois indéterminée.



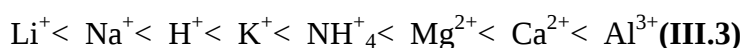
Une fois formé l'hydroxyde de calcium, ou portlandite, peut être dissout selon la réaction d'ionisation suivante **(2)** :



Le caractère exothermique de la réaction d'hydratation conduit en une baisse immédiate de la teneur en eau du sol traité.

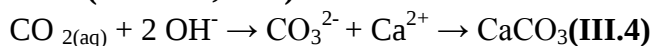
III.4.3.4.2. Échanges cationiques:

Le contact d'une particule argileuse avec un fluide ayant une composition cationique différente de la sienne conduit à un déséquilibre chimique. Celui-ci résulte en des échanges cationiques entre le fluide et l'argile. Ces échanges sont gouvernés par plusieurs paramètres tels que la nature des cations interfoliaires de l'argile, la nature des cations présents dans le fluide et leurs concentrations. La valence des cations apparaît comme un des facteurs déterminant de ces échanges. En effet, d'après les séries lyotropiques **(III.3)**, les cations présentant de faibles valences peuvent être facilement remplacés par les cations présentant de fortes valences. Ces lois sont, par ailleurs, modulées par la taille relative de l'ion hydraté. Ainsi, pour des cations présentant des valences identiques, plus l'ion est gros, plus sa capacité de remplacement sera grande. La concentration des cations en solution joue aussi un rôle important. En effet, un cation de faible valence peut extraire un cation de forte valence si la concentration du premier dans la solution est plus importante. **(Barbara,2008).**

**III.4.3.4.3. Carbonatation:**

Selon Thompson (1966), la carbonatation de la chaux peut être considérée comme un mécanisme négatif puisqu'il conduit à la consommation d'une partie de la chaux pour la formation de carbonates de calcium.

Le mécanisme de carbonatation de la chaux dans les sols traités peut être décrit par la succession de deux réactions **(équation III.4)**. Le dioxyde de carbone une fois dissout dans l'eau interstitielle réagit avec les ions hydroxyles, OH^- , libérés suite à l'ajout de chaux pour former des ions carbonates. Ces derniers peuvent alors se combiner avec les ions Ca^{2+} apportés par la chaux pour former du carbonate de calcium. **(Barbara,2008).**

**III.4.3.4.4. Floculation/agrégation des particules argileuses:**

Dans le cas d'une argile sodique, les échanges cationiques se produisant entre les ions interfoliaires Na^+ et Ca^{2+} apportés par la chaux, peuvent conduire, selon l'état d'hydratation des ions Na^+ , en une réduction de la double couche. Par ailleurs, quelle que soit la nature de l'argile, la grande quantité d'ions calcium libérés suite à l'ajout de chaux, conduit aussi à une réduction de la charge nette négative des particules argileuses via un phénomène appelé en anglais « crowding effect » **(Barbara,2008)**. Ce phénomène correspond à un amassement des ions calcium à la surface des particules argileuses. La réduction de la charge nette entraîne une diminution des forces de répulsion entre les particules argileuses. Ces phénomènes résultent en la floculation des particules argileuses. Cette floculation serait à l'origine de l'agrégation des particules argileuses. Les travaux de Diamond & Kinter (1965) et de Stocker (1974) cité dans **(Barbara,2008)**, suggèrent qu'il pourrait être expliqué par la précipitation immédiate entre les particules de sol de portlandite et de matériaux cimentaires venant lier les particules de sol entre elles. De son côté, Verhasselt (1990) cité dans **(Barbara,2008)**, conclut qu'elle pourrait résulter, non pas de la précipitation de ces composés, mais de la formation de liaisons hydrogène et hydroxyle entre les groupes fonctionnels hydroxyles de la chaux, et les groupes fonctionnels oxygènes et hydroxyles des particules argileuses. Compte tenu du petit nombre d'études sur ce sujet, il ne semble pas possible de conclure à l'heure actuelle quant à la prédominance d'une de ces hypothèses par rapport aux autres. **(Barbara,2008).**

III.4.3.4.5. Réaction pouzzolanique:

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et anions OH^-) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées et libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des aluminates de calcium hydraté (CAH), des silicates de calcium hydratés (CSH) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (CASH), Figure III.6

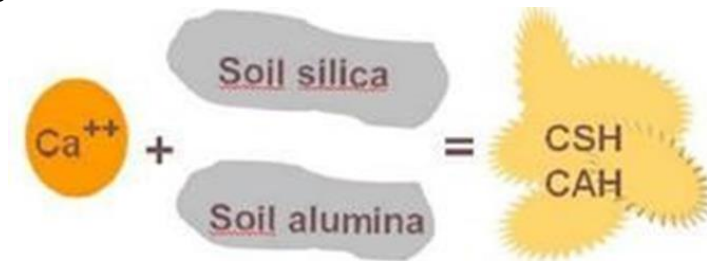


Figure III.6: Réaction pouzzolanique (Marrot, 2010; cité par Nguyen, 2015).

Ces composés hydratés se rencontrent généralement dans les ciments suite à l'hydratation de silicates de calcium (C_3S , C_2S) et d'aluminates de calcium (C_3A , C_4AF). Ces réactions sont dites réactions pouzzolaniques. Elles sont conditionnées par la saturation initiale du sol en chaux. Eades et Grim (1966) ont trouvé qu'il existe un dosage en chaux minimal, nommé « Point de Fixation de la Chaux » (PFC), pour initier les réactions pouzzolaniques. Selon la norme ASTM D6276-99a, le PFC est le dosage en chaux correspondant à une valeur de pH de 12,4 pour le mélange de sol - chaux. (Izemouren,2016).

III.4.3.4.6. Modification de la capacité d'échange cationique:

Les études de Bell (1996) et de Mathew & Rao (1997) indiquent que l'ajout de chaux entraîne une modification immédiate de la capacité d'échange cationique (CEC) du matériau (**Tab. III.2**). Cette modification varie en fonction de la nature du sol et de la quantité de chaux ajoutée. Ainsi, dans le cas d'une kaolinite, l'ajout de chaux conduit généralement à une augmentation de sa CEC, alors que dans le cas d'une montmorillonite, on observe plutôt une baisse de sa CEC. L'origine de ces différences de comportement reste mal connue, (Barbara,2008).

Tableau III.2: Évolution de la CEC d'une kaolinite et d'une montmorillonite en fonction de la quantité de chaux (d'après Bell, 1996 cité par Barbara,2008).

Teneur en chaux (%)	Capacité d'échange cationique (meq/100g)	
	Kaolinite	Montmorillonite
0	4	88
2	12	80
4	9	56
6	9	66
8	10	62

III.4.3.5. Eléments perturbateur de la stabilisation:

Au cours du traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique on peut rencontrer des cas d'échecs de stabilisation où le sol traité ne répond pas aux essais d'amélioration des caractéristiques mécaniques ou il présente un gonflement important à la première humidification. Selon Tangi Le Borgne (**Le Borgne, 2010**) ces échecs dus à des éléments chimiques, contenus dans le sol et qualifiés de perturbateurs, on peut citer parmi eux les sulfates, les matières organiques, les minéraux argileux, les phosphates, les nitrates, les chlorures, etc..

a) Granulométrie:

En effet, un sol argileux sera plus particulièrement traité à la chaux, alors qu'un sable sera traité au liant hydraulique (**Le Borgne, 2010**). Le coefficient d'uniformité C_u est le rapport entre le D_{60} et le D_{10} qui sont respectivement les diamètres correspondant à 60 % et 10 % d'éléments de dimension inférieure. Ce coefficient va donner une information qualitative sur les valeurs de dosage qui seront nécessaires pour atteindre les caractéristiques mécaniques voulues. Un grand coefficient signifie qu'on est dans un sol à courbe granulométrique étalée, les petites particules viennent remplir les pores créés par les plus grosses. Plus ce coefficient est faible, plus la granulométrie du sol est serrée, le sol est creux. Il faut donc remplir les vides par le liant. La quantité de produit de traitement à prévoir peut être très importante pour pouvoir atteindre les performances visées, et devenir non viable économiquement (Peltier, 1957). Il est cependant possible de remplir au préalable ces vides par un autre matériau moins onéreux.

b) Les argiles:

les résultats du traitement d'un sol à une relation directe avec la nature et la quantité d'argiles dans ce sol. La **Figure III.7** montre que la quantité d'eau utilisée pour l'hydratation du ciment est moins importante dans le cas de la montmorillonite que dans le cas de la kaolinite. Ceci expliquerait la mauvaise stabilisation de la montmorillonite par le ciment, **Ben Amor et al. (1997) cité par Le Borgne, 2010**.

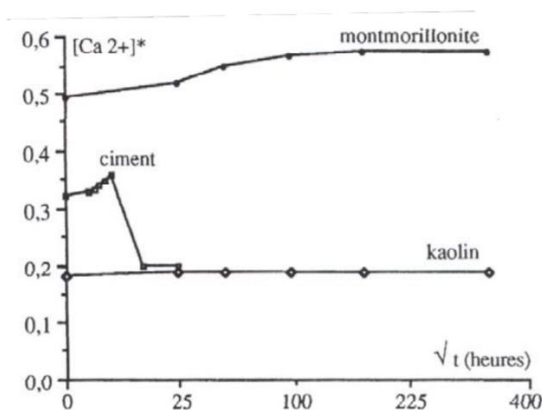


Figure III.7: Capacité de captation des ions Ca^{2+} par les argiles et quantité d'ion Ca^{2+} libérés par le ciment au cours du temps, Ben Amor et al. (1997) cité par Le Borgne, 2010.

c) Les minéraux soufrés:

Dans les sols et leurs environnements, ces composés peuvent se trouver sous plusieurs formes, en particulier sous forme de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou de pyrite (FeS_2). Dans certaines conditions, des composés soufrés peuvent se former et créer des dommages sur des ouvrages en terre traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Mitchell, 1986 ; Hunter, 1988, cité dans Le Borgne, 2010). Ces

dommages correspondent à des fissures et des gonflements, et sont causés par la formation de phases expansives telles que l'étrangéité ou de la thaumasite (Sherwood, 1962, cité dans Le Borgne, 2010).

d) Les micas:

Une étude a été menée par **Cabane (2004)** sur le traitement des sols micacés. Il a cherché à mettre en évidence l'origine de la perturbation induite par les micas par comparaison avec le processus de stabilisation préalablement établi pour un sol de référence. Les caractéristiques mécaniques de trois sols micacés et du sol de référence ont été mesurées par des essais de résistance à la compression simple. L'auteur signale, que dans tous les cas, on constate une augmentation des résistances au cours du temps pour tous les sols étudiés traités 1 % de chaux vive et 5 % de liant hydraulique de type CEM II. À long terme, les schistes traités présentent les caractéristiques les plus faibles ; le gneiss possède un comportement intermédiaire entre les schistes et le sol de référence (**Tableau III.3**). L'auteur l'explique par la présence de paillettes de micas et de fragments de roches anisotropes qui induisent une microstructure favorisant un comportement fragile du matériau. Ces micas forment des points de faiblesses mécaniques dans les ponts liants les grumeaux du sol les uns des autres. (**Le Borgne, 2010**)

Tableau III.3: Mesures de résistance à la compression simple d'un limon et de trois sols micacés traité à 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique, d'après Cabane (2004) cité par Le Borgne, 2010.

	Résistance à la compression simple à 180 jours de cure (MPa)
Limon de référence	5.1
Gneiss de Tulle	3.5
Micaschiste d'Angers	1.0
Micaschiste de St Maturin	1.8

e) La matière organique:

Les acides organiques (acide acétique, acides humiques, acides tanniques, ETDA) empêchent la prise parce que le pH est trop faible pour former les produits cimentaires (Tremblay et al., 2002). Les huiles, les hydrocarbures non miscibles, et le sucrose retardent la prise en enrobant les particules de ciment (ralentissement de l'hydratation), et sans affecter les résistances (Tremblay et al., 2002). (**Le Borgne, 2010**)

f) Les sulfates solubilisés:

La formation d'ettringite peut avoir pour origine un excès de soufre dû à des eaux séléniteuses. Cet enrichissement en sulfate peut avoir plusieurs origines, par exemple la dissolution de formation gypseuse. Les mécanismes de formation de l'étrangéité sont les mêmes que dans le cas des sols contenant des minéraux soufrés. (**Le Borgne, 2010**)

g) Les fertilisants:

Les fertilisants sont des substances utilisées en agriculture ou en horticulture pour enrichir un milieu de culture, comme le sol par exemple. Il n'existe que très peu d'études dédiées spécifiquement à l'impact des fertilisants sur le traitement des sols. Les effets du nitrate d'ammonium et du superphosphate, deux fertilisants courants ont été étudiés par Guichard (2006). Des mesures de gonflements volumiques et de résistances à la traction ont été réalisées sur un limon (**Tableau**

III.4). Les données de cette étude montrent que les résistances à la traction brésilienne baissent avec l'augmentation des concentrations en nitrates et phosphates. **(Le Borgne,2010)**

Tableau III.4: Gonflements volumiques et résistances à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (nitrate et phosphate), Guichard (2006) cité par Le Borgne,2010.

Sol	Polluant	Teneur (mg/kg)	Gonflement	R _t (MPa)
Limon ADP	Aucun		0,7	0,32
	Nitrate	20	1.6	0.34
		60	0.2	0.30
		100	0.7	0.26
		500	1.2	0.28
		1000	1.5	0.23
		2000	0.0	0.29
	Phosphate	500	0.4	0.25
		1000	0.5	0.25
		2000	0.0	0.23

h) Les chlorures:

Guichard (2006) a montré dans son étude que la potasse (KCl) n'influence pas la prise hydraulique **(Tableau III.5)**. La présence de chlorure améliore l'efficacité du traitement à la chaux d'argiles (Rajasekaran et al., 1997 cité par Le Borgne,2010). En effet, la résistance à la compression simple d'un échantillon de sol traité à la chaux et au chlorure de sodium est triplée par rapport au sol non traité ; de même, pour un sol traité à la chaux et au chlorure de calcium, cette résistance est quintuplée. Il est délicat de conclure sur l'effet réel des composés chlorés sur le traitement à la chaux, étant donné que les résultats ont été obtenus sur un sol traité à la chaux auquel on a ajouté un composé chloré. La résistance à la compression simple du sol uniquement traité à la chaux n'est pas mentionnée. **(Le Borgne,2010)**

Tableau III.5: Gonflement volumique et résistance à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (potasse), Guichard (2006) cité par Le Borgne,2010

Sol	Polluant	Teneur (mg/kg)	Gonflement	R _t (MPa)
Limon ADP	Aucun		0,7	0,32
	Potasse	500	0.0	0.29
		1000	0.7	0.30

III.4.3.6. Stabilisation au bitume:

L'emploi d'une stabilisation au bitume dans la construction, bien que limité, remonte au Ve siècle av. J.-C. Il fut redéveloppé en 1940 aux USA mais est à nouveau peu à peu oublié au vu du coût du pétrole. Il s'agit d'un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler ». Pour pouvoir être utilisé dans la stabilisation. Le bitume doit être soit « mélangé à des solvants » volatils tels que du gasoil, du kérosène ou du naphta, soit « dispersé dans de l'eau en émulsion » anionique ou cationique. Une fois mélangés à la terre, l'eau ou le solvant s'évapore et « les globules de

bitume » s'étirent en films solides très fins qui adhèrent aux particules de la terre et les enrobent **(Guillaud & Houben, 1995 cité par Paulus 2015)**.

Le rôle du bitume est multiple : il permet de diminuer la densité de la terre et d'augmenter la teneur optimale en eau et bitume. La résistance à la compression est également améliorée par l'ajout de bitume. Le bitume diminue l'absorption d'eau qui devient très faible et stationnaire dans le temps après quelques jours de séchage. Le bitume est ajouté à la terre dans une proportion variant de 2 à 3% et pouvant aller dans certains cas jusqu'à 8% selon la granularité de la terre. **(Paulus 2015)**

III.4.4. La stabilisation par les fibres:

L'ajout de fibres dans la terre comme stabilisant est une technique largement utilisée dans le monde. La paille, qui renforce la structure, est la plus employée car elle s'adapte aux différents modes de mise en œuvre de la terre, c'est-à-dire à l'état plastique, visqueux ou encore dans le cas de la compression, **(Paulus 2015)**. Les fibres jouent plusieurs rôles, elles permettent :

- Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres.
- Augmenter la résistance à la traction.
- Alléger le matériau : le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation ;

Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau ;

Il existe une quantité optimale de fibres à ajouter au-delà de laquelle on observe une perte de résistance. En effet, si l'on ajoute une quantité exagérée de fibres, la masse volumique sera trop diminuée et il y aura insuffisamment de points de contact entre les fibres et la terre. Ceci implique que les déformations ne seront plus transmises correctement, ce qui diminuera la résistance de la terre **(Paulus.2015)**.

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille : des fibres naturelles, artificiels et synthétiques. **(Taallah ,2014)**

III.4.4.1. Les fibres naturelles:

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine **(Figure III.8)**

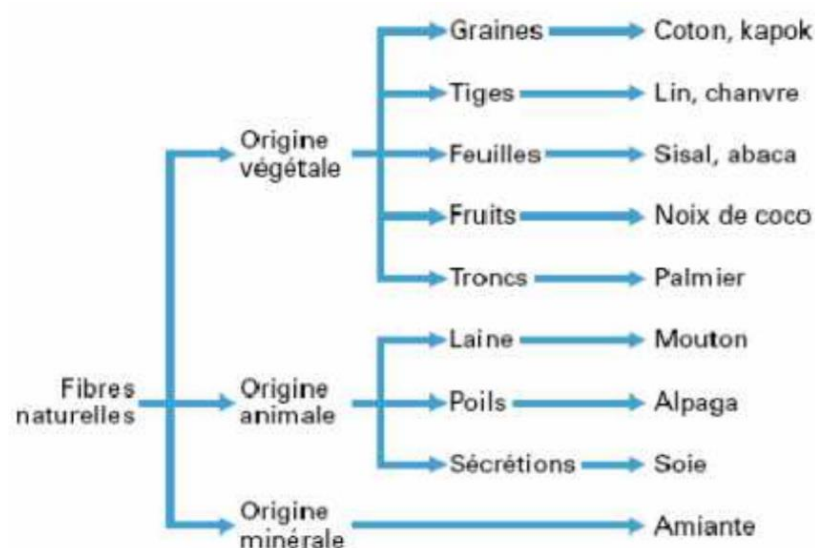


Figure III.8: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)

III.4.4.1.1. Les fibres végétales:

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages(**Taallah ,2014**) : Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites.

III.4.4.1.2. Les fibres animales:

La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant est élevé (16-18%) et son élasticité peut atteindre les 45%(**Feughelman, 1997**).(**cité dans Taallah ,2014**)

III.4.4.1.3. Les fibres minérales:

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant(**Taallah ,2014**). Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente.

III.5. Conclusion:

Le présent chapitre a mis l'accent sur les différentes techniques de la stabilisation de la terre de construction. A travers cette recherche bibliographique, nous avons montré que plusieurs travaux confirment que l'emploi des stabilisants améliore la résistance mécanique et réduit la sensibilité à l'eau du matériau terre. D'un point de vue écologique la stabilisation par l'ajout des fibres naturels reste un bon choix et on rappelle aussi qu'il y a la possibilité de rassembler deux stabilisants ou bien de différents techniques tout dépend les propriétés de la terre, la capacité économique, et les techniques de mise en œuvre de la terre possible.

Chapitre VI

Les caractéristiques mécaniques et hydriques de la brique en terre stabilisée et non stabilisée.

Contenu

1. Introduction.....	44
2. Caractéristiques mécaniques.....	44
2.1. Résistance à la compression	44
2.1.1. Résistance à la compression sèche	44
2.1.2. Résistance à la compression humide	48
2.2. Résistance à la traction.....	51
2.3. Le module d'élasticité	53
2.4. Le module de cisaillement maximal	55
3. Caractéristiques hydriques.....	58
3.1. Coefficient d'absorption à l'eau.....	58
3.2. Essais de sorption désorption.....	60
4. Conclusions.....	62

IV.1. Introduction:

Les briques de terre comprimée (BTC) doivent présenter un certain nombre de qualités, répondant à des performances minimales, pour pouvoir être utilisées comme matériau de construction. Ce chapitre consiste à présenter l'effet de la stabilisation à la chaux sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression sèche et humide, résistance à la traction) et hydriques (Coefficient d'absorption à l'eau, Isotherme de sorption) des blocs de terre comprimée.

IV.2. Caractéristiques mécaniques:

IV.2.1. Résistance à la compression:

IV.2.1.1. Résistance à la compression sèche:

Des essais de compression simple (R_c) ont été réalisés par (TRAN, 2013) conformément à la norme NF P94-077 pour évaluer l'évolution au cours du temps la résistance des sols traités ainsi que de l'influence de la quantité de chaux ajoutée sur le traitement. Le gain de résistance des sols traités est le critère primordial pour évaluer l'efficacité du traitement.

Les éprouvettes ont été conservées dans des petits seaux bien étanches pour empêcher la carbonatation de la chaux libre dans les éprouvettes. Aux différents instants voulus après traitement, les éprouvettes ont été mises sur un système de compression simple avec une vitesse de mise en charge statistique.

Les figures IV.1, IV.2, présentent l'évolution de la résistance en compression simple des sols traités à 2%, 4% et 8% à différents instants après traitement.

Sur la figure IV.1, on observe une diminution des (R_c) après 7 jours de cure. Plus la chaux est ajoutée, plus la résistance en compression diminue. En effet, les changements dans la résistance en compression simple à 7 jours par rapport à 1 jour sont négligeables pour 2% et 4% de chaux ajoutée. Pourtant, on obtient une réduction très forte de la résistance pour 8% de chaux, avec (R_c) qui diminue de 1,51 MPa à 1,03 MPa (31,8 % de réduction) après 7 jours de maturation. Par contre, de 7 jours à 14 jours de maturation, (R_c) augmente pour tous les 3 pourcentages de la chaux. On obtient également un changement important pour 8% de chaux (de 1,03 MPa à 1,34 MPa équivalent à 30,1 % d'augmentation). L'augmentation à 2% et 4% de chaux est négligeable. De 14 jours à 28 jours de maturation, la résistance en compression simple continue à augmenter légèrement pour 8% de chaux. Par contre, (R_c) des sols traités à 2% et 4% de chaux diminue significativement, de 1,11 MPa à 0,95 MPa pour 2% de chaux et de 0,92 MPa à 0,80 MPa pour 4%.

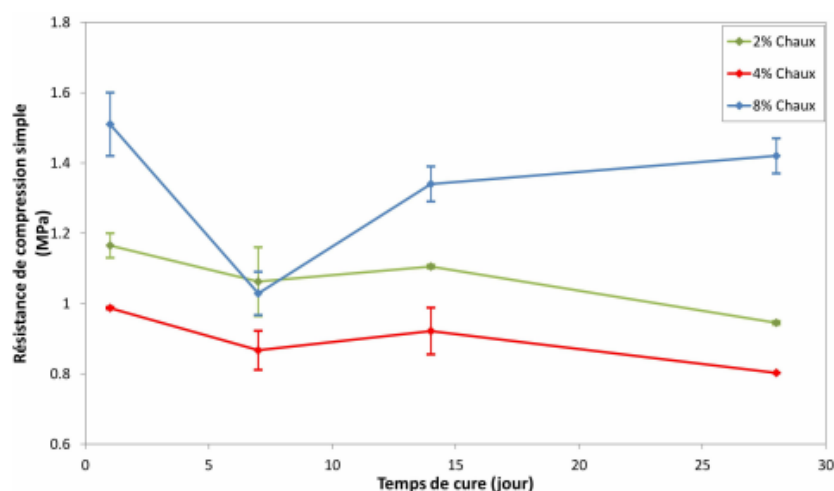


Figure IV.1: Évolution de la résistance de compression en fonction du temps de cure (TRAN, 2013).

La figure IV.2, présente l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de la chaux ajoutée aux différents instants après le traitement. On constate que le traitement des sols à 4% de chaux réduit la résistance en compression simple de 1,18 MPa pour le sol naturel à 0,87 MPa pour le sol traité à 4% après 7 jours de cure. C'est la valeur minimale observée pendant 28 jours de maturation pour tous les 3 pourcentages de la chaux. Malgré la réduction à 2% et 4%, le traitement à 8% nous donne une augmentation de résistance en compression simple après 28 jours, de 1,18 MPa pour le sol naturel à 1,42 MPa pour le sol traité à 8% de chaux.

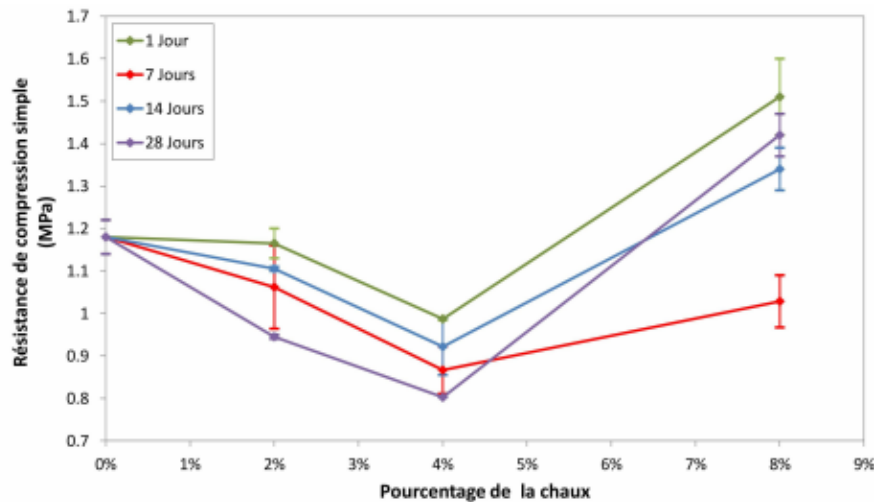


Figure IV.2: Évolution de la résistance en fonction de la chaux ajoutée(TRAN,2013).

Dans le cadre de l'étude de **Nguyen, 2015**, Trois sols limono-argileux de différentes minéralogies ont été étudiés :

- Un limon peu plastique A1 avec une fraction argileuse composée d'illite ouverte, de kaolinite et de chlorite dégradée,
- Un limon argileux peu plastique A2 (illite, kaolinite, chlorite, quartz, montmorillonite),
- Un sol argileux très plastique A3 (illite, kaolinite, montmorillonite, quartz).

Les sols ont été traités avec la chaux vive, conforme aux exigences de la norme européenne **EN 459-1**. Trois dosages ont été appliqués afin de répondre aux trois objectifs suivants : 1) amélioration, 2) stabilisation et insensibilité à l'eau, 3) stabilisation et résistance au gel. Pour suivre la stabilisation à moyen et à long terme, quatre temps de cure ont été choisis: 7 jours, 28 jours, 90 jours, 365 jours.

L'essai de compression simple a été fait selon la norme **NF EN 13286-41**.

A court terme (7 et 28 jours), les résistances mécaniques d'un sol traité évoluent de manière assez similaire, quel que soit le dosage (objectif amélioration ou objectif stabilisation). Ainsi, la résistance à la compression simple voit sa valeur doublée après 7 jours dans le cas du sol A1 (0,45 à 0,67 MPa) (**figure IV.3**), multipliée par 4 dans le cas de l'argile limoneuse A2 (0,60 à 0,69 MPa)(**figure IV.4**), alors qu'elle est seulement multipliée d'un facteur de 1,4 dans le cas du sol argileux A3 (0,43 MPa) (**figure IV.5**). Lorsque la cure est prolongée, la résistance à la compression simple des sols traités aux dosages les plus faibles, en-dessous du point de fixation de la chaux (< PFC, ce qui correspond à l'objectif d'amélioration) évolue très légèrement (sol A1 traité à 1% CaO), voire reste stable (A2 traité à 1,5% CaO et A3 traité à 2% CaO). Pour des dosages supérieurs au PFC, avec des objectifs de stabilisation des sols, les résistances à la compression simple évoluent positivement et

se distinguent progressivement en fonction du dosage et du temps. Ainsi, après respectivement 90 jours et 1 an de cure, le sol A1 traité à 2 % de chaux voit sa valeur de R_c multipliée respectivement d'un facteur de 4, 5 et 8, pour atteindre des valeurs de 2,64 MPa. Le traitement à 4 % de chaux amène à l'obtention d'un matériau possédant une R_c de 4,50 MPa. Le sol A2 apparaît plus réactif avec la chaux que le sol A1 : par rapport au sol A2 non traité ($R_c = 0,16$ MPa), la résistance à la compression simple du mélange traité à 3% CaO est multipliée par 16 et 20 (90 jours et 1 an de cure respectivement), et à raison de 5 % de chaux ajoutée, le facteur multiplicatif s'élève à 24 et 32, pour atteindre une valeur absolue de 5,19 MPa. Le sol argileux A3, plus plastique et pour laquelle on prévoit une progression encore plus affirmée des résistances, s'avère par contre moins réactif. Le passage de 4 à 7 % de chaux n'apporte pas de gain de résistance supplémentaire à moyen et long terme, et les valeurs absolues de R_c plafonnent à 0,90 MPa (90 jours) et 1,46 MPa après 1 an.

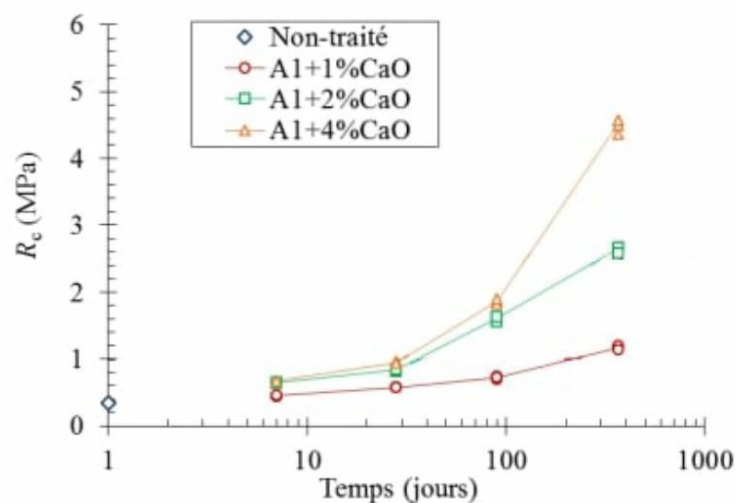


Figure IV.3: Evolution de la résistance à la compression simple du sol A1 non traité et traité à différents dosages en chaux, (Nguyen,2015).

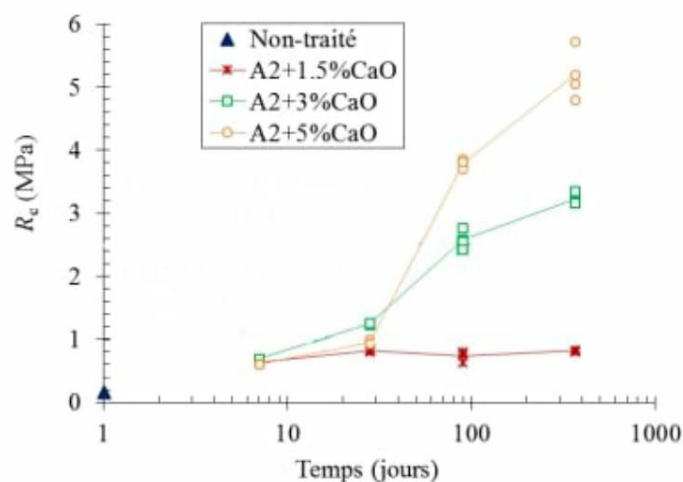


Figure IV. 4: Evolution de la résistance à la compression simple du sol A2 non traité et traité à différents dosages en chaux. (Nguyen,2015)

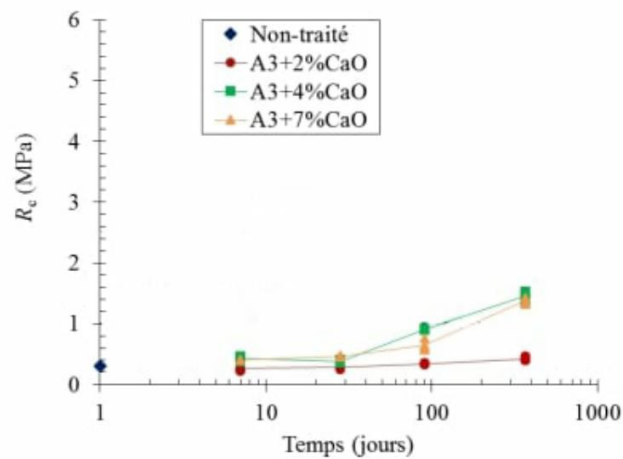


Figure IV. 5: Evolution de la résistance à la compression simple du sol A3 non traité et traité à différents dosages en chaux.(Nguyen,2015).

Pour les sols traités à la chaux, la formation des produits cimentaires conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple(Perret, 1979 ; Brandl, 1981 ; Balasubramaniam et Buensuceso, 1989 ; Bell, 1996 ; Little, 1995 ; De Bel et al, 2005 ; Le Runigo, 2008 cité dans Nguyen, 2015). L'ampleur de cette augmentation dépend de différents facteurs : minéraux argileux, dosage en chaux, temps de cure, température, caractéristiques de compactage, etc. La cinétique d'augmentation des performances mécaniques est meilleure pour les montmorillonites en raison de leur forte activité liée à leur grande surface spécifique, qui faciliterait l'attaque des minéraux par la chaux. Ainsi, une grande cinétique correspond à une dissolution plus rapide des minéraux. Plus la quantité de chaux est forte et plus le temps de cure est long, plus la résistance à la compression simple est forte (Perret, 1979 ; Balasubramaniam et Buensuceso, 1989; Bell, 1996; Little, 1995) cité dans (Nguyen, 2015).D'autre part, la quantité de produits cimentaires augmente avec le temps (Figure IV.6). Toutefois, le rôle exact de l'état de cristallisation des produits cimentaires en fonction du temps sur la résistance à la compression simple reste une question ouverte.

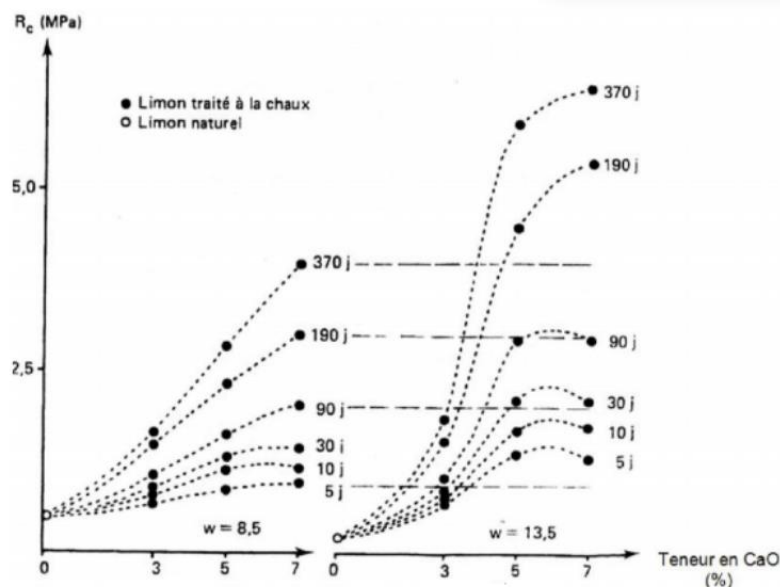


Figure IV.6: Effet de la teneur en eau de compactage ($w= 8,5\%$ et $w = 13,5\%$), du temps de cure et de la teneur en chaux sur la résistance à la compression simple d'un limon (Perret, 1979 cité dans Nguyen, 2015)

IV.2.1.2. Résistance à la compression humide

Cet essai est généralement pratiqué que sur les briques stabilisées car la résistance en compression humide des briques non stabilisées est nulle. Elles se désintègrent complètement en moins d'une heure d'immersion. Les briques destinées à être écrasées sont immergées totalement dans l'eau pendant 6 heures, elles sont ensuite retirées et soumise à l'essai de compression.

Dans (Yacoub, 2010), un mélange de latérite (la latérite est une roche rouge ou brune, qui se forme par altération des roches sous les climats tropicaux) et sables (Terre :C1) et de la latérite simple (Terre C2), (Tableau, IV.1). Avec la terre C1, un mélange de granulométrie optimale était préparé (75% de latérite et 25% de sable) malaxé avec une teneur en eau optimale. Le dosage de la chaux utilisé est: 0%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 11%, et 12%.

Tableau IV.1: dosage en matériau et les teneurs en eau optimal, Yacoub,2010.

Dosage	La latérite (%)	Le sable (%)	Wopm (%)
C1	75	25	15
C2	100	0	16.6

Après confection, les briques stabilisées sont stockés à l'abri, humidifiés par recouverte d'un film de plastique qui maintient une humidité relative proche à 100%. La durée de cure est de 28 jours au maximum. Après cette période, les briques sont laissées à l'air libre. Les essais d'écrasement en compression se font dans l'intervalle de 7 à 48 jours d'âge.

La figure IV.7, nous montre l'évolution de la résistance en compression des briques non stabilisée issue de C1 et C2. On remarque la courbe de C2 est supérieure à celle de C1, c'est-à-dire, les valeurs de la résistance de C2 sont supérieures à C1. Cela s'explique par le fait qu'il y a une forte fraction argileuse au niveau de C2 ou soit lié à la préparation des échantillons.

Les briques non stabilisée issue de C2 donnent des résistances à la compression sèche supérieures à 1MPa, mais ceux de C1 sont compris entre 0,4 et 0,6.

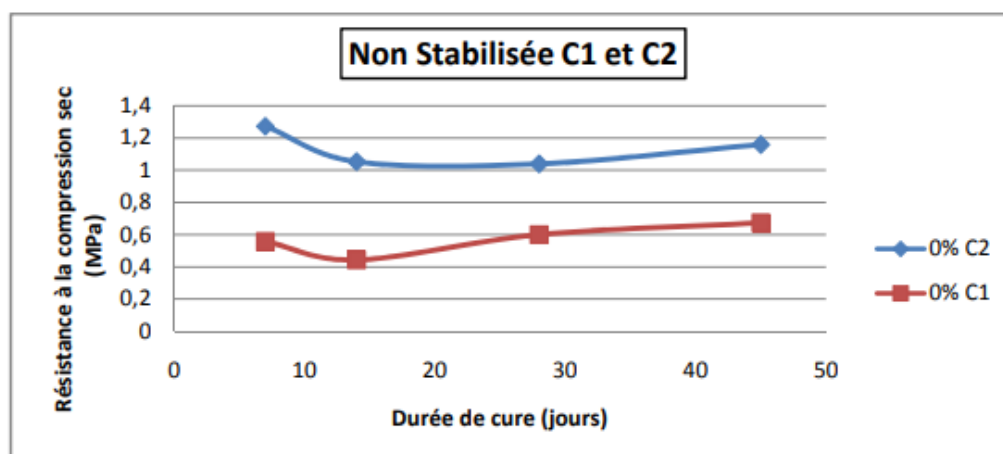


Figure IV.7: résistance en compression sèche en fonction de la durée de cure des briques non stabilisées de C1 et C2 (Yacoub.2010).

Les résistances humides obtenues après immersion sont présentées dans les Figures IV.8, IV.9. Les résultats obtenus indiquent que l'ensemble des résistances obtenues restent inférieures à 2MPa.

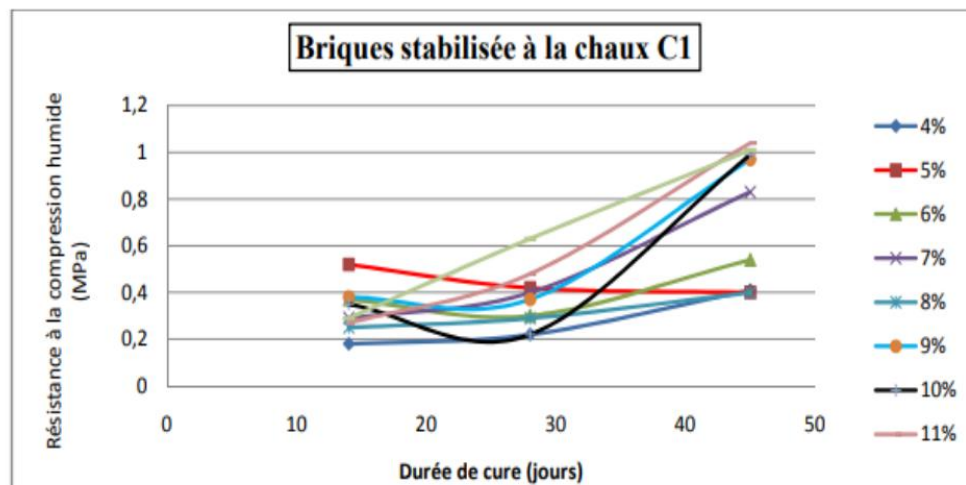


Figure IV.8: Résistance en compression humide en fonction de la durée de cure des briques stabilisées à la chaux (C1) (Yacoub.2010).

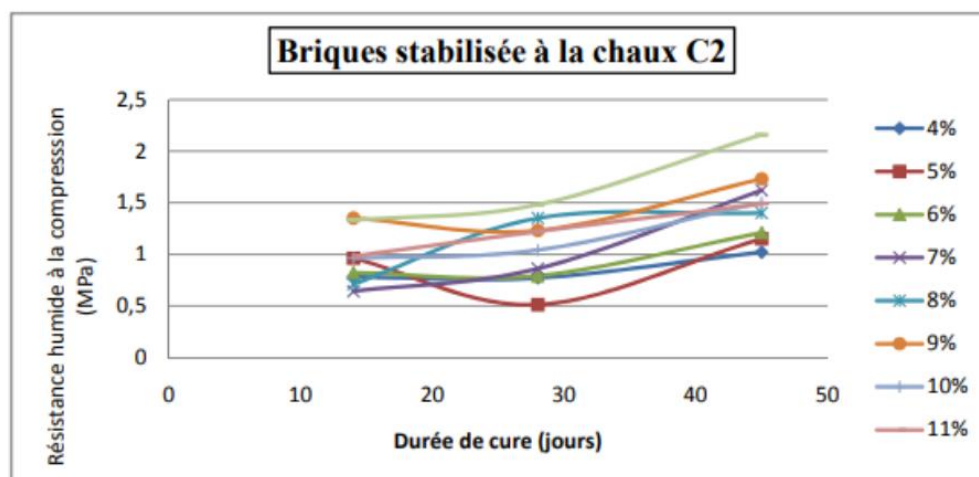


Figure IV.9: Résistance en compression humide en fonction de la durée de cure des briques stabilisées à la chaux (C2) (Yacoub.2010).

Les briques stabilisés à la chaux issue de la latérite C2 présente des résistances humide la compression sensiblement égale à celui de la latérite C1. Par rapport aux résistances à sec, on remarque une baisse des résistances suite à l'immersion des briques. La baisse se situe entre 60 à 65% par rapport aux résistances sèches. Les résistances humides obtenues après immersion sont inférieures à 2MPa sauf à 12% où la résistance est 2,16MPa après 45 jours. (Yacoub, 2010)

Dans son étude, TAALLAH, 2014 a utilisé un mélange du sable concassé, la chaux vive, les fibres de surface des palmiers dattiers mâles, la paille d'orge hachée et les fibres de polypropylène. Le sol utilisé provient de la région de Biskra (Algérie). Sa granulométrie est composée de : Sable 71 % Limon 23 % Argile 16 %.

Sur la figure IV.10, les résultats de la variation de la résistance à la compression humide (RCH) du BXPD (Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmier dattier) en fonction de la teneur en fibres est représentés. On constate aussi qu'il y a une réduction de la RCH du BXPD avec l'addition des fibres de palmier dattier, qui est due à l'effet défavorable de la décompression du bloc après compactage durant la phase de fabrication et par suite une résistance plus faible, malgré que le caractère hydrophile des fibres végétales peut contribuer dans la stabilité du bloc en réduisant la teneur en eau de la matrice par absorption (Taalal, 2014). La valeur maximale de RCH des BXDP

est enregistrée pour le cas de 10 % en chaux et 0.05 % en fibres, alors que la valeur la plus faible coïncide avec le cas de 8 % en chaux et 0.2 % en fibres. **La figure IV.10** montre que les résultats des BXPD à base de 10 % en chaux sont meilleurs que ceux obtenus pour 8 % et 12 % en chaux. (Selon TAALLAH,2014).

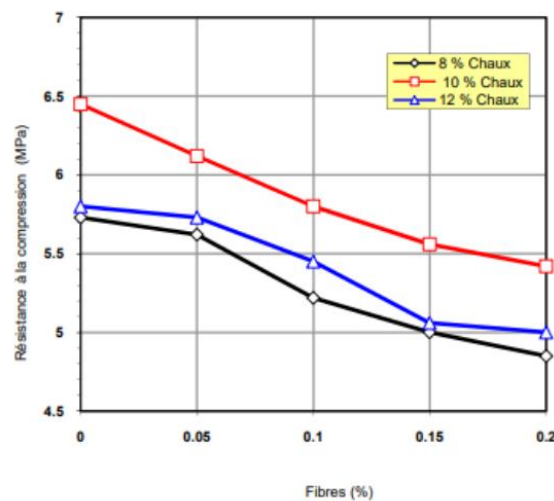


Figure IV.10 : Résistance à la compression humide du BXPD curé à 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) (Selon TAALLAH, 2014).

Les essais effectués par (Seick,2013) sur un sol constitué de : 50% Sable ,17% Limon et 28% d'argile avec une limite de liquidité de 47.5% stabilisé avec la chaux éteinte avec différents pourcentage. Une comparaison est aussi faite avec l'utilisation de ciment comme stabilisant (10%). Les résistances à la compression des blocs sèches et humides à l'âge de la maturité de 45 et 70 jours sont présentées aux figures IV.11, IV.12.

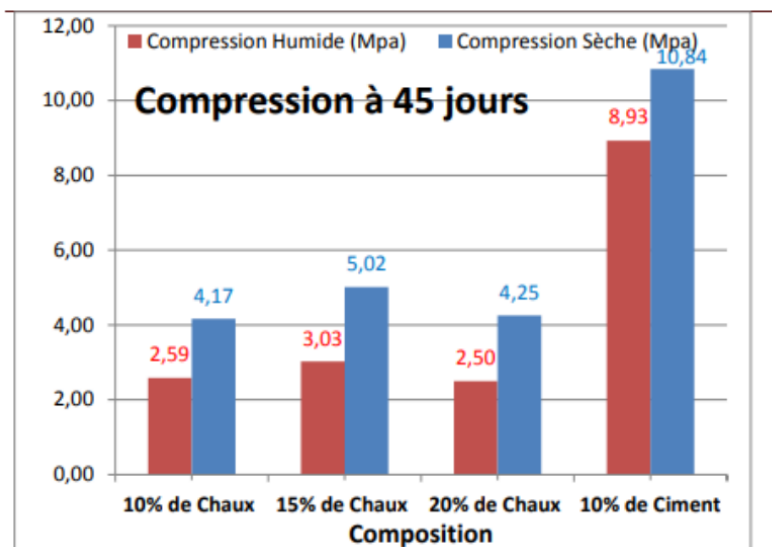


Figure IV.11: Résistance à la compression sèche et humide à 45 jours. (Seick,2013).

Les résultats d'écrasement des BTC observés dans les figures IV.11, IV.12 à 45 et 75 jours de cure ont confirmé que la chaux éteinte est un bon stabilisant pour les BTC. À travers ces figures on remarque que pour une stabilisation de 10%, 15% et 20%, on a des résistances à la compression sèche à 75 jours (45 jours) respectives de 5.03 (4.17), 7.91 (5.02), 6.76 (4.25) MPa. Pour la stabilisation de 10% de ciment, on a 10.84 MPa. En ce qui concerne les résistances à la compression

humides, elles ont été au moins égale à la moitié de la résistance à la compression sèche. Les résultats montrent que toutes les formulations ont abouti à une stabilisation efficace ($R_c > 4\text{MPa}$). La valeur optimale de compression est obtenue avec un dosage de 15% de chaux éteinte.

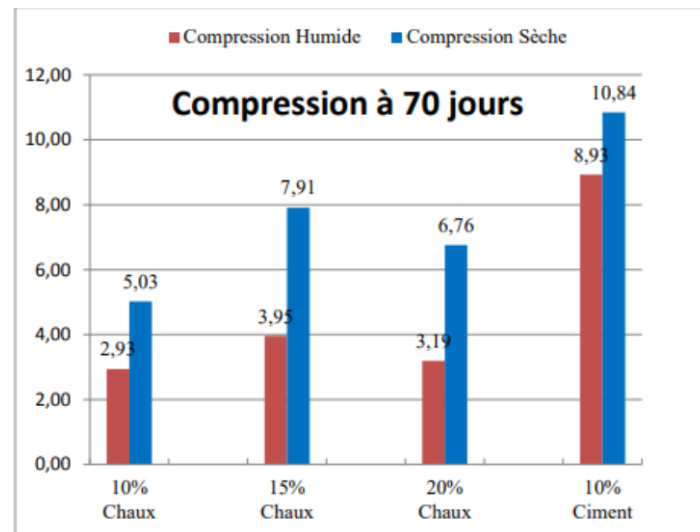


Figure IV.12: Résistance à la compression sèche et humide à 70 jours. (Seick, 2013).

Au vue de cela nous pouvons donc conclure que l'augmentation des résistances à la compression est fonction du temps de cure et du taux de dosage. Mais le dosage optimum pourrait se limiter à 15% de chaux éteinte.

IV.2.2. Résistance à la traction

En plus des essais de compression présentés ci-dessus, **Nguyen, 2015** a réalisé des essais de la résistance à la traction Brésilienne (R_t) des sols A1, A2, A3 non-traités et traités. Les résultats obtenus sont présentés sur les **Figures IV.13, IV.14, IV.15**. Les valeurs de R_t des sols traités montrent des évolutions similaires à celles des résistances à la compression simple:

- Une évolution positive des R_t des sols traités est constatée. A 28 jours, les valeurs sont multipliées par un coefficient variant de 1,5 à 3 (sol A1), et par 4 (cas du sol A2 traité). En revanche, le sol A3 traité présente des R_t plus faibles par rapport au sol A3 non-traité après 7 et 28 jours. Ce phénomène pourrait être expliqué d'une part par une interaction faible de la chaux avec les particules argileuses, et d'autre part par le mode de préparation adopté (**Nguyen, 2015**).
- Aux dosages en chaux plus faibles que le point de fixation (PFC), une croissance légère (A1 traité à 1% CaO et A3 traité à 2% CaO), voire une stabilité (A2 traité à 1,5% CaO) des valeurs de R_t est observée.
- Aux dosages en chaux supérieurs au PFC, R_t des sols traités évolue au cours du temps, et ce concomitamment au dosage en chaux et à la durée de cure. Ainsi, après respectivement 90 jours et 1 an de maturation, les valeurs de R_t sont multipliées par 6 et 15 dans le cas du sol limoneux A1 traité à 2 % de chaux, et d'un facteur 11 et 23 dans le cas du traitement à 4 %. Cette évolution est également observée sur le sol A2, dans des proportions plus importantes encore (par exemple, $R_t = 0,19\text{ MPa}$ après 90 jours, pour 3 % de chaux ajoutée ; $R_t = 0,45\text{ MPa}$ après 1 an pour 5 % de chaux ajoutée). Dans le cas du sol argileux A3 traité, les valeurs de R_t se limitent à 0,21 MPa après 1 an pour un dosage de 4%. L'ajout de chaux supplémentaire n'induisant pas l'amélioration de cette caractéristique.

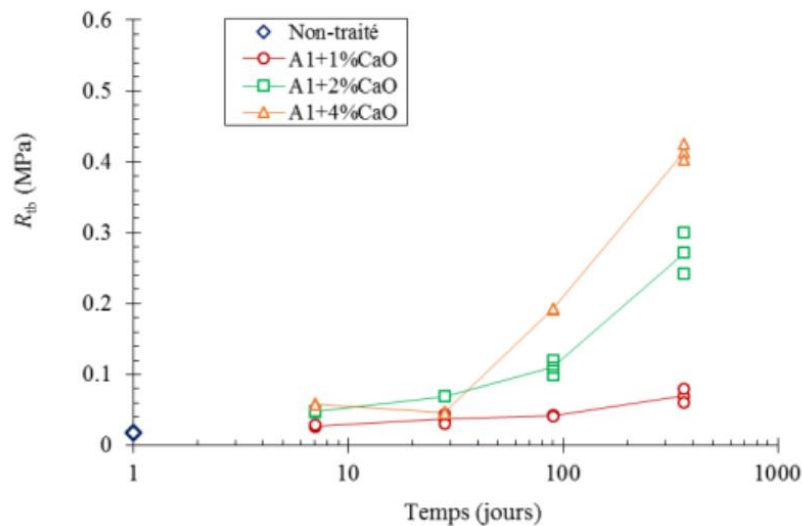


Figure IV. 13: Evolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A1 non traité et traité à différents dosages en chaux.(Nguyen,2015).

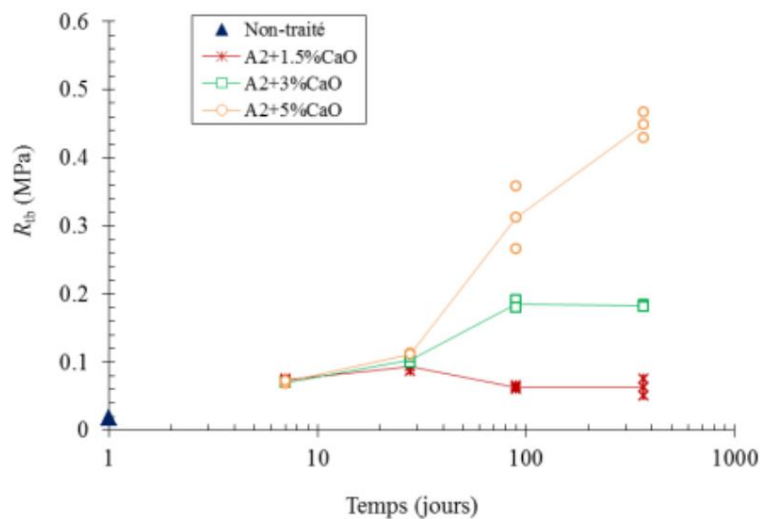


Figure IV. 14: Evolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A2 non traité et traité à différents dosages en chaux.(Nguyen,2015).

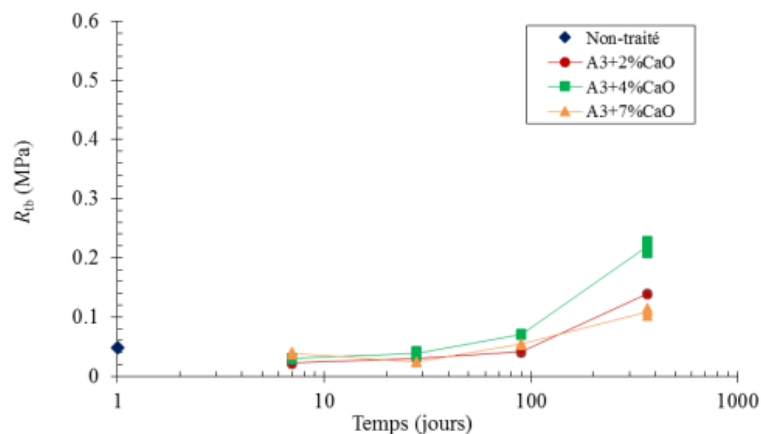


Figure IV.15: Evolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A3 non traité et traité à différents dosages en chaux.(Nguyen,2015).

IV.2.3. Le module d'élasticité:

Le module de Young, module d'élasticité (longitudinale) est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope comme le montre **la figure IV.16**. Dans les ouvrages scientifiques utilisés dans les écoles d'ingénieurs, il a été longtemps appelé module d'Young. Le physicien britannique thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. Cette loi d'élasticité est la loi de Hooke : (Source : Wikipédia)

$$\sigma = E. \epsilon \quad (\text{IV.1})$$

Où :

- σ est la contrainte (en unité de pression) ;
- E est le module de Young (en unité de pression) ;
- ϵ est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel) ; ($\epsilon = \ell - \ell_0 / \ell_0$).

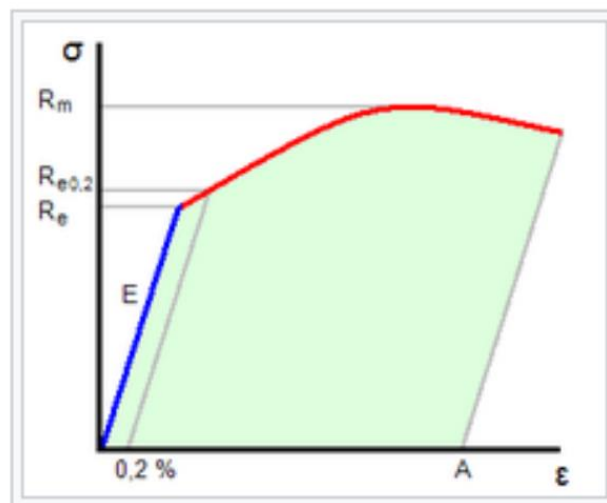


Figure IV.16: diagramme contrainte-déformation d'un matériau ductile.(Source : wikipédia.com)

Des essais de compression et de traction sont effectués de la part de **Bokor, 2011** sur un échantillon de terre contenant 19% d'argile stabilisé avec de la chaux (5%-10%-15%). Les briques destinées à la compression sont des demi-blocs de dimensions nominales 14 x 14 x 9 cm et des briques entières de dimensions nominales 29,5x14x14 cm.

Le tableau IV.2 ci-dessous montre le récapitulatif des moyennes des valeurs du module de Young de l'échantillon écrasé à 7, 14 et 28 jours avec les différents dosages 0%, 5%, 10 % et 15%.

Tableau IV.2 : Les moyennes des valeurs du module de Young de l'échantillon écrasé.

Dosage(%)	Er	σ_c : [MPa]	Es [MPa]	Et [MPa]
A 7 jours				
0	0,013	0,74	58,44	83,21
A 14 jours				
5	0,013	1,01	70 ,05	79,03
10	0 ,04	1,19	88,07	94,37
15	0,013	1,12	92,25	114,37
A 28 jours				
0	0,012	0,9	74,14	88,25
5	0,013	1,32	104,25	107,01
10	0,01	0,882	94,44	112,11
15	0,011	1,57	144	193,08

D'où :

er : déformation des blocs.

σ_c : contrainte d'écrasement.

Es: le module de Young sécant.

Et: le module de Young tangentiel.

A 7 jours la valeur de E_t est 83,21 Mpa à 0% tandis qu'à 14 jours, une diminution est observée sur les valeurs de E_t varient de (79,03 Mpa). Ceci est dû à deux hypothèses probables (**Bokor, 2011**) : soit la brique testée à 15% a été mal compressée, soit il y a eu une prise rapide et la brique a perdu ses caractéristiques à 5% tandis qu'à 10% on a 94,37Mpa et à 15% on a 114,37MPa. On peut dire que ces valeurs augmentent en fonction du dosage. Mais à 28 jours, ces valeurs sont d'autant plus grandes que les précédentes. Elles sont respectivement égales à 88,25MPa à 0%, 107,01MPa à 5%, 112,11MPa à 10% et 193,08 MPa à 15%. On peut dire alors, que les valeurs du module de Young augmentent également en fonctions de la durée de cure. En résumé, on constate que les valeurs du module de Young augmentent avec le temps de cure et en même temps en fonction du dosage de la chaux. (**Bokor,2011**).

Le même sol présenté au niveau de la partie de la compression simple sèche des travaux de **TRAN, 2013** et selon la **figure IV.18** qui présente l'évolution du module d'élasticité des sols traités à 2%, 4% et 8% à différents instants après traitement. La littérature propose que le module d'élasticité (E_c) du sol traité à la chaux augmentent au cours du temps dus aux réactions pouzzolaniques (**Tran, 2013**). Cependant, on n'obtient pas cette augmentation dans les évolutions de (E_c) des sols traités aux 2% 4% et 8% de la chaux au cours de 28 jours après le mélange. En fait, (E_c) diminue fortement pendant les sept premiers jours de cure pour tous les 3 pourcentages de chaux ajoutée.

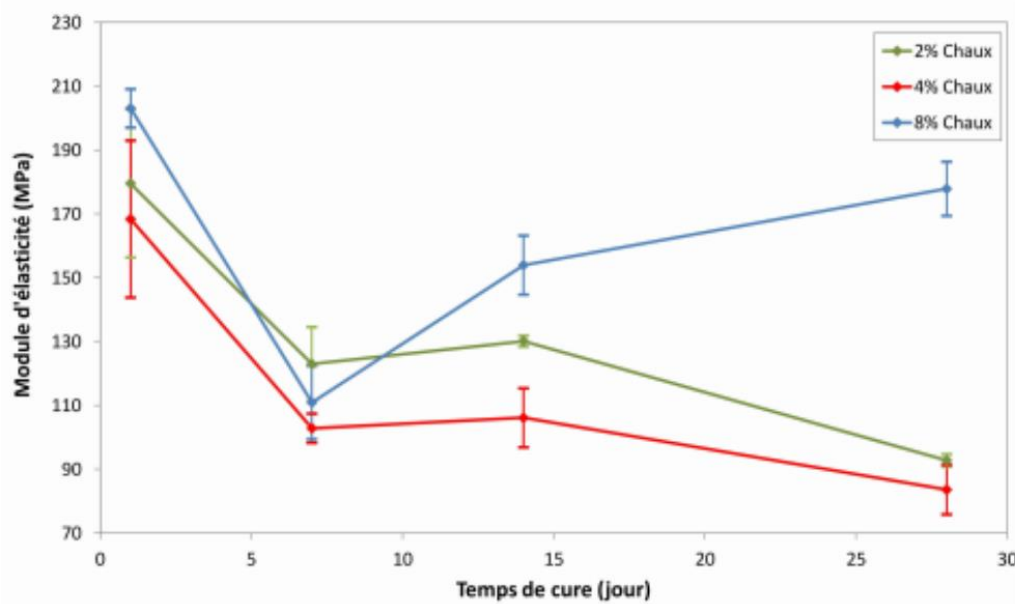


Figure IV.17: Évolution de la résistance en fonction de la chaux ajoutée. (Tran, 2013).

IV.2.4. Le module de cisaillement maximal:

En résistance des matériaux, le module de cisaillement, module de glissement, module de rigidité, module de coulomb ou second coefficient de lamé, est une grandeur physique intrinsèque à chaque matériau et qui intervient dans la caractérisation des déformations causées par des efforts de cisaillement. La **figure IV.18** schématise le principe du cisaillement.

La définition du module de rigidité G , parfois aussi noté μ , est

$$G \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/\ell} = \frac{F\ell}{A\Delta x} \quad (\text{IV.2})$$

$\tau_{xy} = f/a$ est la contrainte de cisaillement,

F = la force,

A = l'aire sur laquelle la force agit,

$\delta x/\ell = \tan \theta$ le déplacement latéral relatif, et θ l'écart à l'angle droit,

Δx = le déplacement latéral,

ℓ = l'épaisseur.

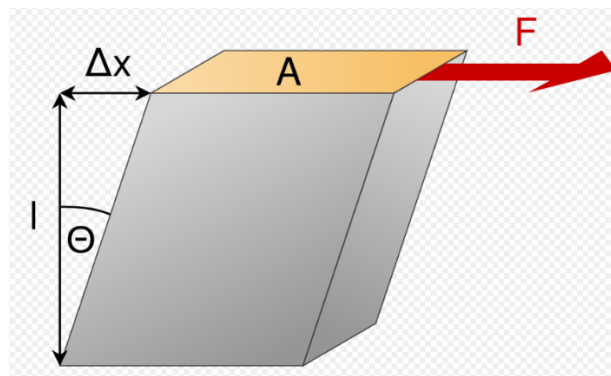


Figure IV.18: schéma de principe du cisaillement. (Source : wikipédia.com)

Un critère de rupture en cisaillement de type "mohr-coulomb", largement utilisé pour les sols, est souvent employé pour la terre compactée et/ou damée. Ce critère établit une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement maximale τ et la contrainte normale σ à une facette, et s'exprime sous la forme :

$$\tau = c + \tan(\phi) \sigma \quad (\text{IV.3})$$

τ = contrainte de cisaillement maximale.

c = la cohésion du matériau.

Φ = L'angle de frottement.

σ = la contrainte normale à une facette.

Dans le cas de matériaux isotropes, il est relié au module d'élasticité E et au coefficient de poisson ν par l'expression :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{IV.4})$$

G = le module de cisaillement.

E = module d'élasticité.

ν = coefficient de poisson.

Selon TRAN,2013. Un essai triaxial à 21 jours après le traitement pour 3 types d'éprouvette a été réalisé. Des éprouvettes du sol naturel sont analysées avec un essai triaxial consolidé et non-drainé (CU) pour mesurer la pression d'eau. Les paramètres de cisaillement sont présentés au **tableau IV.3**.

Tableau IV.3: Essais triaxiaux des sols traités à 21 jours après le traitement.

Paramètres	0% chaux	2% chaux	4% chaux	8% chaux
c [KPa]	14	383	501	501
ϕ [°]	23,4	26,5	26,7	33

L'évolution des paramètres c et ϕ est illustrée sur la **figure IV.19**. On constate que la cohésion des sols traités à la chaux augmente très fort, tandis que l'angle de frottement augmente légèrement. 8% de chaux donne une amélioration la plus significative.

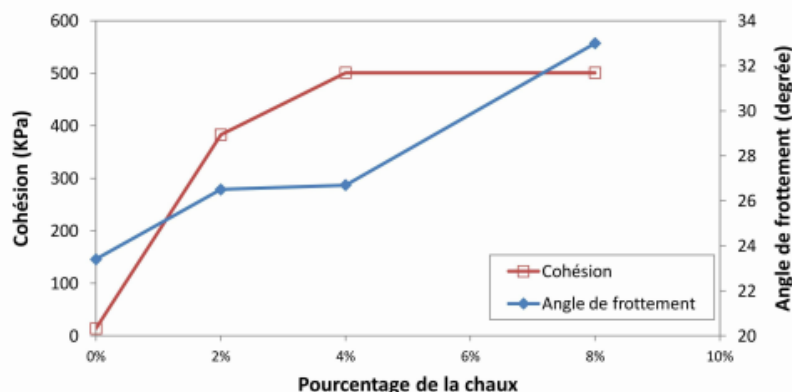


Figure IV.19: Évolution des paramètres de cisaillement des sols traités à 21 jours. (TRAN, 2013).

En général, la chaux change significativement les paramètres de cisaillement du sol, notamment pour la cohésion. Une petite quantité de chaux (par exemple 2%) peut transformer notre sol quasi non-cohérent en un sol cohésif. Cette amélioration correspond à un effet du phénomène de floculation et agglomération qui résulte de l'échange cationique. (Tran, 2013).

Les résultats obtenus par Nguyen, 2015 sur l'évolution du module de cisaillement maximal- G_{max} , sont représenté sur les Figures IV.20,21,22.

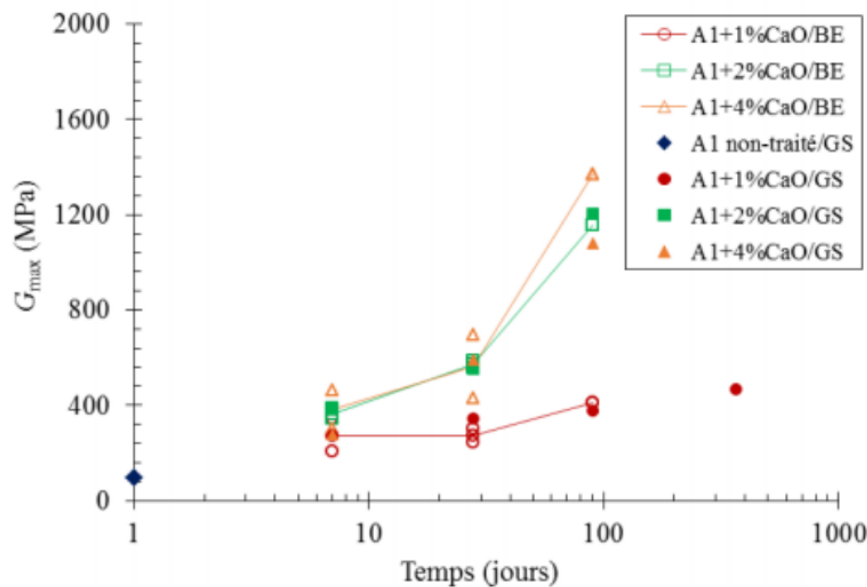


Figure IV. 20: Module de cisaillement maximal du sol A1 non-traité et traité au cours du temps (BE : Bender Element, GS : Grindo Sonic). (Nguyen, 2015).

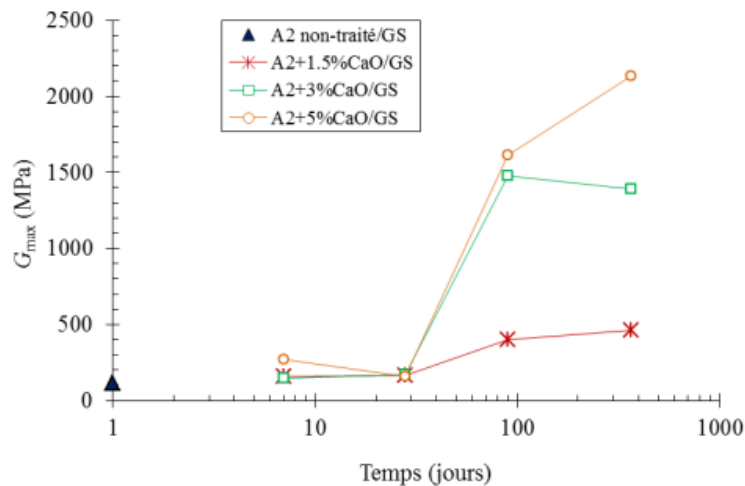


Figure IV. 21: Module de cisaillement maximal du sol A2 non-traité et traité au cours du temps (BE : Bender Element, GS : Grindo Sonic). (Nguyen, 2015).

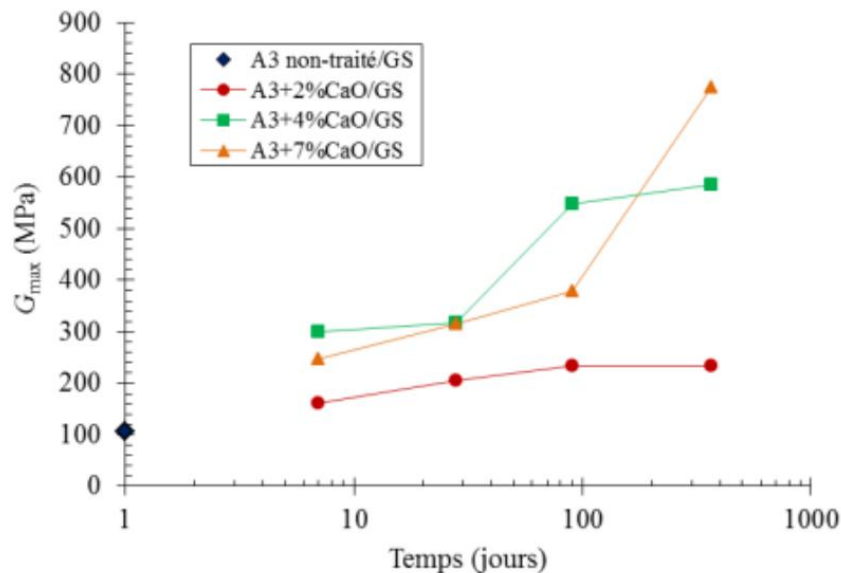


Figure IV. 22: Module de cisaillement maximal du sol A3 non-traité et traité au cours du temps (BE : Bender Element, GS : Grindo Sonic). (Nguyen, 2015).

Comme pour la résistance à la compression simple et la résistance à la traction Brésilienne, le traitement a un effet important sur le module de cisaillement maximal, G_{max} . Les valeurs de G_{max} des sols traités sont plus grandes que celles des sols non-traités et évoluent avec le temps de cure : une augmentation légère pour les sols traités aux dosages en chaux minimaux et une croissance importante pour les sols traités aux dosages en chaux supérieurs au PFC (point de fixation de la chaux). Le G_{max} du sol A1 voit sa valeur multipliée par 12 après 90 jours dans le cas des traitements visant la stabilisation (2% et 4% de chaux). Dans le cas de l'argile limoneuse A2 traité à 3%, le G_{max} est multiplié par 13 après 90 jours et ensuite reste stable. A un dosage plus élevé de 5 % de chaux, le G_{max} croît pour atteindre jusqu'à 18 fois la valeur mesurée sur le sol non traité, et ce à l'issue d'un an de cure. Encore une fois, ces évolutions sont moindres dans le cas du sol A3 et corroborent les observations réalisées et relatives aux résistances en compression et en traction indirecte.

IV.3. Caractéristiques hydriques:

IV.3.1. Coefficient d'absorption à l'eau:

Pour comparer l'influence des différents types de chaux et de la température de cure, des cylindres de brique en terre compactée ont été testés par (Flament, 2013) pour connaître leurs résistances à la remontée d'eau par capillarité après 28 jours et 90 jours de cure en atmosphère contrôlée. L'argile étudiée est composée essentiellement de Kaolinite (12%) et d'illite (7%) avec une limite de liquidité de 33% et un indice de plasticité (IP) de 12. Deux chaux de natures différentes ont été choisies : une chaux hydraulique et une chaux aérienne. La chaux hydraulique provient du groupe Lafarge. C'est une chaux hydraulique NHL 3,5.

Les premiers essais ont permis de constater que l'ajout de 2% de chaux aérienne ou hydraulique n'est pas suffisant pour obtenir une résistance à l'absorption d'eau suffisante. Tout comme pour les échantillons non stabilisés, la matière reste sensible à l'eau et se délite après quelques minutes en contact avec l'eau et ce quel que soit le temps où la température de cure (Figure IV.23).



Figure IV.23: Epreuve à 2% chaux(NHL3,5) à 90 jours après test de remontée d'eau par capillarité.(Flament.2013)

Les résultats des éprouvettes stabilisées à 4% de chaux sont présentés ci-dessous (**Figure IV.24**).

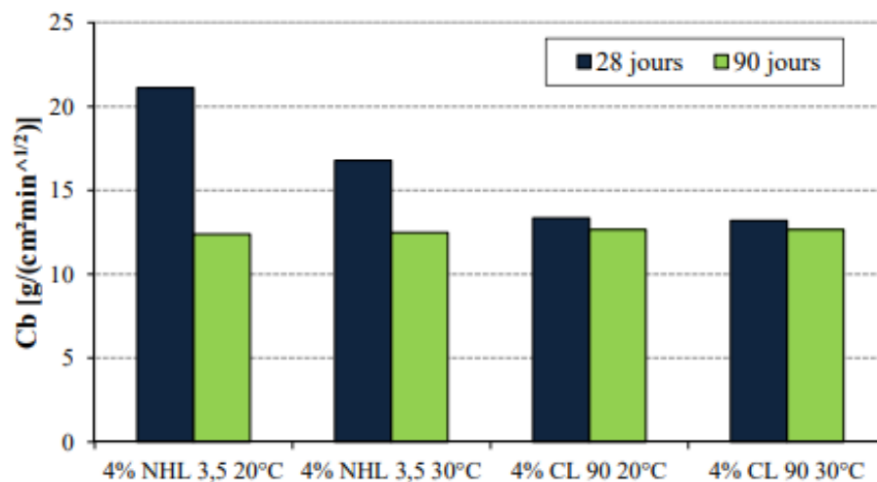


Figure IV.24 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des cylindres et chaux.(Flament.2013)

A court terme, la résistance à la remontée d'eau par capillarité est meilleure avec l'ajout de chaux aérienne. En revanche, pour la chaux hydraulique, l'évaporation rapide de l'eau de surface et la réaction lente d'hydratation de la chaux hydraulique engendre une plus faible résistance à l'absorption d'eau par capillarité à 28 jours. La température de cure accroît la formation d'hydrates à court terme ce qui améliore, pour la chaux hydraulique, le coefficient d'absorption d'eau. On remarque pour la chaux aérienne que la température n'a pas d'influence sur les performances du matériau.

A long terme, la résistance à la remontée d'eau par capillarité est identique suivant le type de chaux ou la température de cure. On remarque que la variation entre les valeurs obtenues à 28 jours et 90 jours pour la chaux aérienne est très faible ce qui indique que le matériau stabilisé atteint sa valeur optimale à court terme. En revanche, pour la chaux hydraulique, le temps de cure est primordial pour obtenir les meilleures performances. Pour une proportion de chaux de 4% et une température de cure à 20°C, l'augmentation du temps cure permet de diminuer le coefficient d'absorption d'eau de 80% (**Figure IV.24**), (Flament,2013).

Les résultats obtenus par **Seick, 2013 (Tableau IV.4)**, montrent qu'il existe de grandes différences entre les résultats obtenus à partir des méthodes de submersion et de capillarité. Ces deux résultats présentent des tendances contraires en fonction des compositions de la matrice. Pour une stabilisation à 10, 15 et 20% de chaux éteinte, le pourcentage d'absorption capillaire décroît respectivement 7.27, 5.88 et 5.46% par contre la capacité d'absorption d'eau croît de façon exponentielle (9.23% à 9.57%) pour ces mêmes dosages en chaux éteinte. La stabilisation à la chaux éteinte a donné lieu à un matériau plus compact et moins poreux. Ceci est en accord avec la densité apparente élevée des échantillons stabilisés à la chaux éteinte selon **Seick, 2013**.

Tableau IV.4: Résultats de capillarité et d'absorption d'eau. (**Seick, 2013**).

Composition	Absorption capillaire		Absorption d'eau en 24h	
	Moyenne (%)	Ecartype	Moyenne (%)	Ecartype
10% Chaux éteinte	7.27	1.20	9.23	0.47
15% Chaux éteinte	5.88	0.27	9.29	1.30
20% Chaux éteinte	5.46	0.57	9.57	0.70

IV.3.2. Essais de sorption désorption:

Pour l'analyse de l'effet de la stabilisation chimique sur la capacité hygroscopique des matériaux en terre, on s'intéresse particulièrement à la détermination des isothermes d'adsorption et de désorption de briques de terre comprimée. Ces courbes sont très importants dans la modélisation hygrothermique afin d'évaluer la réponse hygrothermique du des matériau terre.

Dans l'étude de **Saidi, 2019**, les échantillons ont été compactés à une masse volumique apparente de l'ordre de 1750 kg/m^3 à une teneur en eau de 13% pour les briques non stabilisés. Pour les briques de terre stabilisée, la quantité d'eau utilisée est entre 15 et 17%. Elle dépend de la nature et de la quantité de stabilisant ajoutée au sol. Suite à cette étape de malaxage, le mélange est mis en place dans des moules métalliques de dimensions (4cm × 4cm × 16cm) et compacté selon le mode statique par le biais d'une presse hydraulique. Les échantillons utilisés pour les essais d'adsorption-désorption (4cm × 4cm × 6cm) sont découpés à partir des blocs après 28 jours de conservation dans une chambre humide à température constante de 20°C et une humidité relative de 80 %.

Comme le montrent **les figures IV.25 et 26**, les courbes d'adsorption-désorption des briques de terre non stabilisée et stabilisée possède la même allure mais avec différente capacité de sorption. Les isothermes de BTC (brique en terre comprimée) et BTSL (brique en terre stabilisée au lime) ont une forme sigmoïdale. Cette forme sigmoïdale est rencontrée fréquemment dans les matériaux de construction hygroscopiques. Ces isothermes confirment le fait que l'isotherme d'adsorption ne se superpose pas, en général, avec l'isotherme de désorption: le phénomène de sorption présente une hystérésis. Les courbes expérimentales d'adsorption obtenues montrent que, pour une température de 25°C, la teneur en eau d'équilibre (base sèche) de l'échantillon augmente avec l'accroissement de l'humidité relative de l'ambiance dans lequel il est placé (**Saidi, 2019**). Ce résultat est en accord avec le comportement d'autres matériaux de construction en terre. Les résultats montrent également que la teneur en eau d'équilibre des briques de terre est comprise entre 0 et 6 %.

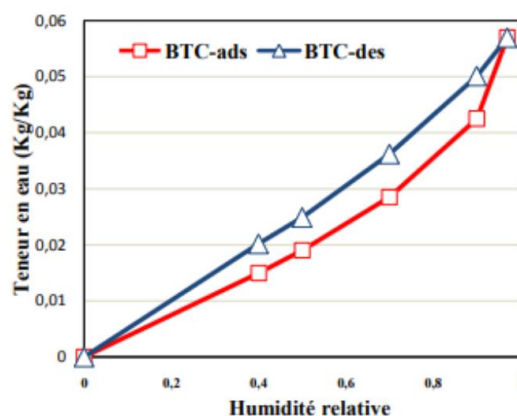


Figure IV.25: Isothermes d'adsorption (ads) / désorption (des) des briques en terre comprimée (BTC)(Saidi,2019).

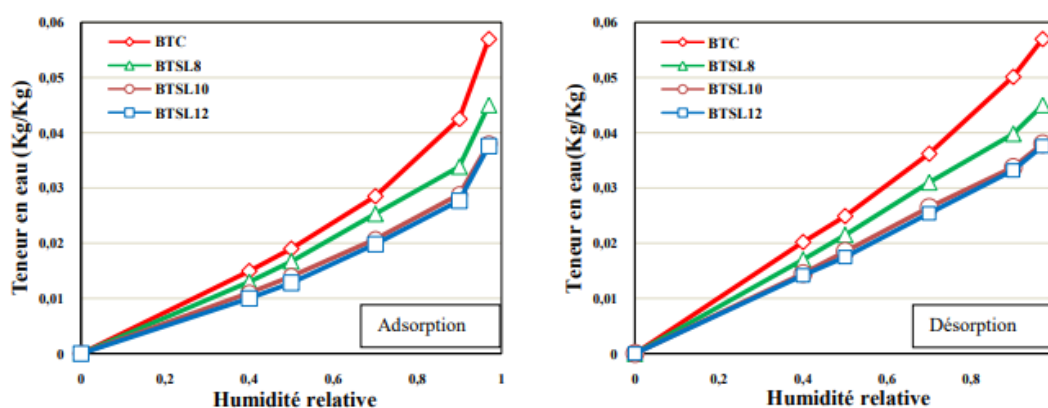


Figure IV.26: Courbes d'adsorption/désorption des éprouvettes BTC, BTSL8, BTSL10 et BTSL12.(Saidi,2019).

Les briques de terre comprimée non stabilisée possèdent un pouvoir de sorption très important. La teneur en eau atteint 5,7% pour une humidité relative égale à 97% (**La figure IV.25**). L'augmentation de l'humidité relative de 40% à 97% provoque un accroissement de 4,36% de la teneur en eau de la BTC. Ce résultat est en bon accord quantitatif avec ceux de **Hansen et Hansen,2002** cité dans **Saidi,2019**, qui ont établi une relation entre l'humidité relative et la teneur en eau des briques de terre non cuites. Ils ont montré que, pour une humidité relative supérieure à 95%, la teneur en eau (base sèche) du matériau peut atteindre une valeur de 5%. L'analyse des courbes (**la figure IV.26**) montre que la teneur en eau fixée à l'équilibre pour la BTC est plus élevée que celle des BTS. En effet, les valeurs des teneurs en eau (base sèche) des isothermes d'adsorption et de désorption de la BTC sont supérieures à celles des BTSL. Ainsi, pour une température de sorption donnée, la BTC est plus hygroscopique que les BTSL. Pour les briques de terre stabilisée (BTSL), l'augmentation de la quantité de liant minéral utilisée provoque une diminution de leurs teneurs en eau(**Saidi,2019**). La stabilisation de la terre avec de la chaux provoque une diminution de la teneur en eau de la BTSL de 5,69% pour 0% de chaux à 4,5 ; 3,81 et 3,76% pour respectivement 8%, 10% et 12% de chaux (**La figure IV.26**). Il est à noter que l'ajout des quantités de chaux supérieures à 10% du poids du mélange sec n'engendre pas une diminution significative de la teneur en eau des briques. Cette réduction de la teneur en eau peut être expliquée par la diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau des briques de terre suite à l'ajout de

stabilisants chimiques aux mélanges qui provoque une modification des dimensions de ses pores (Saidi,2019). En effet, l'augmentation de la teneur en chaux favorise la formation de produits d'hydratation qui réduisent les espaces entre les grains de terre dans les matériaux élaborés, et par conséquent les espaces par lesquels l'eau s'infiltré dans le matériau. Il en résulte une diminution de l'absorption d'eau par les échantillons de terre stabilisée.(Saidi,2019).

IV.4. Conclusions :

A travers ce chapitre, des études ont été présentées dans ce chapitre dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité du traitement à la chaux sur les propriétés mécaniques et hydriques des briques de terre comprimée. Les résultats présentés ont mis en évidence les points suivants :

- Le matériau stabilisé à la chaux est généralement plus résistant que le matériau cru.
- L'évolution des caractéristiques mécaniques dépend de plusieurs facteurs comme: minéraux argileux, dosage en chaux, temps de cure, température, caractéristiques de compactage.
- L'existence d'un dosage optimale ou point de fixation (PFC) comme certains auteurs l'appellent au-delà duquel le gain dans la caractéristique mécanique et le pourcentage de chaux ajoutée est trop faible.
- Plus la quantité de chaux est forte et plus le temps de cure est long, plus la résistance à la compression simple est forte, D'autre part, la quantité de produits cimentaires augmente avec le temps.
- En ce qui concerne les résistances à la compression humides, elles ont été au moins égales à la moitié de la résistance à la compression sèche.
- Les valeurs de la résistance à la traction R_t des sols traités montrent des évolutions similaires à celles des résistances à la compression simple.
- Le module d'élasticité (E_c) du sol traité à la chaux augmente au cours du temps dus aux réactions pouzzolaniques. En revanche, la chaux change significativement les paramètres de cisaillement du sol, notamment pour la cohésion. Cette amélioration correspond à un effet du phénomène de floculation et agglomération qui résulte de l'échange cationique.
- La résistance à la remontée d'eau par capillarité est meilleure avec l'ajout de chaux aérienne et la chaux éteinte a donné lieu à un matériau plus compact et moins poreux. Ceci est en accord avec la densité apparente élevée des échantillons stabilisés à la chaux éteinte. Mais, pour la chaux hydraulique, le temps de cure est primordial pour obtenir les meilleures performances.
- L'augmentation de la teneur en chaux favorise la formation de produits d'hydratation qui réduisent les espaces entre les grains de terre dans les matériaux élaborés, et par conséquent les espaces par lesquels l'eau s'infiltré dans le matériau. Il en résulte une diminution de l'absorption d'eau par les échantillons de terre stabilisée.

Conclusion Générale

Conclusion générale:

L'étude bibliographique à montrer la nécessité de valoriser le matériau terre pour l'utiliser dans la construction. Ce dernier constitue une alternative très intéressante par rapport aux matériaux modernes tels que l'acier ou le béton.

Dans ce mémoire une revue bibliographique sur les différentes techniques de constructions en utilisant la terre crue a été réalisée dans la première partie. Cette revue a montré la variété des techniques existantes ainsi que les nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques si elle est employée de façon raisonnée et avec des moyens modernes.

La caractérisation du matériau terre constitue un élément clef pour son utilisation optimale, comme les essais d'identification (Distribution granulométrique, Limites d'Atterberg...), les essais de durabilité (Isotherme de sorption, Absorption capillaire...), les essais spécifiques (Diffractomètre à rayon x (DRX), La Microscopie Electronique à Balayage (MEB), Analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD/ATG)...), les essais mécaniques (résistance à la compression à voie sèche et humide, résistance à la traction...)

Parmi les inconvénients majeurs de la construction en terre on cite : la faible tenue à l'eau et la faible résistance mécanique. Pour cela un certain nombre de techniques de stabilisation ont été mises en œuvre pour l'amélioration de ces caractéristiques. Ces techniques peuvent être mécanique, physique, chimique ou par des fibres. La réponse de chaque technique dépend des matériaux terre lui-même, l'ouvrage réalisé et la compatibilité entre le matériau et le stabilisateur (existence d'éléments perturbateur).

L'utilisation de la chaux comme stabilisant dans les briques de terre comprimées, a mis en évidence les points suivants :

- Le matériau stabilisé à la chaux est généralement plus résistant que le matériau cru.
 - L'évolution des caractéristiques mécaniques dépend de plusieurs facteurs comme: minéraux argileux, dosage en chaux, temps de cure, température, caractéristiques de compactage.
 - L'existence d'un dosage optimal ou point de fixation (PFC) comme certains auteurs l'appellent au-delà duquel le gain dans les caractéristiques mécaniques et le pourcentage de chaux ajoutée est trop faible.
 - Plus la quantité de chaux est forte et plus le temps de cure est long, plus la résistance à la compression simple est forte, D'autre part, la quantité de produits cimentaires augmente avec le temps
 - En ce qui concerne les résistances à la compression humides, elles ont été au moins égales à la moitié de la résistance à la compression sèche.
-

-
- Les valeurs de la résistance à la traction R_t des sols traités montrent des évolutions similaires à celles des résistances à la compression simple.
 - Le module d'élasticité (E_c) du sol traité à la chaux augmente au cours du temps dus aux réactions pouzzolaniques. En revanche, la chaux change significativement les paramètres de cisaillement du sol, notamment pour la cohésion. Cette amélioration correspond à un effet du phénomène de floculation et agglomération qui résulte de l'échange cationique.
 - La résistance à la remontée d'eau par capillarité est meilleure avec l'ajout de chaux aérienne et la chaux éteinte a donné lieu à un matériau plus compact et moins poreux. Ceci est en accord avec la densité apparente élevée des échantillons stabilisés à la chaux éteinte. Mais, pour la chaux hydraulique, le temps de cure est primordial pour obtenir les meilleures performances.
 - L'augmentation de la teneur en chaux favorise la formation de produits d'hydratation qui réduisent les espaces entre les grains de terre dans les matériaux élaborés, et par conséquent les espaces par lesquels l'eau s'infiltre dans le matériau. Il en résulte une diminution de l'absorption d'eau par les échantillons de terre stabilisée.
-

Bibliographie:

- Abahri, K., Belarbi, R., & El Hachem, C. (2015, May). Caractérisation macro-hydriques des matériaux biosourcés.
 - Amara F, BelarbiA, (2015). Le béton en terre : Application au tuf de Hounet, Thèse de Master. Université Dr Moulay Taher .SAIDA.
 - Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., & Ruiz, E. (2011). Construire en terre, une autre voie pour loger la planète. *Secteur Privé & Développement, revue bimestrielle de Proparco*, 10, 18-21.
 - Arnaud Misse, AE&CC et al.(2018). Ouvrages en maçonnerie de blocs de terre comprimée.
 - Baley, C. (2005). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Ed. Techniques Ingénieur.
 - Bensalem, A. (2010). Caractérisation et exploitation de l'argile de Benazzouz dans la construction routière.
 - Bokor Y, (2011). Verification des caractéristiques des btc stabilisés avec la chaux.
 - Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation (Doctoral dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne).
 - Champiré, F. (2017). Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction (Doctoral dissertation).
 - Dallas, N. L, (2000). Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates.
 - Djadouf, S., Chelouah, N., & Tahakourt, A. Influence de la distribution en taille de l'ajout (noyau d'olive) sur les propriétés de la brique.
 - Flament, C. (2013). Valorisation des fines de lavage de granulats: application à la construction en terre crue (Doctoral dissertation, Artois).
 - Guettala, A., Houari, H., Mezghiche, B., & Chebili, R. (2002). Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, 2(1), 61-66.
 - Hanane, M. (2019). Caractérisation Mécanique de la Brique de Terre Comprimée et Stabilisée (BTCS) sous l'effet des efforts de Compression et de Flexion (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf - M'sila).
 - Houben h et al, 1996 : traité de construction en terre.
 - Houben, H., & Guillaud, H. (2006). CRATerre: Traité de Construction en Terre. *Éditions Parenthèses: Marseille, France*.
 - Izemmourena, O.& Guettala, A. (2014). Amélioration de la durabilité des briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. In MATEC Web of Conferences (Vol. 11, p. 02001). EDP Sciences.
 - Izmmouren, O. (2016). Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
 - Jannot, Y. (2003). Isothermes de sorption: modèles et détermination. LEPT-ENSAM,(1-5).
 - Kaddour B. Adda Z. Benchenna B. (2017). Valorisation des tufs pour la fabrication des briques en terre comprimées, Thèse de Master. Université Dr Moulay Taher .SAIDA.
-

-
- Laibi, B. (2017). Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses (Doctoral dissertation, Normandie).
 - Le Borgne, T. (2010). Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols (Doctoral dissertation).
 - Le Runigo, B. (2008). Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques: comportements hydraulique, microstructural et mécanique (Doctoral dissertation).
 - Mahamat S. I. Y. (2010). Etude Comparative Entre L'amélioration Des Briques En Terre Comprimée Stabilisée Par Le Ciment Et La Chaux Eteinte", Mémoire de Master, Institut International En Ingénierie de l'eau et de l'environnement.
 - Mazhoud, B. (2017). Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés (Doctoral dissertation).
 - Miraucourt, D. (2017). Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso.
 - NF EN 13286-53, 2005. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques
 - NF EN 459-1, 2015. Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité.
 - NF P11-300, 1992. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières 23.
 - Nguyen, T. T. H. (2015). Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel (Doctoral dissertation, Paris Est).
 - Olivier, M. (2016). focus sur la fabrication et la construction en blocs de terre comprimée,
 - Olivier, M., Mesbah, A., El Gharbi, Z., & Morel, J. C. (1997). Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée. *Materials and Structures*, 30(9), 515-517.
 - Paulus, J. (2015). Construction enterre crue: Dispositions qualitatives, constructives et architecturales - application à un cas pratique: Ouagadougou.
 - Projet pavillon cinva-ram, 2010 : (<http://www.cedric-alby.net/>).
 - Saidi M,(2019). Etude comparative de la capacité de sorption des matériaux de construction à base de terre, Unité de Rayonnement Thermique, FST, Université de Tunis El Manar 2092 Tunis, Tunisie.
 - Seick O. S. (2013). Etudes techniques des btc stabilisés à la chaux éteinte, centre commun de recherche énergie et habitat durable/ laboratoire éco - matériaux de construction.
 - SERBAH, B.(2018). Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien: Une solution de valorisation en BTC (Doctoral dissertation).
 - Taallah, B. (2014). Etude du comportement Physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
 - Terre, C. R. A., Houben, H., & Boubekour, S. (1998). Blocs de terre comprimée normes. *Série Technologies*.
 - ThiThanh Hang Nguye,Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel, Docteur de l'Université Paris-E,2015.
 - TRAN Van Duy, Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux,Université de Liège Faculté des Sciences Appliquées,2013.
-

-
- Vulliet, L., Laloui, L., & Zhao, J. (2016). Mécanique des sols et des roches (TGC volume 18): Avec écoulements souterrains et transferts de chaleur. PPUR Presses polytechniques.
 - XP P13-901, (Octobre 2001). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception.

Sites web :

- Amàco – atelier matières à construire : (<http://www.amaco.org>).
 - Batirama.com, 2011 réalisé par BIP Information Professionnelle : (<http://Batirama.com/>).
 - <http://cdalpha.univ-lyon1.fr/materiel/d8/d8car.htm>.
 - [https:// www.marocmicroscopie.ma](https://www.marocmicroscopie.ma).
 - <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/583457/pouzzolane>.
 - <https://images.app.goo.gl/YodpZbegnbQ9ATBR6>.
 - https://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/3_ClassificationSols/co/Contenu_3_ValeurBleu.html.
 - <https://www.proviteq.com/ciment-surface-massique.html>.
 - Materialstudio, :(<https://unmaterialstudio.wordpress.com>).
 - Mecococept, brique en terre, (<https://www.mecoconcept.com/fr/>).
 - OCPM MachinrdOutils, (<https://www.cpmo.fr/fr/>).
 - PASSERELLES(S), construire en terre : http://passerelles.bnf.fr/reperes/terre_crue_01.php .
 - Thierry Joffroy, CRAterre-ENSAG, Maison à part, <https://www.maisonapart.com/edito/construire-renover/gros-oeuvre-construction/la-terre-un-materiau-d-avenir-pour-les-maisons-3412.php#>.
 - wikipedia.org.
 - www.all.biz.
 - YAAM SOLIDARITE, 2020 : (<http://yaamsolidarite.blogspot.com/p/construire-en-terre.html>),
-