

PARAMÈTRES DE CONCEPTION ET PERFORMANCES DES  
BRIQUES EN TERRE COMPRIMÉES STABILISÉES PAR LES  
SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS : CARRIÈRES ARGILEUSES  
DE KOSSODO ET SAABA

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE  
AVEC GRADE DE MASTER

OPTION : GENIE CIVIL ; SPECIALITE : ROUTES ET OUVRAGES D'ART

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 30 / 01 / 2023 par

SALASSI Simon-Pierre Joy

Directeur de mémoire : MESSAN Adamah, Professeur Titulaire (CAMES)

Encadreur 2iE : NSHIMIYIMANA Philbert, Assistant d'enseignement et de recherche

Structure d'accueil : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD)

Jury d'évaluation

Président :

- Pr. Daniel YAMEGUEU NGUEWO

Membres et correcteurs :

- Dr. Seick Omar SORE
- M. Iliassou NOUHOUN SALOU

---

## CITATION

---

*« Rien dans le monde n'est plus souple et plus faible que l'eau. Mais pour enlever le dur et le fort, rien ne la surpasse et personne ne peut la vaincre alors qu'elle est facile à conquérir. La faiblesse a raison de la force. La souplesse a raison de la dureté. Tout le monde le sait, mais personne ne parvient à le mettre en pratique. »*

Lao Tseu.

---

## DEDICACES

---

A toi qui as ce document sous les yeux, je te le dédis et espère de tout mon cœur qu'il te sera utile dans ta recherche.

A ma Très Chère cousine Pascaline Damgnine KANSONGUE, prie pour nous de là où tu es.

---

## REMERCIEMENTS

---

Si l'on se retrouve seul devant un jury, c'est que derrière soi, une famille, des amis, un collègue d'encadreurs pédagogiques, des camarades et collègues nous servent de soutien. Un seul mot pour vous rendre votre amour : *merci*.

Je pense particulièrement au

- Professeur Adamah MENSAN, Responsable du laboratoire LEMHaD; Directeur de ce mémoire, Sage et Charismatique. Pour Vos conseils, votre soutien, votre grande patience. Soyez toujours guidés par Dieu ;
- M. Nshimiyimana Philbert, mon maître de stage. Votre sens du travail bien fait reste un exemple unique pour moi. Merci pour votre soutien et votre patience,
- A tous les docteurs et doctorants du département Génie-civil et Hydraulique. Votre soutien inconditionnel et sans faille m'a permis d'y arriver ;
- A ce Monsieur, source de connaissance, fin technicien de laboratoire, qui ne lésine jamais sur les conseils et le partage de connaissance, soyez immensément bénis M. Salifou KABORE ;
- <<Maman, Maman Chérie, toi qui m'as donné la vie, je t'aime et je t'aimerai toujours>>. Sois centuplement bénie Maman ;
- Mes oncles et tantes, M. Yamandjoa Kansongue; Kwame Simon MORK, Emmanuel Mork, Joseph MORK, Regina Kanwab MORK, Diana et Essi MORK, toute la famille MORK de part le monde ;
- Mes cousins, Francis Yendoube KANSONGUE, Léonie Gbieteke KANSONGUE, Nanimpo Léontina KANSONGUE, Pascaline KANSONGUE, tous mes cousins MORK ; votre amour inconditionnel fut moteur pour moi. Recevez toute ma gratitude ;
- A cette personne très spéciale pour moi, mon Neveu Wisdom Gbati SASSAKA, Je ne peux m'empêcher de rire quand je pense à toi. Que des souvenirs heureux et émouvants. On se reverra Petit-Frère ;
- A ma famille 2iE, tellement nombreux, mes frères de guerre, ADEREMOU Saobane, un Maître, Abel Nikabou PAKAMEY, un second Maître, ADUFU Yawo Daniel, Abel DOREGO, toute la grande famille, répartie de part le monde, Malick Otienbouam, Jean Boundjou Piou ;
- A mes camarades de classe, les meilleurs moments à 2iE furent avec vous en classe, excellente carrière à vous tous ;
- A mes collègues de stage, Adal OUATTARA, Akpdenyon Yao David, Mana Abdel Calil OUATTARA, Edem Kodjo EKLOU, Tchatcheu Carole et bien d'autres.

---

## RESUME

---

Pour vulgariser l'emploi des BTCs dans la construction au détriment des parpaings de ciment et des autres matériaux conventionnels, il faut pouvoir prédire avec une certaine exactitude leurs comportements en toute circonstance. Pour cela, il faut non seulement promouvoir des campagnes de sensibilisation ; mais il faut surtout encourager toute recherche allant dans ce sens. Ce travail de mémoire de fin de cycle Master a pour objectif global d'apporter sa contribution à ce sujet. Il a consisté d'une façon générale à caractériser deux terres argileuses de structure différente provenant des carrières avoisinant Ouagadougou, la capitale burkinabé. Il s'agit des carrières argileuses de Saaba et de Kossodo. Ces caractérisations ont précédé la confection des briques en grandeur nature. Une série d'essai a permis de tester les performances de chacune des briques fabriquées. Au total, huit formulations de briques ont été établies, à raison de quatre par carrière. Ces formules ont été notées S-LOP0; S-L10P0; S-L20P0; S-8CEM; K-LOP0; K-L10P0 ; K-L20P0 et K-8CEM. S et K désignent les initiales des deux carrières (respectivement Saaba et Kossodo). L0 ; L10 et L20 représentent les taux de liant utilisé pour la stabilisation (respectivement 0; 10% et 20% de la masse sèche de la terre). Le liant dans ce cas était la CCR; un sous produit industriel riche en chaux éteinte. Le terme 8CEM représente 8% de ciment. Des échantillons stabilisés au ciment ont été fabriqués en vue de comparer les deux modes de stabilisation. Après toutes ces formulations, les briques sont restées pendant 45 jours dans un environnement hermétiquement clos et à température ambiante pour leurs maturations. Après, un passage à l'étuve maintenue à 40°C s'est imposé pour retirer toute eau résiduelle dans le matériau. Après ce passage à l'étuve, les caractérisations proprement dites des briques ont été faites. Les résultats ont montré que la stabilisation à la chaux augmente la résistance à la compression sèche et humide des deux terres. Cependant les valeurs maximales enregistrées sont celles des briques stabilisées au ciment 8,7MPa pour la terre de Kossodo et 7,3 pour la terre de Saaba. Les résultats des essais physiques ont montré que les briques stabilisées sont plus légères que les non stabilisés. Parmi les briques stabilisées, celles stabilisées au ciment ont présenté des densités plus élevées que celles stabilisées à la CCR (1633kg/cm<sup>3</sup> pour la S-8CEM contre 1503 kg/cm<sup>3</sup> pour la S-L20P0). Inversement, la porosité totale a diminué avec l'ajout de la CCR. Les valeurs les plus basses ont été obtenues avec la stabilisation au ciment (35,26% pour la brique K-8CEM et 39,93% pour la brique S-8CEM). Les propriétés thermiques ont montré que les briques non stabilisées sont plus isolantes que toutes les autres. Lorsque la CCR est ajoutée, la conductivité thermique augmente immédiatement pour les deux terres. Ceci montre bien que la stabilisation tend à diminuer les performances thermiques du matériau. Les propriétés hygrométriques mesurées sont la perméabilité à la vapeur d'eau et la sorption-désorption. Ces essais ont montré à l'unanimité que les briques de Saaba sont plus hygroscopiques que celles de Kossodo.

### **Mots clés :**

Matériaux argileux ; Carbone de Calcium Résiduel ; Propriétés hygromécaniques ; Propriétés hygrothermiques, Propriétés hygroscopiques ; Indicateurs de durabilité.

---

## Abstract

---

In order to popularise the use of BTCs in construction to the detriment of cement blocks and other conventional materials, it is necessary to be able to predict their behaviour with a certain degree of accuracy in all circumstances. To do this, it is necessary not only to promote awareness campaigns, but above all to encourage any research in this area. The overall aim of this Master's thesis is to make a contribution to this subject. It consisted in a general characterisation of two clayey soils of different structure coming from quarries surrounding Ouagadougou, the capital of Burkina Faso. These are the clayey quarries of Saaba and Kossodo. These characterisations preceded the production of the bricks in real size. A series of trials made it possible to test the performance of each of the bricks manufactured. In total, eight brick formulations were established, four per quarry. These formulations were labelled S-L0P0; S-L10P0; S-L20P0; S-8CEM; K-L0P0; K-L10P0; K-L20P0 and K-8CEM. S and K are the initials of the two quarries (Saaba and Kossodo respectively). L0; L10 and L20 represent the rates of binder used for stabilisation (respectively 0; 10% and 20% of the dry mass of the soil). The binder in this case was CCR; an industrial by-product rich in slaked lime. The term 8CEM represents 8% cement. Cement-stabilised samples were made in order to compare the two stabilisation methods. After all these formulations, the bricks were left for 45 days in a hermetically sealed environment at room temperature for maturation. Afterwards, an oven treatment at 40° C was necessary to remove any residual water in the material. After this oven passage, the actual characterisations of the bricks were carried out. The results showed that lime stabilisation increases the dry and wet compressive strength of both clays. However, the maximum values recorded were 8.7MPa for the Kossodo clay and 7.3 for the Saaba clay. The results of the physical tests showed that the stabilised bricks are lighter than the unstabilised ones. Among the stabilised bricks, those stabilised with cement showed higher densities than those stabilised with CCR (1633 kg/cm<sup>3</sup> for the S-8CEM against 1503 kg/cm<sup>3</sup> for the S-L20P0). Conversely, the total porosity decreased with the addition of CCR. The lowest values were obtained with cement stabilisation (35.26% for the K-8CEM brick and 39.93% for the S-8CEM brick). The thermal properties showed that the unstabilised bricks are more insulating than all the others. When CCR is added, the thermal conductivity increases immediately for both clays. This shows that stabilisation tends to decrease the thermal performance of the material. The moisture properties measured were water vapour permeability and sorption-desorption. These tests showed unanimously that Saaba bricks are more hygroscopic than Kossodo bricks.

**Key words:** Clay materials; Residual Calcium Carbide; Hygromechanical properties; Hygrothermal properties; Hygroscopic properties; Durability indicators

## Liste des abréviations

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

µm : Micromètre

BTC : Brique en Terre Comprimée

Cab : Coefficient d'abrasion

CCR : Carbure de Calcium Résiduel

Fmax : Charge de rupture maximale

Ip : Indice de plasticité

LEMHaD : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable

MPa : Mégapascal

ONEA : Office Nationale de L'Eau et de l'Assainissement

Rcs : Résistance à la compression sèche

Rch : Résistance à la compression humide

CES : Coefficient d'Efficacité Structurel

Wl : Limite de liquidité

Wopt : Teneur en eau optimale

Wp : Limite de plasticité

## Table des matières

INTRODUCTION.....	1
Chapitre-I. REVUE DE LA LITTERATURE.....	3
I.1 Introduction partielle .....	4
I.2 Historique des constructions en terre .....	4
I.3 Le matériau terre .....	5
I.3.1 Nature du matériau terre .....	5
I.3.2 Emploi du matériau terre : La brique en terre comprimée BTC.....	8
I.3.3 Les principales propriétés des BTCs .....	10
Chapitre-II. MATERIAUX ET METHODOLOGIE .....	15
II.1 Introduction partielle .....	16
II.2 Matériaux.....	16
II.2.1 Matériaux argileux.....	16
II.2. Les liants.....	16
II.3 Méthodologie.....	17
II.3.1 Formulation des matériaux composites .....	18
II.3.2 Caractérisation des matières premières .....	19
II.3.3 Confection et maturation des briques .....	20
II.3.4 Essais de caractérisation des briques .....	20
Chapitre-III. RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	29
III.1 Introduction partielle .....	30
III.2 Caractéristiques de la matière première .....	30
III.3 Caractéristiques des briques en terre comprimées.....	33
III.3.1 Propriétés physiques.....	33
III.3.2 Propriétés mécaniques et hygro-mécaniques.....	36
III.3.3 Propriétés hydriques .....	40
III.3.4 Propriétés thermiques et hygrothermiques .....	42
III.3.5 Influence de l'humidité sur les propriétés thermiques.....	46
III.3.6 Propriétés hygrométriques.....	48
III.3.7 Indicateurs de durabilité .....	53
CONCLUSION.....	56
BIBLIOGRAPHIE .....	58
ANNEXE.....	60



## Liste des figures

Figure 1: Illustration de la disposition microscopique d'une famille d'argile : les montmorillonites [source : A. EL HACHMI-Argile et minéraux argileux : propriétés.....	7
Figure 2: Observations microscopiques montrant (a.) les kaolinites (b.) les micas (c.) les chlorites. Source :[3] .....	7
Figure 3: Dispositif expérimental de l'essai de perméabilité à la vapeur : Source :[14] .....	26
Figure 4: Courbes granulométriques des terres argileuses de Kossodo et de Saaba .....	30
Figure 5: a) Courbes Proctor Saaba ; b) Courbes Proctor Kossodo ; c) Regression entre les teneurs en eau optimales et les taux de CCR. ....	32
Figure 6: Illustrations de (a.) La densité apparente (b.) la porosité totale des différentes briques.....	33
Figure 7: Illustrations de (a.) La porosité accessible à l'eau et (b.) la porosité fermée des différentes briques .....	34
Figure 8: Illustrations de (a.) La Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et (b.) le Module dynamique des différentes briques .....	35
Figure 9: Résistances à la compression (a.) sèche (b.) humide ; (c) Coefficient of Water Strength (CWS).....	36
Figure 10: Cinétique d'absorption de l'eau .....	38
Figure 11: Résistances hygro-mécaniques des différents échantillons a) Kossodo b) Saaba.....	38
Figure 12: Coefficient d'efficacité structurelle .....	39
Figure 13: Absorption par capillarité des briques de Kossodo (a.) des macros pores (b.) des pores capillaires .....	40
Figure 14: Absorption par capillarité des briques de Saaba (a.) des macros pores (b.) des pores capillaires .....	41
Figure 15: a) Coefficient d'absorption par capillarité après 10 min d'immersion et b) sorptivité des briques de Kossodo et de Saaba .....	41
Figure 16: Absorption totale des briques de Kossodo et de Saaba.....	42
Figure 17: Conductivité thermique.....	43
Figure 18: Corrélation entre le taux de CCR dans une brique e la conductivité thermique .....	44
Figure 19: Capacité thermique massique .....	45
Figure 20: Effusivité thermique .....	45
Figure 21: Diffusivité thermique .....	46
Figure 22: Effusivités hygro-thermiques (a.) Kossodo (b.) Saaba .....	47
Figure 23: : Conductivités hygro-thermiques (a.) Kossodo (b.) Saaba .....	48
Figure 24: Perméabilité à la vapeur.....	49
Figure 25: Isothermes de sorption et désorption K-L0P0 et S-L0P0.....	51
Figure 26: Isothermes de sorption et désorption K-L10P0 et S-L10P0.....	51
Figure 27: Isothermes de sorption et désorption K-L20P0 et S-L20P0.....	52
Figure 28: Isothermes de sorption et désorption K-8CEM et S-8CEM .....	52
Figure 29 : Illustration (a.) du coefficient d'abrasion et (b.) des pertes de masses après l'essai.....	53
Figure 30: a) Coefficient d'abrasion en fonction de la résistance à la compression ; b) Résistance mesurée Vs Résistance calculée .....	54
Figure 31: Illustration de a) pourcentage d'érosion et b) profondeur d'érosion.....	55
Figure 32: Contexte géographique de la présente étude	Figure 33: Roue de la construction en terre. Source: [1] .....
Figure 34: Mosquée de Mopti au Mali	61
Figure 35: Mosquée de San au Mali.....	61
Figure 36: Mosquée de Djéné au Mali	61
Figure 37: Vestiges de la cité ancienne de Babylone .....	61

Figure 38: Image microscopique d'une terre argileuse non stabilisée. Source:[5]	Figure 39:
Vue microscopique d'articles de CCR[28].....	62
Figure 40: Image microscopique d'une terre argileuse stabilisée à 10% de CCR[28].....	Figure 41:
microscopique d'une terre stabilisée 20% de CCR[28].....	62
Figure 42: Fuseau granulométrique des terres pour confection des briques[1].....	63
Figure 43: Réserves en CCR de l'entreprise BIGO Kossodo-Ouagadougou-Burkina-Faso .....	64
.. Figure 44: Flocculation de CCR non broyé, ni tamisé	Figure 45: Poudre de CCR
tamisé à 80micromètre .....	64
Figure 46: Vue aérienne de la carrière de Kossodo [10]	Figure 47: Point de
prélèvement de la terre argileuse de Kossodo .....	64
Figure 48: Vue aérienne de la carrière de Saaba :[10]	Figure 49: Point
de prélèvement de la terre argileuse de Saaba.....	65
Figure 50: Illustration d'un prélèvement de la carrière	Figure 51:
Illustration d'une séance de tamisage de la terre .....	65
Figure 52: Terre argileuse de Saaba passée au tamis de 5mm	Figure 53: Terre
argileuse de Kossodo passée au tamis de 5mm .....	65
Figure 55: Piles de tamis prêt pour analyse granulométriques	Figure 56: Presse
TESTARAM utilisée pour confection des briques.....	66
Figure 54: Balance de laboratoire capacité 15kg.....	66
Figure 57: Etuve utilisée pour séchage des briques	Figure 58:
Briques entreposées dans l'étuve pour séchage .....	67
Figure 59: Entreposage des briques après séance de pesage	Figure 60: Presse hydraulique
utilisée pour essai de compression	67
Figure 61: Dispositif de l'essai d'absorption par capillarité.....	67
Figure 62: Dispositif DESPOTERM pour acquisitions thermiques	Figure 63:
Dispositif pour essai d'abrasion.....	68
	Figure 64: Dispositif pour essai de sorption
désorption.....	68
Figure 65: Dispositif de l'essai d'érodabilité.....	68
Figure 66: Echantillons de Kossodo après essai de perméabilité à la vapeur .....	69
Figure 67: Echantillons de Saaba après essai de perméabilité à la vapeur.....	69
Figure 68: Echantillons de Kossodo (au-dessus) et de Saaba (en dessous) non stabilisés après 2minutes de l'essai d'érodabilité.....	69
Figure 69: Echantillons de Kossodo à gauche et de Saaba à droite stabilisés à 10% de CCR après 10min d'essai d'érodabilité .....	70
Figure 70 : Echantillons de Kossodo à gauche et de Saaba à droite stabilisés à 20% de CCR après 10min d'essai d'érodabilité .....	70
Figure 71: Echantillons de Kossodo à gauche et de Saaba à droite stabilisés à 8% de ciment après 10min d'essai d'érodabilité .....	70
Figure 72: Echantillons non stabilisés de Kossodo à gauche Vs Saaba à droite après essai d'abrasion	71
Figure 73: Echantillons stabilisés à 10% de CCR de Kossodo en haut et de Saaba en bas après essai d'abrasion.....	71
Figure 74: Echantillons stabilisés à 20% de CCR de Kossodo à gauche et de Saaba à droite après essai d'abrasion.....	72
Figure 75: Echantillons stabilisés à 8% de ciment de Kossodo à gauche et de Saaba à droite après essai d'abrasion.....	72

## Liste des tableaux

Tableau 1: Description des trois grandes familles d'argile : Source :[1].....	7
Tableau 2:Classes de résistance en compression sèche des BTCs : Norme AFNOR XP P13-901. Source :[1] .....	11
Tableau 3: Liste des essais de caractérisation des briques .....	17
Tableau 4: Nomenclature et définition des différentes formulations effectuées .....	18
Tableau 5: Valeurs des HR (%) en fonction de la nature du sel à 20°C .....	27
Tableau 6: Répartition granulaire des terres argileuses de Kossodo et de Saaba.....	31
Tableau 7:Densités apparentes et spécifiques des matières premières.....	31
Tableau 8: Propriétés physiques, capacités d'absorption capillaire et totale .....	35
Tableau 9: Propriétés mécaniques .....	37
Tableau 10: Equations de la conductivité thermique en fonction du taux de CCR.....	43
Tableau 11: Propriétés thermiques .....	46
Tableau 12: paramètres de régression hygrothermique.....	47
Tableau 13:Coefficients de perméabilité à la vapeur d'eau .....	50
Tableau 14: Paramètres de sorption et désorption des briques de Saaba et de Kossodo(modèle de Henderson) .....	50
Tableau 15: Résultats de la résistance d'abrasion.....	53
Tableau 16: Paramètres de la résistance à l'érodabilité .....	55

## INTRODUCTION

---

Avoir une habitation saine et décente pour soi et sa famille a toujours été l'un des plus grands besoins de l'Homme. Maslow l'avait si bien énuméré dans sa pyramide en 1947 en besoins physiologiques et de sécurité. Pour répondre à la demande sans cesse croissante en matériaux de construction, l'Homme au fil du temps a trouvé des alternatives qui bien que répondant au besoin, ne sont pas restés sans conséquences pour lui et son environnement. Ces alternatives (matériaux de construction dits modernes) ont remplacé peu à peu les matériaux ancestraux, localement et facilement disponibles tels que *la terre argileuse*. Aujourd'hui ces besoins humains se traduisent en objectifs qualifiés par les Nations-Unies en 2015 d'*Objectifs de Développement Durable*. Parmi eux, on peut lire : *Villes et communautés durables*<sup>1</sup>. Ces objectifs visés pour l'an 2030 apparaissent comme une réponse au cri d'alarme qui est donné depuis quelques années sur les aléas environnementaux et le réchauffement climatique. Conséquences d'une exploitation abusive et d'une mauvaise gestion des ressources naturelles. D'après le *World Business Council for Sustainable Development*, le secteur de la construction utilise à lui seul 40% de l'énergie totale produite dans le monde. L'architecte *Edward Mazria* révélait dans *Architecture 2030* que le secteur du bâtiment rejette à lui seul la moitié du CO<sub>2</sub> émis dans la nature. L'avancée de la mer, qui est causée encore dans certains pays par une exploitation du sable de mer pour la construction est aussi une des réactions de *Mère Nature* face à cette piètre exploitation de ses ressources. Il était grand temps de se fixer de nouveaux objectifs afin de rectifier le tir. *Le terme villes et communautés durables* fait intervenir à lui seul plusieurs paramètres : humains, culturels, techniques, économiques etc. Humainement, il renvoie à une prise de conscience sur l'impact de nos méthodes actuelles de construction et d'exploitation des matières premières sur notre environnement et donc sur nous. Techniquement, il appelle à plus d'investissement dans la recherche et la science de construction et à une orientation écologique des acteurs de la construction. L'aspect culturel renvoie chaque peuple à s'identifier par des techniques de construction particulières adaptées à leur contexte et mode de vie (ressources locales, climat, économie, croyances, tradition etc.). Fort heureusement plusieurs programmes de recherche et de développement allant dans ce sens voient de plus en plus le jour en Afrique et dans d'autres pays en voie de développement. Au Burkina Faso en particulier, le programme intitulé *Amélioration de la qualité de l'habitat de terre crue au Burkina Faso* développé par un partenariat entre l'Université de Liège (U-liège) et l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) en est un exemple palpable. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de mémoire de fin d'études intitulé *Paramètres de conception et performances des briques en terre comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : Carrières argileuses de Kossodo et Saaba*. Ce travail vise d'une façon globale à vulgariser à grande échelle l'utilisation du matériau terre dans les techniques de construction au Burkina Faso tout en valorisant les sous-produits (déchets) agro-industriels localement produits. De façon spécifique, elle vise à :

- Caractériser les terres argileuses des carrières de Kossodo et de Saaba en vue de leur utilisation comme source de matières premières de production des briques en terre comprimées (BTCs),
- Evaluer l'influence de l'ajout du liant stabilisant (CCR) sur la demande en eau des formulations de ces deux terres argileuses, et déterminer leurs densités maximales,
- Déterminer les propriétés d'usage (physico-mécaniques), et la tenue à l'eau des BTCs stabilisées,
- Déterminer les propriétés hygrothermiques des BTCs stabilisées,
- Etudier les paramètres de durabilité des BTCs stabilisées dans un contexte d'usage.

---

<sup>1</sup> Objectif N° 11 de la liste des 17 objectifs établis signés par les Nations Unies en septembre 2015

Ce document fait office de rapport et s'articule en trois grandes sections :

- La première intitulée *revue de la littérature* sera consacrée à l'histoire de ce matériau ancestral aux atouts indénombrables, en faisant cas des études menées au laboratoire LEMHaD et dans le monde ;
- La seconde section intitulée *matériaux et méthodologie* sera celle où les matériaux et la méthodologie employés au cours de cette étude seront décrits ;
- La dernière section, Résultats et discussions sera consacrée comme indiqué par son nom aux résultats des différentes études. Ces résultats seront analysés et interprétés enfin d'en tirer des conclusions justes.

## Chapitre-I. REVUE DE LA LITTERATURE

## I-1. Introduction partielle

La quasi totalité des documents traitant des techniques de construction en terre, s'accordent sur un point : la terre est l'un des matériaux de construction les plus anciens et répandus sur la surface terrestre. Cette assertion est tout à fait normale, car ce matériau se trouve à profusion juste sous nos pieds.

Depuis près de 10 000 ans que les Hommes bâtissent des villes, la terre crue a été et demeure, à travers les traditions historiques et populaires, l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète.[1]

## I-2. Historique des constructions en terre

Plus l'on remonte le cours de l'histoire et plus la terre semble être le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, des âges les plus lointains jusqu'à nos jours.[1]

Des civilisations les plus anciennes aux plus récentes, de l'extrême Orient en Europe en passant par l'Amérique, la terre a fait parler d'elle comme matériau incontournable dans l'art de construire. Il est cependant difficile de parler de l'histoire des constructions en terre sans commencer par l'Afrique et plus précisément par la civilisation égyptienne. Le secret des pyramides reste à nos jours mal connu voire mystérieux. Et s'il se trouvait dans la terre ? Personne ne le sait encore. Mais l'on sait à partir des fouilles archéologiques opérées que ces gigantesques édifices ont été construites en partie en terre stabilisée par des pailles de céréales cultivées. D'autres fouilles ont révélé que les sépultures des pharaons (Mastabas) de la première dynastie étaient en briques de boue. En réalité, la vallée du Nil offrait la matière première nécessaire en quantité et qualité (un limon argileux mêlé au sable du désert) [1] .

Bien que brillante et évolutive, cette civilisation est restée au fil du temps très conservatrice et donc eut très peu d'influence sur les civilisations d'Afrique Noire. Ces dernières ont pour leur part été très influencées par les peuples venus de l'océan indien (les Mélanésiens), mais surtout par l'avènement de l'Islam vers le XI<sup>ème</sup> siècle. L'architecture africaine s'est vue dès lors profondément modifiée avec l'implantation des mosquées ; qui utilisaient pour la plupart des matériaux comme *la bauge*<sup>2</sup> ou des briques de terre. Les mosquées de *San*, *Djenné* ou encore *Mopti* au Mali en sont les exemples les plus palpables (Annexe1 figure 34, 35, 36).

Malgré toutes ces illustrations, l'on ne reconnaît pas l'Afrique comme berceau des constructions en terre. Selon une chronologie établie par [2]; les premières traces de construction en terre remonteraient à 11 000 ans en Amérique du Sud.

Des récits bibliques remontant aux débuts de la civilisation juive nous parlent des gigantesques villes de Babylone, de Ninive et de leurs tours mythiques faites en terre. Bien que dogmatiques, ces villes ont

---

<sup>2</sup> Matériau de construction [monolithique](#) en [terre crue](#) empilée.

existé et étaient construites en terre. Leurs ruines servent aujourd'hui de sites touristiques. (Annexe1 figure 37)

Un peu vers le V<sup>ème</sup> millénaire avant J-C, en l'extrême Orient, la Chine fut l'une des précurseurs d'une technique particulière : *la terre creusée*. Les premières communautés agricoles creusaient des trous de 3m en forme de poches de plans circulaires dans le loess<sup>3</sup> [1].

Toutes ces illustrations pour montrer à quand remonte l'emploi du matériau terre et son rôle dans l'histoire des constructions. Nous retiendrons qu'à chaque époque, le bâtisseur en terre utilise un matériau localement présent. Cette possibilité de l'adapter aux exigences du projet est un de ses plus grands atouts. La grande muraille de Chine et son aspect hétérogène sur tout son long en est un bon exemple. En effet, l'on rapporte qu'elle s'adapte à chaque fois au type de sol sur laquelle elle était construite. Cet atout est repris sous diverses formes dans la littérature. Nous citerons à titre d'exemple [1]

*« La terre est un matériau biosourcé, universel, abondant et facilement accessible ;  
il est doté d'atouts écologiques et économiques indéniables »*

Nous connaissons à présent la renommée et la réputation de ce matériau. Tentons de le définir et de le décrire.

### I-3. Le matériau terre

Une confusion est généralement faite entre les termes *sol* et *terre*. Il y a lieu de lever ce voile pour la suite de ce document. Selon [1] « *Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface de ce sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux* ». En d'autres termes, le sol est la partie solide et granulaire du globe terrestre et la terre n'est qu'une fraction de ce sol, résultant de l'altération d'une roche mère sous-jacente. Il faut remarquer que l'on parle de *constructions en terre* et non de *constructions en sol*. La pédogenèse est la science qui étudie les conditions de formation du sol et de la terre. Ce sujet n'étant pas l'objet de la présente étude, il ne sera pas développé davantage dans ce document.

#### I-3-1. Nature du matériau terre

Le matériau terre est généralement décrit comme étant un matériau triphasique car composé de trois phases principales :

- Les grains solides ;
- L'eau et
- L'air.

Chacun des trois joue un rôle bien défini dans l'essence même du matériau et dans son potentiel utilisation. Une brève description en est faite dans les paragraphes ci-dessous.

---

<sup>3</sup> Roche sédimentaire, sorte de grès

#### a. L'eau et l'air

Ils représentent ce qu'on appelle *les vides*. La partie *air* de la terre fait référence à des pores réparties de façon aléatoire et hétérogène dans tout le volume du matériau. L'air à lui seul ne participe pas directement à la résistance mécanique du matériau. Cependant, il existe un lien étroit entre le volume des poches vides et la densité du matériau, or la résistance mécanique des matériaux granulaires généralement utilisés en génie-civil évoluent avec leurs densités. En d'autres termes et à priori, trop de pores dans un matériau terreux signifie matériau moins dense et donc mécaniquement moins résistant. Ces poches d'air représentent également des réservoirs d'eau lorsque le matériau terre est mis en contact avec cette dernière. En effet ces poches d'air, sont généralement reliées entre elles formant ainsi des canaux d'acheminement de l'eau dans le matériau. Et très souvent, lorsqu'elles ne jouent pas le rôle de *réservoir*, elles peuvent servir de niches bactériennes, modifiant ainsi le comportement du matériau. Voilà pourquoi leur volume doit être réduit au maximum pour garantir une pseudo imperméabilité et une bonne résistance mécanique.

L'eau dans le matériau est un agent à double revers. D'un côté, elle détériore les performances mécaniques du matériau, mais d'un autre côté, c'est elle par ses capacités de transformation d'état qui régule un confort hygrothermique à l'intérieur des habitats.

#### b. Les grains solides

Ce sont des éléments cristallisés ou non, de formes et de dimensions variables, constituant le squelette du matériau. Ils sont insolubles dans l'eau, et réagissent entre eux ou avec un agent extérieur de façon différente suivant leurs dimensions, les proportions de chaque fraction et leur minéralogie. En effet, ils représentent ce qu'on appelle les *constituants minéralogiques de la terre*. Ils sont caractérisés macroscopiquement par leur *structure* et leur *texture* traduisant la granularité du matériau. Ainsi, une terre à texture sableuse sera celle présentant une grande quantité de sable. Une terre argileuse par contre sera caractérisée par une prépondérance d'élément de diamètre inférieure à  $2\mu\text{m}$ . Généralement la terre utilisée en construction est un mélange naturel ou artificiel pondéral et optimal de ces deux groupes d'éléments, car les grossiers qui constituent une sorte d'ossature pour le matériau, sont reliés entre eux par de l'argile et les éléments fins.

Ce sont d'ailleurs ces derniers qui retiendront particulièrement notre attention.

#### c. Les argiles

Ils forment pour la terre ce qu'est le ciment pour le mortier ou le béton ; d'où leur intérêt particulier. Leur caractère de liant leur confère le nom de colloïde (une sorte de colle qui lie les particules inertes<sup>4</sup> de la terre). Les argiles sont ainsi des particules de très faibles diamètres (inférieur à  $2\mu\text{m}$ ). Ces dimensions les rendent généralement invisibles à l'œil nu. D'où l'importance des observations microscopiques pour bien cerner tous leurs états. Au microscope, elles se présentent non pas arrondies comme les autres particules mais sous forme de superposition de feuillets. Cette morphologie phylleuse permet d'expliquer le comportement des argiles.

Primo, des feuilles lamellées présentent une surface spécifique plus importante que des grains arrondis ou de forme quelconque, donc une capacité absorbante plus élevée [1].

Secundo leur superposition leur confère l'aptitude de glisser les unes sur les autres en présence de l'eau, d'où leur grande sensibilité à l'eau et leur plasticité élevée. En effet, l'eau absorbée se retrouve piégée entre ces feuillets sous forme de microgouttelettes ou de vapeur d'eau. On appelle *espace inter-foliaire*, l'espace entre deux feuillets successifs. Cet espace est généralement assimilé à la distance entre les surfaces supérieures de ces deux feuillets successifs et est chargé de cations inter foliaires tels que le

---

<sup>4</sup> les particules grossiers, insensibles à l'eau

potassium  $K^+$ , le sodium  $Na^+$ , l'hydrogène  $H^+$  et d'eau sous forme de vapeur. Lorsque la teneur en humidité augmente dans le matériau, les microgouttelettes deviennent plus épaisses écartant ainsi les feuillets les uns des autres. Ceci se traduit à l'œil nu par un phénomène de gonflement du matériau. Les argiles ayant des distances inter-foliaires plus grandes auront donc tendance à capter facilement de l'humidité, sujets à ces phénomènes de gonflement et donc plus sensibles à l'eau.

Tertio, la composition minéralogique de l'argile joue un rôle de premier choix dans sa caractérisation. En effet, lorsqu'on isole un feuillet et qu'on le passe au microscope, on peut observer une succession de deux ou trois couches selon le type d'argile. D'une part de la silice  $SiO_2$  (ions silicium  $Si^{4+}$  entouré de quatre atomes d'oxygène  $O^+$ ) ; on dit de cette première couche qu'elle est *tétraédrique*. D'autre part, l'on observe une couche d'alumine ou hydroxyde d'aluminium  $Al_2(OH)_6$  se traduisant par des atomes d'aluminium entourés de huit groupes hydroxyle  $OH^-$ . On parle ici de couche octaédrique. L'on rencontre aussi souvent des hydroxydes de magnésium  $Mg_3(OH)_6$  à la place des aluminés.

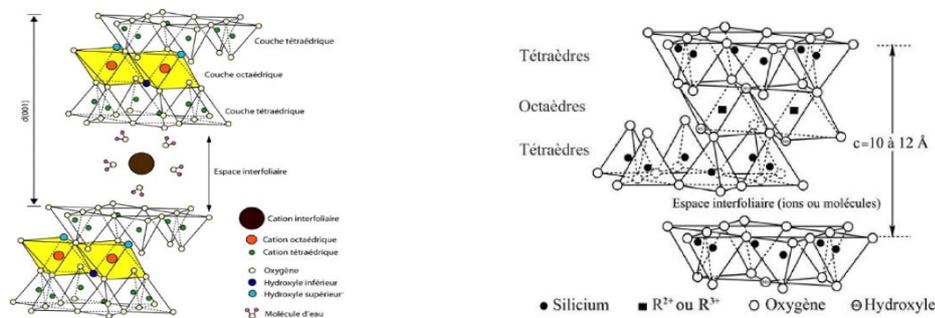


Figure 1: Illustration de la disposition microscopique d'une famille d'argile : les montmorillonites [source : A. EL HACHMI-Argile et minéraux argileux : propriétés

C'est donc la disposition de ces couches, leur succession ainsi que leurs minéralogies qui distinguent les différents groupes d'argile.

On en dénombre une multitude, dont trois principaux retiennent généralement l'attention :

- Le groupe des kaolinites ;
- Le groupe des micas (les illites) et
- Le groupe des montmorillonites.

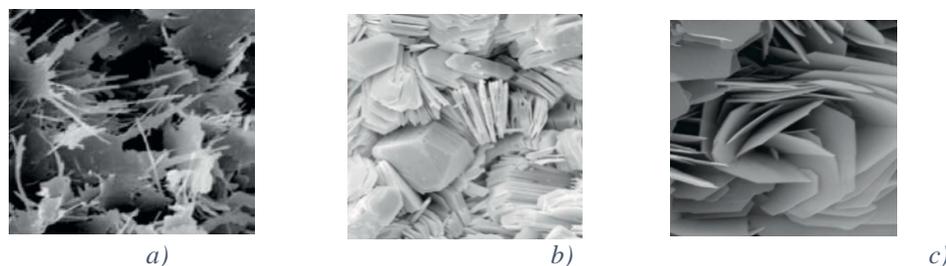


Figure 2: Observations microscopiques montrant (a.) les kaolinites (b.) les micas (c.) les chlorites. Source :[3]

Une brève comparaison entre ces trois grands groupes d'argile est illustrée dans le tableau 1.

Tableau 1: Description des trois grandes familles d'argile : Source :[1]

Familles	N couches	Minéralogie	Distance inter foliaire	SE	SI
----------	-----------	-------------	-------------------------	----	----

Kaolinites	2	Si+Al <sub>2</sub>	7Å	10-30	0
Illite	3	Si+Al <sub>2</sub> + Si	10Å	80	800
Montmorillonite	3	Si+(MgouFe)+Si	14 – 20Å	80	800

A travers ce tableau, nous voyons donc que les kaolinites sont les argiles les plus stables et moins sensibles à l'eau. Les illites et les montmorillonites quant à eux sont très gonflants et très peu prévisibles. Des terres présentant une prédominance de kaolinites seront donc privilégiées dans leur utilisation en construction en terre.

### I-3-2. Emploi du matériau terre : La brique en terre comprimée BTC

L'application de l'argile est très variée. De la construction à la pharmacie en passant par les cosmétiques, l'argile est un matériau de renom dans le monde scientifique et de la recherche. Restons dans le domaine de la construction. L'argile se retrouve partout ; de la route et son assainissement à l'habitat en passant par les réservoirs et les barrages, la terre argileuse est bonne à tout faire. Cependant ce qui nous intéresse dans cette étude c'est son emploi dans l'habitat, plus précisément son utilisation comme *Brique de Terre Comprimée BTC*.

La brique en terre comprimée, n'est rien d'autre qu'une évolution de la *terre moulée ou adobe*. En effet, la grande porosité des adobes les rend vulnérables au contact de l'eau. Leur résistance mécanique aussi n'est généralement pas satisfaisante et cela s'explique assez aisément par la présence élevée de pores.

Durant le processus de rupture, la déformation adopte le chemin qui réclame le moins d'énergie possible, en général balisé par les macropores[1]

Il a donc fallu trouver des techniques d'amélioration appelées stabilisation de terre crue pour booster leurs performances.

Plusieurs techniques sont employées pour stabiliser la terre crue. Elles sont regroupées en trois grands groupes :

- La stabilisation mécanique ;
- La stabilisation physique et
- La stabilisation chimique.

#### a. Stabilisation mécanique

Aussi appelée *densification de la brique*, elle consiste à réduire les vides à travers un compactage statique avec une énergie constante. Cette réduction de vide va entraîner l'ajout d'un maximum de grains solides augmentant ainsi la masse de la brique pour un même volume. Les propriétés de la brique se voient ainsi améliorées. Tant sa résistance mécanique que sa porosité et sa sensibilité à l'eau. C'est cette technique de stabilisation qui donne son nom à la brique : *Brique de Terre Comprimée*. On dit que la stabilisation est réussie lorsqu'on obtient un bloc de densité maximale. Cette dernière dépend en grande partie de la quantité d'eau utilisée dans la confection de la brique. Cette quantité d'eau est appelée *teneur en eau optimale*. Il s'agit de la quantité d'eau nécessaire pour avoir un compactage optimal c'est à dire une densité maximale du bloc. Ce paramètre très important dans la technique de production des briques est généralement obtenu par *l'essai Proctor normal* suivant la norme *NF P 94-093*. Il est cependant nécessaire de souligner que la pertinence de cet essai pour les blocs comprimés est remise en cause par plusieurs auteurs. Ils recommandent à sa place l'essai *de compactage statique* [4].

## b. Stabilisation chimique

Plusieurs liants chimiques peuvent être ajoutés à la terre pour améliorer ses propriétés. Parmi ces produits, on peut citer *le ciment, la chaux, les cendres volantes, du métakaolin etc.* Ces additions réagissent chacune différemment et suivant les proportions introduites.

### b-1. Stabilisation au ciment

Une petite quantité de ciment ajoutée à la terre suffit pour accroître considérablement ses propriétés. En effet, l'hydratation du ciment, se traduisant par l'hydratation de ses anhydres constitutifs (Alite, bélite, aluminat tricalcique et aluminoferrite tétracalcique), produit des hydrates cimentaires, responsables de la cohésion entre les particules et donc de la résistance de la BTC.

Cinq (5) réactions principales interviennent lors du mélange sol-eau-ciment :

- L'hydratation du ciment :

S'accompagne d'un important dégagement de chaleur, produit des hydrates et de *la portlandite* (chaux éteinte)  $Ca(OH)_2$ . Cette dernière étant une base forte, va dans les premières heures se dissocier dans la solution aqueuse du mélange en ions calcium  $Ca^{2+}$  et hydroxiles  $OH^-$ . Au même moment, la basicité du milieu croît considérablement, jusqu'à une valeur maximale de 12,4.[5]

- L'échange cationique :

Les ions  $Ca^{2+}$  libérés précédemment migrent de la solution aqueuse vers les feuillets de l'argile et pénètrent dans l'espace inter foliaires. Les cations argileux qui jadis logeaient dans cet espace migrent quant à eux vers l'extérieur de l'espace inter-foliaire. Cette succession de migration des cations est appelée *échange cationique*[5]. Les ions calcium se voient désormais être les seuls cations inter foliaires. Cet échange n'est pas sans conséquence, en effet, il favorise la modification des charges électriques de la double couche diffuse des particules argileuses, ce qui entraîne une attraction des feuillets les uns par rapport aux autres et donc le rétrécissement de l'espace inter foliaire. Les particules argileuses s'agglomèrent donc entre eux et forment des amas ou *flocs* d'où une troisième réaction appelée *la floculation*. Dès lors, la texture du mélange est modifiée et l'ouvrabilité du mélange se voit accroître. Ces premières réactions surviennent rapidement des premières heures aux premiers jours qui suivent le mélange. Elles constituent ce que l'on surnomme *La modification du sol*.

- Les réactions pouzzolaniques :

Le milieu devenu fortement alcalin, on assiste à une rupture des liaisons des ions silicates et aluminates se trouvant dans les feuillets. Ces deux ions viennent ainsi s'associer aux cations  $Ca^{2+}$  se trouvant maintenant dans l'espace inter-foliaire pour former de nouveaux hydrates cimentaires CAH ; CSH et CSAH. Cette réaction est appelée *réaction pouzzolanique*.

Toutes ces réactions font du ciment le stabilisant le plus satisfaisant et le plus prévisible. C'est pour cela que dans la littérature, les résultats des autres techniques de stabilisation sont comparés à ses résultats.

Bien que maîtrisé, le ciment ne reste pas moins dommageable à l'environnement. D'autres techniques qui visent quelques fois à recycler des déchets agro-industriels sont de plus en plus employées à la place du ciment.

### b-2. Stabilisation à la chaux

Le paragraphe précédent nous a décrit les étapes de stabilisation du ciment en commençant par son hydratation qui libère de la chaux éteinte (portandite). Cette dernière réagit à son tour à travers ses cations  $Ca^{2+}$  pour former des hydrates cimentaires. Et si au lieu d'hydrater du ciment pour obtenir de la

portlandite, on l'ajoutait directement au sol. Puis que la chaux éteinte se retrouve à profusion sous forme de sous-produit industriel comme les carbures de calcium résiduel (CCR).

Bien évidemment on perdra un peu en hydrate (premiers hydrates formés par hydratation du ciment), donc en résistance, mais cette technique donne aussi des résultats très satisfaisants.

La réaction entre le sol argileux et la chaux est donc décrite en deux grands temps qui regroupent les mêmes réactions que le ciment à l'exception de son hydratation.

- Le court terme ; où on parle d'échange cationique, de floculation ;
- Le long terme qui concerne essentiellement les réaction pouzzolaniques.

Les opinions sont divergentes dans la littérature quant à la durée de ces réactions. Certains soutiennent qu'elles se produisent très rapidement à haute température, et d'autres qu'elles peuvent durer jusqu'à plusieurs jours.

Cependant, tout le monde s'accorde sur l'existence d'une quantité de chaux nécessaire pour les premières réactions de modification du sol. Cette quantité se situerait aux environs de 3%. On appelle cette quantité *le point de fixation de la chaux*. Il existe également une quantité optimale de la chaux garantissant les meilleures performances pour les BTCs. Cette quantité optimale varie d'une chaux et d'une terre à une autre et dépend de leurs minéralogies respectives. Au delà de cette quantité, on n'observe plus d'accroissement des propriétés de la brique et la chaux en surplus ne réagit plus avec les éléments de la terre et donc plus d'hydrate supplémentaire.

### b-3. Prolongement des réactions pouzzolaniques par ajout des cendres de balles de riz

On peut prolonger les réactions pouzzolaniques dans un mélange terre-eau avec un excès de chaux (puis qu'on a vu qu'au delà de la quantité optimale, la chaux résiduelle ne réagit plus) en ajoutant des éléments réputés riches en silice. Ce qui est le cas de la cendre de balle de riz qui se voit être un des sous-produits agricoles (la balle de riz) les plus répandus au Burkina-Faso.

La pertinence de l'ajout des cendres de balles de riz se retrouve dans leur forte composition en silice (plus de 90%). Cependant, pour être réactive, cette silice doit remplir une condition sinéquanone, elle doit quitter son état cristallisé vers un état amorphe. On appelle cette transformation *l'activation des cendres de balles de riz*. Elle se produit en les calcinant pendant cinq (5) heures à une température de 500°C. Les cendres obtenues sont ensuite broyées pour obtenir des dimensions très fines appropriées à leur emploi.

Eut égard de tout ce qui est dit, quelles sont donc ces caractéristiques de briques que nous cherchons tant à améliorer ?

### I-3-3. Les principales propriétés des BTCs

Un matériau se caractérise essentiellement par son comportement vis à vis des différentes sollicitations qui lui sont appliquées dans son environnement. On peut donc classer les performances d'une brique en plusieurs classes.

#### a. Les propriétés mécaniques

Lorsqu'on parle de brique en terre comprimée, la première inquiétude est son comportement sous une charge de compression. En effet, la terre à elle seule, malgré toute la stabilisation mécanique qui lui est apportée résiste très peu à la compression à l'état sec et encore moins à l'état humide. La norme *AFNOR XP P13-901* D'octobre 2001 classe les briques en terre comprimée, suivant leurs résistances à la compression en trois groupes. Les tableaux ci-dessous illustrent cette classification.

Tableau 2: Classes de résistance en compression sèche des BTCs : Norme AFNOR XP P13-901. Source : [1]

Blocs pleins	BTC20	BTC40	BTC60
Résistance minimale R	2	4	6

Dans la littérature, plusieurs valeurs ont été obtenues, dépendant de la nature de la terre, du type de stabilisation, mais aussi des traitements post-fabrication apportés aux briques. A titre d'exemple, [6] a obtenu en 2019 des valeurs de compression sèche allant de 2,62MPa à 3,40MPa et 5,87MPa respectivement pour les briques non stabilisées, stabilisées à 10% de CCR et 8% de ciment. En compression humide, il a obtenu une valeur de 2,48MPa pour les briques stabilisées au ciment et des résistances de l'ordre de 1,5MPa pour les briques stabilisés à la CCR. Toutes ces briques avaient été maturées en température ambiante. Il a cependant mis en évidence l'importance de la température de maturation dans l'accroissement des résistances de ses briques. En effet, avec des briques maturées à 40°C il a obtenu des gains de résistances allant jusqu'à 66%.

Les résistances à la flexion et à la traction sont aussi des propriétés majeures pour la brique. Ces trois premières propriétés se déterminent par des essais qui portent respectivement leurs noms ; à savoir : l'essai de compression (sèche ou humide selon le cas) ; l'essai de traction et l'essai de flexion à trois points.

#### b. Les propriétés physiques

Comme propriétés physiques, nous pouvons citer :

- Les densités apparentes et absolues :

Elles sont très importantes dans la caractérisation des briques, car elles illustrent leurs poids par unité de volume. Ainsi, des briques moins denses seront recherchées pour diminuer le poids propre des ouvrages. Naturellement, on peut à priori dire que les résistances mécaniques évoluent avec les densités, mais dans le cas des briques stabilisées à la CCR, les résistances mécaniques et les densités évoluent en sens inverse. [6] a obtenu également avec les mêmes briques des densités apparentes allant de 1820kg/m<sup>3</sup> pour les briques avec 5% de CCR à 1610 kg/m<sup>3</sup> avec 25% de CCR.

- La porosité :

En réalité, le paramètre majeur qui détermine le comportement et les performances d'un matériau granulaire tel que la brique est sa *porosité*. Tout le reste en découle. Un matériau avec une grande porosité présentera une densité moindre par rapport à un autre avec moins de pores. Ses performances mécaniques seront aussi à priori moindres par rapport à la seconde. Ainsi pour bien cerner les propriétés dudit matériau, il faut comprendre la nature et la répartition des pores en son sein.

Le terme *porosité* fait référence à l'ensemble des vides au sein d'un matériau, pouvant être rempli de fluide (gaz ou liquide). Leurs origines et dimensions sont variables et dépendent des conditions de fabrication, de maturation et de manutention. On peut ainsi d'une façon très globale dire qu'on a deux grandes familles de porosité : la *porosité des pores* dite *porosité primaire* et la *porosité des fissures* soit *porosité secondaire*.

Les pores sont généralement classés suivant deux critères. Du point de vue ouverture des pores, selon l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), on distingue :

- Les macro-pores lorsque leurs diamètres sont inférieurs à 2nm ;
- Méso-pores pour les diamètres compris entre 2 et 50nm et
- Macro-pores pour ceux dont leurs diamètres sont supérieurs à 50nm

Du point de vue accessibilité à l'eau, on retrouve :

- Les macros pores pour les pores qui sont saturés dès la première heure du contact entre le matériau et l'eau ;
- Les pores accessibles à l'eau sont ceux qui prennent le relai après la première heure par le biais de liaisons entre eux et
- Les pores fermés, ceux qui sont isolés des autres ne reçoivent aucune goutte d'eau.

#### c. Les propriétés hydriques

En contact avec de l'eau la brique en terre a tendance à se détériorer. Cela suscite plus de pessimisme de la part de la population. Cependant les techniques de stabilisation susmentionnées ont prouvé leur efficacité pour l'amélioration de ces propriétés. Parmi ces propriétés, on peut citer :

- Le gonflement Nous avons déjà explicité les raisons du phénomène de gonflement dans l'argile. Cette aptitude à changer de volume en présence de l'eau peut se mesurer par immersion totale de la brique dans de l'eau jusqu'à saturation. Les détails de cet essai seront présentés au chapitre suivant ;
- Le retrait, il détermine l'aptitude du bloc à se sécher une fois hors de l'eau. Généralement ce retrait s'en suit d'apparition de microfissures très dommageables pour les briques ;
- L'absorption par capillarité, les remontées d'eau par capillarité dans un ouvrage sont très souvent dommageables pour l'ouvrage surtout s'il s'agit de terre. Il y a donc lieu de bien étudier cette propriété des briques afin de savoir à quoi s'en tenir ;

Ce paramètre fait référence à une sorte de succion de la brique, car la montée de l'eau se fait à l'encontre de la gravité. En effet, on parle d'absorption par capillarité lorsque seule la face de pose de la brique est en contact avec l'eau. Ce phénomène est surtout dû à la porosité du matériau et à la pression interstitielle régnant dans ses pores ;

- L'absorption totale : Contrairement à l'absorption par capillarité, l'absorption totale d'eau d'une brique fait référence à sa capacité à retenir l'eau lorsqu'elle est totalement immergée. Ce phénomène est également attribué aux pores et cette capacité diffère d'une brique à une autre.

#### d. Les caractéristiques hygrométriques

Étymologiquement, le terme hygrométrie vient de deux mots grecs, *hygros* qui signifie humide et du suffixe *metrie* qui fait référence aux mesures. L'hygrométrie est donc d'une façon générale la branche de la météorologie s'occupant des mesures des taux d'humidité dans l'air. Dans notre cas, il s'agira des mesures de taux d'humidité sous forme de vapeur dans les briques, et aussi de la simulation des comportements des différentes briques vis-à-vis d'elle. Deux essais permettent de cerner ces comportements.

#### Résistance à la diffusion de la vapeur

L'eau existe dans la nature sous ses trois formes connues. Lorsqu'elle est sous forme liquide, nous avons vu dans le paragraphe précédent le comportement des briques à son contact. Cependant, lorsque l'eau est sous forme gazeuse (vapeur d'eau), le matériau terre réagit différemment. Les conséquences d'une accumulation de vapeurs d'eau à l'intérieur d'une pièce sont diverses et quelques fois peu agréables. Elle peut être source d'accumulation de moisissure à l'intérieur de la pièce, mais peut aussi causer un sentiment de malaise et d'inconfort aux occupants. Car, à une même température, le sentiment de bien-être diminue à mesure que le taux d'humidité augmente. La résistance de la perméabilité à la vapeur d'eau est caractérisée par une grandeur numérique notée  $\mu$ . Cette grandeur représente la mesure dans laquelle la vapeur d'eau traversera le matériau considéré par rapport à son passage dans l'air. Ainsi, plus ce facteur est important, plus ledit matériau résiste au passage de la vapeur d'eau.

La résistance à la vapeur d'eau a été déterminée par la méthode des solutions salines. Dans la littérature, les valeurs de cette résistance sont très variées, suivant la nature et la composition du matériau lui-même. [7] a trouvé en 2017 des valeurs allant de 7 à 8 pour les échantillons prélevés auprès des fabricants de briques sénégalais. [8] a aussi trouvé des valeurs de résistance allant de 5,5 à 5,8 pour des briques non stabilisées et des valeurs avoisinant 7 pour les briques stabilisées au ciment comme à la chaux. [9] a lui aussi trouvé en 2019 des valeurs similaires pour des briques fabriquées à partir des terres argileuses de Loubila et de Bobo Dioulasso stabilisées à 4, 6 et 8% de ciment.

#### Les isothermes de sorption et désorption

Ce sont des courbes qui traduisent pour une température constante la variation de la teneur en humidité dans un matériau (ou produit quelconque) en fonction de la variation de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative. On appelle humidité relative, le rapport entre la quantité de vapeur d'eau réellement contenue dans l'air et la quantité maximale que cet air peut contenir. On parle d'isotherme de sorption ou d'adsorption, lorsqu'on part d'un produit quasi-sec c'est à dire lorsque l'humidité relative est progressivement augmentée ; et d'isotherme de désorption lorsque le point de départ est donné par le matériau saturé d'eau. L'isotherme de sorption décrit donc comment le matériau adsorbe de l'humidité et l'isotherme de désorption décrit comment l'échantillon sèche (libère de l'humidité) au fur et à mesure que l'humidité relative diminue. La première remarque faite est que les deux courbes ne sont généralement pas confondues, c'est à dire qu'un matériau granulaire tel que la terre comprimée ne perd pas de l'humidité de la même façon qu'elle en gagne. On dit que le phénomène de sorption-désorption présente une *hystérésis*. Cela s'explique par le fait que le séchage d'un produit entraîne généralement des modifications de structure et de porosité. Deux principales méthodes permettent d'effectuer l'essai :

- La méthode gravimétrique :

Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température constante  $T$  et à humidité relative  $H_R$  de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à  $(T, H_R)$ . Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau  $X$ , le couple  $(H_R, X)$  fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption. Pour créer des taux d'humidité fixes, on peut soit utiliser des solutions salines concentrées ou des solutions d'aide sulfurique.

- Méthode dynamique

Il existe plusieurs modèles proposés dans la littérature qui prédisent la teneur en humidité en fonction de plusieurs paramètres. A titre informatif, on peut citer les modèles de Langmuir, Brunauer Emmet Teller (BET), Guggenheim Anderson Boer (GAB), Halsey, Henderson, Oswin etc.

#### e. Les caractéristiques thermiques

Autant les performances mécaniques sont importantes pour la sécurité des usagers d'un bâtiment en terre, autant les performances thermiques le sont pour leur confort au sein dudit bâtiment. L'un des objectifs étant de trouver des matériaux pouvant réduire la dépendance à l'énergie électrique dans un bâtiment. C'est l'*inertie thermique* du matériau qui détermine son aptitude à réguler la température à l'intérieur du bâtiment lorsque la température à l'extérieur est perturbée. L'inertie thermique d'un matériau est caractérisée par plusieurs grandeurs intrinsèques audit matériau.

- L'effusivité thermique du matériau :

C'est son aptitude à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. En d'autres termes, elle décrit l'aptitude du matériau à absorber de la chaleur et à la restituer. Cette propriété est donnée par la relation :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad \text{Équation 1}$$

$\lambda$  est la conductivité thermique exprimée en  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;

$\rho$  la masse volumique du matériau en  $\text{kg.m}^{-3}$  et

$c$  la capacité thermique massique exprimée en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

- La diffusivité thermique du matériau :

Il s'agit d'une grandeur physique qui caractérise sa capacité à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. En d'autres termes, il s'agit de la capacité d'un matériau à se laisser propager par un signal thermique. Cette grandeur est donnée par la formule :

$$D = \frac{\lambda}{\rho} \quad \text{Équation 2}$$

Ces deux formules montrent un lien entre l'effusivité thermique, la diffusivité thermique et la conductivité thermique du matériau. Si on définit l'effusivité comme la capacité du matériau à échanger un signal thermique avec son environnement et la diffusivité comme sa capacité à propager ce signal en son sein une fois qu'il est capté, on peut définir la conductivité thermique notée  $\lambda$  comme l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. Plus cette grandeur est élevée, plus la chaleur traverse le matériau et moins le confort est assuré dans le bâtiment. Suivant ce raisonnement, l'intérêt sera porté sur des matériaux présentant une conductivité faible. En termes de bâtiment, selon la *norme française RT2012*, un matériau est considéré comme isolant thermique si sa conductivité thermique est inférieure à  $0,065 \text{ W/m.K}$ .

[6] a trouvé avec les briques de la terre argileuse de Pabré des conductivités thermiques allant de  $1 \text{ W/m.K}$  pour les échantillons non stabilisés à  $0,4 \text{ W/m.K}$  pour les échantillons stabilisés à 20% de CCR. On peut ainsi dire que la conductivité thermique d'un matériau diminue avec l'ajout de la CCR. Mais en réalité elle diminue avec l'augmentation de la porosité. A l'état sec, lorsque les pores ne sont pas chargés d'eau, la chaleur a naturellement du mal à traverser les poches d'air, par contre lorsque le matériau est dense comme dans le cas d'une brique non stabilisée ou lorsque ses pores sont chargés d'eau, la chaleur traverse facilement la matière et ledit matériau se voit donc être un bon conducteur de chaleur. Voilà mise en évidence une autre importance des pores dans les briques en terre.

Les paramètres thermiques comme mécaniques sont fortement influencés par la teneur en eau du matériau. On parle ainsi de propriétés hygrothermiques et hygro-mécaniques qui représentent respectivement les propriétés thermiques et mécaniques en fonction de la teneur en humidité du matériau.

## Chapitre-II. MATÉRIAUX ET MÉTHODOLOGIE

## II.1 Introduction partielle

Dans ce chapitre, comme son intitulé l'indique, nous présenterons les matériaux utilisés et la méthodologie suivie pour atteindre les objectifs décrits en Introduction. Rappelons à cet effet que toute cette étude a été menée au Laboratoire Eco-Matériaux Habitats Durables LEMHaD-2iE ; avec des essais menés ailleurs à l'Université de Liège (U-Liège), aux unités de recherche Urban and Environmental Engineering (UEE), au Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC) et Argiles, Géologie et Environnement sédimentaire (AGEs).

Ce chapitre sera donc composé de deux sous-sections, traitant dans un premier temps des matériaux utilisés et ensuite de la méthodologie adoptée tout en décrivant les différents essais effectués.

## II.2 Matériaux

Les briques étudiées dans le cadre de cette étude sont des matériaux composites regroupant en leurs seins :

- Un matériau de base : la terre argileuse ;
- Des liants : de la chaux sous forme de Carbure de Calcium résiduel (CCR) ou du ciment comme stabilisant et
- De l'eau de gâchage provenant des conduits de l'ONEA.

### II.2.1 Matériaux argileux

La terre argileuse est le matériau prépondérant dans cette étude. Elle fut prélevée dans chacune des deux carrières en des points bien précis.

#### a. Terre argileuse de Saaba

Selon les travaux de [10] effectués en 2016, la carrière de Saaba est décrite comme ayant une forme de *croissant*, et mesurant 350m de long et 70m de large pour une profondeur de plus de 4m. La réserve latéritique et argileuse avait en cette année été estimée à un volume minimum de 70175m<sup>3</sup> correspondant à une masse de 182,5 tonnes d'argile. La terre provenant de cette carrière se présente comme très fine à première vue et très argileuse. Elle a une couleur blanchâtre virant au gris. Elle est beaucoup plus maniable que celle de Kossodo et on y obtient des briques assez belles.

#### b. Terre argileuse de Kossodo

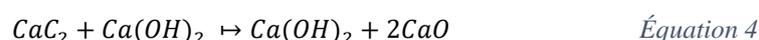
La carrière de Kossodo quant à elle, est exploitée depuis quelques années par l'entreprise Zi-matériaux, et a une forme composite. Elle présente une réserve d'au moins 209000 m<sup>3</sup> correspondant à une masse argileuse de 564,3tonnes [10]. Sa terre a une couleur marronne virant au rouge foncé. Elle présente une prédominance d'élément grossiers assez denses. Ceci lui confère une structure grenue avec une proportion d'éléments fins non négligeable.

### II.2.2 Les liants

#### a. Le carbure de Calcium Résiduel CCR

Comme indiqué par son nom, il s'agit d'un résidu industriel immensément riche en hydroxyde de calcium ou tout simplement *en chaux éteinte*. Ce résidu est laissé à profusion au sein des locaux de l'entreprise Burkina Industrial Gaz (BIG) situé à Kossodo (012° 25,935' N, 001°, 29.374 ' W, à 301 m). Il est produit comme déchet lors de la synthétisation du gaz éthylène qui est le principal produit de ladite entreprise.

Les équations suivantes expliquent son obtention au cours de la production du gaz acétylène.



## b. Le ciment

Matériau de notoriété mondiale, le ciment est l'un des plus utilisés dans le domaine de la construction. En construction en terre, il représente non seulement le meilleur stabilisant de la terre, mais aussi le plus utilisé et le mieux maîtrisé. Tout naturellement, lorsqu'on étudie une nouvelle solution, il faut la comparer aux meilleures qui existent. C'est dans cette vision des choses qu'une formulation contenant 8% de ciment fut préparée pour les deux terres. Le ciment utilisé pour cette cause est du type : CEMII/A-P/42,5N. Le paragraphe suivant traite de toutes les formulations faites.

## II.3 Méthodologie

La méthodologie adoptée du début à la fin de cette étude a été fonction des objectifs visés. Rappelons donc qu'il est question de déterminer les performances physiques, hydriques, mécaniques, hygro-mécaniques ; ainsi que les propriétés thermiques et hygrothermiques des briques en terre crues compressées par une presse statique à charge constante. Mais avant de passer aux briques, une caractérisation des différents matériaux primaires utilisés s'exige. Par caractérisation, l'on entend :

- La détermination de la répartition granulométrique des matériaux premiers ;
- Leurs indices de plasticité ;
- Les teneurs en eau optimales pour chaque type de matériau composite (ceci fait l'objet d'un objectif spécifique : *la détermination de l'influence de l'ajout de la chaux sur la demande en eau des différentes terres* ;
- La composition chimique et minéralogique des différents matériaux ; etc.

Cette caractérisation nous permet d'établir des formulations justes donnant des briques à performances maximales. Une fois les briques fabriquées, plusieurs tests nous permettent de déterminer les propriétés susmentionnées. Ces propriétés, ainsi que les essais correspondants sont illustrées dans le tableau 3.

Tableau 3: Liste des essais de caractérisation des briques

Nature	Propriétés testées	Essais d'acquisitions
Physiques	Densité apparente	Essai de densité
	Vitesse ultrasonique	Essai Pundit
	Porosités	Absorption par capillarité absorption totale
Mécanique	Résistance à la compression	Essai de compression
Thermique	Effusivité, conductivité, diffusivité, capacité thermiques	Acquisitions thermiques
Hygrométriques	Perméabilité à la vapeur	Essai de perméabilité à la vapeur
	Capacité de sorption désorption	Sorption-désorption
Durabilité	Résistance à l'abrasion	Essai d'abrasion
	Résistance à l'érodabilité	Essai d'érodabilité

Ainsi, de la caractérisation des matières premières à la détermination des propriétés des briques proprement dites, une méthodologie expérimentale fut de rigueur dans l'ordre ci dessous :

- Identification des essais à faire : elle fut effectuée à partir des objectifs visés ;
- Estimation des quantités de matières premières à prélever : des essais identifiés ci-dessus, le nombre de briques à fabriquer a été mis en évidence, connaissant les dimensions d'une brique, Les quantités totales de terre, de chaux, d'eau et autres ont été déterminées. Nous indiquons ainsi à titre d'information qu'au total, environ 270 briques par carrière ont été confectionnées ;

- Prélèvement de la matière première : Munis de pelles, de pioches et de sacs, nous nous sommes rendus sur les différentes carrières pour prélever les quantités de matières nécessaires ;

Un tour a été fait à l'entreprise BIG pour prélever le sous-produit industriel CCR.

- Caractérisation des différentes terres et de la chaux : A ce niveau, plusieurs études avaient déjà été menées au laboratoire LEMHaD et ailleurs pour caractériser les matières premières. Ce sont donc ces informations qui nous ont servi de support pour la suite de ces essais ;
- Détermination des teneurs en eau optimales pour chaque formule : A partir de l'essai Proctor normal, les différentes teneurs en eau optimales ont été déterminées pour chaque formule. Ce sont ces quantités d'eau qui entreront dans chaque formulation de brique ;
- Formulation des différentes briques : Deux paramètres essentiels nous ont servi de base pour la formulation des briques. Il s'agit de la teneur en eau optimale déterminée précédemment et de la densité spécifique de chaque matériau. Connaissant ces valeurs, on peut estimer les quantités de matières premières à disposer pour chaque formule. D'amples explications sur la formulation sont données dans les paragraphes suivants ;
- Confection proprement dite des briques : Toute théorie devant s'en suivre de pratique,

Nous avons confectionné en plusieurs jours le nombre de brique qu'il faut pour couvrir toute cette étude ;

- Maturation et séchage : Les briques ainsi confectionnées sont restées dans un environnement clos pendant le nombre de jour prévu pour chaque maturation ;

Au terme de chaque maturation, les briques ont fait un tour de quelques jours à quelques semaines dans un environnement de 40°C pour ainsi accélérer leur séchage, c'est-à-dire évacuer l'eau résiduelle n'ayant pas participé aux réactions durant la maturation.

- Détermination des performances des différentes briques : Une fois toutes ces étapes achevées, nous sommes passés aux essais de caractérisation proprement dits ;
- Analyse et discussion des résultats.

### II.3.1 Formulation des matériaux composites

Plusieurs formulations furent faites suivant les besoins d'essai et les matières premières utilisées. Le tableau4 donne un aperçu sur la composition centésimale des mélanges effectués.

Tableau 4: Nomenclature et définition des différentes formulations effectuées

Formulations	Désignation	Compositions centésimales (%)			
		Terre	Chaux	Ciment	Eau
100% Kossodo	KL0	100	0	0	$W_{opt}$
Kossodo + 10% ccr	KL10	100	10	0	$W_{opt}$
Kossodo+ 20% ccr	KL20	100	20	0	$W_{opt}$
Kossodo + 8% ciment	K8CEM	100	0	8	$W_{opt}$
100% Saaba	SL0	100	0	0	$W_{opt}$
Saaba +10 % CCR	SL10	100	10	0	$W_{opt}$
Saaba +20 % CCR	SL20	100	20	0	$W_{opt}$
Saaba+ 8% ciment	S8CEM	100	0	8	$W_{opt}$

En ajoutant 10% à 20% de CCR à la terre précédemment décrite, la couleur vire du marron au gris jaunâtre devenant de plus en plus claire lorsqu'on ajoute de la CCR. On sent au touché un raffinement du matériau, et le malaxage à la main devient beaucoup plus facile avec l'ajout de CCR.

Plus l'on ajoute de la CCR à la terre de Saaba, plus elle devient fine et claire et plus sa maniabilité croît. A 20% de CCR, le malaxage du mélange devient très délicat et très agréable.

On peut sentir au touché, avec 8% de ciment une augmentation de la densité du matériau. La couleur est plus foncée en opposition avec les couleurs obtenues avec ajout de CCR. Le malaxage à la main devient relativement plus difficile et demande plus d'énergie.

### II.3.2 Caractérisation des matières premières

Dans cette sous-section, les essais d'identification des matières premières seront décrits conformément aux normes qui les régissent.

#### a. Analyse granulométrique par tamisage

Conformément aux *normes NFP 18-560 et NFP 18-540* ; une série de tamis circulaires à mailles carrées (Annexe A2 ; figure55) a été utilisée pour déterminer la répartition granulométrique des différentes terres. L'essai par tamisage a été effectué sur des particules de diamètre supérieur à 80 $\mu$ m. Pour des particules de diamètre inférieur à cette limite, l'essai par sédimentométrie a été utilisée pour analyser la répartition granulaire des différents échantillons.

Une terre pour être employée en construction en terre doit avoir une courbe granulométrique se logeant parfaitement dans un certain fuseau bien défini par [1](Annexe A1 : Figure47). Ce fuseau varie donc selon le type de stabilisation à employer.

#### b. Les densités

Le terme densité désigne le poids d'un matériau par unité de volume. Deux types de densité permettent généralement de caractériser un matériau granulaire. Il s'agit de la densité apparente et la densité spécifique.

La densité apparente d'un matériau se réfère à son poids volumique sans soustraite le volume des vides. Elle est estimée en utilisant un récipient de volume et de masse bien connus. Le matériau y est introduit de façon à homogénéiser la répartition granulaire dans ledit récipient. Le tout (récipient et matériau) est pesé, puis on déduit la masse du matériau dans le récipient. La densité apparente du matériau est donnée par le rapport entre la masse déduite et le volume du récipient.

La densité spécifique désigne le poids volumique des grains solides eux mêmes, sans tenir compte des vides. Elle est déterminée grâce à un appareil appelé le pycnomètre à air. C'est cette densité qui entre en jeu dans la formulation des briques.

#### c. Teneur en eau optimale

Si les quantités massiques des matières premières granulaires sont fonctions de leurs densités spécifiques, comment doit-être choisie la quantité d'eau de gâchage ? Elle est dans le cas des bétons ou mortiers hydrauliques fonction de la quantité de liant utilisé d'où le fameux rapport E/C. Cependant, en géotechnique d'une façon générale et en construction en terre de façon plus spécifique, il existe pour chaque terre une quantité d'eau lui conférant sa densité maximale. Elle est appelée *Teneur en eau optimale*. Elle est fonction de sa répartition granulométrique, de sa densité, du produit stabilisant utilisé, mais aussi de la quantité de cette dernière. Ainsi cette grandeur variera d'un mélange à l'autre. Elle est donnée en proportion centésimale par rapport à la masse sèche de toutes les particules granulaires à gâcher. Elle est déterminée généralement par l'essai *Proctor normal*. Il s'agit d'un essai à caractère dynamique, du fait des 25 coups de mouton qui sont donnés à chacune des trois couches de matériau disposées dans un moule cylindrique à volume constant. Mais en construction en terre, un autre essai,

plus adapté appelé *Essai de compactage statique* est proposé pour déterminer avec exactitude la cette quantité d'eau. [4]

### II.3.3 Confection et maturation des briques

Une fois toutes les matières premières identifiées et caractérisées, on peut passer à la confection des briques proprement dites. Les différentes formules en fonction des objectifs sont établies, avec les quantités massiques de chaque matière première. Il est prévu pour chaque essai un triplet de briques. Ainsi, pour chaque malaxage, des quantités correspondant à trois briques sont introduites simultanément dans le malaxeur. Le malaxage est fait de sorte à obtenir une répartition homogène de chaque élément dans le mélange. La terre seule est dans un premier temps malaxé pendant quelques minutes pour s'assurer une répartition granulaire homogène, ensuite le produit stabilisant est introduit puis le tout malaxé à nouveau jusqu'à homogénéisation. Ce n'est qu'après cette étape qu'est ajoutée la quantité optimale d'eau, puis un nouveau malaxage permet de former une pâte parfaitement homogène. Afin d'éviter un départ d'eau dû à une quelconque évaporation, le mélange obtenu est couvert pendant que la presse est préparée. Par préparation de presse, on entend le nettoyage et l'application d'huile sur les faces intérieures du moule. Ensuite la quantité adéquate correspondant à une brique est introduite dans le moule. Un compactage statique est appliqué manuellement au mélange à travers deux leviers. Puis ensuite un démoulage permet de mettre à nu la nouvelle brique produite. Ce processus est répété pour obtenir les triplets correspondant à un essai. Ensuite les trois briques produites sont emballées dans un sac hermétique en plastique pendant le temps de maturation qu'il faut (45 jours dans le cas des briques stabilisées à la CCR et 28 jours dans le cas des briques stabilisées au ciment).

### II.3.4 Essais de caractérisation des briques

Après le temps de maturation des briques, elles sont sorties des sacs plastiques et passées dans une étuve maintenue à 40°C. Ceci permet de forcer le départ de l'eau résiduelle dans la brique, car les essais en laboratoire sont effectués sur des échantillons totalement secs. Une brique est dite sèche lorsque la différence de masse entre deux pesées successives séparées de 24 heures est inférieure ou égale à 0,1% de sa masse humide de départ. Ce n'est qu'une fois cette condition remplie qu'on peut passer aux essais de caractérisation.

#### 1. Propriétés mécaniques : Résistance à la compression sèche et humide

Au cours de sa durée de vie, une maçonnerie est sujette à des sollicitations mécaniques qui quelques fois lui sont préjudiciables. Parmi ces sollicitations, on peut citer dans le cas des briques en terre : *la flexion et la compression*.

La résistance à la compression est la performance mécanique la plus déterminante. Lorsqu'elle se passe à l'état sec, on parle de *compression sèche*. L'essai est effectué suivant la norme XP P13-091. Compte tenu des dimensions réduites des plaques comprimantes de la presse, et dans le souci d'avoir un échantillon d'éclatement avoisinant la valeur de 1 ; la brique est dans un premier temps scié en deux parties égales puis superposées comme cela est fait dans un mur. Les deux faces boutisses sont opposées de telle manière que la répartition de la matière soit homogène après la superposition. L'essai est alors lancé et les deux plaques se resserrent progressivement avec une vitesse de chargement de 0.2mm/s comprimant ainsi les deux blocs jusqu'à rupture.

La compression hygro-mécanique d'une brique suit le même principe que précédemment, excepté le fait que la brique avant de passer à la presse est immergée pendant un certain temps dans de l'eau. Le temps

d'immersion est généralement fonction de la teneur en eau visée. Des pesées sont effectuées avant et après l'immersion pour avoir une idée sur la quantité d'eau absorbée par l'échantillon. La résistance à la compression humide, à une certaine teneur en eau est un paramètre très important car au cours de la vie d'un ouvrage en terre, il être régulièrement mis au contact de l'eau et dans ce cas, les briques doivent pouvoir résister aux charges qui lui sont soumises tout comme dans son état sec.

Dans les deux cas, la résistance est calculée à partir de la même formule se résumant par un rapport entre la force de compression maximale enregistrée par les capteurs de la presse et la surface de l'échantillon chargée.

$$R_c = \frac{F_{cmax}}{S} \quad \text{Équation 5}$$

Avec,

$R_c$  : la résistance à la compression (MPa) ;

$F_{cmax}$  : La force de compression maximale enregistrée (N) ;

$S$  : La surface de contact entre la presse et le matériau (mm<sup>2</sup>).

#### d. Propriétés physiques : Porosité et densité

Les nuances entre les différents types de porosité ont déjà été démontrées dans le paragraphe porosité du premier chapitre. L'étroit lien entre la porosité et la densité apparente est également connu. Cependant, comment se prend-on pour déterminer la porosité totale, accessible et fermée ? La référence normative régissant ces paramètres est la norme française *NF P18-459* (Essai Pour Béton Durci - Essai de Porosité et de Masse Volumique 2010). La méthode en elle-même consiste à saturer le réseau poreux des échantillons avec un liquide de densité connue (l'eau dans notre cas). Ensuite les échantillons saturés sont soumis à une série de pesées à l'air et hydrostatiques. Les formules ci dessous permettent de déterminer les différentes porosités.

$$\varepsilon_{acc} = \frac{M_{satair} - M_{sec}}{M_{satair} - M_{sateau}} * 100 \quad \text{Équation 6}$$

$$\varphi_{app} = \frac{M_{sec} * \rho_{eau}}{M_{satair} - M_{sateau}} \quad \text{Équation 7}$$

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\rho_d - \rho_{app}}{\rho_d} * 100 \quad \text{Équation 8}$$

$$\varepsilon_{fer} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{acc} \quad \text{Équation 9}$$

Dans ces formules ;

$\rho_{acc}$  désigne la porosité accessible (%) ;

$\varepsilon_{tot}$  : la porosité totale (%) ;

$\varepsilon_{fer}$  : la porosité fermée (%) ;

$\rho_{app}$  : la masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>) ;

$\rho_d$  : la masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ;

$\rho_{\text{eau}}$  : la masse volumique de l'eau ( $\text{g/cm}^3$ ) ;

$M_{\text{sec}}$  : la masse sèche (g) ;

$M_{\text{sat air}}$  : La masse de la brique saturée, pesée sur une balance de manière conventionnelle (g) ;

$M_{\text{sat eau}}$  : la masse hydrostatique saturée de la brique (g).

Dans l'expression de la porosité totale (Équation 8), interviennent les densités spécifiques et apparentes des différents échantillons. La densité spécifique des matériaux granulaires est déterminée grâce au pycnomètre à air. La densité apparente quant à elle est déterminée par l'équation (Équation 7) illustrée, pour les briques stabilisées tenant à l'eau et pour celles non stabilisées, se détériorant au contact de l'eau, la densité apparente représente le rapport entre la masse de la brique et son volume (Équation 10

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_{\text{sec}}}{L * l * h} \quad \text{Équation 10}$$

L, l et h désignent les dimensions de la brique, respectivement sa longueur, sa largeur et sa hauteur (cm).

#### e. Vitesse de propagation des ondes : Essai pundit

L'essai de pundit est un essai à caractère qualitatif, bien que mesurant une grandeur physique. Cette grandeur mesurée est *la propagation des ondes ultrasoniques*. Deux sondes (une émettrice et l'autre réceptrice) sont placées de part et d'autre du matériau. La première émet le signal ultrasonique et la seconde la capte. Ces résultats renseignent sur la densité et la porosité d'un matériau. L'hypothèse faite étant qu'une onde ultrasonique a plus de facilité à traverser la matière solide que le vide absolu. Elle mettra ainsi plus de temps à traverser la largeur constante de la brique de 14cm si l'échantillon en question est très poreux et inversement dans le cas d'un matériau dense.

A partir de cette grandeur, une estimation du module dynamique de Young est possible. C'est un paramètre indispensable pour maîtriser les comportements des briques. Il existe un lien entre ce module, la densité apparente du matériau et la vitesse de propagation des ondes.

$$E_D = V^2 Q * \frac{(1+n)(1-2n)}{1-n} \quad \text{Équation 11}$$

$E_D$ : Module dynamique ( $\text{MN/m}^2$ ) ;

V : la vitesse de propagation des ondes (km/s) ;

Q : Densités apparente ( $\text{kg/m}^3$ ) et

n : Le coefficient de poisson (pris égal à 0,20).

#### f. Propriétés hydriques : Absorption capillaire et totale de l'eau

Une brique absorbe principalement de l'eau par ses macro-pores et ses pores accessibles. Ainsi pour déterminer la capacité d'absorption d'eau d'une brique, il suffit de l'immerger totalement pendant 24 heures puis connaissant sa masse sèche initiale, à déterminer sa teneur en eau à saturation.

$$W_{eau} = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Équation 12}$$

$m_h$  : la masse humide de la brique (g);

$m_s$ : la masse sèche initiale (g);

$W_{eau}$ : la teneur en eau (%).

L'absorption par capillarité est un essai qui simule en conditions les plus agressives (la brique se trouvant directement au contact de l'eau) l'absorption de l'eau par succion de la brique. En effet, le bloc est plongé par sa face de pose d'une hauteur de 0.5 à 1cm. Le dispositif de l'essai, essentiellement constitué de bacs et de cales est conçu de telle sorte que l'eau soit ravitaillée au fur et à mesure qu'elle est absorbée par la brique afin de maintenir la hauteur de 1cm sous l'eau et que l'excès soit déversé de part et d'autre du bac. Des pesées sont effectuées régulièrement à : 10min-30min-1h-2h-4h-8h-12h et 24h. Les quantités d'eau absorbées à chaque pesée sont renseignées sur une fiche d'essai, puis à partir de la formule (Équation 13), le coefficient d'absorption capillaire est calculé pour chaque temps de pesées. Ceci nous permet de tracer et de constater une régression linéaire de la cinétique de succion des briques, qui dans certains rares cas atteint la saturation avant les 24h. Cette formule traduit la quantité d'eau qui pénètre la brique par capillarité par unité de surface de contact. Ainsi, plus la teneur en eau sera élevée, plus ce coefficient sera élevé. La quantité d'eau ainsi absorbée peut être due à plusieurs paramètres tels que : le diamètre des pores, leurs tortuosités, les conditions de température et de pression eu sein de ces pores etc.

$$W_{eau} = \frac{m_h - m_s}{S} \quad \text{Équation 13}$$

Avec

$m_h$ : La masse humide de la brique (g),

$m_s$ : La masse sèche initiale (g),

S : la surface en contact avec l'eau(cm<sup>3</sup>).

#### g. Propriétés thermiques

Lorsque deux systèmes en contact sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes [11]. Dans le cas d'une habitation en terre, les deux systèmes mis en contact par le biais du mur en terre sont le milieu extérieur et l'intérieur de l'habitation. Le sens de déplacement du flux thermique dépendra donc de la différence de température entre les deux milieux.

Limiter la dépendance énergétique tout en améliorant le confort thermique dans une habitation sont de nos jours des critères sinéquanones. Si cela peut dépendre de l'architecture et de l'orientation de l'ouvrage, la contribution des propriétés thermiques du matériau n'est pas négligeable. Par propriétés thermiques, l'on entend la conductivité thermique, l'effusivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique. Toutes ces propriétés ont été mesurées ou calculées à travers un essai d'acquisition thermique à plan chaud et à régime transitoire.

- La capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau notée c est une propriété intrinsèque au matériau. Elle indique la quantité de chaleur à fournir à 1m<sup>3</sup> du matériau pour élever sa température de 1°K. Ainsi exprimée, on parle de capacité thermique volumique. Cette dernière peut être ramenée par unité de masse en la

multipliant par la masse volumique apparente du matériau. Dans ce cas, on parlera de capacité thermique massique.

- L'effusivité thermique

L'effusivité thermique représente la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie avec son environnement [12]. Cette propriété intrinsèque au matériau lui confère l'aptitude de se réchauffer rapidement ou lentement selon les cas au contact d'une source de chaleur. En effet on dit d'un matériau qu'il est effusif lorsqu'il paraît chaud au contact de la peau humaine alors que sa température avoisine la température ambiante. Dans ce cas l'effusivité est élevée. Cette propriété est également déterminée par mesure.

- La diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une propriété intrinsèque au matériau. Elle détermine sa capacité à diffuser un signal thermique en son sein. En termes plus explicites, elle exprime la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période de temps donnée [12]. Elle est donnée par la formule ci dessous :

$$D = \frac{\lambda}{c_v} \quad \text{Équation 14}$$

D : la diffusivité thermique (m<sup>2</sup>.s) ;

λ: la conductivité thermique (W/m.K) ;

C<sub>v</sub>: la capacité thermique volumique (J/m<sup>3</sup>.K).

- La conductivité thermique

L'un des rôles des murs est l'isolation thermique. Cela passe par leur épaisseur, mais aussi par la conductivité thermique du matériau. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant et mieux c'est.

Lorsqu'on multiplie son inverse par l'épaisseur du matériau, on calcule un paramètre important noté R qui est *la résistance thermique du mur*. A son tour, l'inverse de ce dernier paramètre donne *le coefficient de transfert thermique*. Il est noté U[11] [12] .

La terre étant un matériau poreux insaturé contenant une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse, le transfert de chaleur est lié à plusieurs mécanismes : conduction dans les phases solides, liquides et gazeuses, convection, rayonnement, évaporation / condensation. Définir la conductivité dans un tel matériau est donc complexe. [12]

La conductivité thermique dépend essentiellement de la porosité du matériau et donc indirectement de sa densité [13] Selon lui, les matériaux poreux donc moins denses sont naturellement moins conducteurs que des plus denses. La conductivité thermique est liée à l'effusivité thermique et la capacité thermique volumique par la relation ci dessous :

$$\lambda = \frac{E^2}{c_v} \quad \text{Équation 15}$$

Avec

E : l'effusivité thermique ( $J/m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}$ ) ;

$C_p$ : La capacité thermique volumique ( $J/m^3 \cdot K$ ).

#### h. Propriétés hygrométriques : Perméabilité à la vapeur d'eau ; isothermes de sorption-désorption

Maîtriser la température dans un environnement clos tel qu'une habitation en terre n'est qu'un pas dans la course du confort. Un autre élément très important à maîtriser est la vapeur d'eau. Lorsque l'humidité relative de l'encainte augmente, il faut un régulateur pour absorber le trop plein de vapeur d'eau afin de maintenir l'ambiance intérieure vivable. Ce rôle de régulateur peut être attribué à la BTC. Sa porosité plus ou moins importante et les conditions de pression dans ses pores sont des atouts lui permettant de remplir ce rôle. Dans la présente étude, deux propriétés essentielles ont été testées dans ce sens : la perméabilité de la brique à la vapeur d'eau et sa capacité à adsorber et à rejeter cette dernière en fonction de variation du taux d'humidité.

##### ▪ Perméabilité à la vapeur d'eau

Pour déterminer les comportements des différentes briques vis à vis de la vapeur d'eau, un essai de perméabilité à la vapeur a été effectué. Pour se faire, des solutions salines saturées en NaCl ont été introduites dans huit bocaux. Chaque bocal s'est vu scellé hermétiquement par un échantillon de BTC. Le tout placé dans un dessiccateur initialement chargé de gels de silice. Les gels de silice étant réputés pour absorber l'humidité contenue dans son environnement ambiant. Un capteur hygrométrique a indiqué une humidité relative avoisinant 75% dans les bocaux et de 20% dans le dessiccateur. Ainsi, naturellement la vapeur d'eau créée par la solution saline dans les bocaux sera contrainte à quitter le milieu le plus humide (intérieur du bocal) vers le milieu le plus sec (dessiccateur) en traversant l'échantillon de brique. La perméabilité des différents échantillons est mesurée à travers les pertes de masse de chaque bocal à intervalle de temps régulier jusqu'à stabilisation. Une régression linéaire décroissante a été mise en évidence entre les masses consécutives et le temps. Les pentes b de chaque échantillon ont été relevées et les formules suivantes appliquées pour déterminer  $\mu$  la résistance à la vapeur d'eau.

$$\delta_p = \frac{b \cdot e}{S \cdot \Delta p_v} \quad \text{Équation 16}$$

Avec,

$\delta_p$ : La perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ) ;

b : pente de l'évolution de la masse en fonction du temps ( $kg/s$ ) ;

e : épaisseur de l'échantillon (m) ;

S : surface de l'échantillon ( $m^2$ ) ;

$\Delta p_v$  : différence de pression de vapeur d'eau dans l'échantillon.

$$\Delta p_v = (HR_1 - HR_2) * 610.5 * E^{\frac{17,269 * T}{237,3 * T}} \quad \text{Équation 17;}$$

Avec

T : La température dans le dessiccateur (20°C) ;

HR<sub>1</sub> = 73,5%, humidité relative dans le bac à solution saline ;

HR<sub>2</sub> = 20% ; humidité relative dans le dessiccateur.

Le coefficient de résistance à la vapeur est ainsi donné par le quotient :

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_p} \quad \text{Équation 18 ;}$$

Avec,

$$\delta_{air} = 1,96.10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$$

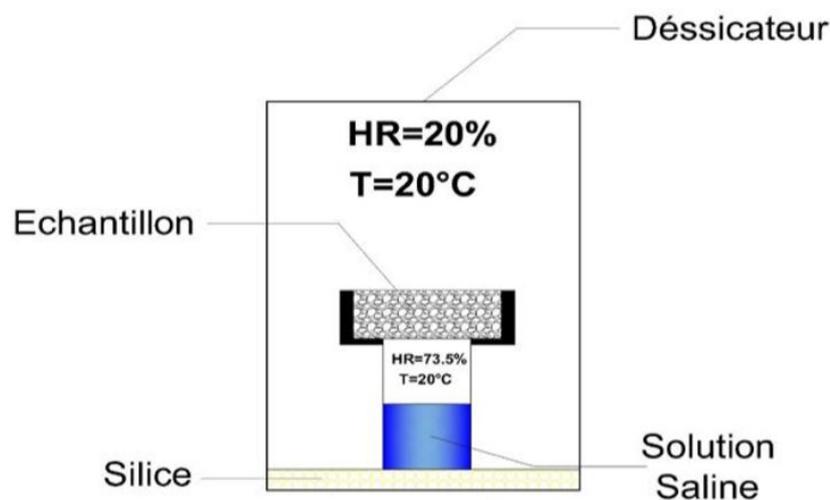


Figure 3: Dispositif expérimental de l'essai de perméabilité à la vapeur :  
Source : [14]

- Isothermes de sorption et désorption

Les courbes de sorption et désorption permettent de montrer comment un échantillon adsorbe et libère de l'humidité sous forme de vapeur. Ces courbes sont très importantes dans la mesure où elles permettent de mettre en évidence le rôle de régulateur d'humidité des briques testées. Les données issues de cet essai pourront également être utilisées pour modéliser et simuler le comportement hygrothermique d'une paroi en brique dans un environnement donné.

La méthode utilisée dans notre cas est la méthode dite des *solutions salines*. Sept (7) points d'humidité relative ont été utilisés. Le tableau 2.3 donne les solutions salines utilisées avec la teneur en humidité recherchée.

On appelle sorption, l'absorption de la vapeur d'eau par un matériau. Dans le cas de la terre, le terme *adsorption* est mieux adapté car les molécules de vapeur d'eau sont piégées par les surfaces des grains solides qui forment les parois des différents pores du matériau. L'attraction entre les molécules de vapeur

d'eau et ces surfaces se fait par le biais des forces assez faibles de type *Van Der Walls*. Ces forces de liaisons sont dites faibles parce que le phénomène inverse, la *désorption* se produit assez facilement lorsque les conditions ambiantes changent. Ainsi, lorsque l'humidité relative d'un milieu augmente, le matériau terre emmagasine l'excès d'humidité en fonction de ses conditions porales et de certaines conditions extérieures telles que la température et la pression du milieu. Cela se traduit par une courbe sigmoïdale ascendante de la teneur en humidité du matériau en fonction de l'humidité relative créée dans son environnement. Inversement, lorsque l'humidité relative d'une enceinte close diminue, la brique en terre qui jadis avait adsorbé l'humidité lors de sa sorption la restitue pour réguler la faible humidité de l'intérieur. Il s'agit de la *désorption*.

En réalité, ces courbes permettent d'estimer la teneur en eau d'un matériau à une humidité relative donnée. Ces deux courbes qui selon l'entendement devraient être confondues sont en réalité distinctes l'une de l'autre *hystérésis*. Ce qui veut dire qu'un matériau hygrosopique tel que la terre ne libère pas de l'humidité de la même manière qu'il en capte. Cela s'explique par la modification de la structure porale qui survient lors de ces phénomènes.

Tableau 5: Valeurs des HR (%) en fonction de la nature du sel à 20°C

Sels	KOH	MgCl6H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KI	NaCl	KCl	K <sub>2</sub> CrO <sub>3</sub>
HR(%)	11%	30%	45%	68%	75%	83%	95%

Deux modèles ont été testés pour mettre en évidence les hystérésis des différents échantillons. Il s'agit du modèle d'Henderson et d'Oswin. De ces deux modèles le meilleur (celui qui présente le coefficient de détermination R<sup>2</sup> le plus élevé) sera retenu.

#### i. Indicateurs de durabilité des briques

Si les bâtiments en matériaux dits conventionnels (ciments, aciers etc.) peuvent durer jusqu'à plusieurs siècles, la durée de vie des constructions en terre est quant à elle fonction de plusieurs paramètres. Parmi eux, son environnement immédiat, et les différentes intempéries auxquelles il peut être soumis. Trois essais principaux ont permis dans le cadre de la présente étude de simuler la durabilité de ces briques. Il s'agit de l'essai d'abrasion, de l'essai d'érodabilité et celui dit des cycles de mouillage-séchage.

##### ▪ Résistance à l'abrasion

Cet essai a pour but de simuler le comportement des BTC vis-à-vis des différentes actions humaines pouvant les abraser, ou au vent charriant des granulats de sa force. Pour réaliser l'essai, une brosse métallique en acier, chargée d'une masse de 3kg est utilisée pour simuler ces effets d'abrasion. La brosse est passée à raison de 60 allers et retours sur une des faces de parement de la BTC. Ces mouvements d'aller et retour sont effectués de sorte à minimiser l'effet de l'action du bras. Des particules se détachent du bloc au fur et à mesure que la brosse passe. A la fin, un sillon rectangulaire est formé dans la brique matérialisant la dégradation de la brique. Après pesée, et connaissant sa masse sèche initiale, on peut déterminer la perte de masse en faisant une simple différence des deux valeurs. Cette différence de masse est rapportée sur la surface du sillon (longueur de la brique fois la largeur de la brosse) pour déterminer le coefficient d'abrasion Ca.

##### ▪ Essai d'érodabilité

Un parement extérieur d'une maison est chaque année soumis à des pluies d'intensités variables. Si elle se dit durable, elle doit pouvoir résister au fil des ans à chaque saison pluvieuse sans présenter des dégradations. Pour simuler le comportement d'une brique face à l'érosion d'une pluie, l'essai d'érodabilité est très généralement employé. Il consiste à placer la brique à une distance connue d'une source d'eau sous pression maîtrisée. Pour atteindre cette pression, une pompe de surface à moteur a été utilisée, et

reliée à un manomètre et un robinet de *douche* permettant de faire jaillir l'eau sous forme de pluie. Une vanne placée à mi-chemin entre la pompe et le manomètre permet de réguler la pression de sortie pour s'assurer que les 5 bars atteignent vraiment la brique. L'essai dure 60 minutes. Après ce temps, des dégradations apparaissent sur la face testée. Ces dégradations sont quantifiées par une certaine profondeur d'érosion et la surface érodée. Préalablement, la surface sollicitée par le jet d'eau est déterminée. Elle est notée  $S_{exp}$  (Surface exposée en  $mm^2$ ). A la fin de l'essai, la surface réellement érodée est ensuite estimée puis un rapport de proportionnalité est effectuée entre les deux surfaces pour déterminer le pourcentage d'érosion. Cette dernière valeur est un indicateur important, car le pourcentage d'érosion sera petit voire nul si la brique est réellement durable et résiste à l'érosion.

## Chapitre-III.      RESULTATS ET DISCUSSIONS

### III.1 Introduction partielle

La présente section est entièrement vouée aux résultats obtenus lors de la caractérisation des matières premières qui ont permis de confectionner les briques et aussi lors de la caractérisation des briques elles-mêmes. Cette section est subdivisée comme suit :

- Dans un premier temps, nous présenterons les résultats de caractérisation de toutes les matières premières ;
- Dans un second temps, nous présenterons les résultats de caractérisation des briques ; ces résultats seront subdivisés en propriétés mécaniques, hydriques, physiques et hygrométriques ; et enfin,
- Nous présenterons les résultats de études statistiques et de simulation thermiques.

### III.2 Caractéristiques de la matière première

#### III.2.1 Propriétés physiques

##### a. Analyses granulométriques

Aux vues de ce qui est dit dans le chapitre 1, il est primordial de connaître la nature et la répartition granulaire de chacune des terres testées afin de mieux discuter leurs comportements avant, pendant et après la stabilisation. De cet essai, il en ressort qu'il s'agit toutes les deux de terres argileuses, mais à des proportions d'argiles et des autres éléments minéralogiques différentes. La figure4 illustre les courbes granulométriques de chacune de ces deux terres.

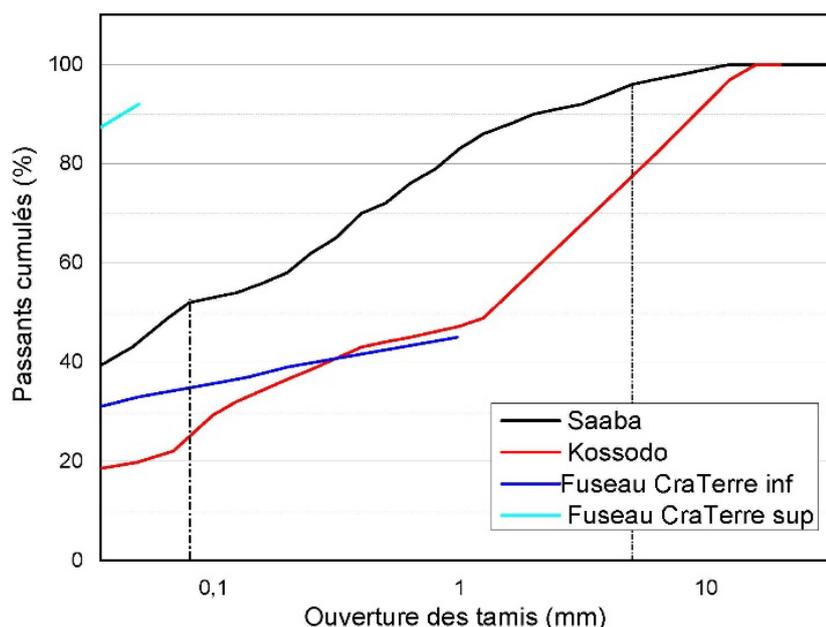


Figure 4: Courbes granulométriques des terres argileuses de Kossodo et de Saaba

De ces courbes, les informations suivantes peuvent être tirées :

- La courbe granulométrique de Saaba rentre parfaitement dans le fuseau Craterre des terres stabilisables avec de la chaux ; ceci sous-entend qu'elle réagira bien avec le CCR.
- La courbe de Kossodo quant à elle déborde légèrement vers le bas à partir des éléments de diamètre inférieur à 0,3mm correspondant à peu près à 40% des éléments. Le CCR peut donc ne pas être le stabilisant idéal pour cette terre argileuse.

Tableau 6: Répartition granulair des terres argileuses de Kossodo et de Saaba

Eléments	Grossiers	Sableux	Fins
Kossodo	23%	53%	24%
Saaba	8%	40%	52%

Le tableau 6 est une synthèse de la figure4 illustrant explicitement la répartition des éléments granulaires, subdivisés en éléments grossiers (diamètre supérieur à 5 mm); sables( diamètre compris entre 80µm et 5mm et les fines (diamètre inférieur à 80µm). Ce tableau nous montre que la terre de Saaba contient plus de fines que Kossodo (pratiquement le double). Donc plus d'éléments argileux. Ce qui sous entend que la terre de Saaba présentera plus d'alumino-silicates aptes à réagir avec le CCR. A priori, les réactions argile-CCR auront plus lieu avec la terre de Saaba qu'avec celle de Kossodo. Cette dernière présente 76% d'éléments grossiers contre 48% pour celle de Saaba. La terre de Kossodo à priori sera donc plus dense que celle de Saaba qui est à prédominance fine.

#### b. Densités apparentes et spécifiques

La densité d'un matériau granulaire est un paramètre important pour sa caractérisation. Principalement dans le cas des briques en terre, un regard enthousiaste est porté aux briques pouvant servir de structure pour des bâtiments de deux niveaux. Pour cela, il faut non seulement avoir des briques bien résistantes mécaniquement, mais aussi des briques assez légères pour minimiser leurs charges propres.

Les résultats montrent que pour 1m<sup>3</sup> de volume pris en vrac de la terre de Saaba pèse 902kg contre 1160kg pour celle de Kossodo. La terre de Saaba pèse ainsi 22% moins que celle de Kossodo. Cette différence de densité peut être due à la composition minéralogique de chacune des terres. En effet, le tableau6 nous renseigne que la terre de Kossodo contient 76% d'éléments grossiers et sableux contre 48% pour la terre de Saaba. Tout naturellement, les briques obtenues avec la terre de Kossodo seront plus denses que celles obtenues avec la terre de Saaba. Aussi, les compositions chimiques de ces différentes terres données par [15] montrent que la terre de Kossodo contient 8,1% d'éléments ferreux contre 0,6% Pour la terre de Saaba. Le fer étant un élément lourd, les densités obtenues s'expliquent bien.

Le poids des gains solide eux même est exprimé ici par la densité spécifique. Nous remarquons la même tendance de variation, à savoir que les grains de Kossodo pèsent plus que les grains de Saaba. Respectivement, nous notons 2910kg/m<sup>3</sup> contre 2600kg/m<sup>3</sup>

Tableau 7:Densités apparentes et spécifiques des matières premières

Terres	Kossodo	Saaba
Densités apparentes(kg/m <sup>3</sup> )	1160	902
Densités spécifiques(kg/m <sup>3</sup> )	2910	2600

### III.2.2 Influence de l'ajout de la CCR sur la demande en eau des différentes terres : Teneur en eau optimales

A partir de l'essai Proctor normal, les différentes teneurs en eau optimales des différents mélanges ont été obtenues conformément à la norme NF P 94-093. La figure 5 montre que les teneurs en eau optimales augmentent avec l'ajout de CCR, inversement les densités sèches maximales diminuent. Ceci est tout à fait normal, car la CCR qui est broyé et passé au tamis de 125 µm est un produit fin. Il contribue ainsi largement à augmenter la demande initiale en eau de la terre crue. Donc plus elle sera ajoutée à une terre, plus la teneur en eau optimale du mélange va augmenter. Ainsi, le volume de l'eau augmentera en fonction des mélanges. Quand toutes les réactions auront pris fin dans ledit mélange et que l'eau sera totalement chassée, les mélanges qui ont demandé une

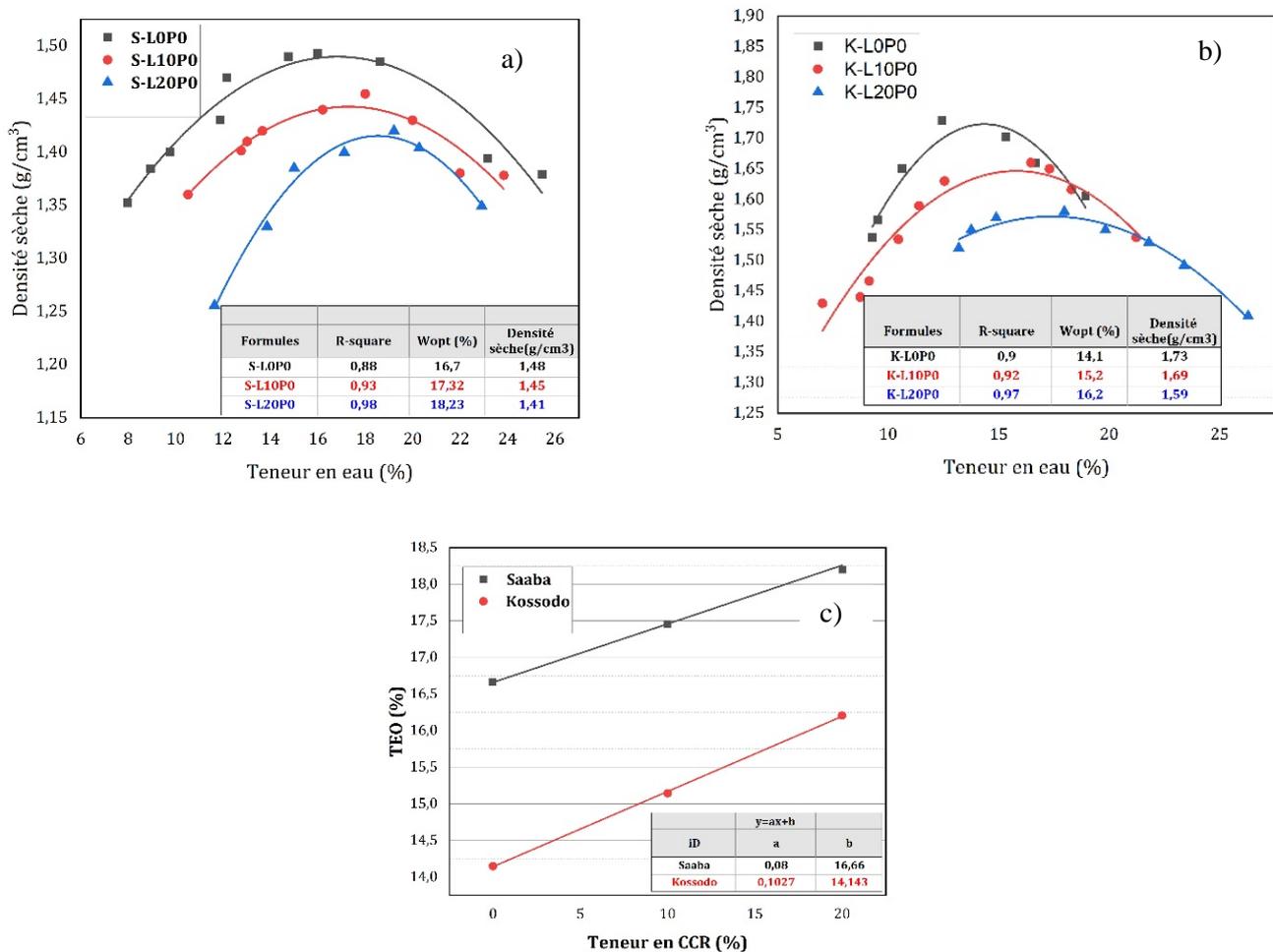


Figure 5: a) Courbes Proctor Saaba ; b) Courbes Proctor Kossodo ; c) Regression entre les teneurs en eau optimales et les taux de CCR.

quantité élevée d'eau présenteront tout naturellement plus de pores que les autres, donc une densité moins élevée.

Toute comparaison faite entre les deux figures, il en ressort que la terre argileuse de Saaba a une demande en eau plus élevée que celle de Kossodo, ceci s'explique par le fait que la terre de Saaba à l'état naturel présente plus d'éléments fins que celle de Kossodo (tableau 6). Cette comparaison est bien observée dans la figure 5-c où une régression linéaire avec un fort coefficient de détermination ( $R^2$ ) a été

mise en évidence entre les taux de CCR contenus dans les mélanges et les teneurs en eau optimales de ces derniers. Cette figure montre entre autres que les deux droites de régression présentent des pentes approximativement égales à 0,10. L'écart de 2,5% observé entre les différents points respectifs des deux droites traduit bien la forte demande en eau de la terre de Saaba par rapport à celle de Kossodo.

### III.3 Caractéristiques des briques en terre comprimées

#### III.3.1 Propriétés physiques

Dans cette sous-section, l'influence de la CCR sur les propriétés comme les densités et les différentes porosités sera démontrée.

##### a. Densités apparentes

L'essai de densité apparente a été effectué par des pesées hydrostatiques pour les briques stabilisées car elles résistent bien à l'eau. Pourtant, pour les briques non stabilisées qui se désagrègent au contact de l'eau, l'essai a été effectué par mesure des dimensions, pesées puis application de la formule de la masse volumique. Les différents résultats sont consignés dans le tableau 8.

Ce tableau montre une décroissance de la densité avec l'ajout de la CCR, passant de  $1798\text{kg/m}^3$  pour la K-LOP0 à  $1624\text{kg/m}^3$  pour la K-L20P0. Une décroissance est aussi remarquée avec la terre de Saaba qui présente une densité de  $1631\text{kg/m}^3$  à l'état cru ;  $1559\text{kg/m}^3$  avec 10% de CCR et  $1503\text{kg/m}^3$  à 20% de CCR. Cette chute de densité peut être due au fait que des particules terreuses soient remplacées par des particules fine de CCR au fur et à mesure que cette dernière est ajoutée. Selon [12] les

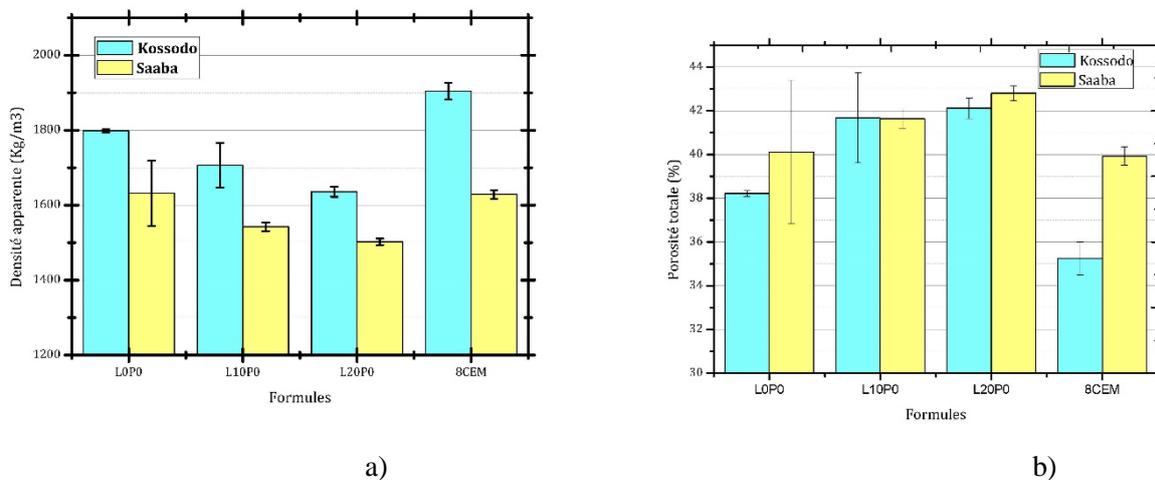


Figure 6: Illustrations de (a.) La densité apparente (b.) la porosité totale des différentes briques

densités apparentes des BTC sont comprises entre  $1600\text{kg/m}^3$  à  $2200\text{kg/m}^3$ . En 2019, [6] a trouvé des valeurs de  $1630\text{kg/m}^3$  et  $1860\text{kg/m}^3$  respectivement pour les briques fabriquées avec la terre de Pabré, stabilisées à 20% de CCR et 8% de ciment. Ces valeurs montrent la différence de densité qui existe entre les deux terres. Cette différence avait été prédite lors de la caractérisation des matières premières. Cependant, il faut noter que les briques les plus denses sont bien celles stabilisées avec le ciment. Les valeurs vont de  $1633\text{kg/m}^3$  Pour S-8CEM à  $1880\text{kg/m}^3$  pour la K-8CEM. La stabilisation au ciment produit donc des briques plus lourdes que la stabilisation à la CCR.

### b. Porosités totales, accessibles et fermées

Les différentes porosités des différents échantillons ont été déterminées avec les mêmes essais que précédemment. Le tableau 8 illustre toutes ces valeurs en proportions centésimales. Les résultats montrent une prédominance des pores fermés avec les briques de Kossodo qu'avec celles de Saaba. La brique K-L10P0 présente une porosité fermée de 5,42% et la K-L20P0 présente 5,12% comme porosité fermée. Les briques S-L10P0 et S-L20P0 présentent quant à elles respectivement 3,58% et 3,77% comme porosité fermée. Le lien inverse qui existe entre la porosité totale d'un matériau et sa densité apparente a également été montré ici. Or on a vu dans le paragraphe précédent que la densité apparente diminuait avec l'ajout de la CCR. Les valeurs de porosité totale vont de 38,21% pour la brique K-L0P0 à 41,68% pour la K-L10P0 et 42,11% pour la K-L20P0. Les briques de Saaba ont une porosité totale de 38,66% pour la brique non stabilisée, 41,63% pour la brique stabilisée avec 10% de CCR et 42,80% pour la brique stabilisée avec 20% de CCR. La porosité totale et la densité apparente d'un matériau tel que la terre sont vraisemblablement liées, car pour un même volume de brique, les briques les plus légères sont celles qui auront plus de vides.

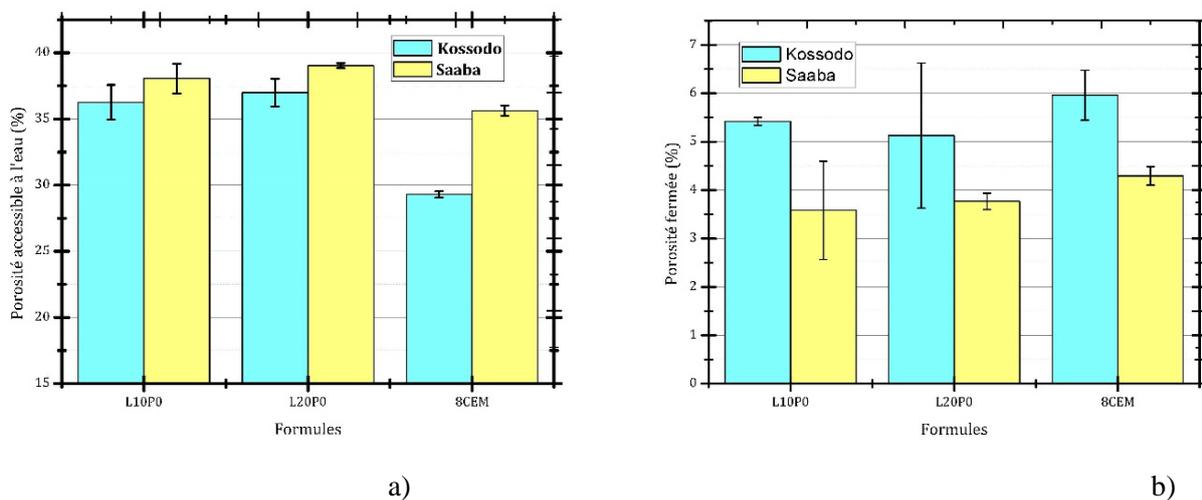


Figure 7: Illustrations de (a.) la porosité accessible à l'eau et (b.) la porosité fermée des différentes briques

### c. Essai punitif : Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et module de Young

La figure 8 illustre les résultats de vitesse de propagation des ondes et de module dynamique. Les valeurs de vitesse de propagation des ondes et du module de Young sont consignées dans le tableau 8. Toute analyse faite, il en ressort que les briques non stabilisées présentent les valeurs les plus faibles de vitesse de propagation d'ondes et de module. Ceci traduit bien leurs densités élevées trouvées. Les briques non stabilisées ont la demande en eau la plus faible, ce qui veut dire qu'il y a moins de pores après départ de cette eau et plus de matière terreuse.

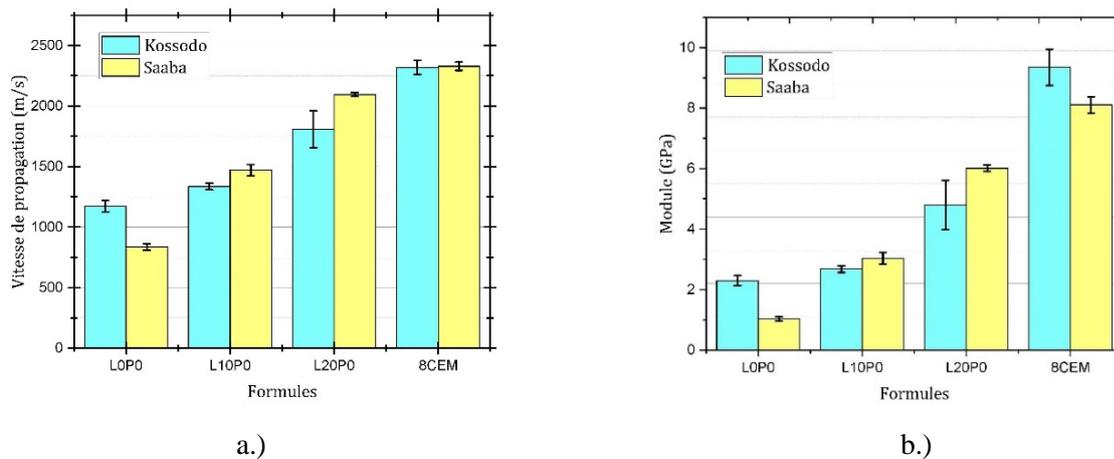


Figure 8: Illustrations de (a.) La Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et (b.) le Module dynamique des différentes briques

Mais plus la CCR est ajoutée aux terres, plus le mélange devient fin, plus la demande en eau croît et plus la porosité croît et inversement la densité apparente, car une bonne quantité de terre est remplacée par de la CCR. Ce qui traduit bien les valeurs croissantes de vitesse de propagation avec l'ajout de CCR. Aussi, avec l'ajout de la CCR, le module dynamique augmente avec une valeur maximale des briques stabilisées à la CCR obtenue avec la brique S-L20P0 s'élevant à 6GPa pour la SL20P0. D'une façon générale les valeurs maximales sont obtenues avec la stabilisation au ciment qui donne respectivement 9,81GPa et 8,11GPa pour les briques K-8CEM et S-8CEM. Il faut remarquer que ce sont là des valeurs avoisinant le module du béton.

Tableau 8: Propriétés physiques, capacités d'absorption capillaire et totale

Formule	$\rho_{app}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Porosités $\varepsilon$ (%)			Paramètres pundit		Absorption par capillarité		Abs totale W
		Totale	Acc	Fermée	V	E <sub>G</sub>	C <sub>b</sub>	a	
K-LOPO	1798	38,21	-	-	1172,6 7	2,30	-	-	-
K-L10P0	1669	41,68	36,26	5,42	1335,0	2,68	21,69	18,89	0,31
K-L20P0	1624	42,11	36,99	5,12	1808,3 3	4,8	19,14	0,29	22,61
S-LOPO	1631	38,66	-	-	836,33	1,03	-	-	-
S-L10P0	1559	41,63	38,05	3,58	1470,6 7	3,04	20,42	0,11	24,64
S-L20P0	1503	42,8	39,03	3,77	2094,6 7	6,01	9,1	0,21	25,98
K-8cem	1880	35,26	29,30	5,96	2319,0	9,34	9,65	0,05	15,39
S-8CEM	1633	39,93	35,63	4,29	2328,3 3	8,11	6,13	0,1	21,89

### III.3.2 Propriétés mécaniques et hygro-mécaniques

#### a. Résistances à la compression

Les résultats illustrés par la figure 3.4 montrent que la résistance à la compression augmente avec l'ajout de CCR. En regardant les résultats des échantillons non stabilisés, la terre de Kossodo présente des briques plus résistantes (1,6MPa) que celles de Saaba(0,5MPa). Cela peut être dû au

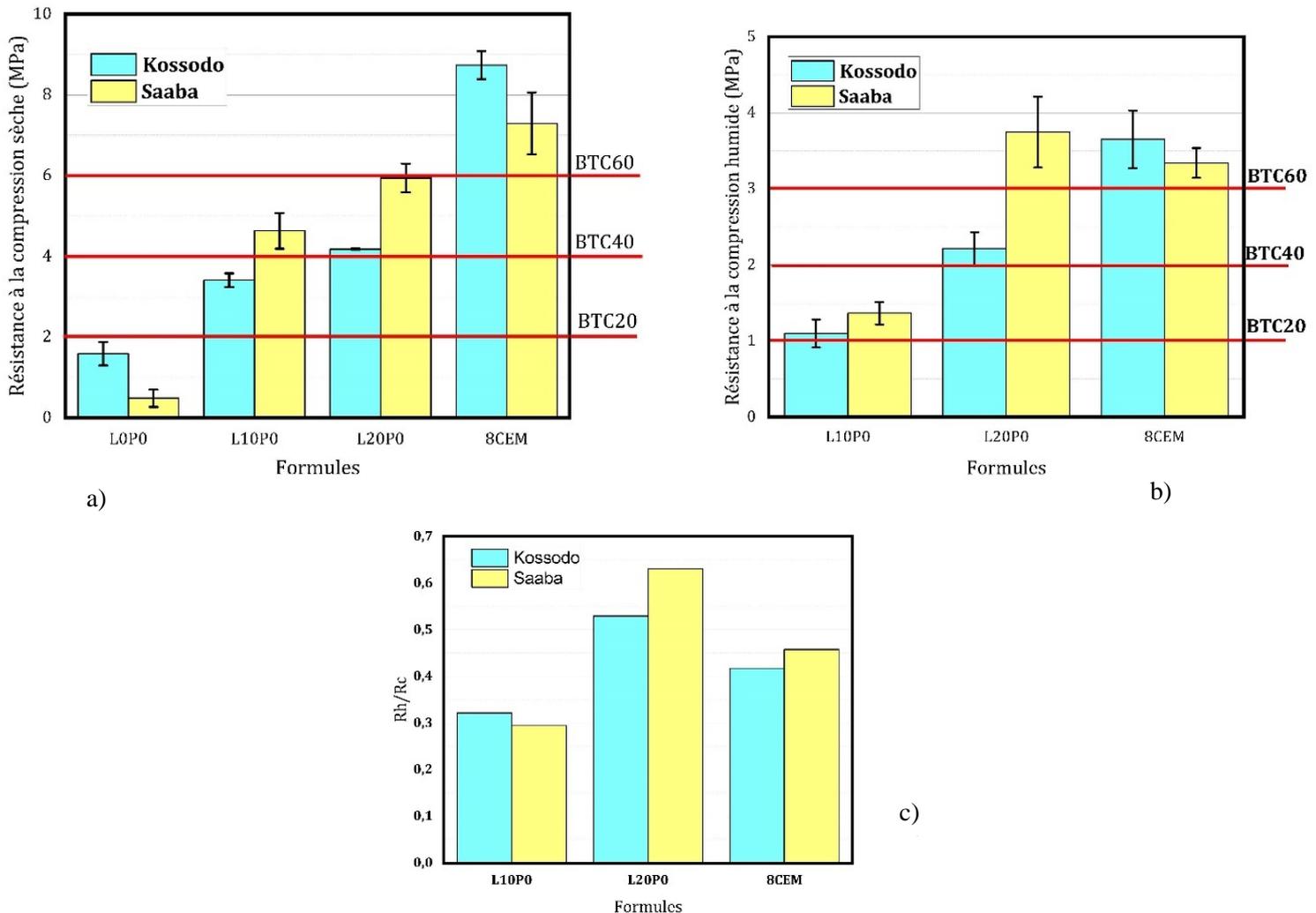


Figure 9: Résistances à la compression (a.) sèche (b.) humide ; (c) Coefficient of Water Strength (CWS)

fait que naturellement, la terre de Kossodo présente des particules plus grossières et plus denses que celle de Saaba. Une ossature granulaire plus ou moins importante offre à la terre naturelle (crue) de Kossodo une résistance plus élevée à la compression sèche. Cependant, avec ajout de CCR, les meilleurs records de résistance à la compression sont atteints par la terre de Saaba, avec une valeur maximale de 6MPa à 20% de CCR. La brique S-L10P0 a présenté une valeur de 4,6MPa. Cette valeur est même supérieure à la résistance des briques de Kossodo stabilisées à 20% de CCR (4,2MPa). La K-L10P0 a présenté une valeur de 3,4MPa. D'une façon générale, les meilleures résistances obtenues par les échantillons stabilisés à 8% de ciment s'élèvent à 8,5MPa et 7,2MPa respectivement pour les terres de Kossodo et de Saaba. La stabilisation à la chaux donne de bons résultats avec la terre de Saaba alors que l'ajout de ciment favorise la terre de Kossodo. Cela peut être une preuve qu'il existe un lien entre la composition

minéralogique et chimique d'une terre et le type de stabilisation qui lui est approprié. En effet, la terre argileuse de Saaba a montré dans le tableau (III.3) une prédominance des éléments argileux de type kaolinite. Cette dernière étant une argile très stable, elle offre assez d'alumino-silicates pour les réactions pouzzolaniques. La terre de Kossodo quant à elle du fait de sa faible proportion en kaolinite, aura moins d'hydrates en fin de cure avec le CCR. Ce qui veut dire que la terre de Kossodo est plus réactive avec le ciment que la terre de Saaba et inversement avec le CCR.

Les résultats de compression humide montrent la même tendance des valeurs. Les briques non stabilisées présentant une mauvaise tenue à l'eau, elles n'ont pas été testées. De même que la résistance à la compression sèche, la résistance à la compression humide augmente avec l'ajout de CCR. La terre argileuse de Saaba étant celle qui présente des meilleurs résultats avec la CCR.

Contrairement à la compression sèche, l'échantillon S-L20P0 présente une résistance à la compression humide plus élevée que tous les autres échantillons, même ceux qui sont stabilisés au ciment. La résistance à la compression humide est un paramètre très important. Si la brique peut facilement supporter des charges élevées lorsqu'elle est sèche, elle doit pouvoir supporter les mêmes charges en saison pluvieuse. Les échantillons de Kossodo présentent des résistances à la compression humide allant de 1,09MPa à 2,21MPa respectivement pour la K-L10P0 et la K-L20P0. Les briques de Saaba présentent 1,36MPa à 10% de CCR, et 3,74MPa à 20% de CCR. Les échantillons stabilisés au ciment ont donné 3,64MPa et 3,33MPa respectivement pour la terre de Kossodo et Saaba.

Tableau 9: Propriétés mécaniques

Formules	R <sub>CS</sub> (MPa)	R <sub>CH</sub> (MPa)	R <sub>CH</sub> /R <sub>CS</sub>	Ces (Pa.m <sup>3</sup> /kg)
K-L0P0	1.6	-	-	882
K-L10P0	3.4	1.09	32.19	2040
K-L20P0	4.2	2.21	53	2572
S-L0P0	0.5	-	-	296
S-L10P0	4.6	1.35	29.43	2969
S-L20P0	5.9	3.74	63.04	3952
K-8CEM	8.7	3.64	41.49	4646
S-8CEM	7.3	3.33	45.78	4464

Le rapport entre les résistances à la compression humide et sèche donne un coefficient appelé dans la littérature *Coefficient of Water Strength (CWS)*. Il illustre la perte de résistance du matériau après être totalement saturé d'eau. Les valeurs de ce coefficient sont illustrées sur la figure (III-8-b). L'échantillon S-L20P0 présente le rapport plus élevé, dépassant les barres de 60%. Ce qui veut dire que sa perte de résistance après être plongée dans l'eau pendant 2 heures est moins de 40%, contre 54% pour la S-8CEM et 70% pour la S-L10P0. Elle est ainsi l'échantillon le plus stable de toutes les observations. Les échantillons stabilisés au ciment présentent des pertes de résistance au delà de 50%. Dans la littérature, [16] a obtenu en 2013 des résultats allant de 4,17MPa à 4,25MPa respectivement avec des proportions de 10 et 20% de CCR en passant par une valeur maximale de 5,02MPa avec 15% de CCR. [6] avait trouvé en 2019 avec la terre de Pabré, des valeurs de 2,62 MPa pour des échantillons non stabilisés et 3,40MPa avec 10% de CCR.

Tout ceci nous montre que la stabilisation à la chaux avec la terre argileuse de Saaba est très efficace

b. Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression

Entre ces deux extrêmes que sont la résistance à la compression sèche et la résistance à la compression humide des briques, il est judicieux de connaître la résistance de la brique à un taux d'humidité quelconque. Il faut rappeler qu'au fil de l'année, la brique n'est jamais quasi sèche comme nous l'avons fait en laboratoire. Il est donc judicieux de maîtriser les caractéristiques hydromécaniques. Avant cet essai proprement dit, nous avons déterminé la cinétique d'absorption totale de l'eau par les différentes briques, ce qui nous a permis de chronométrer le passage des briques dans l'eau avant l'essai. Cette cinétique est présentée dans les figures ci-après.

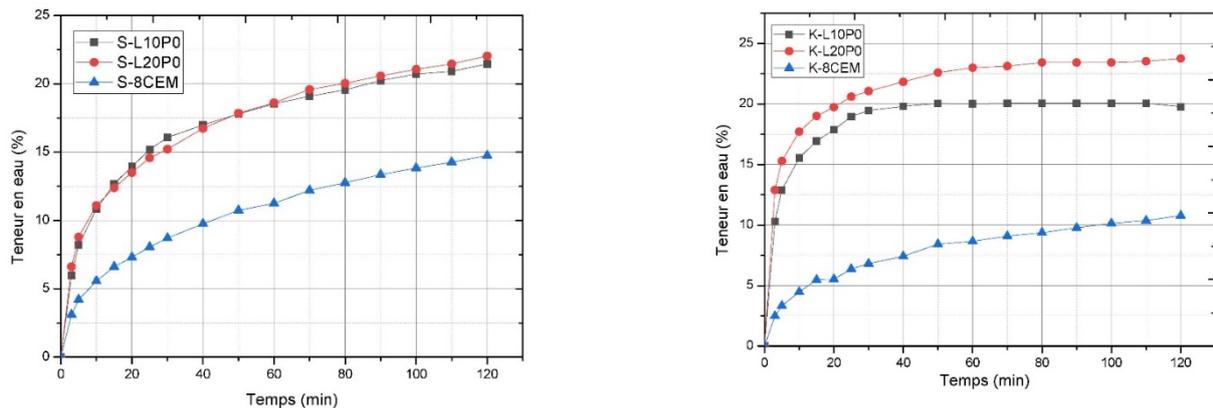
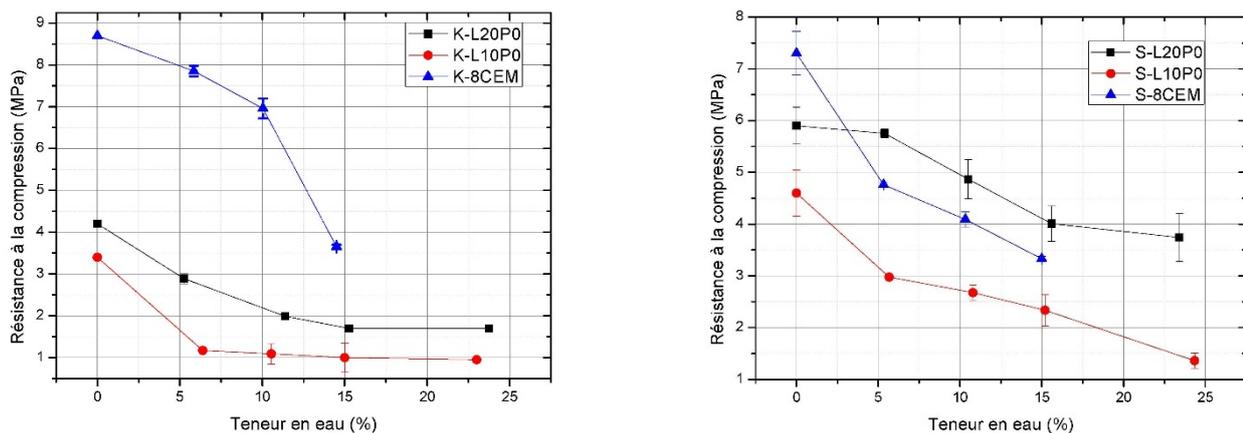


Figure 10: Cinétique d'absorption de l'eau

Ces deux figures nous montrent que les courbes de la cinétique d'absorption d'eau des briques des asymptotes horizontales d'équation allant de  $y = 24\%$  à  $y = 11\%$  en fonction de l'échantillon considéré. Ces deux figures à elles seules expliquent plusieurs caractéristiques des briques.



a)

b)

Figure 11: Résistances hygro-mécaniques des différents échantillons a) Kossodo b) Saaba

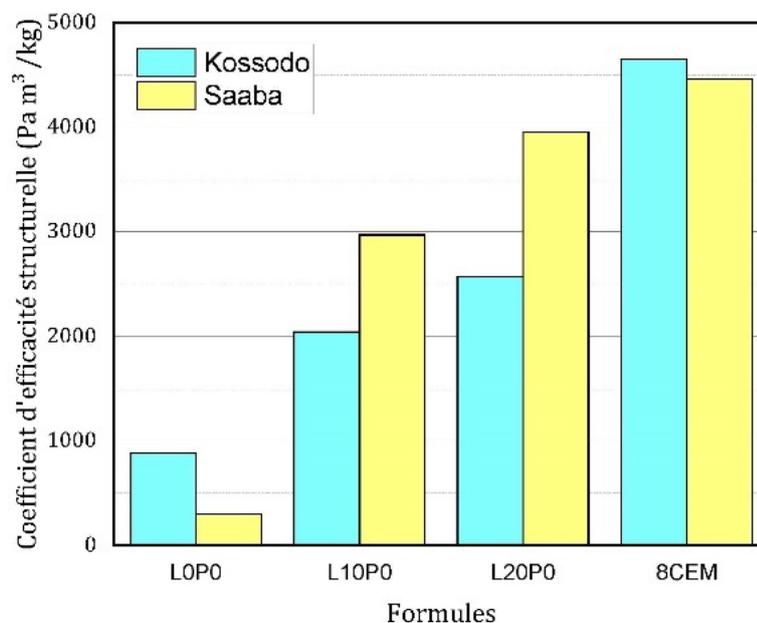
Nous remarquons naturellement une décroissance des résistances en fonction de la teneur en eau. Pour les briques de Kossodo, les briques stabilisées au ciment résistent mieux à la compression que les briques stabilisées à la CCR. A près de 6% d'eau, la K-8CEM résiste à 7,85MPa contre 8,7MPa à 0% d'eau.

Elle décroît de 6,95MPa à 3,65MPa entre 10% et 15% d'eau. Ces valeurs restent très élevées par rapport aux briques K-L20P0 qui passent de 2,89MPa à 5% d'eau à 1,7MPa à 15%. Ce rapport entre briques stabilisées au ciment et briques stabilisées à la CCR n'est pas le même pour les briques de Saaba. Avec ces dernières, on voit clairement que les briques S-L20P0 résistent mieux que les briques S-8CEM. En effet, à 5% d'eau, la S-L20P0 résiste à 5,75MPa contre 4,76MPa pour la S-8CEM. Même à 15% d'eau, la S-L20P0 reste plus résistante que la S-8CEM. (Respectivement, 4MPa contre 3,33MPa). Ceci montre la réussite de la stabilisation à a CCR avec la terre de Saaba au détriment de la terre de Kossodo.

### c. Efficacité structurelle (CES)

L'efficacité structurelle est un paramètre indispensable pour des briques faisant partie d'un mur porteur. En effet, l'un des objectifs les plus en vue est de supprimer la structure en béton armé rencontrée dans la majorité des constructions en terre rencontrée en ville. Les briques en terre deviennent donc des éléments porteurs. Cela nous renvoie à deux paramètres mentionnés ci dessus: la résistance à la compression et la densité apparente. Avoir des briques résistances et légères, est un avantage.

Figure 12: Coefficient d'efficacité structurelle



Le coefficient d'efficacité structurelle se traduit par le rapport entre la résistance à la compression sèche (en Pa) et la densité apparente (kg/m<sup>3</sup>). Ce rapport traduit la capacité d'un matériau à supporter des charges. Les matériaux présentant un rapport élevé seront ceux qui sont plus susceptibles à supporter des charges. Cela est bien illustré par la figure12 qui montre un coefficient de 3952Pa.m<sup>3</sup>/kg pour S-L20P0 contre 4464Pa.m<sup>3</sup>/kg pour S-8CEM. Ce coefficient montre que La CCR ajoutée à la terre de Saaba en proportion suffisante suffit pour faire des briques porteuses. La valeur maximale est trouvée avec la brique de Kossodo stabilisée au ciment, et elle s'élève à 4646Pa.m<sup>3</sup>kg. Cette valeur décroît à 2572Pa.m<sup>3</sup>kg lorsqu'on passe à 20% de CCR et 2040 à 10% de CCR. La valeur minimale est celle trouvée avec la brique non stabilisée, et elle s'élève à 882Pa.m<sup>3</sup>/kg.

### III.3.3 Propriétés hydriques

#### a. Absorption par capillarité

L'absorption par capillarité est un phénomène dangereux pour la brique. Une nappe affleurant tout simplement la face de pose inférieure de la brique peut provoquer sa saturation et ce parfois en moins de 24 heures. Il est donc indispensable de maîtriser leur capacité d'absorption par capillarité. Aussi, la pente "a" des droites de régression des coefficients d'absorption par capillarité renseigne sur le diamètre moyen des pores accessibles à l'eau. En effet, il s'agit d'un coefficient multiplicateur entrant dans la formule de calcul du diamètre moyen de ces dits pores. Cette pente est appelée *la sorptivité de la brique*. En général, plus la sorptivité est élevée, plus le diamètre moyen des pores accessibles aussi sera élevé. Le tableau 3.8 renseigne sur la sorptivité des différentes briques ainsi que les coefficients d'absorption après 10 minutes d'absorption. Analyse faite, ce tableau montre une sorptivité élevée pour les briques de Kossodo. Elle va de 0,31 pour la K-L10P0 à 0,29 pour la K-L20P0. Les briques de Saaba quant à elles nt enregistré respectivement 0,11 et 0,21 pour les briques S-L10P0 et S-L20P0. Ceci traduit bien les résultats du tableau 3.1. Car une terre présentant des particules grossières aura des pores plus larges qu'une terre fine. La sorptivité évoluera aussi dans ce sens. En conclusion, Les briques de Kossodo présentent donc des pores capillaires plus larges que les briques de Saaba.

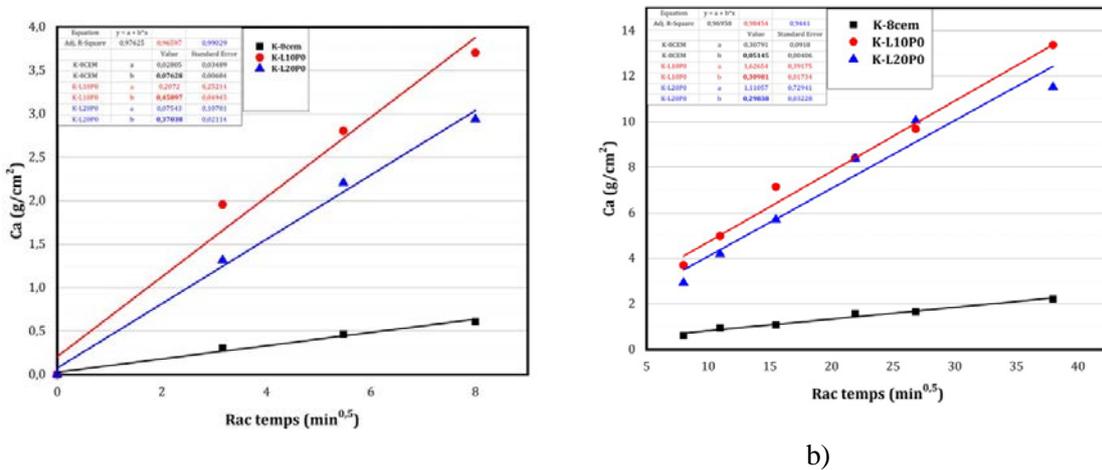


Figure 13: Absorption par capillarité des briques de Kossodo (a.) des macros pores (b.) des pores capillaires

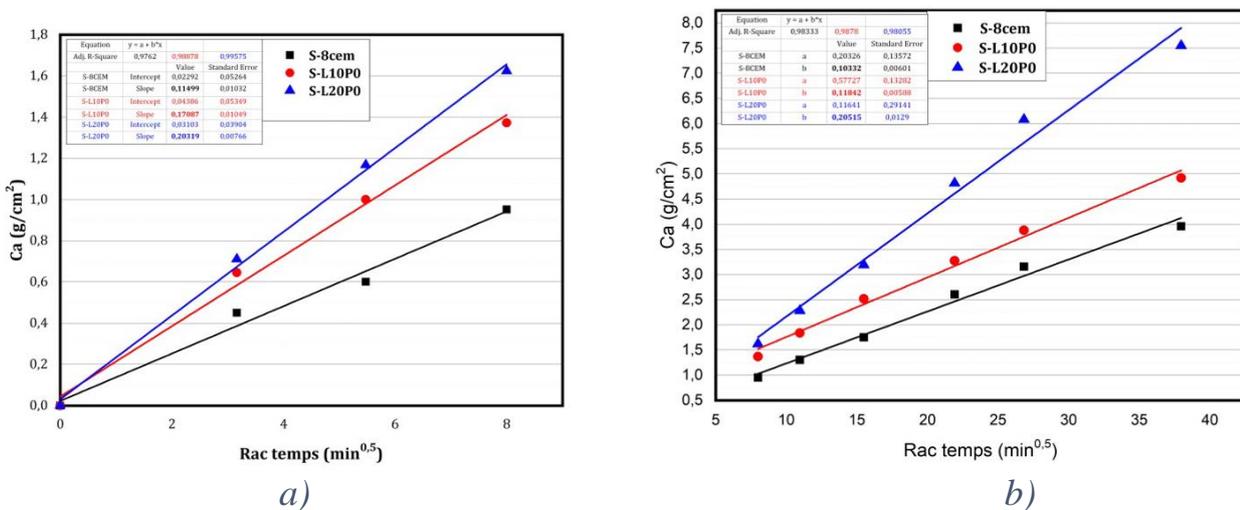


Figure 14: Absorption par capillarité des briques de Saaba (a.) des macros pores (b.) des pores capillaires

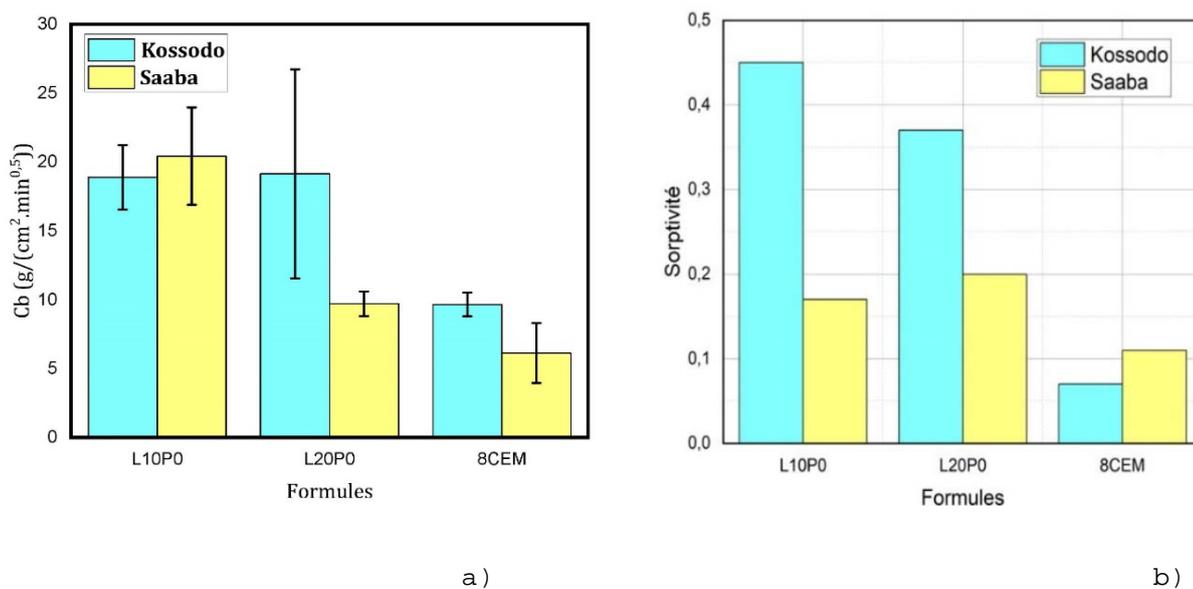


Figure 15: a) Coefficient d'absorption par capillarité après 10 min d'immersion et b) sorptivité des briques de Kossodo et de Saaba

#### b. Capacité d'absorption totale

La capacité d'absorption d'eau totale est intimement liée à la porosité plus précisément la porosité accessible. C'est cette dernière et les macro-pores qui se remplissent d'eau. Il est donc important de connaître la quantité d'eau que peuvent contenir les pores d'une brique à saturation. Car c'est de cette quantité que vont dépendre sa résistance humide et même ses propriétés hygro-thermiques. Par extension cette capacité d'absorption peut être assimilée à la teneur en eau à saturation. Le tableau (III.5) donne les valeurs de la capacité d'absorption totale de chacune des briques. Elles vont de 21,69% pour la K-L10P0 à 22,61% pour la K-L20P0. Les briques de Saaba ont présenté des valeurs de 24,67% avec 10% de CCR et 25,98% avec 20% de CCR. Les briques non stabilisées, n'ont pas été testées car ne pouvant pas être plongées dans l'eau sans se désagréger. On note un faible accroissement entre les briques L10P0 et L20P0. Cette variation est bien à l'image de la variation de la porosité des briques. La brique K-8CEM qui a présenté dans le tableau (III.7) une faible porosité absorbe tout naturellement moins d'eau que toutes les autres. La brique S-8CEM quant à elle a présenté une porosité avoisinant les autres briques

stabilisées à la CCR, d'où son importante capacité d'absorption. Ceci montre encore une fois la réussite de la stabilisation de la terre de Kossodo avec le ciment.

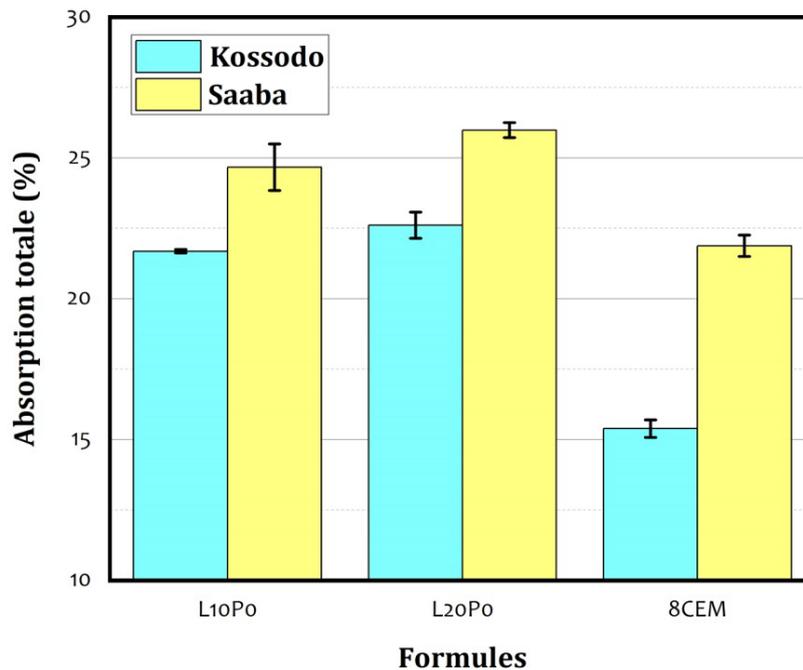


Figure 16: Absorption totale des briques de Kossodo et de Saaba

### III.3.4 Propriétés thermiques et hygrothermiques

L'intérêt de toutes ces études sera plus accru, si les propriétés thermiques des briques testées démontrent une inertie thermique élevée. Plusieurs travaux antérieurs ont montré que les matériaux en terre ont de bonnes propriétés thermiques par rapport aux matériaux conventionnels [12]. Les principaux paramètres mesurés dans cette étude sont : la conductivité thermique, l'effusivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique massique. Ces mesures ont été effectuées par un essai à plan chaud en régime transitoire sur des échantillons quasiment secs. Tous ces paramètres sont consignés dans le tableau 3.7 et illustrés dans les figures 3.12 et 3.13.

#### a. La conductivité thermique

Le tableau 3.7 montre que les briques K-L0P0 et S-L0P0 ont des conductivités de  $0,22\text{W/m}^*\text{K}$  et  $0,27\text{W/m}^*\text{K}$ . Les briques stabilisées qui sont moins denses que les premières (tableau 3.5) présentent ensuite une augmentation de la conductivité thermique. Les valeurs maximales sont atteintes par la brique stabilisée au ciment K-8CEM ( $0,56\text{W/m}^*\text{K}$ ) et S-8CEM ( $0,76\text{W/m}^*\text{K}$ ). Ces briques sont suivies par celles stabilisées à la CCR. Les briques de Saaba ont donné  $0,55\text{W/m}^*\text{K}$  pour la S-L10P0 et  $0,51\text{W/m}^*\text{K}$  pour la S-L20P0. La terre de Kossodo a présenté des briques moins conductrices que celles de Saaba, avec des valeurs de  $0,49\text{W/m}^*\text{K}$  pour la K-L10P0 et  $0,48\text{W/m}^*\text{K}$ .

La faible variation des conductivités thermiques entre 10 et 20% de CCR montre que le taux du liant a peu d'influence sur les propriétés thermiques. Ce qui influence ces propriétés c'est le liant lui-même. Cela s'explique par l'augmentation rapide de la conductivité entre 0% et 10% de CCR (presque le double pour les deux terres). Ceci rejoint les hypothèses de [17]–[19] selon lesquelles le facteur primordial influençant les conductivités thermiques d'un matériau en terre n'est pas sa densité apparente, mais la densité des contacts au sein du matériau. Dans notre cas, les briques non stabilisées ont des

liaisons entre les particules moins denses que les briques stabilisées. C'est donc tout à fait normal que les briques stabilisées au ciment qui ont à priori plus d'hydrates cimentaires que les autres présentent des conductivités thermiques maximales.

En réalité, la conductivité thermique du matériau pris seul renseigne très peu sur la capacité du matériau à réguler la température. L'épaisseur du mur joue une partition très importante dans ce sens. La résistance thermique d'un mur noté R est le rapport entre l'épaisseur du mur et sa conductivité thermique. Ainsi posée cette résistance sera plus grande si l'épaisseur du mur est grande et si la conductivité thermique diminue. Dans notre cas, l'épaisseur des briques est de 14cm. Le tableau 11 renseigne sur les valeurs de résistance thermiques et du coefficient de transfert thermique qui n'est rien d'autre que l'inverse du premier terme [12].

De ces résultats, nous pouvons déduire une corrélation entre la densité apparente et la conductivité thermique de la brique d'une part et comme la densité est corrélée avec le taux de liant, nous pouvons également mettre en évidence une corrélation entre la teneur en CCR et la conductivité thermique de chaque brique. Une régression polynomiale a été mise à jour. La même remarque est observée dans la littérature avec les taux de ciment et des taux de gypse et même des taux de chaux par [20]–[22]. Le tableau suivant donne les paramètres de ces régressions et figure qui suit montre les différentes courbes pour les deux terres.

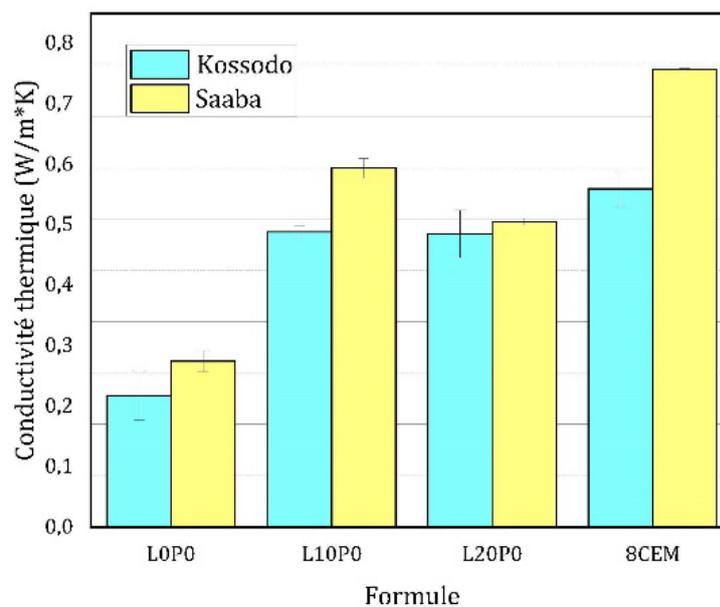


Figure 17: Conductivité thermique

Tableau 10: Equations de la conductivité thermique en fonction du taux de CCR

Briques de	Conductivités thermiques	
	Equations	R <sup>2</sup>
<b>Kossodo</b>	$-0,00138(\text{CCR})^2 + 0,05225\text{CCR} + 0,27742$	1
<b>Saaba</b>	$-0,00204(\text{CCR})^2 + 0,05225\text{CCR} + 0,27742$	1

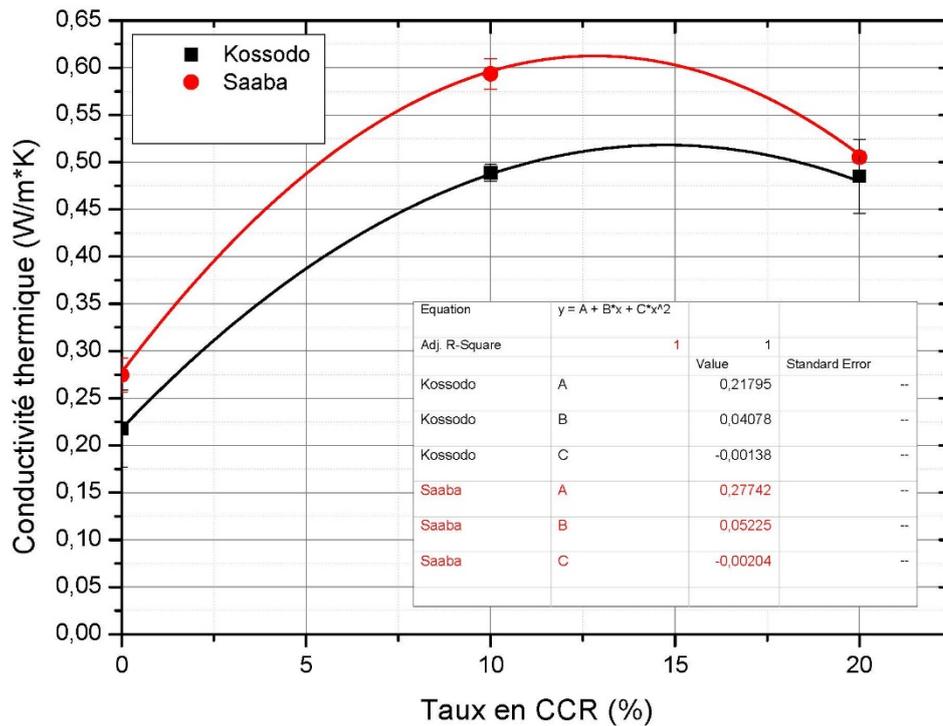


Figure 18: Corrélation entre le taux de CCR dans une brique et la conductivité thermique

#### b. La capacité thermique massique

La capacité thermique massique notée C, en J/kg.K, indique la quantité de chaleur à fournir à 1 kg du matériau pour élever sa température de 1°K [12]. Les matériaux qui présentent une capacité thermique élevée sont ceux qui sont susceptibles à emmagasiner de l'énergie calorifique sans se réchauffer. Les résultats montrent que les briques non stabilisées à l'instar des briques K-LOP0 et S-LOP0 ont de bonnes capacités thermiques (respectivement 1956J/kg.K et 1310J/kg.K). Elles sont suivies des briques stabilisées au ciment K-8CEM (1239J/kg.K) et S-8CEM (1015J/kg.K). Les briques stabilisées à la CCR offrent également des valeurs intéressantes, comme le montrent les briques de Kossodo K-L10P0 et K-

L20P0 qui donnent respectivement 1023J/kg.K et 1070J/kg.K. Les briques de Saaba stabilisées à la CCR donnent quant à elles des valeurs de 966J/kg.K et 1053J/kg.K respectivement avec 10% et 20% de CCR.

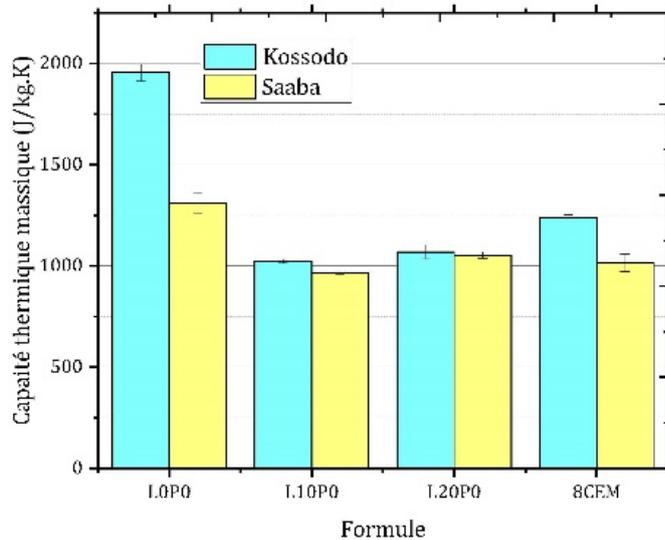


Figure 19: Capacité thermique massique

### c. L'effusivité thermique

Les matériaux présentant une grande effusivité seront privilégiés car ils présentent la capacité d'emmagasiner beaucoup de chaleur sans pour autant se réchauffer. Les résultats montrent que les matériaux non stabilisés présentent des effusivités faibles (respectivement 872,5J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> et 765,5J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> pour la K-L0P0 et S-L0P0). L'effusivité cependant augmente avec l'ajout de la CCR. Elle atteint les valeurs de 924J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> pour la brique K-L10P0 et 921J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> pour la brique K-L20P0. Les briques de Saaba présentent une effusivité variable avec l'ajout de la CCR. La brique S-L10P0 a enregistré 1025J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> et la S-L20P0 894J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup>. D'une façon générale, les briques stabilisées au ciment sont les plus effusives (1149J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> pour la K-8CEM et 1118J/m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup> pour la S-8CEM).

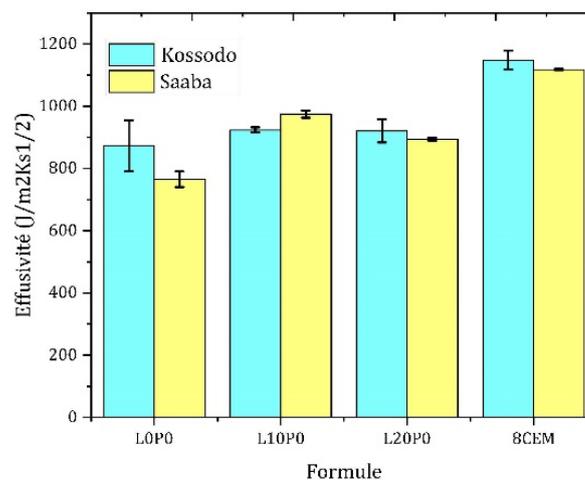


Figure 20: Effusivité thermique

#### d. La diffusivité thermique

Les valeurs de diffusivité thermique vont de  $6,2.10^{-8}m^2/s$  pour la K-L0P0 à  $2,8.10^{-7}m^2/s$  pour la K-L10P0. La brique K-L20P0 a enregistré une valeur de  $6,8.10^{-8}m^2/s$ . Les briques de Saaba ont montré une diffusivité plus élevée que celles de Kossodo. Les valeurs vont de  $1,29.10^{-7}m^2/s$  pour la S-L0P0 à  $4,7.10^{-7}m^2/s$  pour la S-L10P0 et  $3,2.10^{-7}m^2/s$  pour la S-L20P0.

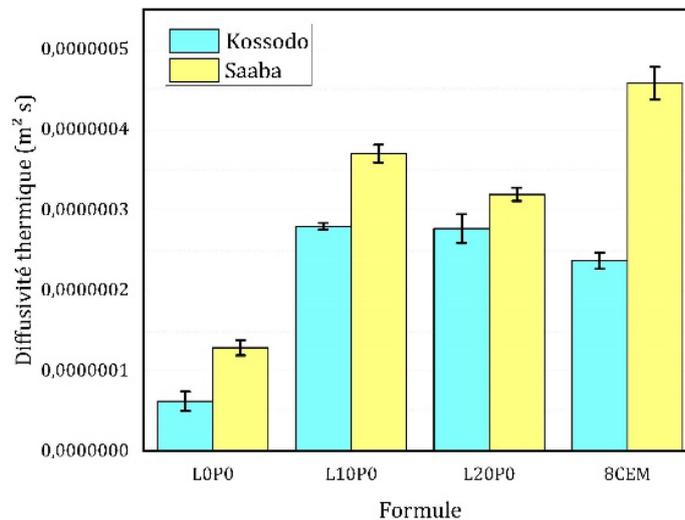


Figure 21: Diffusivité thermique

Tableau 11: Propriétés thermiques

Formules	E(J/m <sup>2</sup> .K.s <sup>1/2</sup> )	λ(W/m.K)	D(m <sup>2</sup> .s)	Ct(J/kg.K)	R(W/K)	Ctt(K/W)
KL0	872.5	0.22	6.2.10-8	1956.02	0.64	1.57
K-L10	923.75	0.49	2.8.10-7	1023.15	0.285	3.5
K-L20	920.5	0.48	6.8.10-8	1069.6	0.29	3.43
S-L0	765.5	0.27	1.29.10-7	1310.23	0.52	1.93
S-L10	1024.5	0.55	4.7.10-7	966.32	0.25	3.93
S-L20	89375	0.51	3.2.10-7	1052.61	0.27	3.64
K-8cem	1148.75	0.56	2.4.10-7	1239.51	0.25	4
S8CEM	1117.75	0.76	4.6.-7	1015.32	0.18	5.43

#### III.3.5 Influence de l'humidité sur les propriétés thermiques

Le paragraphe précédent a renseigné sur les propriétés thermiques des briques à l'état sec. Cependant, lorsqu'elles sont chargées d'eau, leurs propriétés thermiques changent immédiatement. Les parements extérieurs d'une habitation pouvant être sujets à des pluies, il est important d'avoir une idée sur les propriétés thermiques d'une brique après absorption d'eau. Les figures 22 et 23 montrent que la conductivité et l'effusivité thermique augmentent avec la teneur en eau dans le matériau. Ceci est tout à fait normal, car l'eau est un excellent conducteur de chaleur. Sa présence dans les pores ne va donc faire qu'augmenter la conductivité thermique du matériau. Ces propriétés hygrothermiques suivent une tendance linéaire avec des valeurs maximales à saturation. Ce modèle linéaire est le même rencontré dans la littérature [23] [17]–[19]. A partir des équations illustrées dans les figures 3.14 et 3.15, il est

possible de prédire la conductivité et l'effusivité thermiques des briques de Kossodo et de Saaba stabilisées à 10 et 20% de CCR et à 8% de ciment à une teneur en eau donnée. Les équations de régression de la conductivité et de l'effusivité thermiques des différents échantillons figurent sur les figures avec les codes couleurs qui correspondent. Le tableau suivant résume ces équations pour chacun des échantillons. Ces figures montrent que les briques stabilisées à 8% de ciment sont plus effusives et plus conductrices que celles stabilisées à la CCR et ce peu importe la teneur en eau considérée. Si on isole les briques stabilisées à la CCR, celles stabilisées à 10% de CCR conduisent plus la chaleur au détriment de celles stabilisées à 20%.

Tableau 12: paramètres de régression hygrothermique

Echantillons	Effusivité hygrothermique		Conductivité hygrothermique	
	Equations	R <sup>2</sup>	Equations	R <sup>2</sup>
<b>K-L10P0</b>	$49,22\omega+958$	0,96	$0,06\omega+0,43$	0,92
<b>K-L20P0</b>	$48,69\omega+934,56$	0,99	$0,05\omega+0,46$	0,99
<b>S-L10P0</b>	$51,75\omega+1119,71$	0,96	$0,05\omega+0,84$	0,92
<b>S-L20P0</b>	$44,93\omega+966,24$	0,99	$0,04\omega+0,60$	0,98
<b>K-8CEM</b>	$69,23\omega+1231,06$	0,98	$0,085\omega+0,83$	0,98
<b>S-8CEM</b>	$39,96\omega+1486,6$	0,83	$0,05\omega+1,12$	0,94

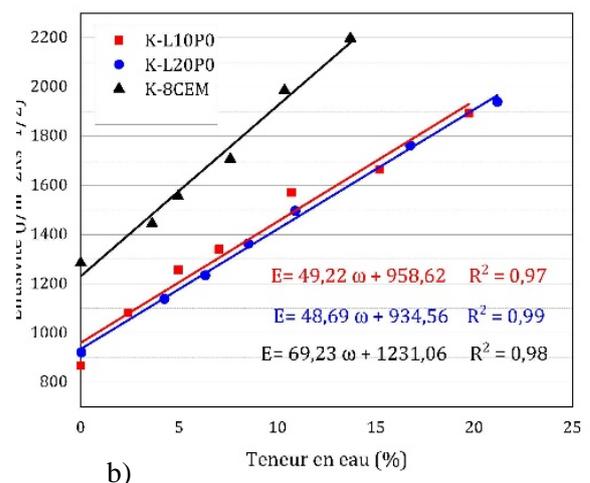
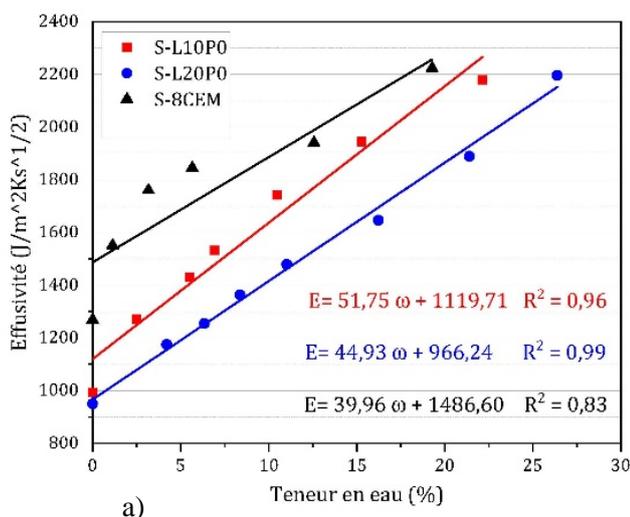


Figure 22: Effusivités hygro-thermiques (a.) Kossodo (b.) Saaba

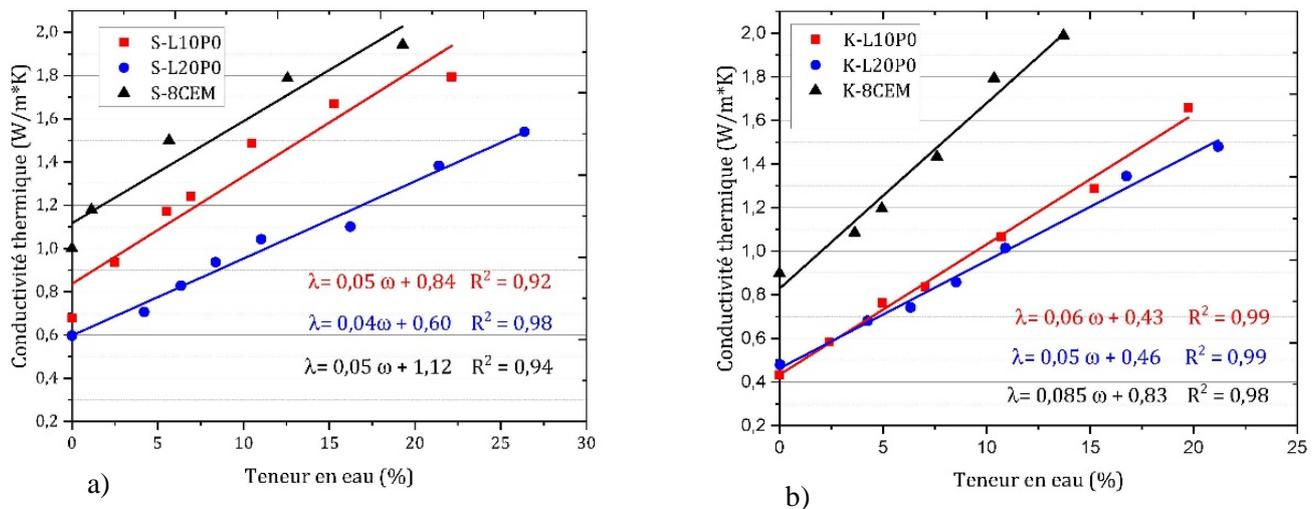


Figure 23: : Conductivités hygro-thermiques (a.) Kossodo (b.) Saaba

### III.3.6 Propriétés hygrométriques

Les propriétés hygrométriques testées sont la perméabilité à la vapeur d'eau et les isothermes de sorption-désorption. Le comportement d'un matériau tel que la brique en terre varie rapidement selon l'ambiance thermo-hygrométrique extérieur. On dit que la terre est un matériau hygroscopique. Généralement, ce caractère hygroscopique est dû à sa porosité.

#### a. La perméabilité à la vapeur d'eau

La terre est un matériau qui permet des échanges entre les milieux extérieurs et intérieurs de son environnement. Ceci lui confère son rôle de régulatrice de température et d'humidité. En effet, l'air étant généralement chargé de masse telle que la vapeur d'eau, lorsque l'humidité relative augmente dans une pièce, il s'en suit un sentiment d'inconfort. Pour réguler ce taux d'humidité, la brique en terre absorbe cette humidité pour la restituer à son environnement extérieur. La vitesse à laquelle cette adsorption et cette restitution de masse s'effectue conditionne le sentiment de bien-être ou de malaise à l'intérieur. Cette cinétique peut être fonction de la nature de la terre utilisée et du type de stabilisation employé.

Ainsi, un matériau qui est peu ou pas du tout perméable à la vapeur d'eau, la retiendra sur ses parois. Une condensation d'eau s'en suit à l'intérieur ce qui provoque des dépôts de moisissure. D'où l'importance de cet essai pour déterminer dans quelle mesure la stabilisation à la CCR influence la perméabilité à la vapeur d'eau des briques en terre comprimée.

Il a été démontré que les briques de Kossodo résistent très bien à la vapeur d'eau. En d'autres termes, elles ne la laissent pas passer, mais la retiennent dans leur matrice. Cette vapeur se condense dans les pores de l'échantillon pour le désagréger. Tout ceci est montré dans la figure 24. La désagrégation des échantillons de Kossodo nous a poussé à arrêter prématurément l'essai pour ces échantillons. Les échantillons de Saaba quant à eux ont présenté une bonne perméabilité à la vapeur d'eau. L'essai a donc suivi son cours normal. Le tableau 3.11 présente les résultats hygrométriques de tous les échantillons qui ont été soumis aux tests.

La pente  $b$  qui est celle des droites de régression des masses des échantillon en fonction du temps, renseigne bien sur l'aptitude des différentes briques à laisser ou non passer la vapeur d'eau. Il en ressort que les échantillons de Kossodo à l'exception de la K-L20P0 présentent des pentes faibles ( $-3.10^{-6}$  pour la K-L10P0 et  $-7.10^{-6}$  pour K-L0P0). Contrairement aux échantillons de Saaba dont la masse décroît rapidement traduisant une bonne perméabilité (S-L0P0 a une pente de  $-4.10^{-9}$ ; S-L10P0, une pente de  $-2.10^{-9}$  et S-L20P0,  $-3.10^{-9}$ ). Ainsi, les échantillons présentant un fort coefficient de perméabilité  $\mu$  seront ceux qui sont plus perméables à la vapeur d'eau. Le tableau13 montre que toutes les briques de Saaba stabilisées à la CCR ou non stabilisées présentent un fort coefficient de perméabilité. Des valeurs allant de 5,88 pour la S-L0P0 à 9,87 pour la S-L20P0 en passant par une valeur maximale de 15,28 pur la S-L10P0. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés par[7] [9]. Les briques de Kossodo quant à elles, pour le peu de temps qu'elles ont passés dans le dessiccateur pour l'essai ont présenté des valeurs très faibles de coefficient de perméabilité. Ces valeurs sont 0,005 pour la K-L0P0; et 0,01 pour la K-L10P0. La brique K-L20P0 est celle qui a tenté de sauver la mise, mais son état humide et désagrégé nous a emmené à arrêter l'essai pour elle aussi. Il faut remarquer que les deux échantillons stabilisés au ciment présentent eux aussi des valeurs très faible de coefficient. Ceci voudrait-il dire que la stabilisation au ciment présente des risques de mauvaise gestion de la vapeur d'eau ? Cela peut être dû à leur faible porosité par rapport aux autres échantillons. Cependant, une répétition de cet essai nous permettrait d'en savoir plus.

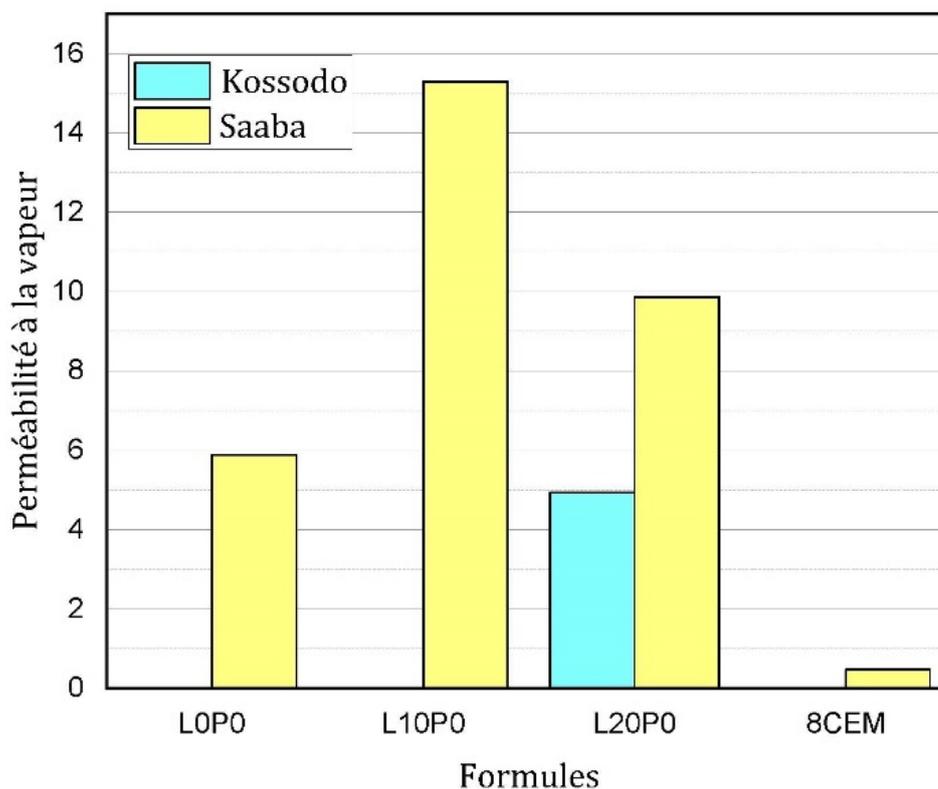


Figure 24: Perméabilité à la vapeur

Tableau 13: Coefficients de perméabilité à la vapeur d'eau

Formules	Pentes b	$\delta_p$ (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup> )	$\mu$
K-L0	-7.10 <sup>-6</sup>	3.99.10 <sup>-8</sup>	0.005
K-L10	-3.10 <sup>-6</sup>	1.92.10 <sup>-8</sup>	0.01
K-L20	-6.10 <sup>-9</sup>	3.97.10 <sup>-11</sup>	4.93
S-L0	-4.10 <sup>-9</sup>	3.33.10 <sup>-11</sup>	5.88
S-L10	-2.10 <sup>-9</sup>	1.98.10 <sup>-11</sup>	15.28
S-L20	-3.10 <sup>-9</sup>	1.98.10 <sup>-11</sup>	9.87
k-8cem	-2.10 <sup>-6</sup>	1.59.10 <sup>-11</sup>	0.012
S-8CEM	-7.10 <sup>-8</sup>	4.18.10 <sup>-11</sup>	0.47

#### b. Isothermes de sorption-désorption

Dans le cadre de cette étude, les mesures effectuées lors de cet essai ont révélé des hystérésis avec des allures sigmoïdales pour tous les échantillons. Deux modèles ont été utilisés. Le modèle d'Henderson et celui de Oswin. Le premier modèle est dit semi empirique et le dernier totalement empirique [21]. Tous deux, ont présenté à chaque fois un coefficient de détermination R<sup>2</sup> supérieur à 0,90. Cependant, le plus pertinent des deux fut celui qui présente un R<sup>2</sup> plus proche de 1. Les paramètres k et n du modèle retenu (Henderson) sont présentés dans le tableau14 qui résumant ces paramètres plus ou moins leurs erreurs respectives et aussi les paramètres de vérifications statistiques du modèle. Les figures25à28 illustrent chacune les hystérésis de sorption et désorption des différents échantillons. Les courbes telles que présentées peuvent être classées dans le groupe des isothermes de type II avec des hysteresis de type H4 selon la classification de l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [24]. Selon [21] cette allure d'isotherme est fréquemment rencontrée dans les matériaux de construction hygroscopiques. Ces figures montrent que les briques de Saaba sont plus hygroscopiques que celles de Kossodo. Pour un point de départ correspondant à une humidité relative de 0% et une teneur en eau de 0% ; l'échantillon présente pour une humidité relative de 93% une teneur en eau avoisinant 1,6% de sa masse sèche. Cette valeur augmente légèrement au fur et à mesure que le stabilisant CCR est ajouté. Elle atteint la valeur de 1,8% pour l'échantillon S-L20P0. Les briques de Saaba stabilisées au ciment sont celles qui présentent une hygroscopité maximale, avec une teneur en au à 93% de HR avoisinant 2,3%. D'un autre côté, les briques de Kossodo, ont présenté une activité hygroscopique plus faible. L'échantillon K-LOP0 présente à 93% de HR une valeur de teneur en humidité en deçà de 0,45%. Cette valeur croît au fur et à mesure que le stabilisant CCR y est ajouté. Elle vaut à peu près 1,15% pour l'échantillon K-L10P0 ; 1,5% pour la brique K-L20P0 et à peu près 1,6% pour l'échantillon stabilisé au ciment.

Tableau 14: Paramètres de sorption et désorption des briques de Saaba et de Kossodo (modèle de Henderson)

Ech	W <sub>eqmax</sub>	Sorption			Désorption		
		n	k	R <sup>2</sup>	n	k	R <sup>2</sup>
<b>K-L0</b>	2,01	1,97	0,81	0,98	2,36	0,53	0,93
<b>K-L10</b>	1,91	2,68	0,64	0,97	3,95	0,28	0,98
<b>K-L20</b>	2,05	2,64	0,5	0,98	4,30	1,16	0,97
<b>S-L0</b>	1,53	2,36154	1,19307	0,99	3,21	0,65	0,97
<b>S-L10</b>	1,35	2,8	1,5	0,98	4,39	0,8	0,98
<b>S-L20</b>	1,87	2,22	0,8	0,98	3,12	0,45	0,98
<b>K-8CEM</b>	2,79	2,04	0,41	0,98	2,77	0,19	0,96
<b>S-8CEM</b>	1,79	2,54	0,73	0,96	3,24	0,47	0,98

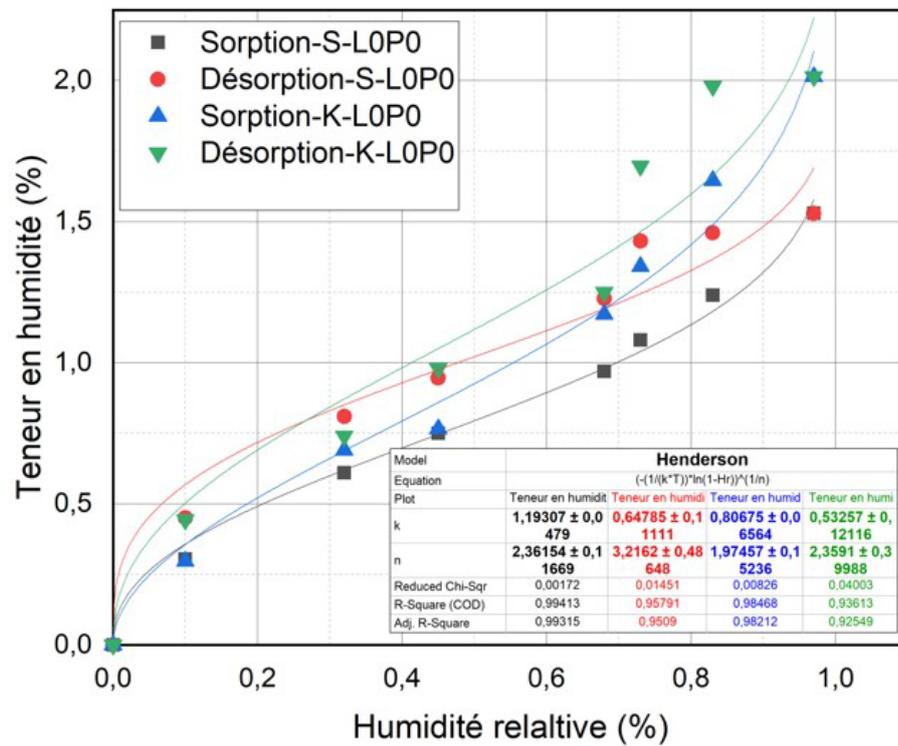


Figure 25: Isothermes de sorption et désorption K-LOP0 et S-LOP0

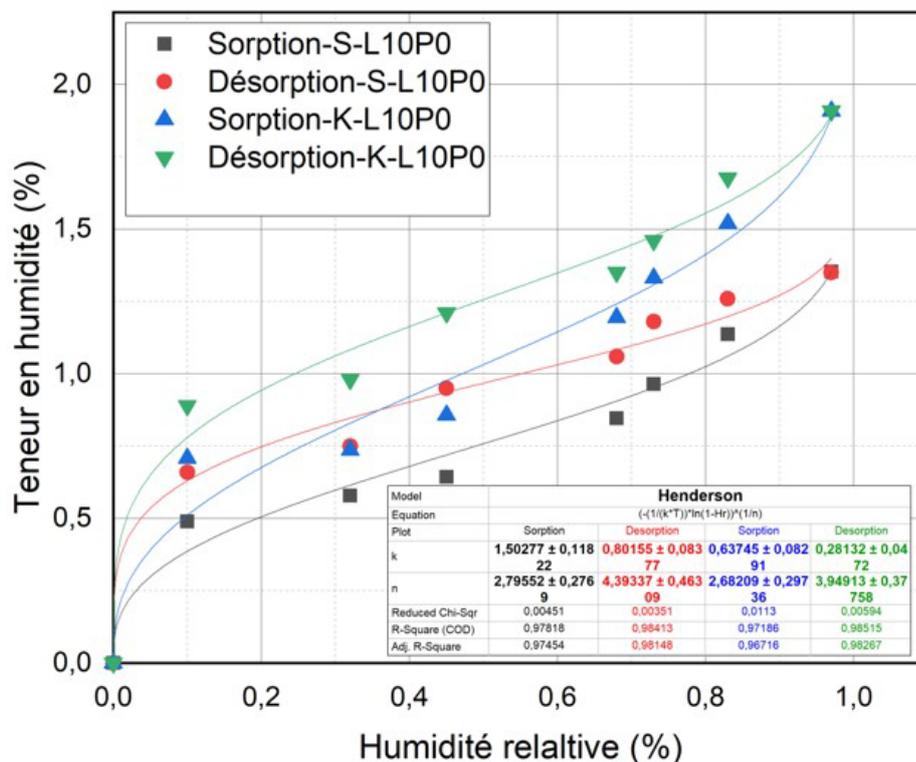


Figure 26: Isothermes de sorption et désorption K-L10P0 et S-L10P0

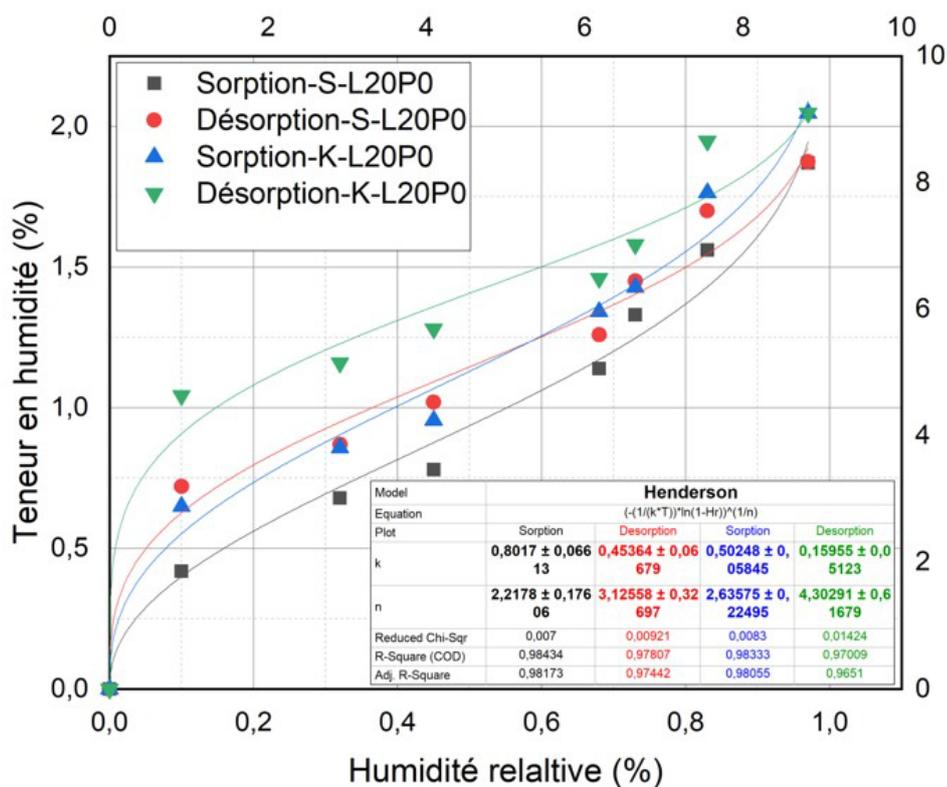


Figure 27: Isothermes de sorption et désorption K-L20P0 et S-L20P0

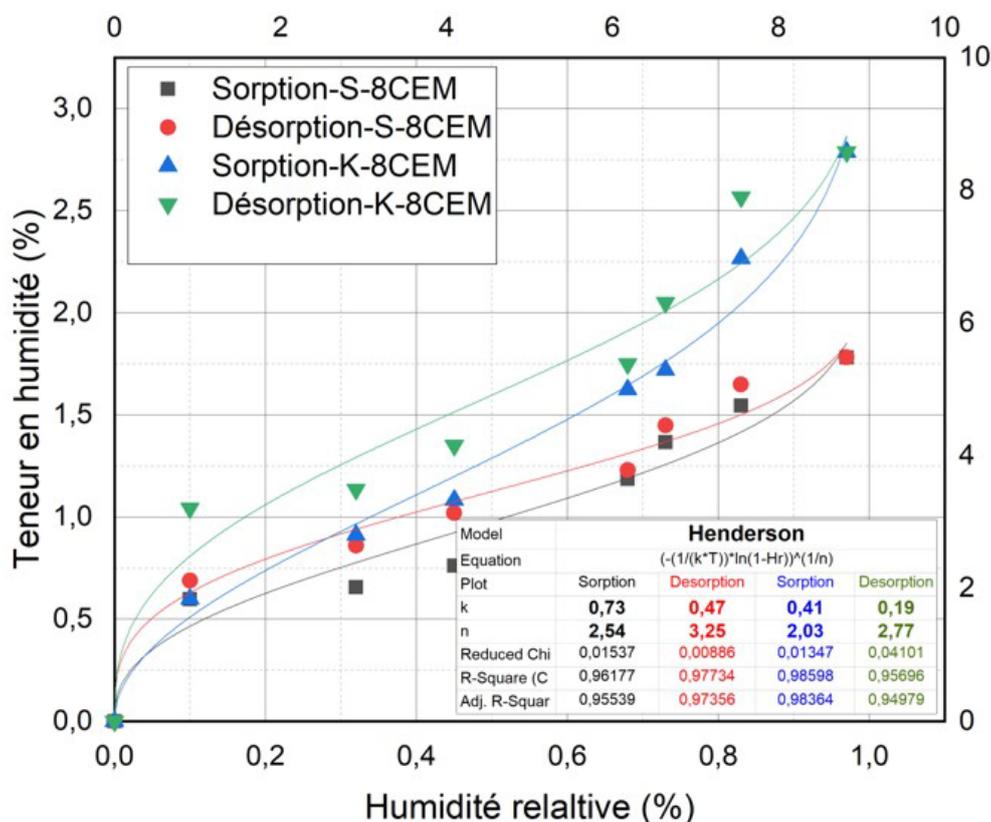


Figure 28: Isothermes de sorption et désorption K-8CEM et S-8CEM

### III.3.7 Indicateurs de durabilité

Si la durée de vie d'un bâtiment conventionnel peut facilement atteindre le siècle, le cas des matériaux en terre n'est pas si évident. La durabilité des bâtiments en terre est conditionnée par plusieurs paramètres extérieurs liés aux activités humaines et encore plus à des conditions plus naturelles telle la pluviométrie du milieu, la vitesse du vent etc. Dans le présent travail, deux indicateurs principaux nous ont permis d'estimer la durée de vie des briques issues des deux carrières. Il s'agit de l'essai *d'abrasion* et celui de *l'érodabilité*.

#### a. Résistances à l'abrasion

Un mur est très souvent soumis à des sollicitations externes, variées et abrasives telles que le vent. C'est pour cela que la norme *AFNOR XP P13-901* D'octobre 2001 fixe des références normatives quant à la résistance à l'abrasion. Le tableau 15 résume les résultats de coefficient d'abrasion obtenus pour tous les échantillons ainsi que leurs classifications. La figure (3.29) illustre plus explicitement ces résultats.

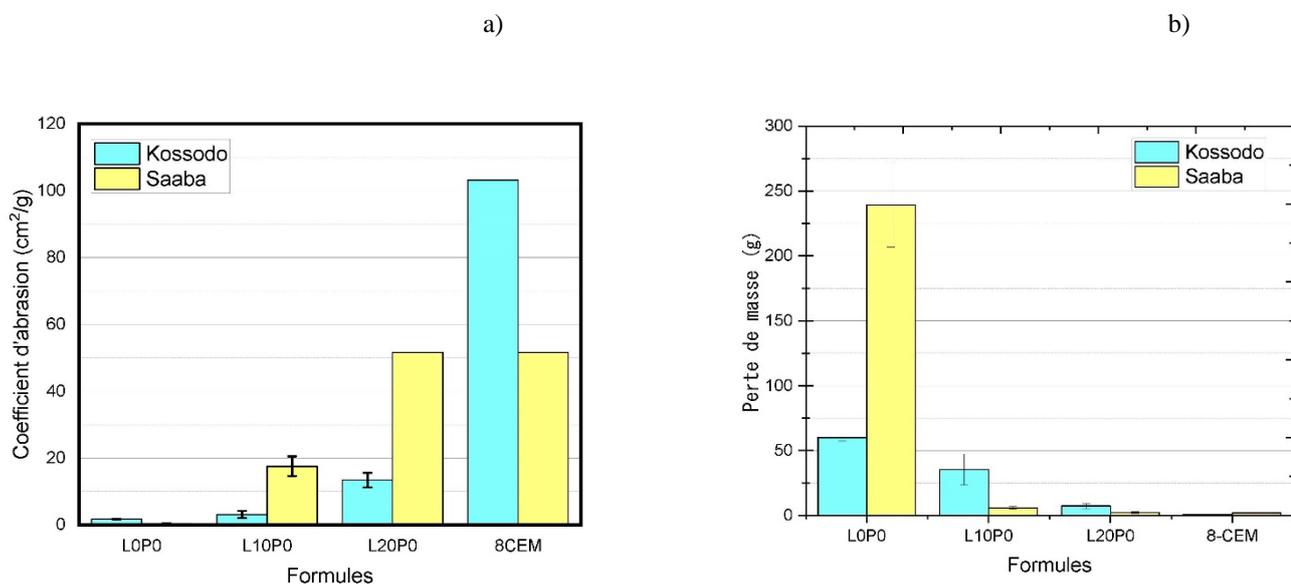


Figure 29 : Illustration (a.) du coefficient d'abrasion et (b.) des pertes de masses après l'essai

Tableau 15: Résultats de la résistance d'abrasion

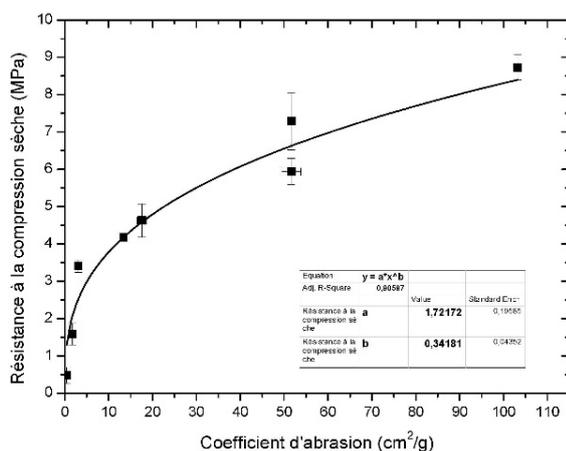
Formule	Ca	Classification
K-L0P0	1.72	BTC20
K-L10P0	3.09	BTC40
K-L20P0	13.38	BTC60
S-L0P0	0.44	BTC20
S-L10P0	17.54	BTC60
S-L20P0	51.63	BTC60
K-8CEM	103.25	BTC60
S-8CEM	51.63	BTC60

Le coefficient d'abrasion étant un rapport entre la surface d'abrasion(constante) et la perte de masse après les 60 passes de la brosse métallique, ce coefficient augmentera au fur et à mesure que la perte de masse diminuera. C'est ce qu'illustre la figure (29 a et b). Les échantillons non stabilisés présentent un faible coefficient d'abrasion ce qui traduit une perte de masse élevée (Annexe A3-figure 72). Les valeurs de

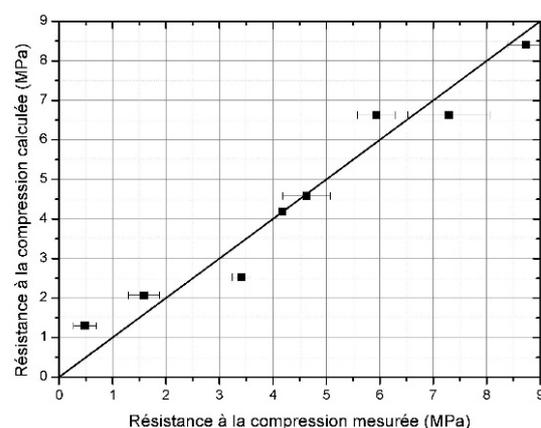
coefficient d'abrasion vont de 1,72cm<sup>2</sup>/g pour les briques de Kossodo et 0,44cm<sup>2</sup>/g pour la brique de Saaba. Nous remarquons bien ici que la brique non stabilisée de Kossodo résiste mieux à l'abrasion que la brique non stabilisée de Saaba. Rappelons que ce même constat fut fait pour la résistance à la compression sèche. Cependant, comparées aux briques stabilisées à 10% de CCR, les briques non stabilisées résistent beaucoup moins. En effet, la K-L10P0 a enregistré un coefficient d'abrasion de 3,09 cm<sup>2</sup>/g contre 17,54 cm<sup>2</sup>/g pour la S-L10P0. [25] a trouvé les mêmes ordres de grandeur pour les briques de la terre de Kamboinsin (1 à 30cm<sup>2</sup>/g pour des briques stabilisées avec 0 à 25% de CCR). La brique K-L10P0 peut donc être classée comme une BTC40 et la S-L10P0 une BTC60 selon [1]. Les meilleures performances de résistance à l'abrasion sont enregistrées par les briques K-8CEM et S-L20P0. Les coefficients d'abrasion de ces briques sont respectivement 103,25cm<sup>2</sup>/g et 51,63cm<sup>2</sup>/g. Elles sont toutes deux classées en BTC60[1]. Il faut cependant noter la différence entre la K-L20P0 (13,38cm<sup>2</sup>/g) et la S-L20P0 (51,63 cm<sup>2</sup>/g). Ceci montre également que le produit stabilisant idéal dépend de la terre à stabiliser. La terre de Kossodo montre d'excellentes performances quand elle est stabilisée avec 8% de ciment et celle de Saaba résiste mieux avec la CCR qu'avec le ciment.

Il est possible de corrélérer la résistance à la compression sèche au coefficient d'abrasion. Une telle corrélation est très utile car s'il est facile de se procurer une brosse métallique et une charge de 3kg pour faire l'essai d'abrasion, il est plus difficile de trouver une presse à BTC. La résistance à la compression d'une brique peut donc être estimée avec une bonne précision à partir du coefficient d'abrasion et vice versa. Ces corrélations sont illustrées sur la figure30-a et sont sous la forme  $y = ax^b$ . La figure30-b nous montre une bonne validation des valeurs de résistance à la compression mesurées par rapport aux résistances calculées avec l'équation19. [25] a trouvé une équation similaire.[26] et [27] ont trouvé les mêmes tendances avec des équations similaires, sauf que leurs coefficients a est inférieur à 1, contrairement à ce que nous avons trouvé et ce qu'a trouvé [25].

$$R_{cs} = 1,72C_a^{0,34} \quad \text{Équation 19}$$



a)



b)

Figure 30: a) Coefficient d'abrasion en fonction de la résistance à la compression ; b) Résistance mesurée Vs Résistance calculée

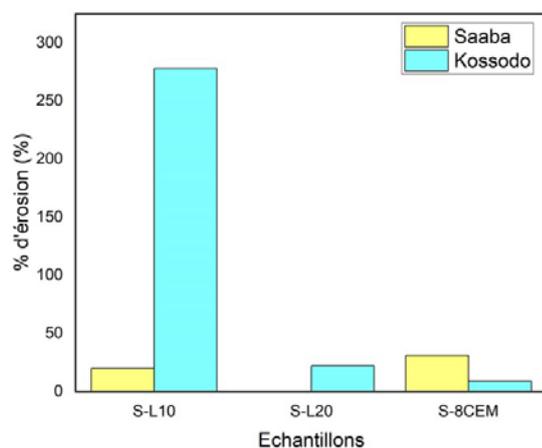
#### b. Résistances à l'érodabilité

On dit d'une brique qu'elle résiste à l'érosion si après 60 minutes d'exposition à un jet d'eau sous pression connue, la profondeur des dégradations est inférieure à 120 mm.

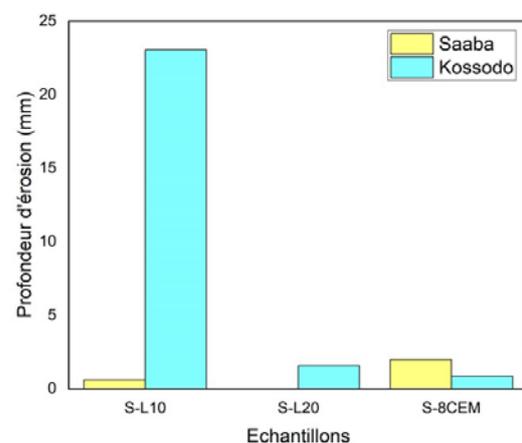
Le tableau ci-dessous indique les différentes profondeurs de dégradation. Les briques non stabilisées ont été profondément altérées peu de temps après le lancement du jet d'eau. Nous remarquons surtout que la brique S-L20P0 n'a connu aucune dégradation (Annexe A3-Figure 70). La brique K-L20P0 a quant à elle subi de petites dégradations avec une profondeur de 1,6mm. Les briques stabilisées au ciment à l'instar de la K-8CEM a aussi connue une profondeur de dégradation de moins de 1mm. La S-8CEM elle a présenté 2mm de profondeur de dégradation (Annexe A3-figure 71). Il faut aussi remarquer que la brique K-L10P0 a été profondément altérée. Ceci se remarque par un pourcentage de surface érodée supérieur à 200%. Ce qui veut dire que les dégradations sont allées bien au-delà de la surface sollicitée par le jet d'eau (Annexe A3- figure69). La brique de Saaba stabilisée à 20% de CCR est ainsi bien plus durable que les autres en terme d'érodabilité. Dans son étude avec les briques de Kamboinsin, [25] a trouvé des valeurs allant de 7mm à 34mm suivant divers taux de CCR. Pour la brique de Kamboinsin stabilisée à 20% de CCR, il a trouvé 12mm de profondeur avec 58% de la surface érodée détériorée.

Tableau 16: Paramètres de la résistance à l'érodabilité

Ech	Surface érodée (cm2)	Pourcentage d'érosion	Profondeur de dégradation(mm)
K-L0P0	-	-	-
K-L10P0	4416	278	23.06
K-L20P0	346	22	1.585
S-L0P0	-	-	-
S-L10P0	314	19.75	0.6
S-L20P0	0	0	0
K-8CEM	137.37	8.64	0.85
S-8CEM	490.63	30.86	1.99



a)



b)

Figure 31: Illustration de a) pourcentage d'érosion et b) profondeur d'érosion

---

## CONCLUSION

---

Les objectifs spécifiques de cette étude sont : caractériser les terres argileuses de Kossodo et de Saaba, déterminer l'influence de la CCR sur la demande en eau des deux terres, déterminer les propriétés physico-mécaniques des briques fabriquées à partir de ces terres stabilisées à la CCR, évaluer l'influence de l'eau sur ces propriétés mécaniques, déterminer les propriétés d'absorption d'eau des différentes briques, déterminer les propriétés thermiques des briques, évaluer l'influence de l'eau sur ces propriétés thermiques, déterminer les propriétés hygroscopiques et les indicateurs de durabilité de ces briques.

Somme toute, il en ressort que les deux terres sont argileuses à proportions différentes de particules solides grossiers et d'argile. Ceci a une répercussion importante sur leurs comportements au contact avec la CCR et l'eau. La terre de Kossodo s'est présentée comme ayant une texture sableuse et argileuse, et la terre de Saaba beaucoup plus argileuse, donc plus fine. L'ajout de 10% ou de 20% de CCR sur ces terres augmente donc leurs finesses. La terre la plus fine devient beaucoup plus fine. La demande en eau de gâchage étant corrélée par le module de finesse, la terre de Saaba stabilisée avec 20% de CCR a demandé beaucoup plus d'eau que celle de Kossodo. Cette demande d'eau influence grandement les propriétés physiques des briques.

Les briques les moins denses sont celles obtenues avec la terre la plus fine (terre moins dense). Ces briques ont demandé la plus grande quantité d'eau de gâchage lors de leur fabrication. Après maturation et séchage, toute cette eau laissera donc la plus grande quantité de pores (vides) d'où la faible densité enregistrée pour la brique S-L20P0 ( $1500 \text{ kg/cm}^3$ ) et sa porosité totale élevée.

Du point de vue mécanique, la terre de Kossodo qui est à l'état cru plus dense que celle de Saaba a enregistré la plus grande résistance à la compression (1,6MPa pour la K-L0P0 contre 0,5MPa pour S-L0P0). Cependant, ces valeurs trouvées à l'état cru des briques augmentent brusquement lorsqu'on ajoute 10 à 20% de CCR. La brique K-L10P0 a enregistré 3,4MPa contre 4,6MPa pour la S-L10P0. La K-L20P0 résiste à 4,2MPa contre 5,9MPa pour la brique S-L20P0. Cette dernière bien que plus légère, est la plus résistante. Ceci s'est traduit par son coefficient d'efficacité structurel. Etant donné que les briques sont sujettes au cours de l'année à plusieurs cycles de saisons, elles ne sont jamais totalement sèches. Il était donc important d'évaluer leurs résistances hydromécaniques. Ces résultats ont montré que la résistance mécanique des briques diminue fortement en fonction de la teneur en eau. De tous les échantillons testés, c'est encore la brique S-L20P0 qui a présenté la meilleure résistance humide à la compression (3,74MPa), suivie de près par la brique K-8CEM (3,64MPa) contre 2,21MPa pour la brique K-L20P0. Ceci montre que la stabilisation avec la CCR donne de meilleurs résultats avec la terre argileuse de Saaba alors que la terre de Kossodo réagit mieux avec 8% de ciment.

Du point de vue thermique, les briques des deux terres non stabilisées sont plus isolantes que les briques stabilisées. Ceci s'est expliqué par le fait qu'elles présentent des grains solides quasiment dénudés ; offrant ainsi peu de chance au flux thermique de passer. Cependant, avec la stabilisation, ces grains se relient entre eux par les hydrates cimentaires formés lors des réactions de stabilisation. Ceci explique bien le fait que les briques stabilisées au ciment qui ont à priori plus d'hydrates que celles stabilisées à la CCR soient les plus conductrices. Les résultats thermiques ont également montré que lorsque les pores sont chargés d'eau, les propriétés thermiques telles que la conductivité et l'effusivité thermiques augmentent linéairement pour atteindre une valeur maximale à saturation. Les paramètres a et b des différentes équations affines établies permettent de prédire ces propriétés à une teneur en eau donnée.

Lorsqu'on place une brique non stabilisée en contact avec de l'eau, celle-ci se désagrège après quelques minutes. Cependant une brique stabilisée à la CCR résiste parfaitement à l'eau. Cette tenue à l'eau se

fait en même temps que la brique absorbe une quantité de fluide proportionnelle au nombre et à la taille de ses pores. D'où l'importance de maîtriser la situation porale des briques fabriquées. Les résultats indiquent que les briques stabilisées présentent une porosité totale très élevée. Ceci est sans doute dû à la demande en eau élevée des briques stabilisées. En effet, l'ajout de la CCR qui est un élément fin contribue à augmenter la quantité d'eau de gâchage nécessaire. Une partie de cette eau servira dans un premier temps aux réactions entre l'argile et la CCR. L'excédent est ensuite chassé par séchage à la fin de cure de la brique. C'est ce départ d'eau qui occasionne la formation des pores. Cependant, tous les pores ne sont pas préjudiciables pour la brique. Les pores fermés qui ne communiquent pas entre eux n'ayant aucune chance d'être chargés d'eau, ne contribuent en rien à perte des performances de la brique en présence d'eau. D'où l'importance de trouver un système pour maximiser le volume des pores fermés tout en minimisant celui des pores accessibles.

Les performances hygrométriques testées sont la perméabilité à la vapeur d'eau, et les isothermes de sorption-désorption. Les résultats ont montré dans le cas de la perméabilité à la vapeur que les briques de Saaba sont très perméables à la vapeur d'eau, contrairement aux briques de Kossodo qui la retiennent dans leurs matrices, ce qui provoque leur désagrégation. Les courbes de sorption-désorption ont montré une forme sigmoïdale avec des hystérésis de type H4 bien évidents. Cette forme est retrouvée dans la littérature. Les résultats ont montré en outre que les briques de Saaba sont plus hygroscopiques que celles de Kossodo. En effet, elles arrivent à capter jusqu'à 2,5% de leur masse sèche d'eau à 95% d'humidité relative. La quantité maximale d'humidité que peut adsorber une brique de Kossodo est de 1,95%. Les paramètres  $k$  et  $n$  du modèle de Henderson obtenus permettent d'estimer la quantité d'eau captée par une brique à un taux d'humidité relative donnée.

Les indicateurs de durabilité testés, montrent que les briques de Saaba sont parfaitement durables par rapport à celles de Kossodo. En effet, elles résistent beaucoup plus à l'abrasion. Les coefficients d'abrasion  $C_a$  sont de  $51,63\text{cm}^2/\text{g}$  pour la S-L20P0 contre  $13,38\text{cm}^2/\text{g}$  pour la K-L20P0. La relation de puissance établie entre les coefficients d'abrasion et la résistance à la compression sèches sont très importantes, car elles pourront aider à la décision sur des chantiers ne disposant pas de presse pour effectuer l'essai de compression. La même conclusion est faite pour l'érodabilité. En effet, cet essai montre que les briques de Kossodo résistent moins à l'érodabilité que celles de Saaba. En somme, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les briques de Saaba présentent une grande amélioration de ses performances lorsqu'elle est stabilisée avec de la CCR, contrairement à la terre de Kossodo qui présente un bon comportement avec le ciment. Ceci voudrait dire que tous les stabilisants ne sont pas applicables à toutes les terres. La composition minéralogique et chimique de ladite terre devrait être un critère très important pour décider ;
- Les briques de Saaba stabilisées à la CCR sont plus hygroscopiques que celles de Kossodo;
- Les briques de Saaba sont également plus durables que celles de Kossodo.

De toutes ces conclusions, il est évident de se demander quel paramètre de la brique influence le plus tous les autres comportements ? Pour nous, il est évident que c'est sa porosité. Nous recommandons donc de se pencher sur le sujet de la porosité des briques pour comprendre leur formation, leur distribution et leur tortuosité dans la brique.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. , F. L. et al. Anger, “CRATERRE.”
- [2] Christophe DELBERQUE, “Ch.Delbecque\_Histoire\_construction\_terre\_oct11,” 2011.
- [3] C. Deramaux, “La terre crue au Burkina Faso: Matériau d’expression architecturale,” p. 235, 2017.
- [4] Abalo P’KLA, “Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries ‘BTC-mortier de terre,’” L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [5] M. Al-Mukhtar, S. Khattab, and J. F. Alcover, “Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil,” *Eng Geol*, vol. 139–140, pp. 17–27, 2012, doi: 10.1016/j.enggeo.2012.04.004.
- [6] Seni Moussa Hassane, “Étude des propriétés d’usage des briques de terre comprimées stabilisées au carbure de calcium résiduel : terre argileuse de Pabre -Burkina Faso.,” 2017. [Online]. Available: [www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org)
- [7] Pape Moussa Touré, “Mechanical and hygrothermal properties f compressed stabilized earth bricks (CSEB),” *Journal of Building Engineering*, pp. 267–271, Aug. 2017.
- [8] F. McGregor, A. Heath, D. Maskell, A. Fabbri, and J. C. Morel, “A review on the buffering capacity of earth building materials,” *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, vol. 169, no. 5. ICE Publishing, pp. 241–251, Oct. 01, 2016. doi: 10.1680/jcoma.15.00035.
- [9] Aimé Yao Franck, “Exploration du potentiel hygroscopique des briques en terre comprimée (BTC) pour l’amélioration du confort thermique de l’habitat en climat chaud.,” 2019. [Online]. Available: [www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org)
- [10] Wers Romain, “Amélioration de la qualité de l’habitat en terre crue au Burkina Faso.”
- [11] K. Marti, “Catalogue d’éléments de construction avec calcul de la valeur U,” *Office*, 2002.
- [12] P. : Béton D’, A. Environnemental, M. Moevus, L. Fontaine, and R. Anger, “Programme C2D2 Convention de subvention N°10 MGC S 011 Ministère de l’Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement Coordination : Valérie Wathier / Christian Crémona Livrable 1 Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature,” 2012.
- [13] Jean-Paul Laurent, “Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d’outils de mesure « in-situ »des paramètres thermiques, application à l’étude des propriétés thermiques du matériau terre.,” 1986.
- [14] S. G. Civil, “Exploration du potentiel hygroscopique des briques en terre comprimée (btc) pour l’amélioration du confort thermique de l’habitat en climat chaud”.
- [15] P. Nshimiyimana, A. Messan, Z. Zhao, and L. Courard, “Abonnez-vous à DeepL Pro pour éditer ce Chimico-microstructures dans les matériaux de construction en terre contenant des résidus de carbure de calcium et des cendres de balle de riz,” pp. 3–8.
- [16] Seick Omar Soré, “Etudes techniques des BTC stabilisées à la chaux éteinte.,” Ouagadougou, 2013.

- [17] D. Allinson and M. Hall, "Hydrothermal analysis of stabilized rammed earth test building in UK," *Energy and Building*, vol. 42, pp. 845–852, 2010.
- [18] M. Hall and D. Allinson, "Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials," *Build Environ*, vol. 44, no. 9, pp. 1935–1942, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.01.007.
- [19] M. Hall and D. Allinson, "Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials," *Build Environ*, vol. 44, no. 9, pp. 1935–1942, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.01.007.
- [20] N. C. Balaji, M. Mani, and B. V. Venkatarama Reddy, "Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks," *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, vol. 170, no. 1, pp. 40–54, Feb. 2017, doi: 10.1680/jcoma.15.00032.
- [21] M. Saidi, A. S. Cherif, B. Zeghmami, and E. Sediki, "Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks," *Constr Build Mater*, vol. 167, pp. 566–577, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063.
- [22] T. Ashour, A. Korjenic, S. Korjenic, and W. Wu, "Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum," *Energy Build*, vol. 104, pp. 139–146, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.016.
- [23] S. Kabre, F. Ouedraogo, B. Naon, A. Messan, J. C. Benet, and F. Zougmore, "Évaluation des propriétés thermo-hydro-mécaniques des briques en terre compressée (BTC) issues de la carrière de Matourkou, au Burkina Faso," *Afrique science*, vol. 15, no. 3, pp. 12–22, 2019, [Online]. Available: <http://www.afriquescience.net>
- [24] "International union of pure and applied chemistry physical chemistry division commission on colloid and surface chemistry including catalysis\* reporting physisorption data for gas/solid systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity Reporting physisorption data for gas/solid systems-with special reference to the determination of surface area and porosity," 1985.
- [25] P. Nshimiyimana, A. Messan, and L. Courard, "Hydric and Durability Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders: Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003745.
- [26] Habibou Ouédraogo, "Durabilité des blocs en terre comprimées stabilisées aux géopolymères," 2022. [Online]. Available: [www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org)
- [27] Tarmangue DIME, "Détermination des paramètres de réactivité des matériaux argileux pour la production des briques en terre comprimées stabilisées," 2021. [Online]. Available: [www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org)
- [28] P. Nshimiyimana, A. Messan, Z. Zhao, and L. Courard, "Chemico-microstructural changes in earthen building materials containing calcium carbide residue and rice husk ash," *Constr Build Mater*, vol. 216, pp. 622–631, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.037.

## ANNEXE

## Annexe A-1 : Revue de littérature

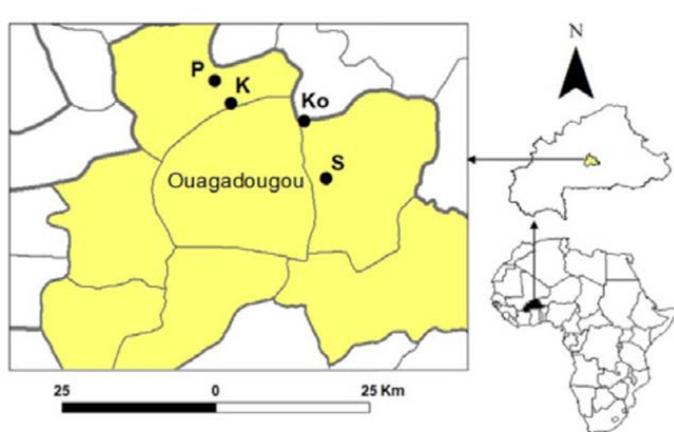


Figure 32: Contexte géographique de la présente étude

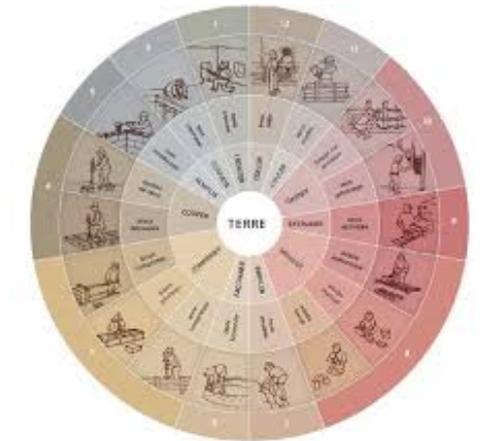


Figure 33: Roue de la construction en terre. Source: [1]



Figure 34: Mosquée de Mopti au Mali  
Mali



Figure 35: Mosquée de San au Mali



Figure 36: Mosquée de Djéné au Mali  
ancienne de Babylone



Figure 37: Vestiges de la cité

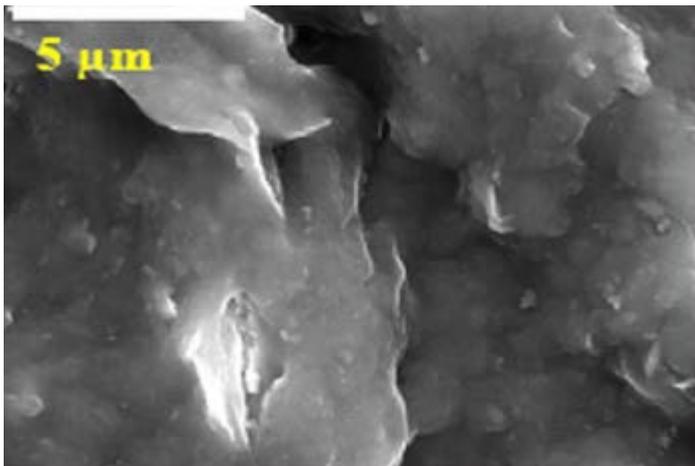


Figure 38: Image microscopique d'une terre argileuse non stabilisée. Source:[5] CCR[28]

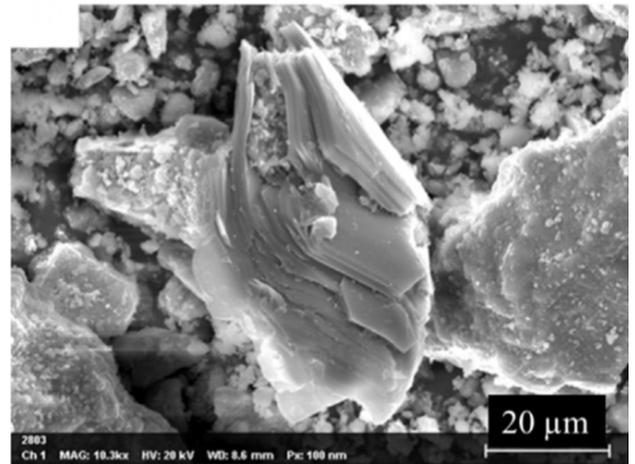


Figure 39: Vue microscopique d'articles de

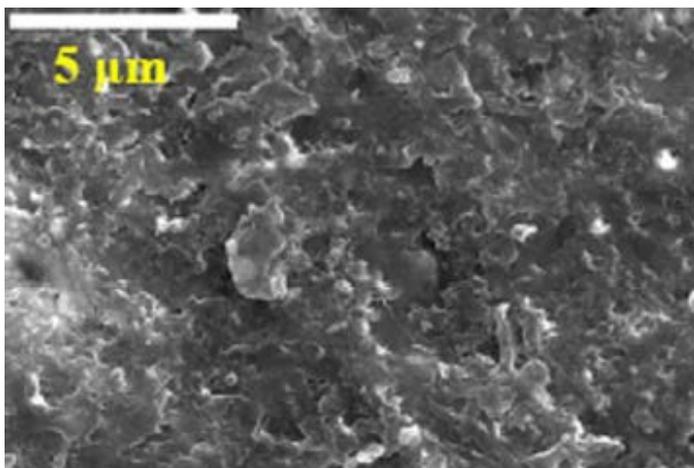


Figure 40: Image microscopique d'une terre argileuse stabilisée à 10% [5] de CCR[28]

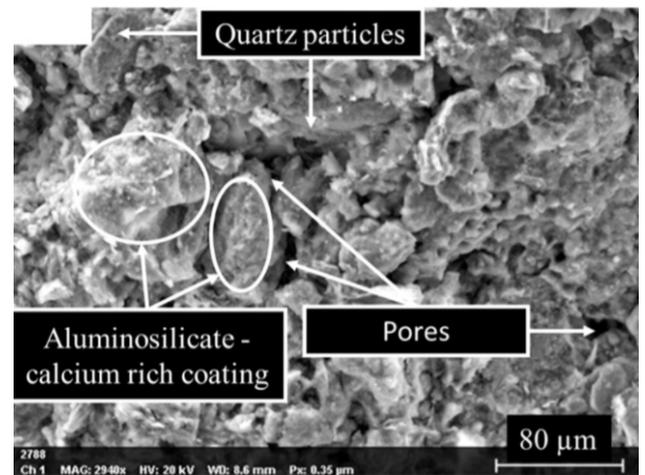


Figure 41: microscopique d'une terre stabilisée 20% de

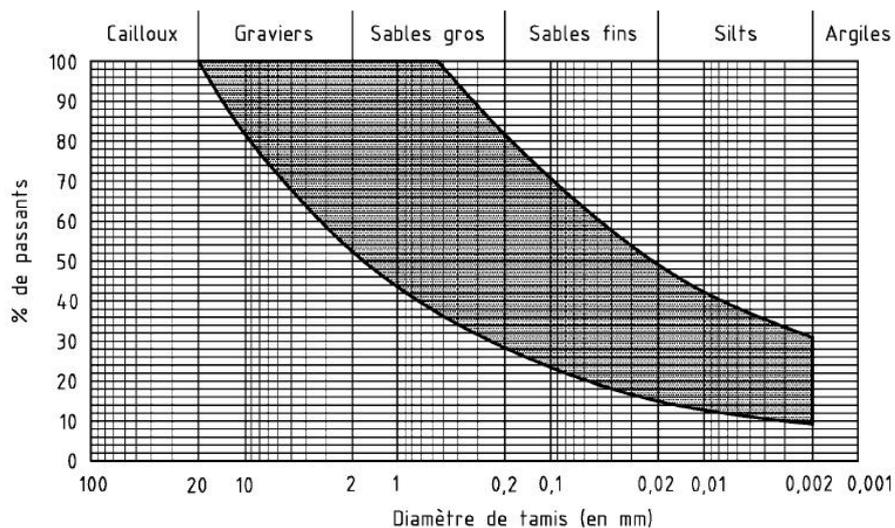


Figure 42: Fuseau granulométrique des terres pour confection des briques[1]

## Annexe A2 : Matériaux, matériels et méthodologie



Figure 43: Réserves en CCR de l'entreprise BIGO Kossodo-Ouagadougou-Burkina-Faso



Figure 44: Flocc de CCR non broyé, ni tamisé



Figure 45: Poudre de CCR tamisé à 80micromètre



Figure 46: Vue aérienne de la carrière de Kossodo [10]



Figure 47: Point de prélèvement de la terre argileuse de



Figure 48: Vue aérienne de la carrière de Saaba :[10] de Saaba



Figure 49: Point de prélèvement de a terre argileuse



Figure 50: Illustration d'un prélèvement de la carrière la terre



Figure 51: Illustration d'une séance de tamisage de



Figure 52: Terre argileuse de Saaba passée au tamis de 5mm



Figure 53: Terre argileuse de Kossodo passée au tamis de



Figure 55: Piles de tamis prêt pour analyse granulométriques



Figure 54: Balance de laboratoire capacité 15kg



Figure 56: Presse TESTARAM utilisée pour confection des



briques



Figure 57: Etuve utilisée pour séchage des briques



Figure 59: Entreposage des briques après séance de pesage

Figure 58: Briques entreposées dans l'étuve pour séchage



Figure 60: Presse hydraulique utilisée pour essai de compression

Arrivée d'eau pour maintenir le niveau d'eau constant



Figure 61: Essai d'absorption par capillarité



Figure 62: Dispositif DESPOTHERM pour acquisitions thermiques d'abrasion



Figure 63: Dispositif pour essai



Figure 64: Dispositif pour essai de sorption désorption



Manomètre

Pompe

Régulateur de pression

Figure 65: Dispositif de l'essai d'érodabilité

### Annexe A3 : Résultats et discussions



Figure 66: Echantillons de Kossodo après essai de perméabilité à la vapeur



Figure 67: Echantillons de Saaba après essai de perméabilité à la vapeur

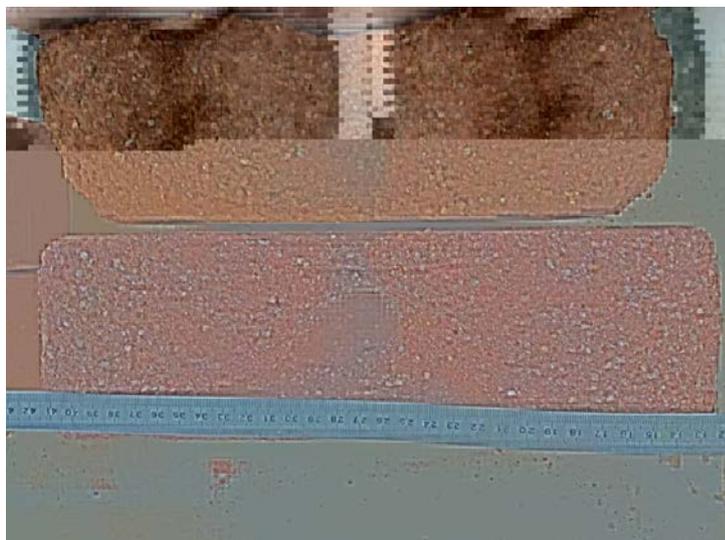


Figure 68: Echantillons de Kossodo (au-dessus) et de Saaba (en dessous) non stabilisés après 2minutes de l'essai d'érodabilité

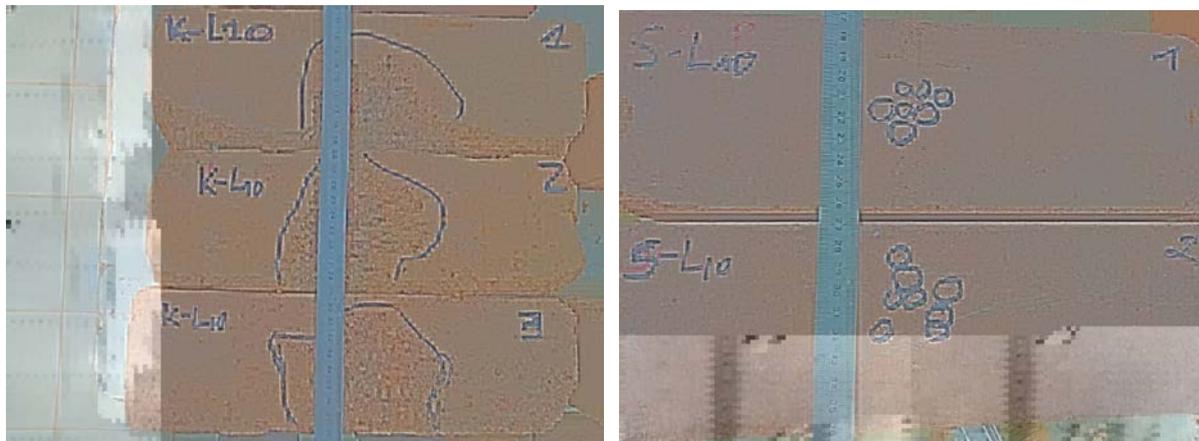


Figure 69: Echantillons de Kossodo à gauche et de Saaba à droite stabilisés à 10% de CCR après 10min d'essai d'érodabilité

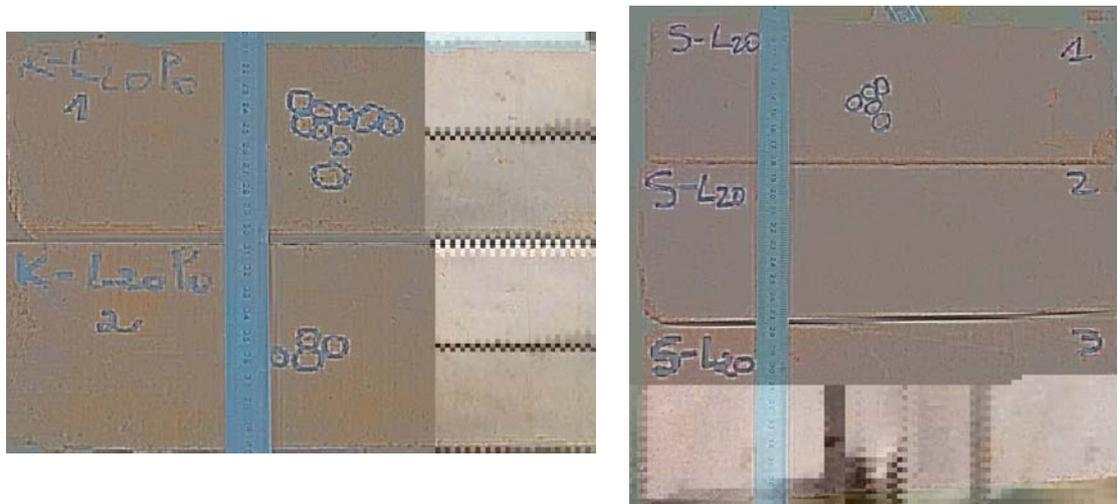


Figure 70 : Echantillons de Kossodo à gauche et de Saaba à droite stabilisés à 20% de CCR après 10min d'essai d'érodabilité

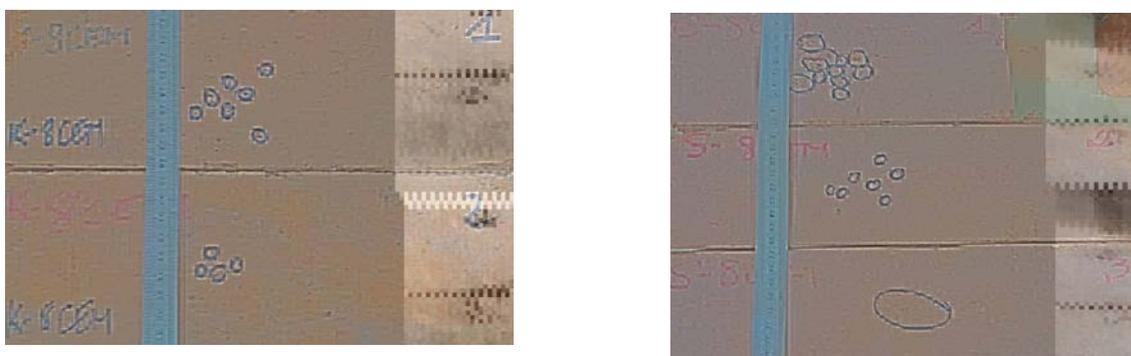


Figure 71: Echantillons de Kossodo à gauche et de Saaba à droite stabilisés à 8% de ciment après 10min d'essai d'érodabilité

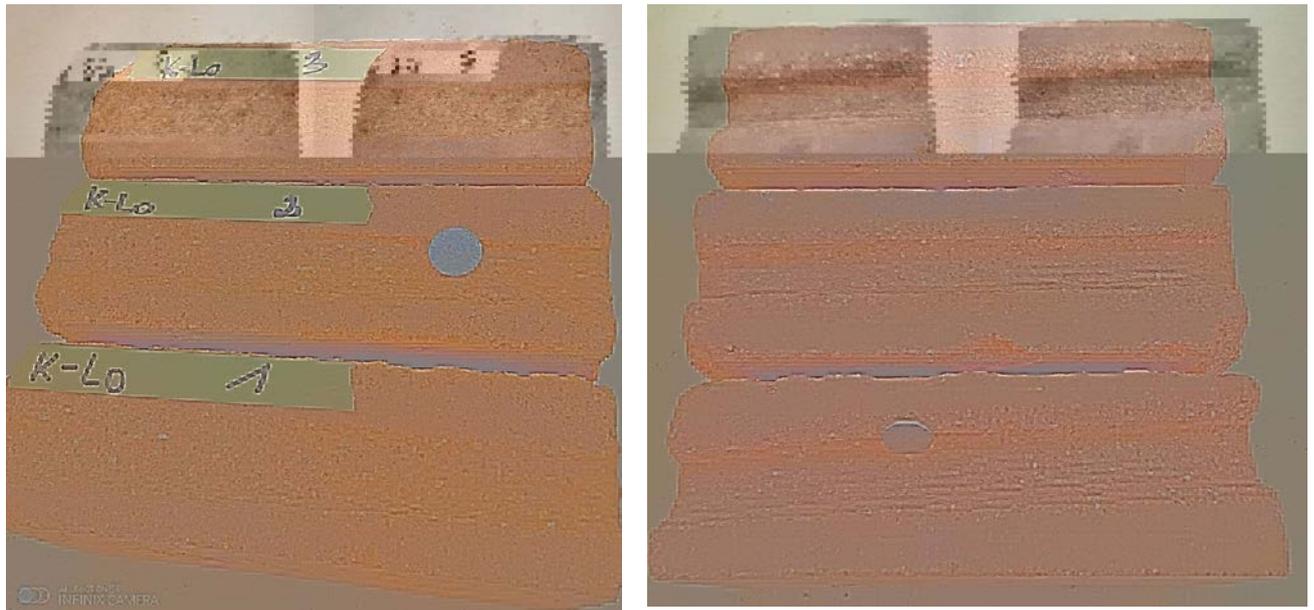


Figure 72: Echantillons non stabilisés de Kossodo à gauche Vs Saaba à droite après essai d'abrasion

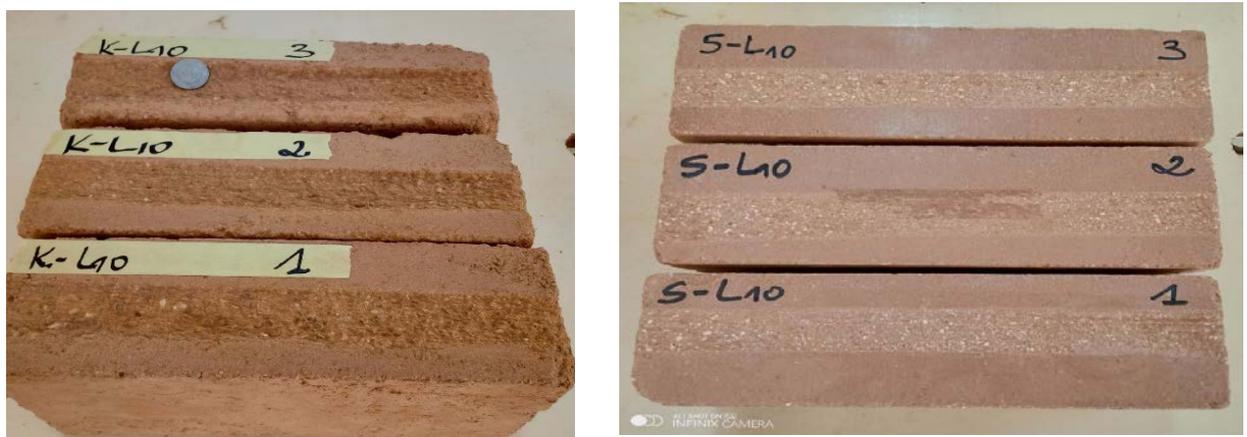


Figure 73: Echantillons stabilisés à 10% de CCR de Kossodo en haut et de Saaba en bas après essai d'abrasion

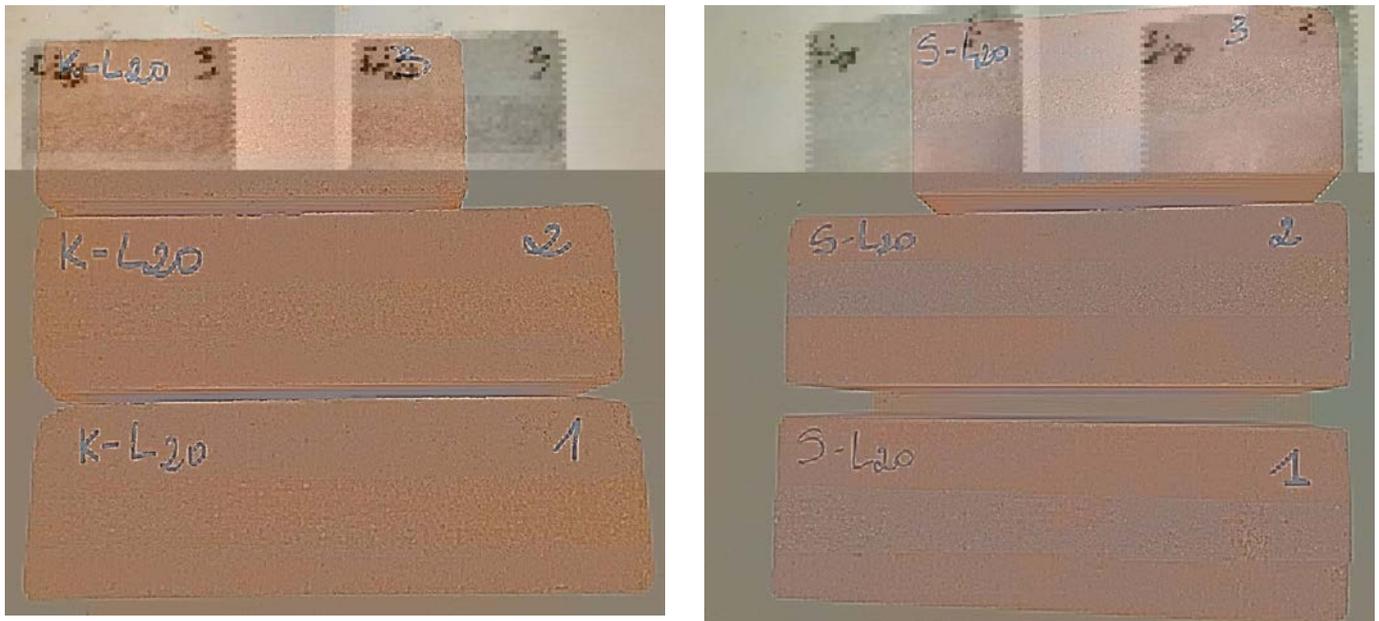


Figure 74: Echantillons stabilisés à 20% de CCR de Kossodo à gauche et de Saaba à droite après essai d'abrasion

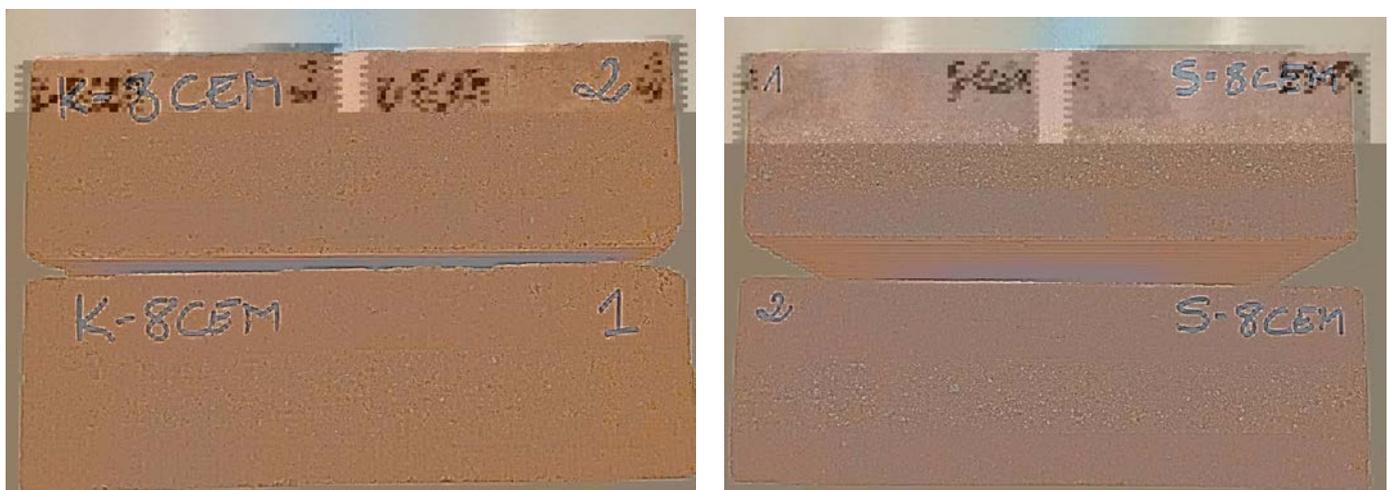


Figure 75: Echantillons stabilisés à 8% de ciment de Kossodo à gauche et de Saaba à droite après essai d'abrasion