



ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS D'USAGE DES BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉES STABILISÉES
AU CARBURE DE CALCIUM RÉSIDUEL : TERRE ARGILEUSE DE PABRE -BURKINA FASO

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE MASTER

SPÉCIALITÉ GENIE CIVIL

Option : Routes et Ouvrages d'Art (ROA)

Présenté et soutenu publiquement le 12 janvier 2019 par

Hassane SEINI MOUSSA (20130791)

Directeur de mémoire : Adamah MESSAN, Maître de conférences (CAMES)

Co-encadreur : Abdou LAWANE GANA, Maître-Assistant (CAMES)

Maître de stage : Philbert NSHIMIYIMANA, Ingénieur de recherche

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) de 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Harouna KARAMBIRI, Professeur titulaire

Membres et correcteurs : Christian RAMADJI, Ingénieur de recherche

Césaire HEMA, Ingénieur de recherche

Promotion [2017/2018]

DÉDICACES

Qu'importe ce que les autres pensent, le plus précieux, c'est l'accompagnement des gens à qui l'on tient...

Vous êtes les meilleurs.... Ce travail est dédié à :

À Allah le tout miséricordieux et très miséricordieux, le Guide par essence et par excellence.
Que ton nom Glorieux soit à jamais sanctifier, Amine.

À Ma Maman bien-aimée, Kadi DAOUDA, qui est ma source d'inspiration et la personne à qui je serais à jamais reconnaissant. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi. Que le seigneur te comble vous sa grâce et de sa Bénédiction et vous accordez longue vie pour jouir des fruits de l'arbre que vous avez planté.

À Mon Papa si calme, Seini MOUSSA qui a toujours su faire ce qu'il faut pour que je devienne ce que je suis aujourd'hui. Pour tous les sacrifices consentis, je vous dis infiniment merci. Que le seigneur vous comble de sa grâce et de sa Bénédiction et vous accorde longue vie pour jouir des fruits de l'arbre que vous avez planté.

À Ma Sœur et mes frères (Oumoul-Kaïraty SEYNI MOUSSA, Mahamadoul-Bachir SEYNI MOUSSA, Djibo SEYNI MOUSSA, Abdoul Nasser SEINI) pour les encouragements et assistances multiformes, ainsi que pour le soutien moral qu'ils m'apportent. Que le Seigneur nous unisse toujours et qu'il montre à chacun de nous le chemin de la vérité et de l'Amour.

À Mes familles bis (La Famille ABDOU IDE, La Famille DAN DIBI, La Famille Tchekoukou, La famille DAOUDA,...) Merci pour tout. Que le Seigneur nous unisse toujours et qu'il montre à chacun de nous le chemin de la vérité et de l'Amour.

À Toute ma famille paternelle et maternelle. Pour leur attention particulière affichée à mon égard. Recevez à travers ce mémoire, le couronnement de la perspicacité.

À Tous mes amis et camarades pour le soutien et la générosité indéfectible.
Considérez ce travail comme un exemple de courage, de patience, de volonté d'abnégation.

CITATIONS

« Quand l'avancée est dure, seuls les plus durs avancent »

« Allez chercher la connaissance où qu'elle se trouve »

REMERCIEMENTS

C'est le lieu de manifester ma gratitude à :

- La Fondation 2iE, pour tout ce qu'elle m'a donné et appris
- *Adamah MESSAN, Maître de conférences*, mon Directeur de Mémoire, qui a rendu possible ce stage et pour ses remarques, suggestions et orientations dans la réalisation des essais et sa disponibilité qui n'est plus à redire. Ce travail est le fruit de vos directives et de vos soutiens.
- *Abdou LAWANE GANA, Maître-Assistant*, mon encadreur pour son assistance et son soutien dans l'exécution des travaux au Laboratoire ainsi que pour sa sollicitude à mon égard.
- *Philbert NSHIMIYIMANA, Ingénieur de recherche*, mon Maître de stage qui n'a cessé de croire en moi du début jusqu'à la fin et pour sa disponibilité ; conseils et remarques pertinentes dans la rédaction de ce document.
- *Marie Thérèse GOMIS, Ingénieure de recherche*, pour les conseils et directives
- *Seick Omar SORE*, Enseignant-Chercheur à 2iE, pour ses inestimables conseils et réponses à mes préoccupations.
- *Arnaud OUEDRAOGO, Ingénieur de recherche*, pour sa collaboration et sa contribution à la réalisation de ce projet de recherche.
- *Christian RAMADJI, Ingénieur de recherche*, pour sa collaboration et sa contribution à la réalisation de ce projet de recherche.
- *Césaire HEME, Ingénieur de recherche*, pour sa collaboration et sa contribution à la réalisation de ce projet de recherche.
- *Salif KABORE*, pour son concours tout au long de cette étude.
- La Coopération suisse DDC, pour son aide dans mon parcours universitaire
- Abdou MAGADJI pour son soutien
- Mes collègues amis, frères de stage (pour l'ambiance fraternelle de travail et l'aide reçue de chacun.
- Tous mes frères et sœurs de la Communauté Nigérienne (ASEN-2iE) pour leur soutien moral, affectif et l'ambiance fraternelle, avec eux le Niger était toujours à côté.

RÉSUMÉ

La présente étude a pour objet d'étudier la stabilisation d'un matériau argileux, en utilisant un sous-produit industriel disponible au Burkina Faso: le carbure de calcium résiduel. Le carbure de calcium résiduel (CCR) améliore significativement les performances des matériaux argileux d'un point de vue mécanique et hygrothermique. Cette stabilisation est appliquée plus précisément aux briques de terre comprimées (BTC). L'effet de l'ajout du CCR à différents dosages à la terre argileuse issue de la carrière de Pabré a été étudié. Les dosages en CCR ont varié entre 0 et 25 %, à des pas de 5 %. Ce ratio est exprimé par rapport à la masse de matériau argileux sec. Les résultats ont montré une réelle amélioration du comportement à l'eau, des performances mécaniques et hygrothermiques. Un optimum a été observé à 10% de CCR avec une résistance à la compression qui a varié de 2,62 MPa (0 % CCR) à 3,40 MPa (10 % de CCR) pour des échantillons maturés dans les conditions ambiantes du laboratoire à 30 °C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$). Le contrôle de la température de maturation améliore également la résistance mécanique, où les résultats ont montré une hausse jusqu'à 6,92 MPa pour les échantillons contenant 20 % de CCR maturés à température constante de 40°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Les BTC stabilisées au CCR résistent très bien à l'eau et à l'érosion. Du point de vue de la thermique, elles présentent de bonnes valeurs de conductivité jusqu'à 0,4 W.m⁻¹.K⁻¹ pour les échantillons contenant 20 % de CCR.

Mots clés :

1. Argile
2. BTC
3. Carbure de calcium résiduel
4. Propriétés d'usages
5. Stabilisation

ABSTRACT

The present research aims to study the stabilization of a clay material using an industrial by-product available in Burkina Faso: calcium carbide residue. Calcium carbide residue (CCR) significantly improves the performance of clayey materials from a mechanical and hygrothermal point of view. This stabilization is applied more precisely to compressed earth blocks (CEB). The effect of the addition of CCR at different content to the clayey material from Pabre was studied. The CCR content ranged from 0 to 25 % at 5 % step size. This ratio is expressed relatively to the dry mass of the clayey material. The results showed a real improvement in water behavior, mechanical and hygrothermal performances of CEB. An optimum was observed at 10 % of CCR with a compressive strength that ranged from 2.62 MPa (0 % CCR) to 3.40 MPa (10 % of CCR) for samples cured at room temperature in the lab at 30°C (± 5 °C). The control of the curing temperature can also improve the mechanical strength, where the results showed an increase up to 6.92 MPa for samples cured at a constant temperature of 40 °C (± 2 °C) and which contains 20 % of CCR. CEB stabilized with CCR are highly resistant to water and erosion. From a thermal point of view, they have good conductivity values up to 0.4 W.m⁻¹.K⁻¹ for a 20 % of CCR content.

Key words:

1. CEB
2. Clay
3. Calcium carbide residue
4. Stabilization
5. Performance of CEB

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviatio/Cygle	Définition
µm	micromètres
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Å	Angström
ACP	Analyse par Composante Principale
AFNOR	Association Française de Normalisation
ATG	Analyse Thermogravimétrique
BET	Brunauer–Emmett–Teller Theory
BTC	Brique de Terre Comprimée (s)
CAH	Hydrate d'Aluminate calcique
CASH	Hydrate aluminosilicate calcique
CCR	Carbure de Calcium Résiduel
CEC	Capacité d'Échange en Cations
cm	Centimètres
CSH	Hydrate de Silicate calcique
DEsProTherm	Dispositif d'Estimation des Propriétés Thermiques
ES	Extrait Sec
kN	Kilo Newtons
LEMHaD	Laboratoire Eco-Matériau et Habitats Durables
méq	milliéquivalent
mm	millimètres
mns	Minutes
MPa	Mégas Pascals
PH	Potentiel d'hydrogène
PSD	Particle Size Distribution
TGA	Thermogravimetric Analysis
TO	Tétraédrique-Octaédrique
TOT	Tétraédrique-Octaédrique-Tétraédrique
VBS	Valeur au Bleu de Méthylène

XRD

X-Ray Diffraction method

XRF

X-Ray Fluorescence method

SOMMAIRE

DÉDICACES	i
CITATIONS	ii
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vi
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	4
I. INTRODUCTION GÉNÉRALE	5
II. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	7
1. LES MINÉRAUX ARGILEUX	7
2. STABILISATION DES ARGILES	8
3. BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉES (BTC).....	14
4. CONCLUSION.....	16
III. MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	17
1. INTRODUCTION	17
2. MATÉRIAUX ET COMPOSITION DU MÉLANGE.....	17
3. CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET MINÉRALES DES MATIÈRES PREMIÈRES	18
4. FORMULATION, CONDITIONNEMENT ET DETERMINATION DES PROPRIÉTÉS D'USAGE DES BTC.....	19
5. CONCLUSION.....	26
IV. : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	27
1. INTRODUCTION	27
2. CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES.....	27

3. COMPORTEMENTS PHYSICO-MÉCANIQUES ET HYGROTHERMIQUES DES BTC STABILISÉES AU CCR.....	32
V. CONCLUSION GENERALE.....	48
1. CONCLUSION GENERALE	48
2. RECOMMANDATION ET PERSPECTIVES	48
VI. BIBLIOGRAPHIE :.....	50
ANNEXES.....	52
LISTE DES ILLUSTRATIONS EN ANNEXES.....	53
1. ANNEXE 1 : PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES.....	54
2. ANNEXE 2 : MINÉRALOGIE ET CRITÈRES DE CHOIX DES MATÉRIAUX POUR BTC	56
3. ANNEXE 3 : DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX	58
4. ANNEXE 4 : ANALYSE DE DONNÉES	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Capacité d'échange de cations (CEC) de quelques minéraux.....	8
Tableau II: Codification des BTC	23
Tableau III: Hypothèses de modélisation.....	26
Tableau IV: Propriétés physiques des matériaux primaires.....	27
Tableau V: Composition minéralogique du CCR	30
Tableau VI: Composition minéralogique du matériau argileux.....	30
Tableau VII: Composition chimique de l'argile de Pabré et du CCR	30
Tableau VIII: Évolution du diamètre des pores	39
Tableau IX: Coefficient de capillarité des BTC à 10 minutes	39
Tableau X: Coefficient d'abrasion Ca des BTC	40
Tableau XI: Valeurs de retrait-Gonflement	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Bâtiment pilote servant de modèle à la simulation thermo-climatique	25
Figure 2: Courbe granulométrique des matières premières	28
Figure 3: Thermogramme ATG du CCR et de Pabré (Philbert Nshimiyimana et al. 2018).....	28
Figure 4: Optimums Proctor normaux	31
Figure 5: Évolution des limites d'Atterberg	32
Figure 6: Représentation de la résistance à la compression sèche après maturation à température ambiante	33
Figure 7: Représentation de la résistance à la compression humide après maturation à température ambiante	34
Figure 8: Représentation de la résistance à la traction après maturation à température ambiante	35
Figure 9: Représentation de la résistance à la compression après maturation à température de 20°C	36
Figure 10: Représentation de la résistance à la compression après maturation à température de 40°C	37
Figure 11: Représentation de la résistance à la traction après maturation à température contrôlée de 20 °C et 40 °C	37
Figure 12: Sorption des échantillons de BTC	38
Figure 13: Porosités totales et accessibles à l'eau des échantillons de BTC	38
Figure 14: Porosités accessibles à l'eau fonction la densité apparente des échantillons de BTC.....	38
Figure 15: Valeurs de conductivité thermique selon les formules des BTC.....	41
Figure 16: Valeurs de Diffusivité selon les formules des BTC	41
Figure 17: Valeurs de la profondeur de pénétration des flux selon les formules des BTC pour une période de 24H.....	42
Figure 18: Évolution de la diffusivité en fonction de la densité apparente.....	42
Figure 19: Éboulis des valeurs propres	44
Figure 20: Individus au 1er plan factoriel	44
Figure 21: Variables au 1er plan factoriel.....	44
Figure 22: Nombre d'heures d'inconfort total	45
Figure 23: Nombre d'heures d'inconforts par type.....	46
Figure 24: Diminution d'inconfort par rapport au béton	46

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'aube des temps, l'homme a toujours eu un besoin de s'abriter, des cavernes, aux immeubles modernes en passant par les cases et huttes. De nos jours, beaucoup d'habitations sont construites en matériaux définitifs, qui coutent relativement cher en Afrique. Les constructions en terre se sont révélées être de bonnes alternatives aux constructions toutes cimentaires du point de vue environnemental et économique.

Le matériau terre est utilisé en construction d'habitation, car il offre de bonnes caractéristiques hygrothermiques, mais très souvent il ne répond pas aux exigences de caractéristiques mécaniques et de durabilité exigée par les normes en vigueur. Des procédés de stabilisation et de renforcement des caractéristiques existent, tels que l'utilisation du ciment, ou de la chaux.

Alors une vision globale s'est développée dans la plupart des pays ayant les problèmes de construction.

Pour la recherche des solutions techniques, économiques et durables en vue de satisfaire aux exigences et aux besoins rencontrés.

Pour apporter des solutions aux problèmes d'habitation, on fait actuellement recours à :

- ✓ La stabilisation des argiles au ciment afin de réduire l'utilisation des réserves naturelles ;
- ✓ L'usage massif des parpaings en mortier de ciment
- ✓ La stabilisation des argiles à la chaux industrielle.

La recherche menée par le Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) du 2iE a pour objectif principal la valorisation des matériaux locaux, par leur emploi dans le domaine des constructions de façon à construire des habitations économiques, confortables et durables. Ainsi plusieurs études seront réalisées sur chaque mélange afin de déterminer les optimums des caractéristiques souhaitées, et d'en déduire une formulation de compromis.

Le mémoire actuel présente, les résultats et analyses relatifs à la stabilisation de la terre argileuse de Pabré en vue de son utilisation en construction d'habitation.

Cette étude a pour objet de contribuer à améliorer les connaissances relatives aux effets des stabilisants chimiques vis-à-vis des comportements mécaniques et hygrothermiques des matériaux argileux dans le domaine de la construction. Elle s'articule autour des objectifs spécifiques suivants :

- ✓ Objectif 1 : Caractérisation des matériaux utilisés (chimie, minéralogie, géotechnique...)
- ✓ Objectif 2 : Analyse et interprétation des résultats sur les principaux paramètres d'usage des BTC
- ✓ Objectif 3 : Étude sur les implications des paramètres mesurés et leurs corrélations

Le présent mémoire comprend les chapitres suivants :

Premier chapitre : Ce chapitre est essentiellement consacré à la revue de littérature sur les stabilisations des matériaux argileux en général, et des Briques de terre comprimées en particulier

Deuxième chapitre : Matériaux et méthodes utilisés pour la réalisation des essais

Troisième chapitre : Analyses et interprétations des résultats

Conclusion générale Discussions (recommandations) sur les critères techniques pour une meilleure optimisation des paramètres d'usage

II. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

1. LES MINÉRAUX ARGILEUX

Les argiles représentent des entités minéralogiques caractérisées par un comportement particulier avec l'eau, qui se traduit souvent par des phénomènes de gonflement, de dispersion et d'hydratation. Ce sont des silicates d'alumines hydratés, qui ont des structures phylliteuses particulières et se distinguent par leur nature chimique. La structure phylliteuse de l'argile est le résultat de la superposition de couches tétraédriques de silice et de couches structurales octaédriques d'hydroxydes d'aluminium ou de magnésium. Dans une couche tétraédrique (SiO_2), l'ion silicium Si^{4+} est placé au centre d'un tétraèdre entouré de quatre atomes d'oxygène. Dans une couche octaédrique d'hydroxyde d'aluminium $Al_2(OH)_6$ ou de magnésium $Mg_3(OH)_6$, le cation (Al^{3+} ou Mg^{2+}) est entouré d'un octaèdre d'ions hydroxydes OH^- (Illustration 5 en Annexe 2). Dans le cas où le cation de la couche octaédrique est l'aluminium, deux tiers des sites octaédriques sont occupés par des ions Al^{3+} et la couche octaédrique est dite gibbsite alors que, dans le cas où l'on est en présence de cations Si^{4+} Tous les sites octaédriques sont occupés et la couche octaédrique est dite brucite. La jonction entre une couche tétraédrique et une couche octaédrique se fait par substitution de certains groupements OH^- par des ions d'oxygène O^{2-} , ce qui donne à la particule d'argile une charge négative. Il s'ensuit des propriétés absorbantes de l'argile, favorisant la fixation de cations et de molécules polaires afin d'assurer la neutralité électrique du minéral. Certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins. Ces argiles sont dites gonflantes. Le potentiel de gonflement d'une argile dépend de la texture et de la structure de minéraux qui la constituent. On distingue plusieurs groupes de minéraux argileux, que sont les chlorites, les smectites, les kaolinites et les micas. Mais dans le cadre de cette étude, on n'abordera que les deux dernières qui se retrouvent dans le matériau utilisé au cours de cette étude.

1.1 LE GROUPE DE LA KAOLINITE :

Argiles dioctaédriques de type 1 / 1 (ou TO (tétraédrique : octaédrique + inter-foliaire)) typique :

Le minéral le plus fréquent de ce groupe de minéraux est de loin la kaolinite. Elle est aussi l'exemple typique d'une argile non gonflante. Les minéraux de cette famille sont composés par l'alternance de couches tétraédriques et de couches octaédriques (Illustration 6 en Annexe 2). La jonction au plan commun entre la structure octaédrique et la structure tétraédrique est surtout assurée par des atomes d'oxygène. Seul un tiers est composé d'ions hydroxyles. Suivant la nature du cation de la structure octaédrique, on distingue deux sous-groupes dans cette famille de minéraux argileux :

- le groupe de la serpentine, où la couche octaédrique est de type « brucite »

- le groupe de la kaolinite, où la couche octaédrique est de type « gibbsite ».

Les liaisons entre les différentes couches sont relativement rigides et sont principalement assurées par les forces de Van der Waal et les liaisons hydrogène.

Outre les deux groupes précédents, on distingue dans cette famille le groupe des halloysites,

L'épaisseur d'une couche de kaolinite est de **7,2 Å** (Ångström), tandis qu'une couche d'halloysite hydratée a une épaisseur de **10,1 Å**. Des feuillets d'halloysite d'épaisseurs intermédiaires peuvent exister, correspondant à des structures partiellement hydratées. Des phénomènes de substitutions de cations peuvent être observés au niveau des structures tétraédriques et octaédriques, sans pour autant changer l'arrangement des minéraux de cette famille. Cependant, de telles substitutions sont susceptibles de générer un déficit de charge et donc de charger négativement la couche de kaolinite. Ce déficit de charges est comblé par l'attraction d'autres cations et l'on parle alors de capacité d'échange en cations (CEC) du minéral, souvent donnée en milliéquivalents (méq) par cent grammes du minéral à sec. On donne dans le Tableau I quelques valeurs de CEC pour différents minéraux argileux :

Tableau I: Capacité d'échange de cations (CEC) de quelques minéraux.

Minéraux	Capacité d'Échange en Cations (CEC)
Kaolinite	3-15meq/100g
Halloysite	5-40meq/100g
Montmorillonite	80-150meq/100g

1.2 LE GROUPE DES MICAS (L'ILLITE) :

Argiles de type 2 / 1 ou TOT :

La structure de base des minéraux de cette famille résulte de l'association d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques, qui l'entourent. Elle ressemble donc à la structure des smectites. Cependant, le quart des cations Si^{4+} est remplacé par des cations Al^{3+} (Illustration 7 en Annexe 2). Il en résulte un déficit de charges, compensé par l'adsorption d'ions de potassium K^+ , qui s'intercalent entre les feuillets.

2. STABILISATION DES ARGILES

La stabilisation est une technique qui permet d'améliorer la capacité portante et le comportement à l'eau d'un sol ou d'un matériau moyennant l'ajout d'un liant hydraulique (ciment, chaux...) ou d'un liant hydrocarboné (bitume, émulsion de bitume...). Il existe différents types de traitement des argiles. Ces traitements, de manière générale, permettent de lier et de cimenter les particules entre elles, afin d'augmenter la résistance du matériau et de réduire sa sensibilité à l'eau. Les deux techniques de stabilisation les plus utilisées pour valoriser les matériaux argileux sont les suivantes :

- Traitement aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés (traitement physico-chimique):

Les liants hydrauliques sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés et ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral (contrairement aux produits de type colle qui eux ne peuvent qu'adhérer au squelette minéral)

Parmi les stabilisations les plus couramment utilisées, on distingue :

- ✓ Stabilisation à la chaux
- ✓ Stabilisation au ciment
- ✓ Stabilisation en cendres volantes,

- Traitement avec un matériau non argileux (traitement physico-mécanique):

Il s'agit de mélanger le matériau argileux gonflant avec un autre d'argilosité presque nulle, ce sont par exemple les sables, les graviers .Ces matériaux inertes réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns) et réduisent, par la même, l'activité du gonflement de l'argile. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.

2.1 STABILISATION PAR L'AJOUT DE LA CHAUX

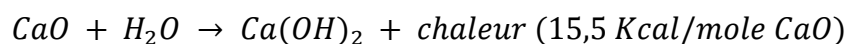
L'application de la chaux peut améliorer considérablement les propriétés mécaniques des matériaux avec lesquels elle est mise en réaction. Il y a essentiellement deux formes d'amélioration : la modification et la stabilisation. L'utilisation de la chaux peut modifier presque tous les sols à grain fin dans une certaine mesure, mais l'amélioration la plus spectaculaire se produit dans les sols argileux de plasticité modérée à élevée. La modification survient principalement en raison de l'échange de cations calcium apportés par la chaux éteinte et des cations normalement présents absorbés à la surface de l'argile. La modification survient aussi par la réaction de la chaux éteinte avec la surface argileuse dans un environnement au pH élevé; la minéralogie de la surface argileuse est altérée lorsqu'elle réagit avec les ions de calcium pour former des produits cimentaires. Il en résulte une réduction de la plasticité et du gonflement, une réduction de la capacité de rétention de l'humidité, et une plus grande stabilité. La stabilisation survient lorsqu'on ajoute une quantité adéquate de chaux à un sol réactif. La stabilisation diffère de la modification par le fait qu'un niveau important du gain de solidité à long terme se développe grâce à la réaction pouzzolanique. Cette réaction est la formation d'hydrates de silicate de calcium et d'aluminates de calcium lorsque le calcium de la chaux réagit avec les aluminates et les silicates solubilisés de la surface d'argile. Cette réaction peut commencer rapidement et est responsable d'une partie des effets de modification. Toutefois, la réaction pouzzolanique à terme peut se poursuivre pendant très longtemps, voire même des années. Ainsi, certains sols peuvent produire des gains de solidité très élevés lorsqu'ils sont traités à la

chaux. La clé de la réactivité pouzzolanique et de la stabilisation est un sol réactif et un bon protocole de formulation. Outre son utilisation pour le traitement des sols en construction routière, la chaux peut être utilisée dans de nombreux domaines : sidérurgie, verrerie, industrie papetière, agriculture, construction, etc. Aujourd'hui, les chaux utilisées en construction sont des produits normalisés.

2.1.1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE CHAUX ,

La chaux peut exister sous les trois formes suivantes:

- Chaux vive: elle est principalement constituée d'oxyde de calcium **CaO** (en général à plus de 90 %). Une chaux vive pour le traitement des sols est selon la norme NBN EN 459 à définir comme (IDDRIM 2015) ;
- Chaux éteinte (ou hydratée): elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 . Elle est généralement fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique :



L'extinction de la chaux vive par l'eau entraîne une pulvérisation très fine du produit. Une chaux hydratée pour le traitement des sols est selon la norme NBN EN 459 à définir comme (IDDRIM 2015).

- Lait de chaux : il est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sols présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achève au contraire de les dessécher). En pratique, le lait de chaux ne fait pas l'objet d'une norme, car ses caractéristiques, c'est-à-dire essentiellement sa concentration, sont déterminées par les besoins réels des matériaux au moment des travaux. On mesurera donc :

- sa concentration (exprimée en extrait sec ES);
- éventuellement la teneur en chaux libre.

La chaux vive contient à peu près 30 % de CaO disponible de plus que la chaux éteinte. Une tonne de chaux vive est équivalente à environ 1 300 kg de chaux éteinte. La chaux vive pèse entre 700 et 1 100 kg/m³ alors que la chaux éteinte ne pèse que 560 kg/m³.

2.1.2 CARACTÉRISTIQUES IMPORTANTES DES CHAUX :

En ce qui concerne le traitement des sols à la chaux, trois caractéristiques de ce liant sont importantes :

- La teneur en CaO : Le CaO peut être:

- disponible : c'est-à-dire non combiné, sous forme de CaO pour la chaux vive et sous forme Ca(OH)_2 pour la chaux éteinte ;
- combiné : sous forme de carbonate (son importance est appréciée par la teneur en CO_2 de la chaux), de silicates et d'aluminates (la somme du CaO libre et du CaO combiné représente le CaO total). Sous forme combinée, le CaO n'est pas réactif et ne présente donc pas d'avantages pour le traitement.
- La finesse de mouture : (elle conditionne l'homogénéité du mélange sol-chaux, garantissant l'hydratation complète de la chaux). Elle intervient également dans les conditions de stockage et de transport.
- La réactivité d'une chaux vive est évaluée par sa vitesse d'hydratation et le dégagement de chaleur provoqué par cette réaction chimique. Plusieurs facteurs influencent sur la réactivité d'une chaux vive, les principaux étant le mode de cuisson de la pierre calcaire originelle, sa pureté et le broyage de la chaux.
- Une autre caractéristique importante des chaux et leur thermoactivité. Cela signifie qu'en fonction de la température ambiante, les chaux se montrent plus ou moins actives.

2.1.3 CHOIX DU TYPE DE CHAUX :

Pour le traitement des sols, toutes les chaux pulvérulentes, qu'elles soient vives ou éteintes conviennent. Toutefois, s'il est nécessaire d'assécher le sol pour se rapprocher des conditions optimales de réemploi, le choix de l'utilisateur s'orientera vers la chaux vive qui permet de diminuer la teneur en eau du sol. Si l'on travaille dans des zones «sensibles», l'utilisateur s'orientera vers la chaux à émission de poussière réduite ou le lait de chaux et/ou adaptera les méthodes de travail.

2.1.4 RÉACTIONS CHAUX - SOL ARGILEUX :

Le mécanisme du traitement des sols avec la chaux est basé sur plusieurs réactions.

- Échange cationique : Dans le sol argileux, les argiles ainsi que les matières organiques ont la propriété de pouvoir échanger une partie de leurs cations constitutifs « échangeables » ou « Adsorbés à la surface » et de fixer l'ion calcium. Pour les argiles, cette réaction dépend de :
 - l'aptitude des argiles à échanger ces cations présents entre les lamelles selon la nature de l'argile ; distingué par la capacité d'échange cationique CEC. Cette capacité est variable selon le type d'argile : pour la Kaolinite la CEC est entre 0,05 et 0,1 meq/g, pour l'illite la CEC est entre 0,2 et 0,5 meq/g et pour la montmorillonite la CEC est de l'ordre de 1 meq/g. Les faibles valeurs de CEC signifient que l'argile ne fixe les cations que sur les zones latérales des feuillets alors que dans les montmorillonites les cations sont captés sur leurs faces externes et internes (CABANE 2004)
 - la nature du cation compensateur. En effet, la capacité des argiles à libérer (ou changer) leurs cations dépend de la valence et de la masse atomique du cation présent dans la solution, selon l'ordre croissant suivant : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$

La capacité d'échange cationique correspond aux échanges :

- des cations inter-foliaires. Ces échanges concernent plus particulièrement les argiles TÔT (smectite, vermiculite ...). La substitution des cations inter-foliaires est d'autant plus facile que les cations ont une charge plus faible et sont de petites tailles (CABANE 2004)
- des cations de bordure. Sur les bordures d'un cristal, les charges ne sont plus équilibrées. Il apparaît alors des liaisons Si-OH et Al-OH. Ces liaisons sont déstabilisées en milieu basique et constituent alors une source supplémentaire de sites de fixation pour les cations de calcium (CABANE 2004).

Lorsque la chaux est ajoutée aux sols argileux, en présence de l'eau, l'échange cationique commence à avoir lieu immédiatement après le mélange. En effet, la dissolution de la chaux dans un sol argileux hydraté libère des cations du calcium Ca^{2+} et des hydroxyles (OH)⁻. Les cations de calcium sont instantanément absorbés et intercalés dans l'espace inter-foliaire de l'argile (structure TÔT) et remplacent les différents cations interfoliaires existants. Cet échange induit des forces attractives entre les feuillets d'argile et réduit la double couche d'eau diffuse (NEDJAH A.RAOUF 2015). Cela conduit à un changement de la structure des feuillets de l'argile et aussi à des modifications immédiates des propriétés des matériaux traités. Cette réaction instantanée se poursuit au fur et à mesure de l'addition de la chaux jusqu'à la saturation complète des argiles en calcium. La quantité de calcium (et donc de chaux) nécessaire pour aboutir la saturation parfaite est fonction de la nature des argiles et du cation existant dans l'espace inter-foliaire. On parle de « lime fixation point, Lime Consommation Optimale et Initial Lime Consommation » dans la littérature pour désigner la nécessité d'adapter la proportion de chaux en fonction de la teneur en (NEDJAH A.RAOUF 2015).

➤ Floculation - Agglomération : En conséquence de l'échange cationique, des cations de calcium s'intercalent entre les feuillets argileux et en modifient la densité de charge électrique superficielle dans les particules d'argiles (NEDJAH A.RAOUF 2015). La charge négative portée à la surface des particules d'argiles et l'intensité des forces de répulsion se réduisant, ceci conduit au rapprochement des particules d'argiles et former des floes. On observe alors une diminution du volume apparent des particules et une contraction de l'argile. Les floes formés sont insensibles au lavage (NEDJAH A.RAOUF 2015), mais deviennent plus stables avec le temps. Cette floculation - agglomération change la texture de l'argile et améliore la consistance des matériaux argileux traités.

➤ Réaction pouzzolanique : Une fois que l'affinité de sol est satisfaite par les cations Ca^{2+} , une autre réaction, appelée réaction pouzzolanique, se déclenche entre la chaux et les couches tétraédriques et octaédriques des feuillets argileux et le calcium, en particulier sur les bords des particules d'argile. À

noter que les cations précédemment fixés dans l'espace inter-foliaire de la fraction argileuse ne participent pas à la réaction pouzzolanique (NEDJAH A.RAOUF 2015).

En effet, la dissolution de la chaux dans l'eau libère des cations Ca^{2+} et des anions OH^- et permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées. En réponse, elles libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments ; hydrate de silicate calcique (CSH), hydrate d'aluminate calcique (CAH) et hydrate aluminosilicate calcique (CASH) (NEDJAH A.RAOUF 2015). Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol et en cristallisant, agissent comme des liens entre les particules du sol. Cette réaction consomme donc les argiles et aboutit à la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. Les différentes argiles (kaolinite, illite et smectite) ne réagissent ni avec la même cinétique ni avec la même intensité avec la chaux (NEDJAH A.RAOUF 2015). Cette réaction est conditionnée par la saturation initiale de la solution (eau de mélange) en chaux. Cette réaction pouzzolanique a une cinétique lente qui nécessite, à température ordinaire, plusieurs mois avant que ses effets puissent être appréciés. Cependant, la cinétique dépend de plusieurs facteurs, dont la température de maturation et la teneur en eau des sols traités. En dessous de 5°C, la cinétique est ralentie alors qu'elle s'accélère avec l'augmentation de la température (NEDJAH A.RAOUF 2015). Une humidité relativement importante favorise la réaction pouzzolanique par la mobilité des ions et la formation des minéraux uniforme dans une surface plus ou moins étendue autour des gains de chaux. La quantité de chaux permettant d'obtenir une amélioration optimale des propriétés hydromécaniques et une durabilité des propriétés recherchées avec le temps est appelée « lime stabilisation optimale » (NEDJAH A.RAOUF 2015).

➤ Carbonatation : La carbonatation (formation de la calcite) de la chaux est une conséquence de la réaction qui se produit entre la chaux et le CO_2 de l'air. Cette réaction peut avoir lieu pendant la maturation des matériaux qui en sont traités. Cependant, elle n'est pas recherchée lors du traitement des sols argileux. Dans le cas du développement de cette réaction, les cristaux de calcite ainsi formés ont une propriété liante très médiocre et perturbent la stabilisation des sols, car leur développement inhibe la réaction pouzzolanique (CABANE 2004). Ainsi, cette réaction provoque une réduction de la résistance finale à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique. Bien que la calcite formée puisse renforcer légèrement le sol à court terme, cette réaction ne peut pas être considérée comme une amélioration à long terme.

2.2 STABILISATION PAR L'AJOUT DU CIMENT :

Le ciment est un liant hydraulique, fabriqué artificiellement dans des usines dédiées à cet effet. Le processus de stabilisation initié par l'ajout du Ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes :

- L'échange cationique ;
- La floculation et l'agglomération de l'argile ;
- L'hydratation par cimentation ;
- La réaction pouzzolanique.

Le ciment Portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation par cimentation. Lorsque le ciment Portland est hydraté, en plus du CSH, il forme également l'hydrate d'alumine calcique (CAH) et le Ca(OH)_2 . Le CSH et le CAH forment un réseau servant de « colle » donnant une structure et de la résistance au mélange (NEDJAH A. RAOUF 2015).

3. BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉES (BTC)

3.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES BTC

Dès les années 50, en Colombie, des recherches se sont entreprises sur l'étude des briques (ou blocs) de terre comprimées (BTC), dans le cadre d'un programme de recherche de l'habitat rural (B. Taallah et al. 2014). La norme ARS 6701996 définit les BTC comme des éléments de maçonnerie de dimensions réduites et de caractéristiques régulières, contrôlées et obtenues par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat (H. Houben 1998). La production des BTC se fait généralement en cinq étapes que sont :

- ✓ préparation de la terre : Cette étape consiste en un séchage du matériau argileux, puis il s'en suit un criblage (tamisage) afin d'en éliminer les composés indésirables (racines, feuilles, etc.) et les composants ayant un diamètre supérieur à celui désiré ; cette étape est suivie de la désagrégation qui vise à briser les grumes pour les réduire en agrégats ayant un diamètre plus petit ;
- ✓ le malaxage : Cette étape a pour but de rendre homogène la terre préparée, en la mélangeant avec ou sans additif, ainsi que de l'eau.
- ✓ le temps de retenue : C'est un laps de temps qui se situe entre le début du malaxage humide de la terre et la compression de la terre ;
- ✓ la compression : C'est l'opération qui consiste à comprimer le matériau dans un milieu confiné, appelé moule, suivant un mode statique ou dynamique ; la compression est suivie d'un démoulage immédiat du bloc formé. C'est cette étape qui donne sa forme à la BTC. Du moule dépend la forme finale de la BTC.
- ✓ la cure : C'est la période suivant la compression pendant laquelle se déroulent principalement deux types de phénomènes :

- les réactions physico-chimiques entre les différents composants du mélange, et surtout entre la terre et les additifs, conduisent à la stabilisation du bloc ; pendant cette phase, les conditions d'hygrométrie relative et de chaleur sont déterminantes et demandent une attention particulière ;
- le séchage qui correspond à l'évacuation progressive de l'humidité de fabrication par évaporation.

La production de ces matériaux (BTC) doit donc répondre à des normes spécifiques de contrôle de la qualité des produits, depuis l'identification et la sélection des terres jusqu'au suivi de la qualité des BTC. Le premier liant des BTC est l'argile contenue dans la terre, mais lorsque la terre simplement compressée, souvent elle ne répond pas aux rigueurs et critères requis. Par exemple la résistance à la compression ou encore la tenue vis-à-vis d'un milieu saturé en eau. Les performances des BTC peuvent être améliorées comme indiqué plus haut.

3.2 CRITÈRES DE CHOIX ET MATIÈRE PREMIÈRE DE BASE POUR BTC

Pour toute opération de transformation ou de formation, faire un bon choix de matériaux primaire est capital, et la formation des BTC à partir de la terre n'en déroge pas. Toutes les terres ne conviennent pas à la production des BTC. Il existe quelques recommandations décrites par les normes en vigueur, telles que la norme ARS- 680 (H. Houben 1998) pour le choix de la terre pour BTC afin d'assurer la qualité, et la réactivité des matériaux utilisés. Ces recommandations se focalisent principalement sur la granularité et la plasticité des matériaux :

✓ la granularité de la terre sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture représenté en Figure-a (Illustration 8 en Annexe 2) et dont elle épousera de préférence l'allure générale. Selon (A. P'Kla 2002), la terre ne doit pas contenir une trop grande proportion de particules argileuse, surtout celles qui sont gonflantes, au risque d'entraîner du retrait et des fissurations fragilisant les blocs ($\% 2\mu\text{m} \leq 30 \%$). Les plus gros éléments du matériau ne doivent pas avoir des diamètres moyens qui dépassent une certaine valeur. Cette valeur dépend de la taille des blocs qui sont projetés à être produits. Une moyenne de 5 mm est prescrite. La Plasticité de la terre, désignée par sa limite de liquidité et sa limite de plasticité, sera, si possible comprise dans le fuseau du diagramme de plasticité en figure –b (Illustration 8 en Annexe 2). Les limites fixées par ces deux fuseaux recommandés sont approximatives. Les terres dont la texture et la plasticité sont inscrites dans ces fuseaux donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Cependant, des terres dont la texture et la plasticité ne respectent pas ces critères peuvent quand même donner des résultats acceptables.

3.3 QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LES PERFORMANCES DES BTC :

Les travaux de recherche sur les BTC remontent à plusieurs décennies. Certains des plus récents publiés étudient les BTC du point de vue de leur performances mécaniques et hygrothermiques. Dans ce paragraphe on ne présentera que les travaux de quelques chercheurs ayant travaillé sur une stabilisation chimique des argiles en vue de leur utilisation pour la fabrication de BTC.

Dans (Seick Omar SORE 2017), l'auteur utilise le métakaolin activé la soude pour stabiliser des argiles. Du point de vue des performances thermiques, il a obtenu des résistances allant jusqu'à 8,95 MPa à la compression sèche et 6,29 MPa à la compression humide. Du point de vue thermique, les résultats ont montré des valeurs allant jusqu'à 0,71 W/m.K pour les valeurs les plus faibles des BTCs stabilisées. D'autres auteurs quant à eux ont utilisé le CCR pour la stabilisation de leur BTC. Dans (Philbert Nshimiymana et al. 2018), l'auteur a obtenu des valeur de résistance à la compression passant de 1,9 MPa pour une BTC sans stabilisant, à 3,4 MPa pour un taux de stabilisation optimal de 8% en CCR. Nous avons ici quelques points de comparaison des performances des BTC qui seront étudié dans ce document.

4. CONCLUSION

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. L'utilisation des matériaux argileux pour la fabrication de BTC utilisées dans les constructions en terre est une des applications de ces matériaux. C'est autour de cette idée que s'articule ce chapitre, qui fait l'état de l'art en matière de recherche dans le domaine de la stabilisation des sols argileux. Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement. S'agissant des BTC, il ressort de la littérature que la latérite et la terre argileuse sont les matrices principales des BTC.

III. MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES

1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de mettre en exergue les principaux dispositifs expérimentaux et méthode expérimentales utilisés pour l'acquisition des données qui vont servir de base à l'établissement des résultats et leurs interprétations. Dans le corps de ce mémoire, on distingue les analyses minéralogiques, physico-chimiques, microstructurales, physicomécaniques et thermiques. Les analyses minérales et microstructurales sur les matériaux utilisés ont été effectuées en amont dans le cadre d'une thèse en cours en partenariat avec l'institut 2iE. Les expérimentations et essais ont été effectués au Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) de 2iE à Kamboinsin, et d'autres à l'Université de Liège (ULiège), aux unités de recherche Urban and Environmental Engineering (UEE), au Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC) et Argiles, Géologie et Environnement sédimentaire (AGEs).

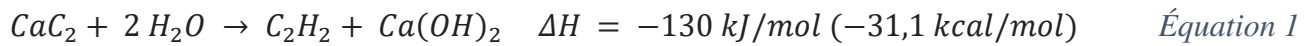
Avant toute expérimentation, il est préférable de maîtriser la nature et les caractéristiques physico-chimiques des matières premières utilisées. C'est dans ce sens que des essais et mesures d'usages ont été menés pour déterminer les caractéristiques intrinsèques de matériaux.

2. MATÉRIAUX ET COMPOSITION DU MÉLANGE

2.1 PRÉPARATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

La terre brute est un sol argileux de couleur beige extraite de la localité de Pabré (012 ° 31,397 ' N, 001 ° 34,373 ' W, à 297 m). Ses grumeaux ont été écrasés pour libérer les particules élémentaires. Il a été tamisé pour éliminer les granulats de diamètre supérieur à 5 mm, et ce, afin de faciliter un mélange homogène et une interaction avec le liant. Le liant et stabilisant utilisé au cours de cette expérimentation est le carbure de calcium résiduel (CCR), un sous-produit industriel qui s'est révélé avoir une teneur élevée en hydroxyde de calcium, la chaux éteinte. Le (CCR) a été collecté auprès de Burkina Industrial Gas (BIG), dont l'usine est localisée à Kossodo (012 ° 25,935 ' N, 001 ° 29.374 ' W, à 301 m). Ce CCR a été concassé à l'aide de la machine Los Angeles, un broyeur à billes, puis tamisé au tamis de 125µm. Le Burkina Faso dispose d'un très grand potentiel en matière de terres argileuses qui pourraient être utilisées pour la fabrication de BTC. Dans cette étude, la seule carrière à laquelle on s'est intéressé est celle qu'on nomme « Pabré-Ouest ». Cette argile a été choisie du fait du contraste qu'elle présente vis-à-vis des autres argiles utilisées au cours des études semblables menées au LEMHaD-2iE. La figure en Illustration 10 (en Annexe 2) localise les deux carrières. La chaux utilisée quant à elle est un résidu industriel qui est fourni par la Burkina Industrial Gaz (BIG). C'est une société qui possède une usine en périphérie de Ouagadougou dans la zone industrielle, et où elle produit essentiellement du gaz acétylène (C_2H_2). Ce gaz

est produit par hydrolyse d'une roche appelée Carbure de calcium (CaC_2). Les équations bilans des réactions sont présentées aux équations bilans 1 et 2:



Le sous-produit obtenu, une fois séché est une poudre de couleur bleu clair qui est riche en chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), et moyennement en chaux vive (CaO). C'est ce qu'on appelle carbure de calcium résiduel (CCR).

2.2 COMPOSITION DES MÉLANGES

Les échantillons d'argiles ont été prélevés selon les besoins par les stagiaires au Laboratoire. Après séchage et quartage, ces échantillons ont ensuite été homogénéisés à l'aide d'un échantillonneur, broyés et tamisés à 5 mm (Figure -a en Illustration 9 en Annexe 2). Les échantillons de CCR quant à eux ont été prélevés selon les besoins à l'usine de la BIG. Après séchage et mouture, ce matériau a ensuite tamisé à 0,125 mm (Figure -b en Illustration 9 en Annexe 2.). En ce qui concerne les différentes formulations étudiées et les compositions des mélanges, plusieurs cas ont été abordés. D'abord voir le comportement des BTC sans stabilisants vis-à-vis des différents paramètres d'usage. Ensuite, voir l'influence de l'ajout du CCR à différents dosages (5%, 10%, 15%, 20% et 25%). Après, formulés des BTC stabilisées à 8% de ciment CEM II A 42,5, afin de s'en servir comme référence, car c'est le généralement le stabilisant utilisé sur le marché burkinabé. Ces différents pourcentages sont exprimés en fonction de la masse sèche de matériau argileux considéré pour le mélange.

3. CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET MINÉRALES DES MATIÈRES PREMIÈRES

La répartition granulaire des particules, les limites d'Atterberg, les essais du Proctor normal sur le matériau terre ont été déterminés en accord avec les normes NF P 18-056 (AFNOR 1996), NF P 94-057 (AFNOR 1992), NF P 94-051 (AFNOR 1993) et NF P 94-093 (AFNOR 1999) respectivement. Ces essais se résument à travers une analyse granulométrique par tamisage, avec des tamis à maillage normalisé. Cette analyse a été complétée par une analyse granulométrique par sédimentométrie. Par la suite, les limites d'Atterberg que sont les limites de liquidité et de plasticité, ainsi que l'indice de plasticité ont été déterminées conformément à la norme. Par ailleurs, on a aussi réalisé l'essai du Proctor normal sur le matériau argileux, pour en déterminer la teneur en eau optimale dans la matrice pour atteindre la densité maximale, et ce pour différentes teneurs en CCR. Dans (CABANE 2004), on peut lire qu'il est conseillé d'utiliser de la chaux éteinte lorsque le mélange est formulé à l'optimum Proctor. La granulométrie du CCR a été analysée par diffraction aux rayons laser en utilisant l'appareil d'analyse

« Mastersizer » équipé du logiciel d'analyse Mastersizer 2000 V et en utilisant l'eau comme liquide dispersant (F. Michel and L. Courard 2014). La surface spécifique a été déterminée à l'aide de la méthode du BET avec absorption d'azote en utilisant l'instrument micrométrique Gemini V1.01 (S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller 1938). Tous ces paramètres mesurés vont guider au moment de l'interprétation des résultats, car ce sont là des paramètres très pertinents conditionnant le type de réaction et le degré de réactivité dans les mélanges. La composition chimique quant à elle a été analysée à travers la technique de fluorescence par rayon X en utilisant l'ARL Perform' XRF (X-Ray Fluorescence). La composition minéralogique a été analysée par la technique de diffraction par rayon X en utilisant le diffractomètre « Brucker D8-Advance Eco 1,5 kW » équipé d'une anode en cuivre ($\text{Cu K}\alpha \lambda = 1.54060 \text{ \AA}$, 40 kV, 25mA) et du détecteur « Lynxeye » couplé au mode $2\theta/\theta$. L'analyse qualitative et semi-quantitative des spectres ont été effectuées en utilisant le Diffrac.Eva V4.11 et le logiciel Topas V5 de Brucker basée sur la méthode du raffinement de Rietveld. La composition minéralogique a été par la suite confirmée par l'analyse thermogravimétrique (Thermogravimetric Analysis « TGA »). La TGA est faite en utilisant la machine Multisampler-Thermogravimetric Analyzer TGA-2000. L'analyse s'est faite sur une plage allant de 25 à 1000°C avec des pas de 5 °C. La masse volumique spécifique des particules des matériaux est déterminée en utilisant le pycnomètre à eau. Le pycnomètre est constitué d'un petit ballon (d'environ 50 cm³) sur lequel vient s'adapter un bouchon rodé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde. Sur une balance adaptée, on réalise les trois pesées suivantes :

M_1 = Pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge et le solide à côté ; M_2 = Pycnomètre contenant le solide et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge ; M_e = Pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge ; $M_s = M_1 - M_e$ = La masse du solide s'obtient par différence ; $M_e = M_1 - M_2$ = La masse d'eau occupant le même volume

L'expression de la masse volumique des particules solides est donc donnée par : $D = M_s / M_e$

La valeur de bleu de méthylène est en principe mesurée par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée sur la prise d'essai. La norme NF P 94-068 donne les directives pour la mesure de ce paramètre et les interprétations des résultats. La valeur au bleu de méthylène indique l'activité de la fraction argileuse et donne des indications sur ses propriétés de gonflement-retrait.

4. FORMULATION, CONDITIONNEMENT ET DETERMINATION DES PROPRIÉTÉS D'USAGE DES BTC

Pour s'assurer de la répétabilité des caractéristiques des éprouvettes soumises à l'étude, il faut une bonne gestion de leur mise en œuvre au départ. Tout d'abord, on doit s'assurer de la qualité des matériaux en étant très exigeant au moment des prélèvements et de la préparation. Ensuite, on détermine les meilleures

formules à travers les différents essais mentionnés dans cette étude. Après avoir déterminé tous ces paramètres, on peut à présent passer à la formulation. On établit différentes formules et dosage des matériaux cela selon les objectifs fixés. Comme il est prévu des essais sur des triplets, on met en œuvre les différentes quantités pour la formulation des briques trois par trois. Après malaxage, on essaye autant que faire se peut de conserver la teneur en eau en couvrant le récipient de malaxage et en moulant les BTC aussi vite que possible. Un calibrage a d'abord été fait en amont pour déterminer la quantité optimale de mixture à mettre dans le moule pour obtenir des éprouvettes ni trop pleines, ni trop vides. Aussi il faut que la mise en œuvre soit relativement aisée pour les ouvriers, car des presses manuelles sont utilisées. Pour le moulage, on utilisera une presse à BTC normalisée manuelle produisant des briques parallélépipédiques de 29,5x14x5x9,5 cm³. Après formulation et production, il faut s'assurer de bonnes conditions de maturation. Les formules contenant des liants doivent être maturées dans un milieu qui conserve l'humidité. Pour cela, elles sont placées dans des emballages plastiques et le vide d'air est fait. La maturation peut se faire à température ambiante (variable selon les moments de la journée ou de l'année), ou encore à température contrôlée grâce à des étuves et enceintes dédiées à cet effet. La maturation des échantillons stabilisés à la chaux dure 45 jours, car au-delà de cette période, les réactions se sont déjà déroulées à plus de 95% (Suksun Horpibulsuk et al. 2012). Pour les échantillons stabilisés au ciment ; cette période est de 28 jours. Après maturation, les échantillons sont séchés à température ambiante jusqu'à masse constante.

4.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

4.1.1 ABSORPTION CAPILLAIRE

Quel que soit l'ouvrage de génie civil, il est confronté aux caprices de la nature et de la météo. C'est à travers le phénomène d'absorption qu'un liquide peut migrer de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux du fait de la remontée capillaire. L'essai d'absorption capillaire consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par capillarité par les échantillons. Connaissant cette valeur sur un laps de temps, plusieurs paramètres intéressants de caractérisation de BTC peuvent en être déduits. Les essais ont été réalisés sur des échantillons de BTC en s'inspirant du protocole (AFPC - AFREM 1997). Ils consistent à mesurer l'accroissement de la masse de l'éprouvette placée dans un récipient dont le niveau d'eau est à environ 1 cm au-dessus de la face inférieure de l'échantillon. La figure en Illustration 11 (en Annexe 3), présente le dispositif. L'absorption en eau par capillarité est alors mesurée par pesée en fonction du temps. Le coefficient d'absorption est déterminé par l'équation 3 :

$$C_{ac} = \frac{m_h - m_s}{s} \quad \text{Équation 3}$$

Avec : « C_{ac} » le coefficient absorption par capillarité (g / cm^2) ; « m_h » la masse de la BTC humidifiée après absorption d'eau (g) ; « m_s » la masse de BTC séchée à 105 °C (g) ; « S_h » la section de la BTC en contact avec l'eau (cm^2).

Au sortir de cet essai, on détermine un coefficient caractéristique, issu de (AFNOR 2001). Pour les BTC destinées à être utilisées en milieux humides, la norme fixe des valeurs limite de coefficient d'absorption (C_b) à ne pas dépasser. Elle est de 20 pour les BTC faiblement capillaires et de 40 pour les BTC peu capillaires. Au-delà, elle serait très capillaire, ce qui n'est pas acceptable. Le temps de mesure conventionnel de la norme est de 10 minutes. Le coefficient C_b d'absorption d'eau de chaque bloc est conventionnellement exprimé par la formule à l'équation 4 :

$$C_b = 100 \times \frac{M}{S \times \sqrt{t}} = 100 \times \frac{(P_1 - P_0)}{S \times \sqrt{10}} \quad \text{Équation 4}$$

Dans laquelle M est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai ; S est la surface de la face immergée, en centimètres carrés ; « t » est la durée d'immersion du bloc, en minutes.

4.1.2 ABSORPTION PAR IMMERSION TOTALE

L'essai consiste à immerger totalement la BTC dans un liquide de densité connue, en générale de l'eau, afin de saturer les pores. On mesure ensuite les gains de masse par des pesées successives sur des intervalles de temps donné, et jusqu'à saturation complète de l'échantillon. Bien entendu, il faut que la BTC tienne longtemps au contact de l'eau pour que les mesures soient valables. Ces essais d'absorption totale ont été réalisés selon la norme NF EN 14617 sur des blocs de dimensions normalisées ($29,5 \times 14,5 \times 9,5 \text{ cm}^3$). La quantité d'eau absorbée par le matériau est ensuite déterminée par l'équation 5.

$$H_p = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Équation 5}$$

Où : « H_p » est la teneur en eau (%) ; « m_h » est la masse de l'éprouvette humide après absorption d'eau (g) ; et « m_s » la masse de l'éprouvette séchée à 105 °C (g).

4.1.3 POROSITÉ ET DENSITÉ

Généralement, plus précisément dans le cas des BTC on a à faire à trois types de porosité dont une porosité accessible à l'eau dite porosité ouverte, une porosité dite fermée et la porosité totale. Généralement noté ε_t exprimée en (%), la porosité est un paramètre physique des échantillons, qui dans ce cas seront déterminés selon la norme française NF P18-459 (*Essai Pour Béton Durci - Essai de Porosité et de Masse Volumique* 2010). La méthode consiste en la saturation du réseau poreux des échantillons avec un liquide de densité connue. Dans ce cas, l'eau a été utilisée. Ensuite, on procèdera à trois pesées sur chacun des échantillons soumis à l'épreuve. Ceci permet d'évaluer la porosité totale et la

porosité accessible à l'eau, puis d'en déduire la porosité fermée. On en déduira aussi la masse volumique apparente (ρ_{app}) au travers des équations 5, 6, 7 et 8 :

$$\varepsilon_{acc} = 100 \times \frac{M_{sat.air} - M_{sec}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \quad \text{Équation 6} \quad \rho_{app} = \frac{M_{sec} \times \rho_{eau}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \quad \text{Équation 7}$$

$$\varepsilon_{fer} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{acc} \quad \text{Équation 8} \quad \varepsilon_{tot} = 100 \times \frac{\rho_d - \rho_{app}}{\rho_d} \quad \text{Équation 9}$$

Où : « ρ_{app} » est la masse volumique apparente de l'échantillon sec (g/cm^3) ; « ρ_d » la masse volumique spécifique de l'échantillon sec (g/cm^3) ; « ρ_{eau} » la masse volumique de l'eau (g/cm^3) ; « ε_{acc} » la porosité accessible à l'eau (en%) ; « ε_{tot} » la porosité totale (en%) ; « ε_{fer} » la porosité fermée (en%) ; « $M_{sat.eau}$ » la masse de l'échantillon saturé dans l'eau en pesée hydrostatique (g) ; « $M_{sat.air}$ » la masse de l'échantillon saturé en pesée à l'air libre (g) et « M_{sec} » la masse de l'échantillon séché à 105 °C (g), chaque échantillon ayant été séché dans un four à 105 °C jusqu'à ce qu'il atteigne un poids stable (une différence de moins de 0,1 % entre 2 pesées à l'intervalle de 24 heures)

4.1.4 ESSAI DE SENSIBILITÉ AU RISQUE D'ABRASION SUR LES BTC

Cet essai a pour but de simuler le comportement des BTC vis-à-vis des différentes érosions pouvant être dues à l'activité humaine, ou au vent charriant des granulats. Cet essai est réalisé en utilisant une brosse métallique en acier du type de celle décrite à la figure en Illustration 12 (en Annexe 3) et chargée d'une masse de 3 kg est utilisée pour simuler ces effets. À raison de 60 allers-retours sur une des faces de parement de la BTC, ces effets sont simulés et mesurés. Pour réaliser l'essai conformément à la norme, on conserve les blocs pendant 24 h au moins, dans un local clos, à l'abri de l'humidité. On les pèse et on les numérote. On pose les blocs tour à tour sur un plan de travail horizontal pour le brossage, la brosse sera posée sur le bloc (afin que le poids s'exerce verticalement sur celui-ci). Le coefficient d'abrasion "Ca" est conventionnellement exprimé par la formule à l'équation 10:

$$C_{ab} = \frac{S}{m_0 - m_1} \quad \text{Équation 10}$$

Où « C_{ab} » est le coefficient d'abrasion (cm^2/g) ; « m_0 » la masse de la BTC avant abrasion (g), « m_1 » : masse de BTC après abrasion (g) et « S » la section abrasée de la BTC (cm^2),

4.1.1 QUELQUES AUTRES PROPRIÉTÉS MESURÉES

Tout au long du processus de formulation, maturation et de séchage, les BTC sont pesées et mesurées suivant les trois dimensions. On en déduit les pertes de masses et de volume relatives entre le début et la fin du séchage des échantillons. Cette mesure a été effectuée pour apprécier de manière plus concrète l'effet de la stabilisation sur ce phénomène. Dans le même ordre d'idées la quantité d'eau absorbée en

24H par absorption totale s'y trouve certains autres paramètres tels que la quantité d'eau totale absorbé à prés immersion totale sur 24 heures ont aussi été évalués afin d'étoffer l'analyse statistique à venir.

4.2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

4.2.1 NOMENCLATURE DES BTC ET MATURATION À DES TEMPÉRATURES CONTRÔLÉES.

La maturation à une température contrôlée signifie que les échantillons ont été placés en milieu hermétique afin de conserver autant que faire se peut la teneur en eau à la formulation, mais soumis à des températures restant constantes à plus ou moins de 2° au cours de l'expérience. Certains de ces échantillons ont été maturés à 20°C et d'autres à 40°C. Mais le test n'a été effectué que deux formulations dans chacun des cas, une formule à 10 % de CCR et l'autre à 20 % de CCR. Cette expérimentation a été menée pour apprécier l'effet de la température et de la teneur en CCR sur le comportement mécanique BTC. Pour ce qui est de la nomenclature des échantillons (par exemple 10M20S), la signification est résumée dans le Tableau II.

Tableau II: Codification des BTC

Code	Signification			
10M20H	10= teneur en CCR 10%	M= maturation à température contrôlée	20= Température de maturation 20°C	H= Essai de compression humide
20M40S	20= teneur en CCR 20%	M= maturation à température contrôlée	40= Température de maturation 40°C	S= Essai de compression sèche

4.2.2 MESURE DES RÉSISTANCES À LA COMPRESSION

La résistance à la compression a été évaluée sur des échantillons de BTC de dimensions normalisées ($29.5 \times 14.5 \times 9,5 \text{ cm}^3$) au préalable fendus en deux par le biais d'une presse hydraulique (ETI - PROETI) avec une capacité de 300 kN et un taux de chargement de 0,5 kN/s. Ce test a été fait en accord avec la norme XP P13-091. La résistance à la compression des BTC est la propriété mécanique la plus déterminante pour le choix des types de matériaux constituant les murs d'un bâtiment. Cet essai mécanique permet de déterminer deux types de résistances, la résistance à la compression sèche et la résistance à la compression humide. La résistance à la compression de ces échantillons étant alors déterminée à travers l'équation qui y est dédiée. L'essai de la résistance à la compression humide est identique à celui de la résistance à la compression sèche, excepté le fait que les échantillons seront au préalable immergés totalement dans de l'eau durant deux heures avant de subir la charge de la presse pour en apprécier la nouvelle résistance mécanique. La figure en Illustration 13(en Annexe 3) présente le dispositif de l'essai.

4.2.3 MESURE DES RÉSISTANCES À LA TRACTION INDIRECTE DES BTC

La résistance à la traction des BTC a été déterminée avec la méthode proposée dans (M. Olivier et al. 1997). Ces essais ont été réalisés sur des échantillons de dimensions normalisées (29,5x14,5x9,5 cm³) en utilisant une presse hydraulique (ETI - PROETI) avec une capacité de 300 kN et une vitesse de chargement de 0,002 m/s. Cet essai est dérivé de l'essai de traction indirecte par fendage. Il s'agit de soumettre le bloc à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre d'un bloc, ce qui se traduit par une contrainte de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes. Les baguettes utilisées sont de section carrée de 1 cm de côté, en plastique rigide et de longueur un peu supérieure à la largeur du bloc à tester. On pose ensuite les baguettes et la BTC comme indiqué à la figure en Illustration 14 (en Annexe 3) sur le plateau de la presse (dont le diamètre est supérieur à la largeur du bloc). La résistance à la traction par fendage des blocs est donnée par l'équation 11:

$$R_t = \frac{18 \times F}{\pi \times l \times e} \quad \text{Équation 11}$$

Où « R_t » est la résistance à la traction des blocs en Méga Pascals MPa ; « F » la charge maximale supportée par les deux demi-blocs en kilo newtons (kN) ; « l » la largeur du bloc en centimètres (cm) et « e » l'épaisseur du bloc en centimètres (cm). La résistance à la traction moyenne des blocs est la moyenne arithmétique des résistances à la compression d'au moins trois essais réalisés sur des échantillons d'un même lot.

4.3 MESURE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES BRIQUES DE TERRE COMPRIMÉES

L'effusivité thermique, la capacité thermique, la diffusivité thermique et la conductivité thermique et la profondeur de pénétration sont les principales propriétés thermiques mesurées sur les échantillons de briques en terre comprimée sur cette étude. Elles sont déterminées à l'aide du dispositif DEsProTherm (Dispositif d'estimation des propriétés thermiques) présenté en Illustration 15 (en annexe 3) du document. La mesure de l'effusivité thermique (E) est effectuée sur des échantillons de taille unique (6x4x3 cm³). Ces dimensions permettent de recouvrir complètement la cellule de mesure et de s'assurer que le flux de chaleur ne traverse pas l'échantillon en expérimentation, et d'en limiter les pertes. Cette condition est primordiale et permet de s'assurer de la qualité des mesures, en plus des différentes corrections apportées par le logiciel de traitement. Par ailleurs, la mesure de la capacité calorifique, équivalente de la chaleur spécifique (C_p) se fait sur des échantillons (6x4 x1 cm³) permettant au flux de chaleur cette fois-ci de traverser l'échantillon de mesure (D. Mourand 2011). Une fois ces deux paramètres obtenus, la conductivité thermique et la diffusivité thermique sont ensuite déterminées en utilisant respectivement les équations 12 et 13 respectivement.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho_{app} \times C_p} \quad \text{Équation 12}$$

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho_{app} \times C_p} \quad \text{Équation 13}$$

Où « E » est l'effusivité thermique ($\text{J/m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}$) ; « Cp » La chaleur spécifique ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$) ; « λ » la conductivité thermique ($\text{W/m} \cdot \text{K}$) ; « a » la diffusivité thermique (m^2/s) et « ρ_{app} » : densité apparente (kg/m^3)

4.1 SIMULATION NUMERIQUES :

Dans cette partie, nous allons, à l'aide de certains outils évaluer les performances des BTC formulées, et les comparer à certains autres matériaux généralement utilisés en construction. Tout d'abord il y' aura une analyse par composante principale réalisée avec le logiciel R, cela dans le but d'évaluer les performances des différentes formules en prenant en compte tous les aspects évalués. Il s'en suivra une simulation thermo-climatique qui évaluera à l'aide du logiciel XEsoView et la méthode GIVONI, le nombre d'heures d'inconfort thermique. Les performances des BTCs seront comparées à celles du Béton et des parpaings de ciment du point de vue du nombre d'heures d'inconfort chaud. Cet aspect a été évalué car il représente le principal problème de l'habitat au Burkina Faso. Les gains ou les pertes relatives seront aussi évaluées.

La Figure 1 présente le modèle utilisé pour la simulation.

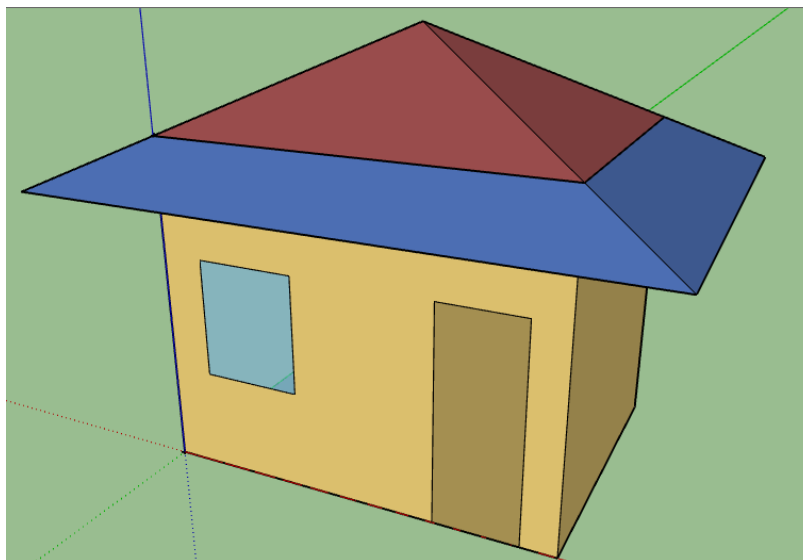


Figure 1: Bâtiment pilote servant de modèle à la simulation thermo-climatique

Le tableau III présente les hypothèses de modélisation.

Tableau III: Hypothèses de modélisation

Bâtiment	Dimensions: 4 m x 3 m x 3,2 m
	Matériaux: (Toiture, porte et fenêtres en Acier, Vitrage simple, Sol en béton)
	Usage: Habitation
	Seuls les éléments de maçonnerie changent
Charges et zones	Usagers: 2 personnes en activité normale
	Temps d'occupation :100%
	Charges électriques: 3 lampes halogènes de 60 W
	Débit d'air: 0,3 ACH (Air Change per Hour)
	Zone: Ouagadougou

5. CONCLUSION

Dans ce Chapitre, on a présenté, de façon succincte, les essais réalisés sur les échantillons afin de déterminer des paramètres pertinents permettant de caractériser les BTC stabilisées par le CCR, comprendre le fonctionnement des systèmes d'échange (thermiques et hydriques) et aussi projeter le comportement des BTC en situation d'usage. Au cours du chapitre qui va suivre, on présentera les principaux résultats obtenus, les interpréter et les discuter. Cette étape rentre dans le cadre de l'atteinte globale des objectifs que fixés en début d'étude.

IV. : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION

Le présent chapitre représente la clé de voûte de ce travail. Ce chapitre est essentiellement dédié à la présentation des différents résultats des essais présentés dans le chapitre précédent. Seront présentées dans cette partie essentiellement la présentation des matières premières utilisées dans cette étude ainsi que leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques qui sont déterminées. La plupart des études et expérimentations ont eu pour objectif la détermination et l'étude des paramètres d'usage des BTC stabilisées aux sous-produits industriels. Ici, on analysera l'influence de l'ajout du carbure de calcium résiduel au matériau argileux issu de la carrière de Pabré-Ouest. Aussi, on interprétera ces résultats, et essaiera de les comparer à ceux des BTC stabilisées au ciment et aux agglomérés en mortier de ciment présents sur le marché. On comparera par la même occasion les performances des BTC aux références normatives en la matière, plus spécifiquement par rapport aux normes XP P13-901-2001 AFNOR. Il sera également présenté dans ce chapitre des résultats d'une simulation thermo climatique avec le logiciel « XEsoView » et la méthode de Givoni évaluant le confort thermique.

2. CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES

2.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

On étudiera dans ce paragraphe certaines propriétés physiques des matières premières : analyse granulométrique et densité absolue. Le Tableau IV présente quelques propriétés physiques de l'argile et du CCR. Les répartitions en taille des particules pour les matières premières sont présentées sur la Figure 2. Les courbes présentent les pourcentages cumulés par chaque classe de particules des matériaux étudiés, ce qui permet d'évaluer pour chaque matériau le diamètre maximum correspondant à 50 % (d_{50}) et 90 % (d_{90}) de masse (argile) et de volume (CCR) cumulé des particules. Les résultats obtenus montrent une distribution assez régulière des granulats du matériau. On compte une grande fraction de fines, dont la plupart des particules sont limoneuses en ce qui concerne la terre utilisée.

Tableau IV: Propriétés physiques des matériaux primaires

Matériaux	Caractéristiques physiques du matériau		
	d_{50} (µm)	d_{90} (µm)	Densité absolue
Pabré Ouest	74	610	2,66± 0,01
CCR	19	120	2,49± 0,01

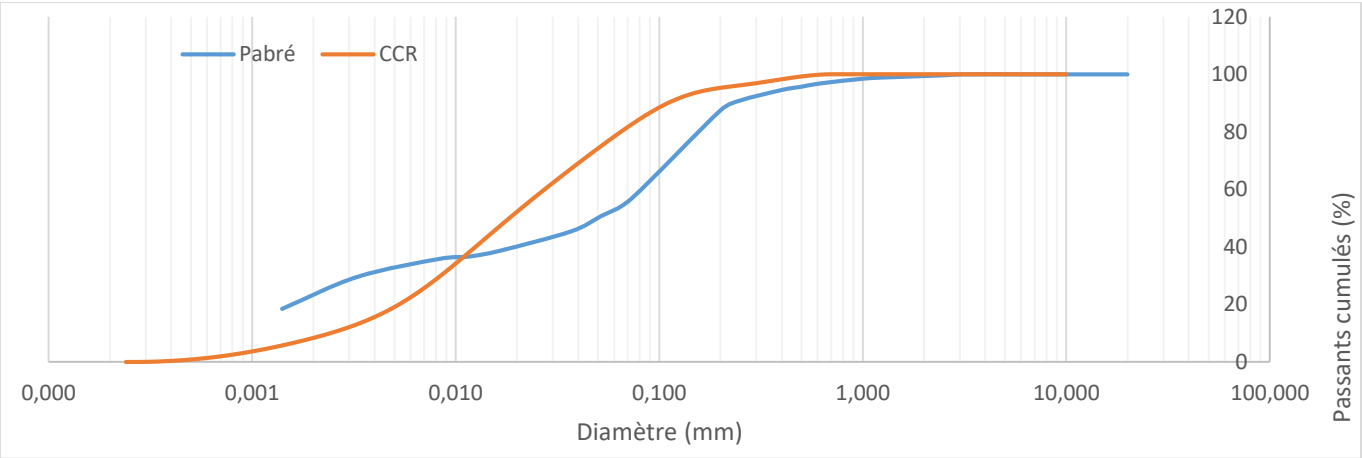


Figure 2: Courbe granulométrique des matières premières

2.2 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Les matériaux primaires (argile et CCR) ont été caractérisés par analyses de diffraction aux rayons (XRD). Les résultats de l’analyse XRD ont été confirmés par une analyse thermogravimétrique (ATG). Les mêmes résultats ont été obtenus. Les thermogrammes sur la Figure 3 présentent les différentes pertes de masse constatées au cours de l’ATG pour le CCR et la terre respectivement. Les compositions minéralogiques du CCR et du matériau argileux sont respectivement présentées dans les Tableau V et Tableau VI. Ces résultats sont ceux de la XRD.

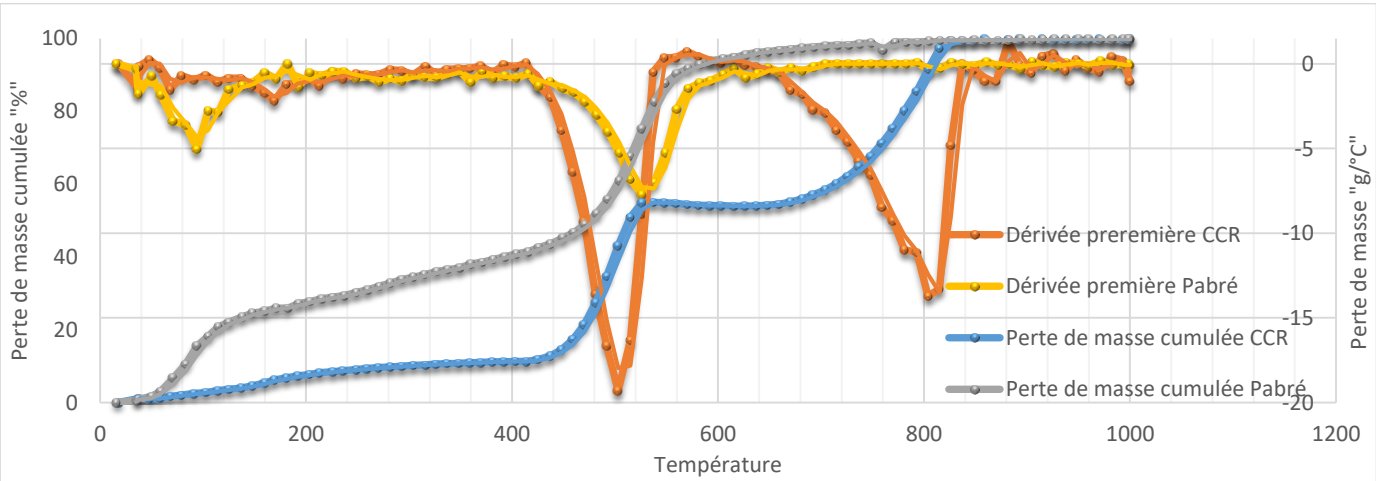


Figure 3: Thermogramme ATG du CCR et de Pabré (Philbert Nshimiyimana et al. 2018)

Les deux chutes remarquables observées sur la figure 20 représentent respectivement la déshydratation de la portlandite et la décarbonatation des calcites.



Les Calcites sont des carbonates qui présentent une certaine résistance mécanique, mais qui ne fait pas l'objet de cette étude, car elles ont déjà réagi.

L'élément intéressant est la portlandite qui est susceptible de réagir avec les Alumines et les silicates des argiles pour former de matériaux cimentaires.

Suivant l'équation 14, les masses molaires des différentes espèces présentées sont :

$$M(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 40 + 2 \times 1 + 2 \times 16 = 74 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{CaO}) = 40 + 16 = 56 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 2 \times 1 + 16 = 18 \text{ g/mol}$$

En tenant compte des coefficients stœchiométriques, on évalue la composition de la portlandite à 24,32% d'eau. Aussi, sur le thermogramme, entre 425 et 550°C, la perte de masse constatée représente l'eau issue de la déshydratation de la portlandite. Ainsi, après traitement des données de l'ATG, 12,76% de la masse a été perdue entre 425 et 550°C. En faisant un produit des extrêmes par celui des moyens, on a la teneur en portlandite du CCR. On la notera « % $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ».

$$\% \text{Ca}(\text{OH})_2 = \frac{12,76 \times 100}{24,2} = 52,47\%$$

En tenant compte des déchets et des interférences, on pourra évaluer la teneur en portlandite du CCR issu des usines de la BIG à un peu moins de 50%. Sur la figure 1 en revanche, la première chute de la dérivée première entre 440 et 620 représentent la déshydroxylation (libération de l'eau liée) de la kaolinite ((Kiki 2016)).



L'équation 15 indique les produits de la décomposition de la kaolinite (Silice SiO_2 et alumine Al_2O_3).

Les masses molaires des différentes espèces présentées dans l'équation sont :

$$M(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4) = 2 \times 27 + 2 \times 28 + 4 \times 1 + 9 \times 16 = 258 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2 \times 27 + 3 \times 16 = 102 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{SiO}_2) = 28 + 2 \times 16 = 70 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 2 \times 1 + 16 = 18 \text{ g/mol}$$

En tenant compte des coefficients stœchiométriques, on évalue la composition de la portlandite à 13,9% d'eau. Ce résultat est conforme à ceux trouvés dans (Kiki 2016). Aussi, sur le même thermogramme, sur la même plage de température, mais sur le graphique des pertes de masses cumulées, entre 440 et 620°C, on détermine que 4,74% de la masse est perdue. En faisant un produit des extrêmes par celui des moyens, on a la teneur en kaolinite du matériau de Pabré. On la notera « % $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ».

$$\% \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 = \frac{4,74 \times 100}{13,9} = 33,7\%$$

En tenant compte des déchets et des interférences, on pourra évaluer la teneur en portlandite du CCR issu des usines de la BIG à un peu moins de 30%.

Tableau V: Composition minéralogique du CCR

minéralogie du CCR	Portlandite (Ca(OH) ₂)	Aragonite (CaCO ₃ -Orthorhombic)	Calcite (CaCO ₃ -Hexagonal)	Rapidcreekite (Ca ₂ (SO ₄)(CO ₃).4H ₂ O-Orthorhombic)	Kaolinite	Quartz	Gypse	Total
	43,03	20,66	15,87	13,31	4,05	2,59	0,5	100,01

Tableau VI: Composition minéralogique du matériau argileux

Minéralogie de la terre	Minéraux	Quartz	Tridymite	Goethite	Hématite	K-Feldspath	Plagioclase	Mica	Rutile	Kaolinite	Illite	Total
	%Pabré	60	3	0	0	7	0	0	0	29	1	100

On constate une forte proportion en quartz du matériau de Pabré à hauteur de 60%, mais seulement 30% de minéraux argileux, dont 29% de kaolinite. Pour ce qui est du CCR, on observe une forte proportion de portlandite comme trouvée avec l'ATG à hauteur de 43%. Ainsi, avec ces données, on peut présager une réaction entre la portlandite et la kaolinite en présence d'eau pour former des CSH cimentaires.

2.3 COMPOSITIONS CHIMIQUES

Les compositions chimiques de l'argile de Pabré, exprimée sous forme de pourcentages massiques des oxydes, sont présentées dans le Tableau VII. L'argile est principalement composée de silice (74,94%) et d'alumine (11,38%). Le taux relativement faible d'oxyde ferrique (Fe₂O₃) (3,74 %) pour l'argile de Pabré explique sa couleur qui tend à s'écarter du rouge pour tirer vers le beige.

Tableau VII: Composition chimique de l'argile de Pabré et du CCR

Composition chimique	Oxydes		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	MgO	NaO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
	Terre de Pabré	Teneur (%)	74,9	11,4	3,7	0,2	0,9	0,1	0,0	0,0	0,8	0,0	5,5	97,5
	CCR		4,8	1,7	0,7	67,4	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	26,7	101,7
	Chaux (Carmeuse SuperCalco 90)		7,3	1,7	0,4	66,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	27,0	102,6

Les résultats de cette analyse montrent une prédominance de l'oxyde de calcium CaO à hauteur de 67% environ (Philbert Nshimiyimana et al. 2018) dans le CCR. Toujours par rapport à cette même étude, on montre que même la chaux industrielle type « Carmeuse SuperCalco 90 » comporte environ le même pourcentage d'oxyde de calcium (66%) (Tableau VII).

2.4 CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES

2.4.1 LE PROCTOR NORMAL

Afin de déterminer la valeur de la quantité d'eau optimale dans la matrice des différents mélanges, les valeurs des optimums Proctor normales ont eu à être déterminées conformément à la norme NF P 94-093. Pour prospection de la teneur optimale en CCR, différents mélanges ont eu à être testés. La Figure 4 résume les principaux résultats. Aussi des échantillons de référence formulés à base de 8% de ciment ont été produits pour comparer les résultats obtenus avec le CCR avec ceux d'un des stabilisants utilisé en général dans la pratique.

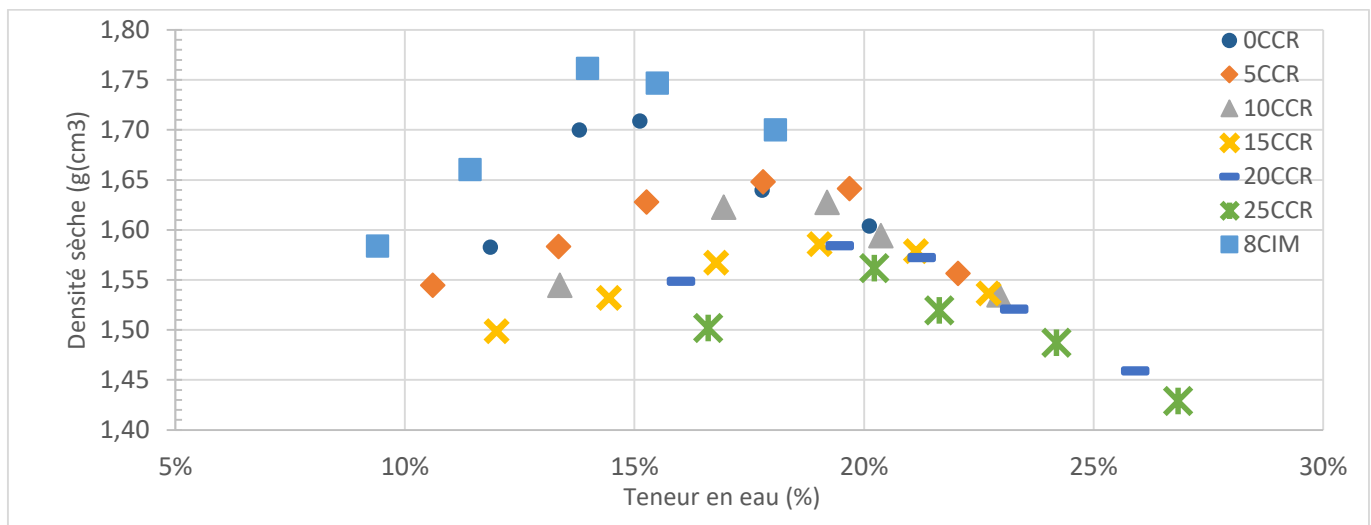


Figure 4: Optimums Proctor normaux

On remarque une tendance décroissante de la densité sèche et une tendance croissante de la teneur en eau optimale de la matrice avec la variation de la teneur en liant. Cette tendance s'explique par le fait que le CCR remplace quelques grains solides dans la matrice du sol. La densité spécifique du CCR est plus faible que celle du matériau argileux de Pabré (2,49, comparé à 2,66 respectivement). Le CCR, du fait qu'il est riche à plus de 43% de portlandite, est hydrophile (Taha Jawad et al. 2014), ce qui explique l'augmentation de la teneur en eau optimale proportionnellement à la teneur en CCR.

2.4.2 LES LIMITES D'ATTERBERG

La connaissance de l'indice de plasticité est un paramètre indispensable dans le processus de stabilisation des sols. Il permet d'apprécier le comportement à l'eau du matériau, mais aussi, et surtout guide vers le choix d'une technique de stabilisation. La détermination de ce paramètre passe nécessairement par la détermination des limites d'Atterberg. Pour prospection de la teneur optimale en CCR, différents mélanges ont eu à être testés. La Figure 5 résume les principaux résultats. On remarque une tendance décroissante l'indice de plasticité et une tendance croissante des limites d'Atterberg et des teneurs en eau

optimale (entre 16 et 21%), ceci avec la variation de la teneur en liant. Le fait que la chaux soit hydrophile explique ce phénomène. Les rections d'échanges cationiques sont à la base de la baisse de l'indice de plasticité (Taha Jawad et al. 2014). C'est l'un des avantages recherchés dans la stabilisation des sols.

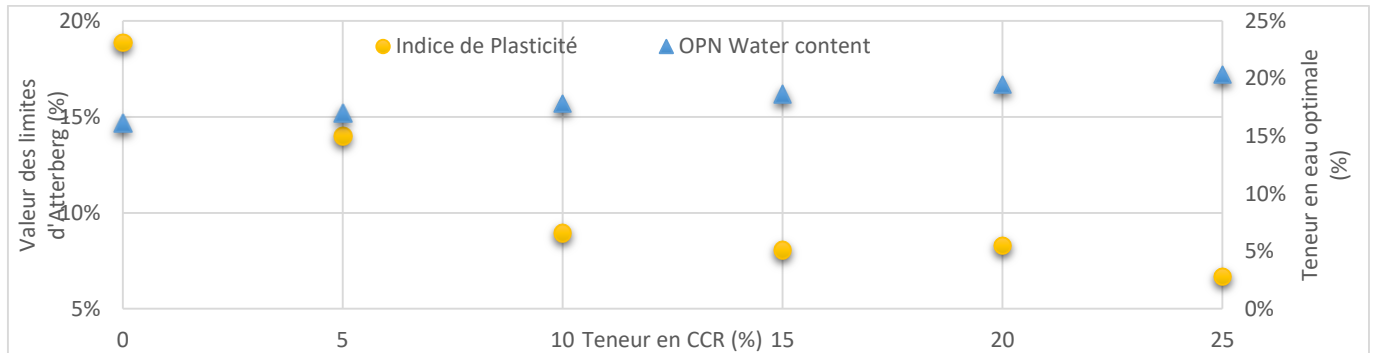


Figure 5: Évolution des limites d'Atterberg

Un traitement à la chaux est envisageable pour une teneur en argiles supérieure à 40 % un indice de plasticité supérieur à 10 (CABANE 2004). Au vu de l'indice de plasticité du matériau qui est de 19, Nicolas Cabane réconforte le choix d'utiliser la chaux (CCR) pour la stabilisation.

2.4.3 LA VALEUR AU BLEU DE MÉTHYLÈNE (VBS)

La connaissance de la VBS est un paramètre important dans le processus de stabilisation des sols. Il permet d'apprécier l'importance même de la stabilisation du matériau, mais d'en prédire le comportement avec et sans stabilisation. La valeur du VBS pour le matériau de Pabré est de **0,13**.

Pour une valeur du VBS comprise entre 0,1 et 1,5, le GTR92 estime que l'on est en présence d'un matériau est de type « sablo-limoneux, sensible à l'eau ». Ce qui est en accord avec les réactions observées avec ce matériau au cours des expérimentations. La courbe granulométrique et la composition minéralogique à plus de 60% quartzique en sont des explications logiques. La courbe granulométrique montre que le matériau terre étudié est principalement composé de limons et de sables (seulement 18% de particules inférieures à 0,002 mm). La composition minéralogique montre une teneur argileuse d'environ 29% en Kaolinite. Ces deux caractéristiques expliquent aussi cette valeur.

3. COMPORTEMENTS PHYSICO-MÉCANIQUES ET HYGROTHERMIQUES DES BTC STABILISÉES AU CCR

3.1 MATURATION À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Les échantillons présentés dans cette section ont subi une maturation à température ambiante du laboratoire (30 ± 5 °C). Cela signifie qu'ils ont été placés en milieu hermétique afin de conserver autant

que faire se peut la teneur en eau à la formulation, mais soumis à des variations de température au cours de la journée.

3.1.1 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

3.1.1.1 COMPRESSION SÈCHE

La Figure 6 présente les différentes résistances observées à la compression pour les différents teneurs en liant. Les échantillons stabilisés au ciment servent de référence. La norme (AFNOR 2001) initie trois classes de BTC (BTC20, BTC40 et BTC60) selon les performances de la BTC. Nos formules sont classées en fonction de cette norme. On remarque que comparativement aux échantillons stabilisés au ciment qui présentent une résistance moyenne à la compression de 5,87 MPa, les échantillons non stabilisés et ceux stabilisés au CCR présentent une résistance moindre. Mais parmi les échantillons stabilisés au CCR, l'optimum est observé à 10%CCR. Les minéraux argileux (silice et alumine) sont dissouts en milieu basique forment des CSH et des CAH cimentaires. C'est le gain de cohésion créé par ces composés qui est responsable de l'augmentation de la résistance (NEDJAH A.RAOUF 2015).

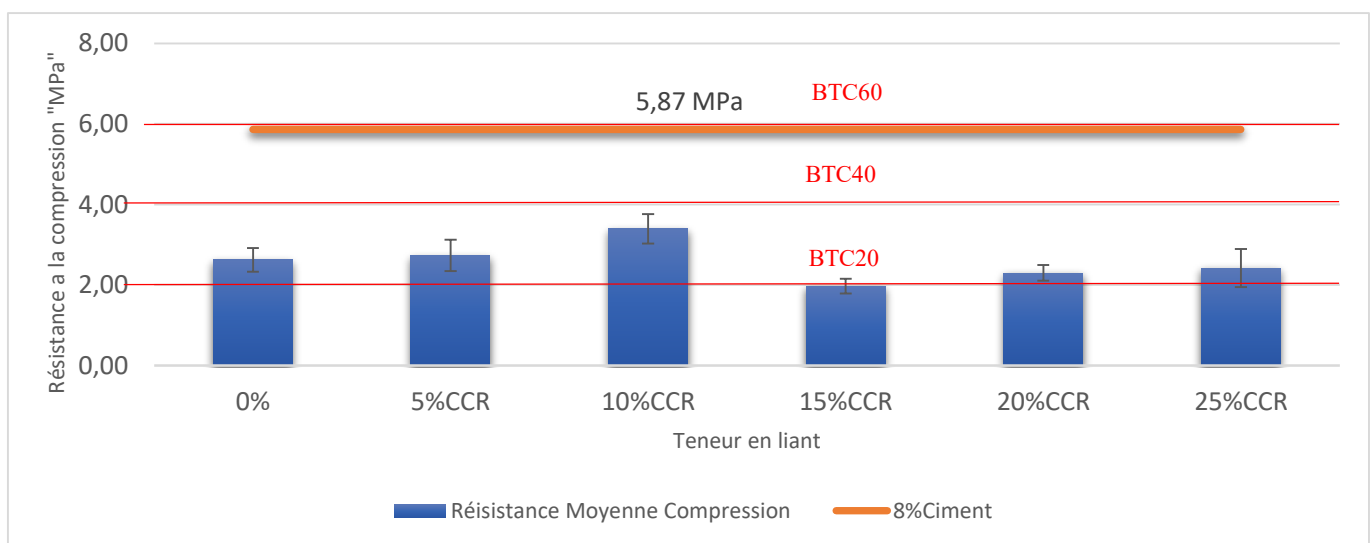


Figure 6: Représentation de la résistance à la compression sèche après maturation à température ambiante. En effet, la dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et anions OH^-) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH ce qui favorise l'accrochage. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées. En conséquence, elles libèrent de l'alumine et de la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxydes provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments ; hydrate de silicate calcique (CSH), hydrate d'aluminate calcique (CAH) et hydrate aluminosilicate calcique (CASH). Toutes les BTC stabilisées au CCR et maturées à température ambiante seraient de la classe BTC20. On pouvait s'attendre

à un tel résultat du fait que le matériau argileux de Pabré contienne peu d'argile (29% de kaolinite) et qu'elle a des granulats qui sont plus de la classe limono-sableuse. Avec 10% de CCR, tous les réactifs du côté de la terre ont été consommés. On peut remédier à cela et augmenter la résistance en y ajoutant une pouzzolane telles les cendres de balle de riz calcinées ou des cendres volantes. Une autre voie de prospection serait aussi d'augmenter la température de maturation, car on le sait, la chaux est thermoactive (Muzahim Al-Mukhtar, Abdelmadjid Lasledj, and Jean-Francois Alcover 2010).

3.1.1.2 COMPRESSION HUMIDE

La Figure 7 présente les différentes résistances à la compression observée pour les différentes teneurs en liant.

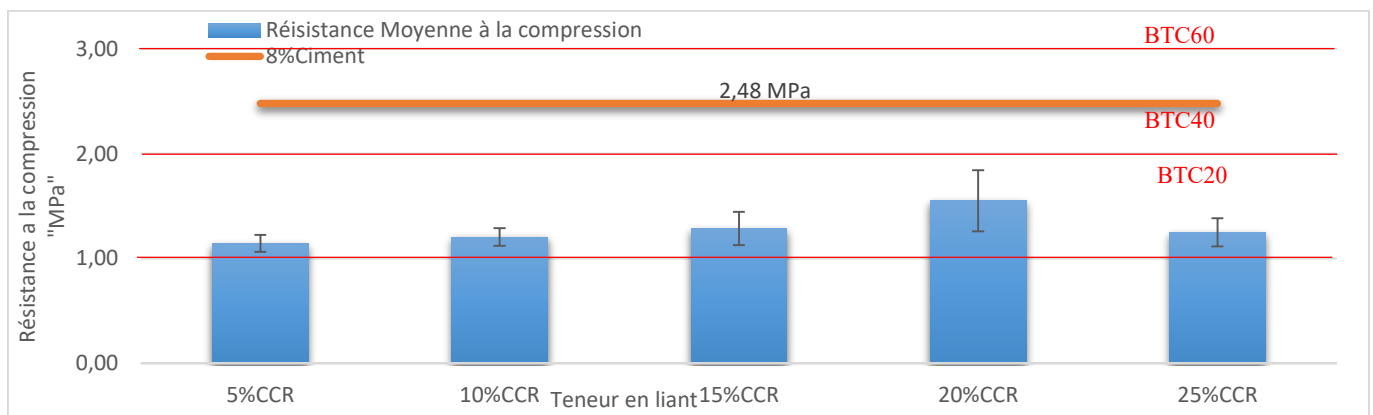


Figure 7: Représentation de la résistance à la compression humide après maturation à température ambiante

On remarque que comparativement aux échantillons stabilisés au ciment qui présentent une résistance moyenne à la compression de 2,48 MPa, les échantillons non stabilisés et ceux stabilisés au CCR présentent une résistance moindre. Mais parmi les échantillons stabilisés au CCR, l'optimum est observé cette fois-ci à 20%CCR. La valeur d'écart type pour cet optimum montre une certaine disparité entre les éprouvettes, cela s'explique par le fait que les valeurs de densité apparente de ces éprouvettes présentent à peu près le même écart. Néanmoins, ces résultats semblent acceptables du fait que même en tenant compte de ces effets, on aura toujours l'optimum qui se présentera à 20% CCR. Cette baisse de résistance est normale. Elle pourrait s'expliquer par le fait que l'eau s'infiltre dans les pores de la BTC et tend à écarter les particules ; ce qui crée des zones de fragilité. Mais notons que ces conditions (Immersion totale durant deux heures) ne sont rencontrées en réalité que dans des cas d'inondation.

Toutes les BTC stabilisées au CCR et maturées à température ambiante seraient de la classe BTC20. Les mêmes explications données précédemment pour la compression sèche sont valables pour la compression

humide. Les résultats sur les BTC non stabilisées n'y figurent pas du fait qu'elles ne tiennent pas en immersion (elles se désagrègent).

3.1.2 RÉSISTANCE À LA TRACTION INDIRECTE

Bien que les BTC travaillent d'habitude en compression, ce paramètre a quand même été évalué dans le cadre de cette étude. La Figure 8 présente les différentes résistances à la traction observée pour les différents teneurs en liant.

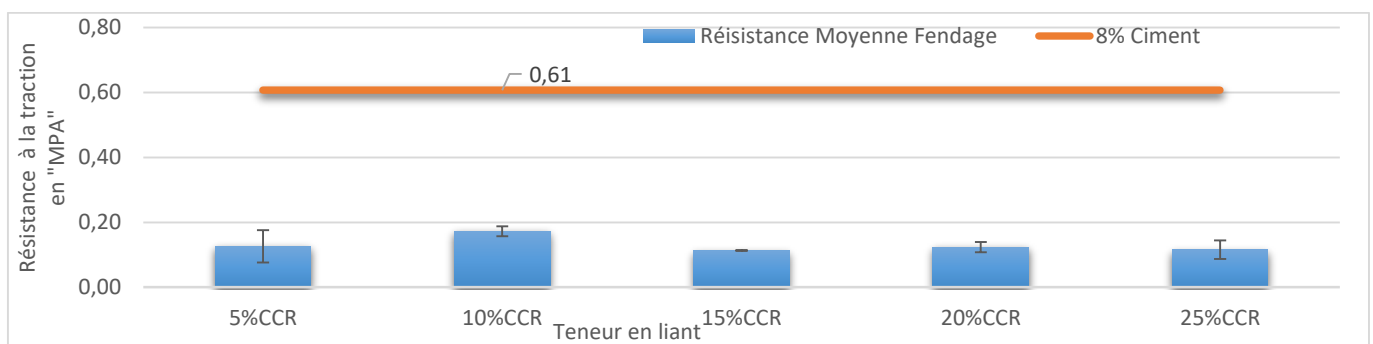


Figure 8: Représentation de la résistance à la traction après maturation à température ambiante

Comparativement aux échantillons stabilisés au ciment qui présentent une résistance moyenne à la traction de 0,61 MPa, les échantillons non stabilisés et ceux stabilisés au CCR présentent une résistance moindre. Parmi les échantillons stabilisés au CCR, l'optimum est observé à 10%CCR.

3.2 MATURATIONS À TEMPÉRATURES CONTRÔLÉES 20°C ET 40°C

3.2.1 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

3.2.1.1 MATURATION À 20 °C

La Figure 9 présente les différentes résistances observées à la compression pour les différents teneurs en liant et après maturation à 20°C. Sur les illustrations 2, 3 et 4 (en Annexe 1) du présent document, on représente les gains ou pertes relatives en résistance entre les deux conditions de maturation.

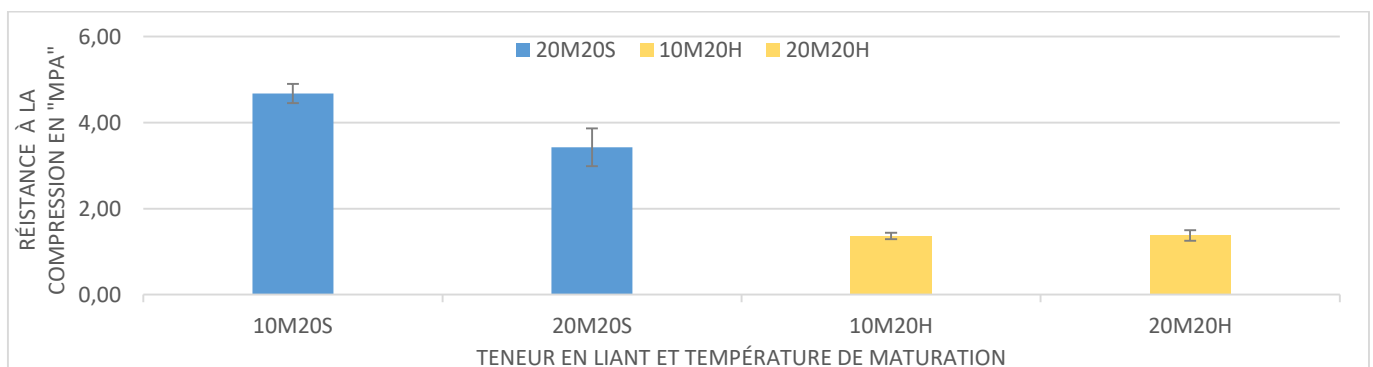


Figure 9: Représentation de la résistance à la compression après maturation à température de 20°C

On remarque que comparativement aux échantillons maturés à température ambiante, à la surprise générale, les échantillons maturés à une plus faible température présentent une meilleure résistance. Au moment des expérimentations et de la maturation, la température ambiante variait au cours de la journée entre 24 et 35°C. En temps normal, ces échantillons maturés à température ambiante présenteraient une meilleure résistance que ceux maturés à température plus faible (Muzahim Al-Mukhtar, Abdelmadjid Lasledj, and Jean-Francois Alcover 2010). la combinaison de plusieurs facteurs inhérents à la terre utilisée pour la formation des BTC (faible teneur en argile) expliquent ce phénomène. Dans (Reza Babazadeh, M. H. Ghobadi, and Y. Abdilor 2012), les auteurs montrent la corrélation de la réactivité de la chaux avec le pH. Selon (National Lime Association, 200 N. Glebe Rd., Suite 800, Arlington, VA 22203, 703.243.5463, Fax 703.243.5489, <http://www.lime.org>), le pH de la chaux en solution varie avec la température. La variation de la température entraîne celle du pH. La variation du pH est inversement proportionnelle à celle de la température (Reza Babazadeh, M. H. Ghobadi, and Y. Abdilor 2012) du fait qu'elle joue sur la solubilité de la chaux. Or la réaction entre l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte du CCR) et les minéraux argileux est fortement dépendante de la stabilité du pH, et elle est meilleure lorsque celle-ci est stable. Une maturation dans des conditions plus favorables entraîne logiquement des résultats plus favorables. Lorsque la température varie, elle joue sur les conditions de la réaction (PH) qui fluctue sur une plage de valeurs plus ou moins favorable. Au contraire, quand la température est quasiment constante, la réaction est meilleure. Quand sa valeur est basse ou haute, la chaux réagit avec les minéraux argileux ou la silice (quartz) pour former des CSH cimentaires (Reza Babazadeh, M. H. Ghobadi, and Y. Abdilor 2012). La chaux réagit avec le quartz de sol lorsque celle-ci n'est pas totalement cristallisée (SIDNEY DIAMOND, JOE L. WHITE, and W. L. DOLCH 1957). Notons que les CSH formés peuvent être de trois ordres (SIDNEY DIAMOND, JOE L. WHITE, and W. L. DOLCH 1957) que sont les CSH (gel) qui est moyennement sensible à l'eau ; le CSH (I) qui est sensible à l'eau et le CSH (II) qui est très sensible à l'eau.

La forte baisse de la résistance à la compression humide comparativement à celle à la compression sèche indique que dans le cas du matériau issu de Pabré, les CSH formés sont de classe I ou II..

3.2.1.2 MATURATION À 40°C

La Figure 10 présente les différentes résistances observées à la compression pour les différents teneurs en liant et après maturation à 40°C. Sur ce graphe, on représente aussi les résistances à température ambiante et les gains ou pertes relatives en résistance entre les deux conditions de maturation.

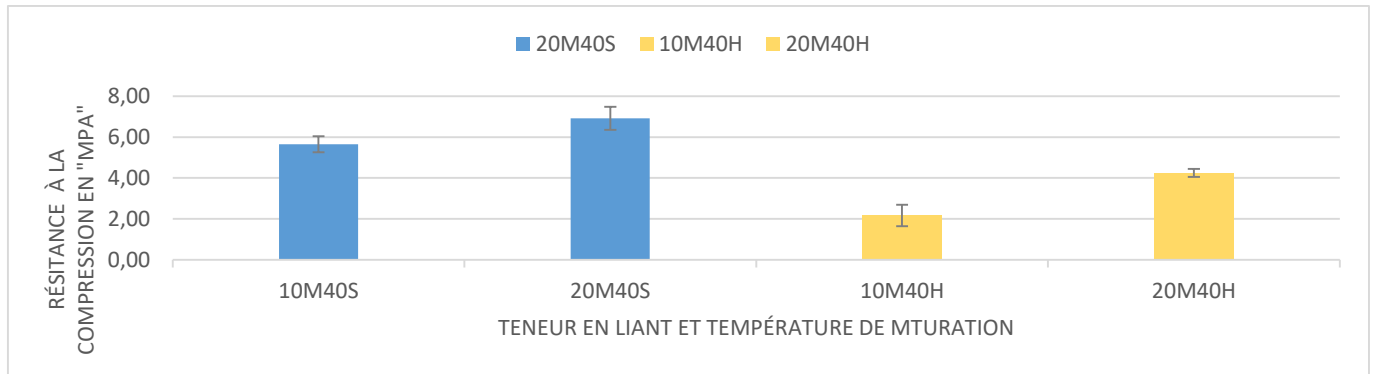


Figure 10: Représentation de la résistance à la compression après maturation à température de 40°C

On remarque que comparativement aux échantillons maturés à température ambiante, les échantillons maturés à température haute présentent une meilleure résistance. Ces résultats sont en conformité avec ceux trouvés au cours d'autres études telles que celle menées dans (Muzahim Al-Mukhtar, Abdelmadjid Lasledj, and Jean-Francois Alcover 2010). La baisse de la résistance à la compression humide comparativement à celle à la compression sèche (-50%) indique que dans le cas de ces échantillons, les composés cimentaires formés sont moins sensibles à l'eau. On peut attribuer ces fortes hausses de résistance (+66%) à la réaction du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec la silice (quartz). Toutes ces interprétations peuvent être confirmées par la valeur de la surface spécifique (Essai BET) et une XRD des échantillons matures.

3.2.2 RÉSISTANCE À LA TRACTION INDIRECTE

La Figure 11 présente les différentes résistances à la traction observée pour les différentes teneurs en liant.

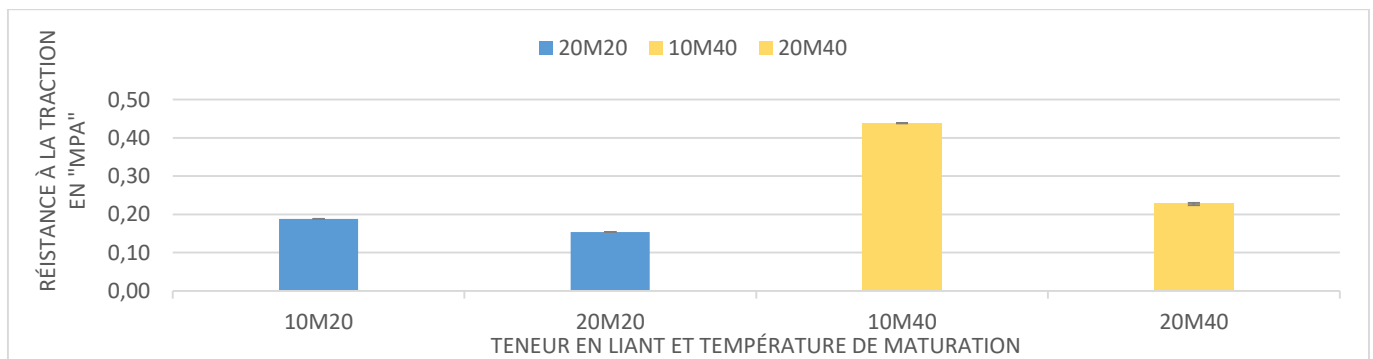


Figure 11: Représentation de la résistance à la traction après maturation à température contrôlée de 20 °C et 40 °C

On remarque que comparativement aux échantillons maturés à température ambiante, on observe une hausse généralisée des résistances à la traction pour les échantillons maturés à température contrôlée. Cette hausse est plus significative pour les échantillons maturés à 0°C, jusqu'à 61% en plus pour la teneur

optimale en CCR (10% CCR). Le contrôle de la température a considérablement amélioré la capacité de résistance des BTC.

3.3 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-THERMIQUES

3.3.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

3.3.1.1 ABSORPTION CAPILLAIRE, DENSITÉS ET POROSITÉS

La Figure 12, la Figure 13 et la Figure 14 présentent respectivement la sorption, la porosité totale et la porosité accessible à l'eau ainsi que la relation entre porosités - densité apparente des BTC en fonction de la teneur en liant. Les courbes de sorption sont représentées en Illustration 1 (en Annexe 1) du document.

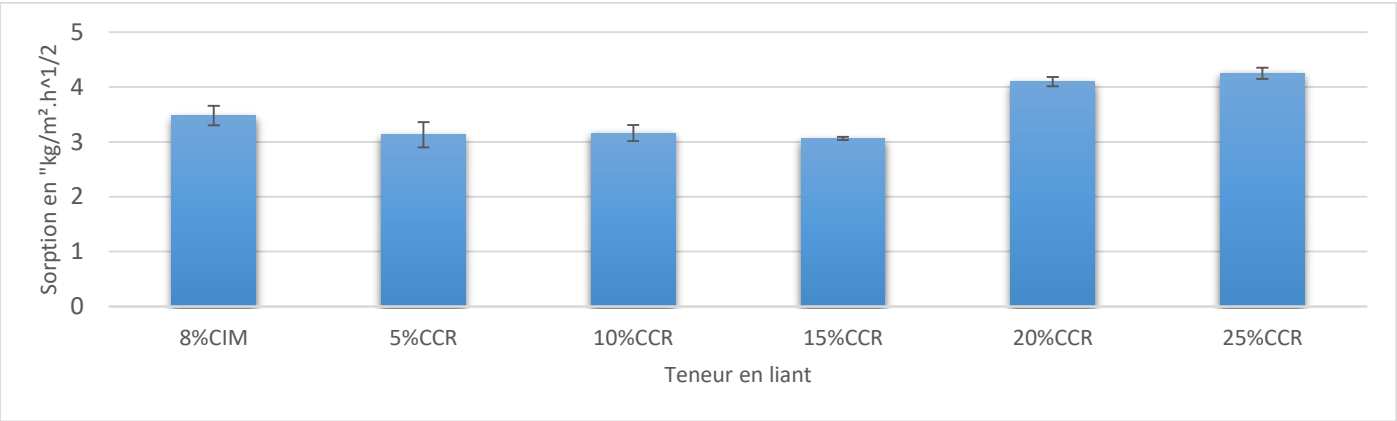


Figure 12: Sorption des échantillons de BTC

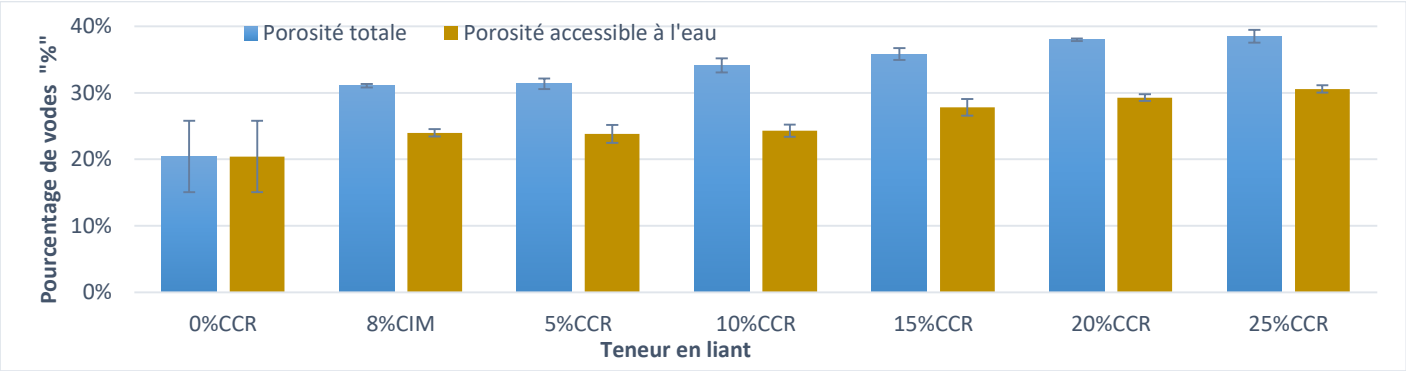


Figure 13: Porosités totales et accessibles à l'eau des échantillons de BTC

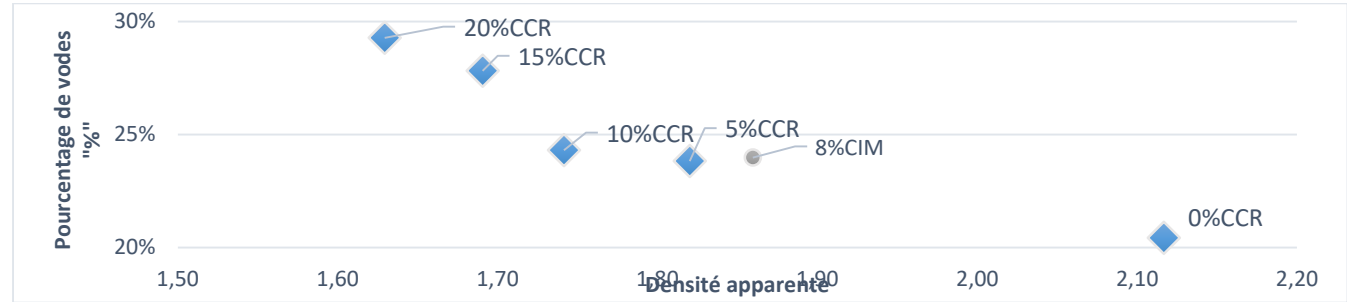


Figure 14: Porosités accessibles à l'eau fonction la densité apparente des échantillons de BTC

La sorptivité représente la vitesse d'absorption d'eau par capillarité par les BTC. Cette vitesse est d'autant plus que le diamètre des pores est grand (Franck Cassagnabère et al. 2011). Ainsi la sorption donne une idée sur l'évolution du diamètre moyen des pores par rapport aux différentes formulations. La porosité accessible à l'eau de l'ensemble des échantillons varie de 20 à 39 % alors que leur densité apparente évolue de 1,6 à 2,15. On observe également sur le graphique à la figure 32, une tendance relativement linéaire d'évolution de la porosité en fonction de la densité apparente. La porosité semblerait être inversement proportionnelle à la densité apparente, ce qui est logique du fait que plus la densité est grande, plus elle tend vers la densité spécifique des particules solides, ainsi donc le volume des vides tendrait à s'annuler. Le Tableau VIII présente l'évolution du diamètre des pores en fonction des formules. La formule contenant du ciment sert de référence. On remarque une sensible stagnation de ce diamètre entre 5% et 15% de CCR, ce qui veut dire que pour les BTC stabilisées à 5,10, et 15 % de ciment, le diamètre des pores est sensiblement le même, mais il reste inférieur à celui des BTC de référence stabilisées au Ciment. Cela confirme la tendance observée selon laquelle la teneur à 15% de CCR constituerait un palier ou un voisin de palier, ce qui entraîne des comportements assez atypiques de ces BTC. Mais au-delà, le diamètre tend à croître et devient de beaucoup, supérieur à celui de BTC de référence.

Tableau VIII: Évolution du diamètre des pores

ID	Sorption (kg/m ² .h ^{1/2})	Densité apparente (g/cm ³)	évolution diamètre des pores	Appréciation
8%CIM	3,5	1,86	0,00%	Référence
5%CCR	3,1	1,82	-10,06%	---
10%CCR	3,2	1,74	-9,08%	---
15%CCR	3,1	1,69	-11,97%	---
20%CCR	4,1	1,63	17,85%	+++
25%CCR	4,3	1,61	22,22%	++++

Le Tableau IX présente les valeurs du coefficient d'absorption capillaire des BTC stabilisées selon (AFNOR 2001), et les classe en conséquence.

Tableau IX: Coefficient de capillarité des BTC à 10 minutes

ID	Cb (g/(cm ² .min ^{1/2}))	Classement
8%CIM	9,72	BTC faiblement capillaire
5%CCR	12,36	BTC faiblement capillaire
10%CCR	10,16	BTC faiblement capillaire

15%CCR	7,23	BTC faiblement capillaire
20%CCR	10,77	BTC faiblement capillaire
25%CCR	9,94	BTC faiblement capillaire

3.3.1.2 COEFFICIENT D'ABRASION

Un des autres coefficients caractéristiques des BTC selon la même norme XP P13-901 d'AFNOR de 2001 serait le coefficient d'abrasion (C_a). La norme fixe des valeurs limites de coefficients d'abrasion (C_a). Elle est de 2 pour les BTC 20, de 5 pour les BTC 40 et de 7 pour les BTC 60. En deçà, la BTC serait trop sensible à l'abrasion, ce qui n'est pas acceptable. Le Tableau X présente les valeurs du coefficient d'abrasion des BTC stabilisées, et les classe en conséquence.

Tableau X: Coefficient d'abrasion C_a des BTC

ID	Coefficient d'abrasion C_a (cm ² /g)	Classement
REF	3,01	BTC 20
8%CIM	76,32	BTC 60
5%CCR	4,54	BTC 20
10%CCR	19,00	BTC 60
15%CCR	37,64	BTC 60
20%CCR	25,59	BTC 60
25%CCR	24,86	BTC 60

3.3.1.1 CAPACITÉ DE RETRAIT-GONFLEMENT

Le Tableau XI présente les valeurs maximales de retrait (valeurs positives) ou de gonflement (valeurs négatives).

Tableau XI: Valeurs de retrait-Gonflement

Formule	8% Ciment	0 % CCR	5 % CCR	10 % CCR	15 % CCR	20 % CCR	25 % CCR
Retrait-Gonflement (mm ³)	0,0	16,1	1,4	-0,1	0,1	0,0	0,0

En prenant en compte les quelques erreurs de mesure, on remarque qu'à partir de 10 % de stabilisation en CCR, les effets du CCR sur la stabilité du matériau sont très palpables. Quasiment aucun changement de dimension n'a été remarqué à ce niveau. Il en est de même pour la stabilisation à 8 % de ciment. À 5 % de CCR, la réaction sol-CCR n'est pas assez poussée, d'où cette valeur de retrait assez conséquente. Les échantillons non stabilisés présentent la pire valeur de cette série. Utiliser ces BTC non stabilisées en construction serait préjudiciable pour la structure du fait des fissurations qui pourraient être observées. Le retrait est dû à l'évaporation de l'eau non liée dans la matrice. Les grains solides se rapprochent et combler quelque peu le vide ainsi laissé. Dans le cas d'un matériau stabilisé au CCR, une partie l'eau qui était non liée en début de réaction entre dans la formation des CSH et CAH. Ces composés formés rendent plus cohérente la matrice de la BTC, d'où la fluctuation quasi nulle.

3.3.2 PROPRIÉTÉS THERMIQUES

La conductivité thermique des différentes formulations de BTC est représentée sur la Figure 155. Les figures 16 et 17 représentent les valeurs de diffusivité et de profondeur de pénétration des flux pour une période de 24 heures respectivement. La Figure 18 représente la relation entre diffusivité et densité apparente des BTC.

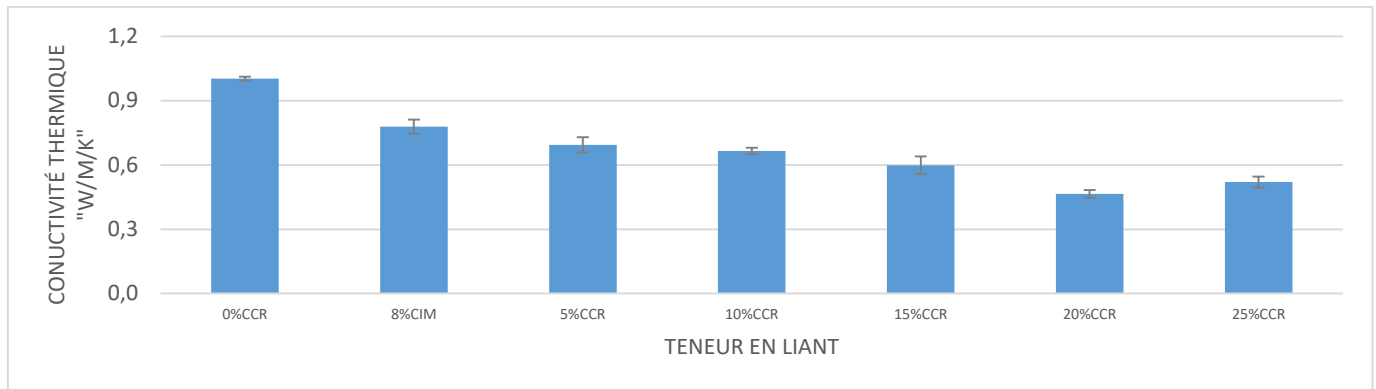


Figure 15: Valeurs de conductivité thermique selon les formules des BTC

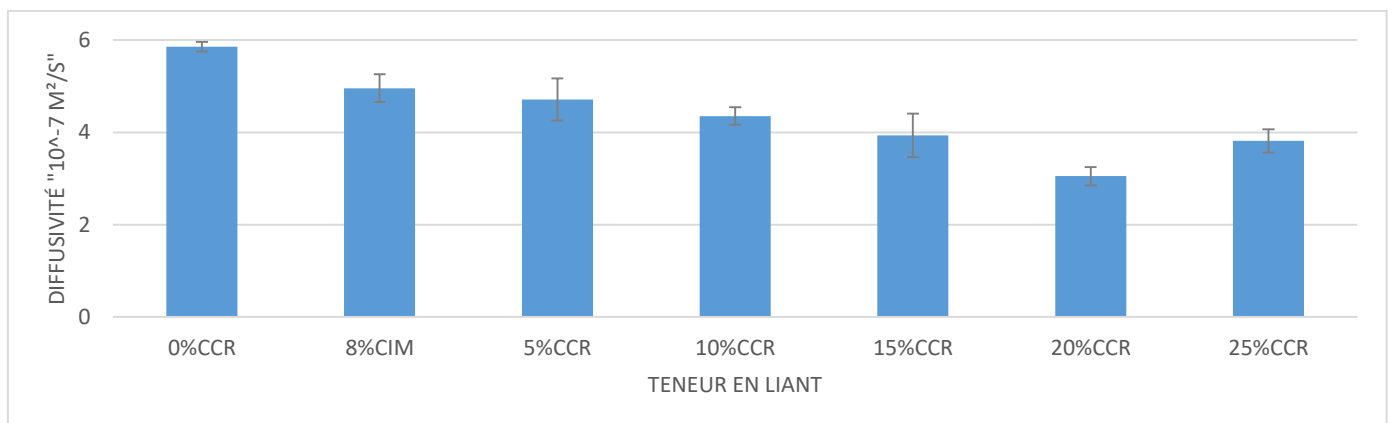


Figure 16: Valeurs de Diffusivité selon les formules des BTC

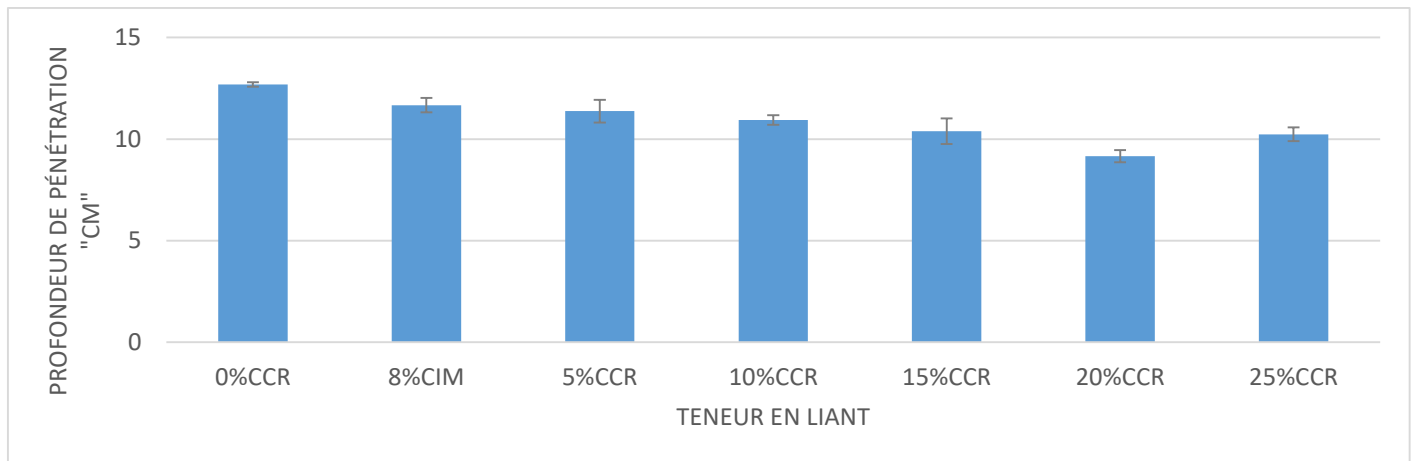


Figure 17: Valeurs de la profondeur de pénétration des flux selon les formules des BTC pour une période de 24H

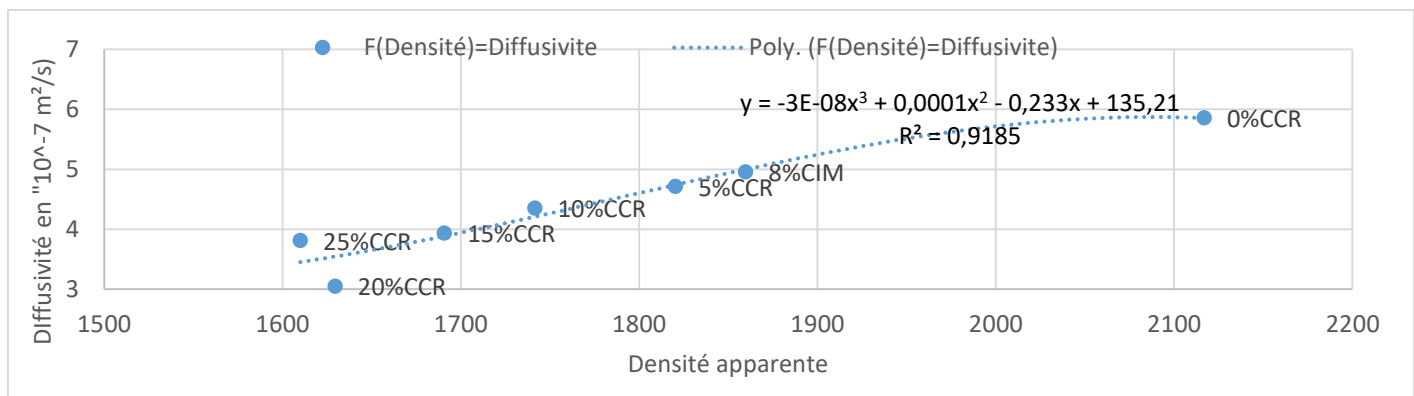


Figure 18: Évolution de la diffusivité en fonction de la densité apparente

Les échantillons non stabilisés présentent une conductivité moyenne d'environ 1 W/m.K alors que ceux ayant été stabilisés, qui ont des densités plus faibles, ont des conductivités qui varient de 0,47 à 0,78 W/m.K.. Connaissant les valeurs de la conductivité thermique ($2,10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), la masse volumique (2400 kg.m^{-3}) et celle de la capacité thermique ($850 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) des agglos en béton généralement utilisés en construction (Catalogue d'éléments de construction avec calcul de la valeur U Construction neuve, 2002), on calcule la diffusivité et la profondeur de pénétration des flux sur une période de 24 heures pour ces éléments. Les résultats donnent une diffusivité égale à $1,03.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et une profondeur de pénétration de 16,8 cm. Les valeurs maximales des paramètres mesurés (effusivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique, conductivité thermique et de profondeur de pénétration des flux) sont obtenues avec les BTC non stabilisées et celles stabilisées au ciment alors que les valeurs minimales, et donc plus favorables sont obtenues pour les BTC stabilisées au CCR. Notons aussi que les agglomérés en béton généralement utilisés en construction présentent des valeurs de Diffusivité et de profondeurs de pénétrations plus défavorables que celles des BTC. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la

masse volumique des matériaux entraîne une diminution de la porosité. Or on sait que plus le matériau est poreux, plus faibles sont sa conductivité et sa diffusivité thermique. Globalement, les BTC produites avec le matériau de Pabré, stabilisées au CCR ont de bonnes performances hygrothermiques. Elles présentent de meilleures valeurs comparativement aux BTC stabilisées au ciment et aux agglos en béton. Même si par ailleurs les performances mécaniques des BTC stabilisées au CCR sont inférieures à celles stabilisées au ciment. Elles représentent une solution meilleure que celle des BTC stabilisées au ciment pour les murs non porteurs (par exemple pour les bâtiments à un seul niveau). Elles permettront d'améliorer le confort thermique du bâtiment, et de réduire le poids mort de la structure.

3.4 ÉTUDE STATISTIQUE

Ce point a pour objectif d'analyser les résultats des mesures et essais d'un point de vue statistique, mais aussi d'évaluer le nombre d'heures d'inconfort avec le logiciel XEsoView. Cela pour déterminer la meilleure des formulations actuelles, et voir comment améliorer ses performances de façon optimale. On tentera aussi d'expliquer le comportement de la formule à 15% de CCR qui semble atypique. Pour pouvoir faire ce choix, il faudrait visualiser les résultats (variables) sur un espace à 18 dimensions. Techniquement, cela est impossible, mais une analyse par composante principale (ACP) permet de s'en approcher au mieux. Pour ce faire, le logiciel R a été utilisé. L'Illustration 16 (en annexe 4) montre une certaine corrélation entre certaines variables, mais aussi une certaine indépendance de certaines variables avec les autres. La dépendance entre variables est exprimée par une certaine tendance linéaire du nuage de point. Si au contraire les points se regroupent dans un coin, on acceptera que ces deux variables soient indépendantes. Une tendance linéaire du nuage de point montre une forte corrélation entre les variables représentées deux à deux. En revanche, un agglomérat ou une répartition qui semble être aléatoire montre une certaine indépendance des valeurs. Le tableau des corrélations en indique les valeurs moyennes. Entre autres dépendances, on peut citer : « Porosité-Densité apparente » ; « Résistance à la compression-Porosité ». Pour limiter le nombre d'axes factoriels au mieux, On regardera le graphique présenté à la Figure 19 et appliquera la méthode du coude.

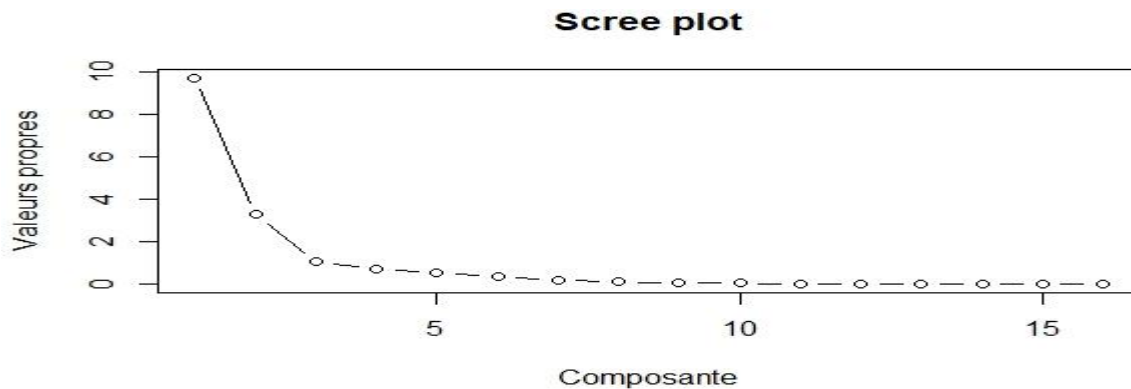


Figure 19: Éboulis des valeurs propres

En appliquant la méthode du coude, on se focalisera sur trois composantes qui semblent être principales, et qui restituent 88% de l'information totale disponible (en annexe 4)

Si l'on devait nommer les axes par rapport aux variables qui leur sont le plus fortement corrélées, les données (en annexe 4) guident vers le choix. La composante 1 serait liée aux performances thermiques, la composante 2, aux performances mécaniques, et la composante 3 à la capacité de retrait-gonflement. Les trois plans factoriels représentés par chacun des couples formés par ces axes deux à deux constituent une priorité dans la construction de chaque habitat en terre, mais dans cette étude, on se limitera au premier plan factoriel. Les autres plans seront quand même présentés en annexe 4 du document.

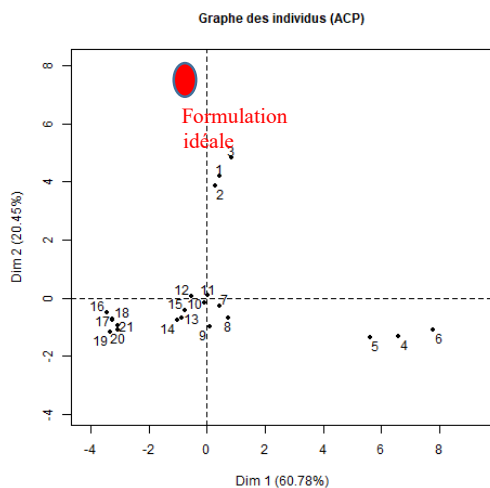


Figure 20: Individus au 1er plan factoriel

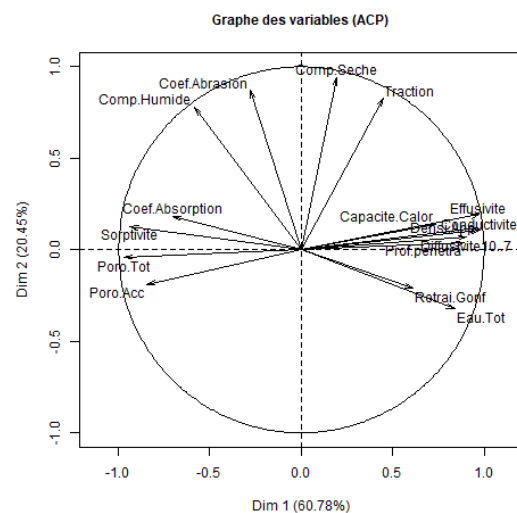


Figure 21: Variables au 1er plan factoriel

On remarque que les BTC non stabilisées (4, 5, 6) présentent globalement les pires performances du point de vue thermique et mécanique (en prenant en compte tous les aspects au mieux). Les BTC stabilisées au Ciment (1, 2, 3) présentent de bonnes performances mécaniques, mais du point de vue thermique, elles sont moyennement performantes. Les BTC stabilisées à plus de 19%CCR (16, 17, 18,

19, 20, 21) présentent les meilleures performances thermiques, mais sont peu performantes du point de vue mécanique. Le meilleur compromis est obtenu pour les BTC stabilisées à 15% de CCR (10, 11, 12). La question est à présent de voir comment améliorer le comportement mécanique, tout en perdant le moins du point de vue thermique. La meilleure position serait au niveau du point rouge sur le graphique. Ainsi pour améliorer la formulation, il faudrait jouer sur les paramètres qui animent les deux axes simultanément. Le graphe des variables permet de visualiser entre autres cette information. Ainsi on visualise que l'on doit jouer sur la résistance à la compression humide et la porosité. Comment améliorer la résistance à la compression humide, tout en augmentant la porosité ? Ceci représente une question qui pourrait faire l'objet d'une étude à part entière vu sa complexité, parce que les paramètres favorables à l'un sont défavorables à l'autre. Pour cela, une analyse de sensibilité pourrait aider. Mais hélas, beaucoup de données manquent pour la faire dans le cadre de cette étude. Mais la recherche continue. Néanmoins, une piste de solution existe à savoir le maintien la température de maturation haute et relativement constante. Cela a pour effet d'améliorer la résistance mécanique, mais en modifie pas la densité apparente des BTC.

Pour ce qui est de la simulation Thermo-climatique, les valeurs de conductivité thermique pour les éléments de comparaison en ciment ont été considérées comme standards et obtenu avec un catalogue en ligne.

(https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/energie/fichiers_pdf/catalogue_element_s_neufs.pdf).

Les figures 22 et 23 présentent le nombre d'inconfort obtenus avec la simulation. La figure 24 quant à elle présente le nombre d'heures d'inconfort chaud en moins par rapport matériau béton.

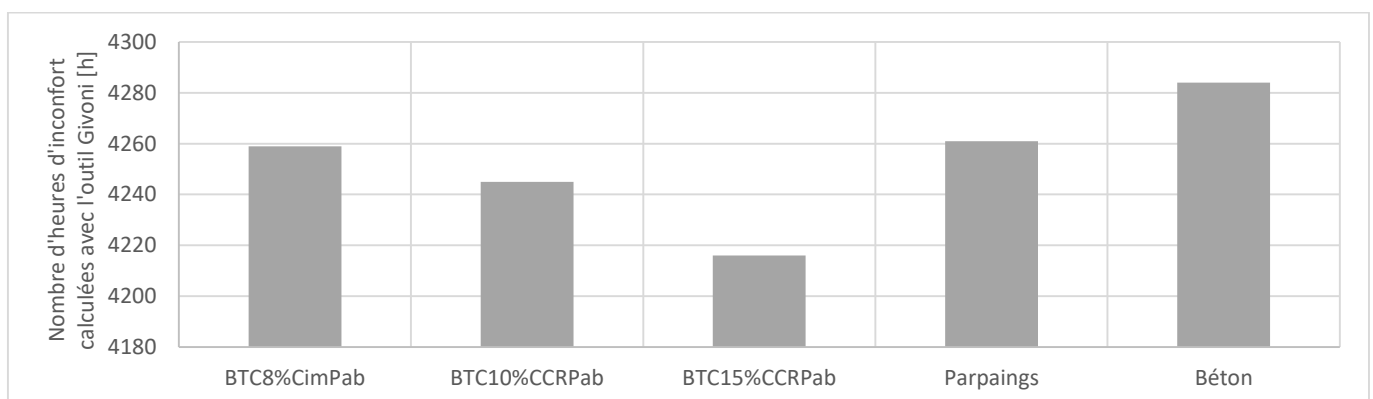


Figure 22: Nombre d'heures d'inconfort total

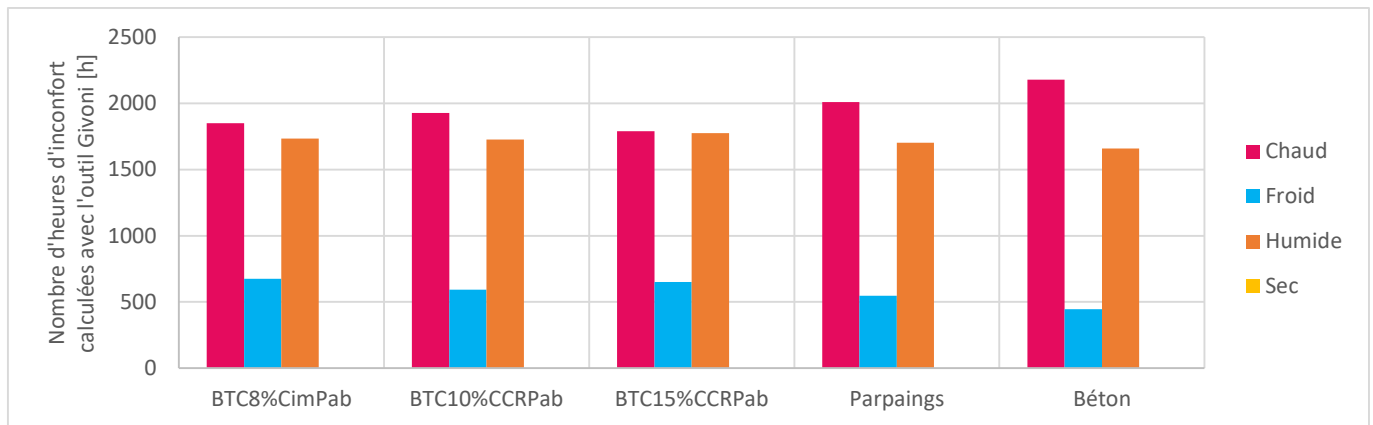


Figure 23: Nombre d'heures d'inconforts par type

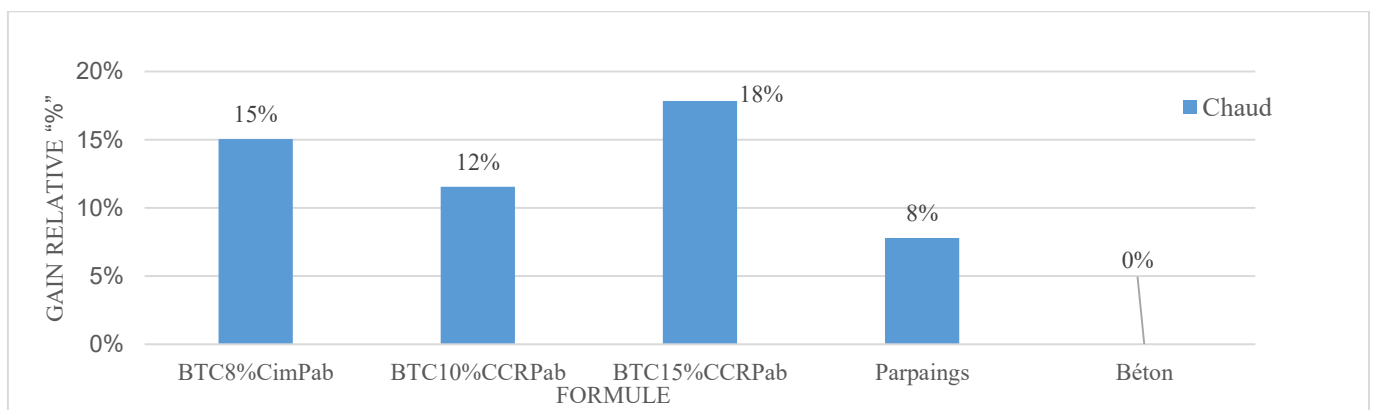


Figure 24: Diminution d'inconfort par rapport au béton

Selon les résultats de la simulation, un gain de 18% relativement au béton est observé, ce qui laisse présager de meilleurs rendements thermiques des BTC stabilisées au carbure de calcium résiduel et d'économie pour les usagers. Il est aussi important de noter que les BTC représentées sont produites avec des matériaux 100% locaux et qu'elles sont moins denses que le béton, ce qui est un avantage pour la construction.

3.5 CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de présenter dans un premier temps les matières premières utilisées, d'en déterminer les caractéristiques primordiales en vue de toute étude de stabilisation du matériau argileux. Deuxièmement, l'objectif était aussi de présenter, discuter et interpréter les résultats des expérimentations de mesure des paramètres d'usage des BTC. La caractérisation de ces matériaux a permis d'en déterminer la répartition granulaire, qui s'est présentée être assez étalée pour le CCR et pour le matériau argileux. La composition chimique qui a montré une prédominance d'oxyde de calcium dans le CCR et de silice et d'alumine pour les matériaux argileux. Pour ce qui est de la composition minéralogique, les

résultats montrent que le CCR est riche en portlandite (chaux éteinte) à hauteur de 43 %. La terre quant à elle présente une forte proportion de quartz à hauteur de 60 % et une proportion moyenne de minéraux argileux majoritairement de type Kaolinite (29 %). Les paramètres géotechniques ont permis de confirmer la stabilisation chimique à la chaux comme type de stabilisation qu'on a choisi, mais aussi les caractères de non tenu de la terre seule vis-à-vis de l'eau. D'un point de vue global, les BTC stabilisées au CCR présentent de meilleures caractéristiques mécaniques, et physico-thermiques que les BTC non stabilisées. En plus, le liant utilisé est un sous-produit industriel qui pourrait être valorisé. Du point de vue du confort thermique, les BTC stabilisées au CCR offrent de bonnes performances. Mais les BTC stabilisées au Ciment montrent la diminution des performances du point de vue thermique des BTC possiblement due à la formation des CSH en quantité. L'objectif est de trouver un compromis entre performance mécanique, et performances hygrothermiques. Pour répondre à cette préoccupation, justifier le comportement de la formule avec 15% de CCR et déterminer les différentes sensibilités et corrélations entre les paramètres calculés, on a essayé d'effectuer une analyse statistique. Cette formule offre un gain de l'ordre de 18% en terme de nombre d'inconfort chaud par rapport au béton.

V. CONCLUSION GENERALE

1. CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette étude était d'étudier les paramètres d'usage e BTC stabilisés à un sous-produit industriel, dont disposait le Burkina Faso. Plus spécifiquement, trois aspects ont été abordés :

- la caractérisation des matériaux utilisés dans le cadre de cette étude (Chapitre III : Section II),
- L'analyse et l'interprétation, des principaux résultats sur les paramètres d'usage des BTC (Chapitre III : Section III),
- L'étude sur les implications des paramètres mesurés et leurs corrélations (Chapitre III : Section IV),

Du point de vue géotechnique, les études de la carrière Pabré a montré que le matériau comprenait une grande proportion de fines, mais qui est plutôt limoneuse et a un comportement instable vis-à-vis de l'eau. Non pas qu'elle soit gonflante, mais elle se désagrège au contact de l'eau, malgré son haut indice de plasticité. Les études ont démontré aussi la nécessité d'une stabilisation pour pouvoir utiliser ce matériau en construction, car il présentait des caractères de non-tenu à l'eau et un fort indice de plasticité de l'ordre de 19. Le CCR a montré de bonnes performances en stabilisation en améliorant significativement les comportements mécaniques (passant de 2.6 à 3.4 MPa pour la résistance en compression sèche) et la tenue à l'eau du matériau .Avec le contrôle de la température, les BTC ont montré une réelle amélioration du point de vue des comportements mécaniques (jusqu'à 66 % de gain en résistance en compression sèche pour les BTC avec 20 % de CCR maturées à environ 40°C) Les BTC stabilisées au CCR ont également montré de bonnes performances thermiques (conductivité basse jusqu'à 0,40 W/m/K pour les BTC avec 20% de CCR). L'analyse statistique a permis de faire ressortir la corrélation entre les différents paramètres d'usage et a donné des indices sur les directions d'amélioration des comportements souhaités. Au final, on retiendra que les BTC stabilisées au CCR présentent de très bonnes performances du point de vue thermique, mais des résistances mécaniques plus faibles que celle des BTC et agglos au ciment. Les BTC de classe BTC20 peuvent être utilisées pour la construction de murs non-porteurs de moins d'un étage de haut. On gagnera du point de vue du confort et de l'économie d'énergie. La simulation thermo-climatique a aussi montré que les BTC stabilisée au CCR présentaient de meilleurs rendements thermiques que les autres matériaux classiques utilisés au Burkina Faso. La combinaison entre la terre argileuse de Pabré et le CCR présente plusieurs avantages non négligeables.

2. RECOMMANDATION ET PERSPECTIVES

À la lumière de cette étude, les recommandations sont formulées pour les recherches ultérieures à poursuivre ou à entreprendre :

- ✓ Étendre la recherche sur d'autres utilisations du CCR, par exemple en stabilisation de construction routière en y étudiant les avantages et désavantages du CCR sur les couches de chaussées, comparativement au ciment utilisé d'habitude.
- ✓ Une étude supplémentaire des variations du pH et des températures sur la qualité de la stabilisation afin de mieux maîtriser l'influence de ces paramètres moteurs pour la stabilisation et en tirer les conditions les plus favorables.
- ✓ Étendre les études pour décrire précisément les sensibilités entre les différents paramètres d'usage, en tirer des corrélations mathématiques afin de formuler, selon les résultats que l'on souhaite avoir, la meilleure BTC.
- ✓ Il est nécessaire de vérifier à long terme le comportement des BTC stabilisées en effectuant des simulations mathématiques des comportements des BTC avec la méthode des éléments finis par exemple. Ceci, dans le but de mieux maîtriser les matériaux utilisés en construction.

VI. BIBLIOGRAPHIE :

- A. P'Kla. 2002. "Caractérisation En Compression Simple Des Blocs de Terre Comprimée (BTC): Application Aux Maçonneries" BTC-Mortier de Terre." Building and Construction materials, Villeurbanne: INSA.
- Abdelhadi EL HACHMI. 2013. "Argile et minéraux argileux : propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés colloïdes." Chimie Fondamentale, Maroc: Université Abdelmalek Essaadi.
- AFNOR. 1992. *Connaissance et Essais-Analyse Granulométrique Des Sols-Méthode Par Sédimentation*. Saint-Denis La Plaine.
- . 1993. *Sols: Reconnaissance et Essais-Détermination Des Limites d'Atterberg-Limite de Liquidité À La Coupelle-Limite de Plasticité Au Rouleau*. Saint-Denis La Plaine.
- . 1996. *Sols: Reconnaissance et Essais-Analyse Granulométrique Par Tamisage À Sec Après Lavage*. Saint-Denis La Plaine.
- . 1999. *Reconnaissance et Essais – Détermination Des Références de Compactage D'un Matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor Modifié*. Saint-Denis La Plaine.
- . 2001. *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons Définitions — Spécifications — Méthodes d'essai — Conditions de réception*. Saint-Denis La Plaine Cedex: AFNOR.
- AFPC - AFREM. 1997. *Durabilité Des Bétons - Mesure de L'absorption D'eau Par Capillarité*.
- B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker. 2014. "Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers." Building and Construction materials. Doi:10.1016. doi.
- CABANE, Nicolas. 2004. "Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation." Génie des procédés. Tel-00010521.
- D. Mourand. 2011. "Contrôle Non Destructif et Caractérisation Thermique - Dispositif d'Estimation de Propriétés Thermique (DEsProTherm)." *Essai Pour Béton Durci - Essai de Porosité et de Masse Volumique*. 2010.
- F. Michel, and L. Courard. 2014. *Particle Size Distribution of Limestone Fillers: Granulometry and Specific Surface Area Investigations*. Part. Sci. Technol.
- Franck Cassagnabère, Mohamed Lachemi, Michel Mouret, and Gilles Escadeillas. 2011. "Caractérisation Performantielle D'un Liant Ternaire À Base de Ciment, Laitier et Métakaolin." Génie Civil.
- H. Houben. 1998. *Serie Technologies No. 11, Blocs de Terre Comprime*. Brux. CRAterreEAG ISBN.
- IDRRIM. 2015. *Norme NF EN 459 : Chaux de Construction*.
- Kiki, Tankpinou. 2016. "Caractérisation Minéralogique, Thermique et Microscopique Des Sols Fins En Technique Routière." PhD Thesis.
- M. Olivier, A. Mesbah, Z. El Gharbi, and J.C. Morel. 1997. "Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée." Building and Construction materials. 1652.
- Muzahim Al-Mukhtar, Abdelmadjid Lasledj, and Jean-Francois Alcover. 2010. "Behaviour and mineralogy changes in limetreated expansive soil at 50°C." Applied Clay Science. 50 (2010) 199–203. ELSEVIER.
<https://www.researchgate.net/publication/229112336>.
- NEDJAH A. RAOUF, Djoudi A. Krim. 2015. "Stabilisation des sols gonflants." Master en Géotechnique, Algérie: Université SOUK AHRAS.
- Philbert Nshimiimana, David Miraucourt, Adamah Messan, and Luc Courard. 2018. "Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash for Improving the Compressive Strength of Compressed Earth Blocks." 10.1557/adv.2018.147. Materials Research Society.
- Reza Babazadeh, M. H. Ghobadi, and Y. Abdilor. 2012. "Stabilization of Clay Soils Using Lime and Effect of pH Variations on Shear Strength Parameter." Géotechnique. ResearchGate.

- S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller. 1938. "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers." J. Am. Chem. Soc.
- Seick Omar SORE. 2017. "Synthèse et caractérisation des liants géopolymères à base des matériaux locaux du Burkina Faso en vue d'une stabilisation des Briques en Terre Comprimées (BTC)." Building and Construction materials. 2iE/2017-07. CDI.
- SIDNEY DIAMOND, JOE L. WHITE, and W. L. DOLCH. 1957. "TRANSFORMATION OF CLAY MINERALS BY CALCIUM HYDROXIDE ATTACK by." Génie des procédés.
- Suksun Horpibulsuk, Chayakrit Phetchuay, Avirut Chinkulkijniwat, and Arnon Cholaphatsorn. 2012. "Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash." Soils and Foundations. www.sciencedirect.com. www.elsevier.com/locate/sandf.
- Taha Jawad, Ibtehaj, Mohd Raihan Taha, Zaid Hameed Majeed, and Tanveer A. Khan. 2014. "Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative." *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 8 (4): 510–20. <https://doi.org/10.19026/rjaset.8.1000>.

ANNEXES

ANNEXES

LISTE DES ILLUSTRATIONS EN ANNEXES

Illustration 1: Courbe de Sorption.....	54
Illustration 2: Gains en résistance à la compression après maturation à 20 °C	54
Illustration 3: Gains en résistance à la compression après maturation à 40 °C	55
Illustration 4: Gain en résistance à la traction	55
Illustration 5: Structure d'une couche tétraédrique et/ou octaédrique (Abdelhadi EL HACHMI 2013)	56
Illustration 6: Structure d'un feuillet de kaolinite (Abdelhadi EL HACHMI 2013)	56
Illustration 7: Structure des minéraux de la famille des micas (l'illite) (Abdelhadi EL HACHMI 2013)..	56
Illustration 8: Fuseaux granulaires et de plasticité des matériaux recommandés pour les BTC (H. Houben 1998)	56
Illustration 9: Argile quartée et tamisée et Carbure de calcium résiduel séché, broyé et tamisé.....	56
Illustration 10: Localisation des sites de carrières argileuses et de CCR utilisés	57
Illustration 11: Dispositif de détermination de la capillarité des échantillons de BTC	58
Illustration 12: Dispositif pour l'essai d'abrasion(M. Olivier et al. 1997)	58
Illustration 13: Dispositif de test des résistances mécaniques	58
Illustration 14: Dispositif de fendage (M. Olivier et al. 1997)	58
Illustration 15: Mesure des propriétés thermiques des échantillons de BTC en utilisant DesProTherm...	59
Illustration 16: nuage de points de représentation des variables entre elles	60
Illustration 17: Coordonnées factorielles de variables	61
Illustration 18: Contributions des variables à la construction des axes factoriels	61
Illustration 19: Qualité de représentation des variables ($\cos^2$).....	62
Illustration 20: Graphe des individus dans le second plan factoriel	62
Illustration 21: Graphe des Variables dans le second plan factoriel	62
Illustration 22: Graphe des individus dans le troisième plan factoriel.....	63
Illustration 23Graphe des variables dans le troisième plan factoriel	63

1. ANNEXE 1 : PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES

Cette annexe présente essentiellement les graphiques apportant une information complémentaire pour plus détailler les propriétés physico-mécaniques et leurs implications. Elle présente plus spécifiquement les courbes de sorption et celle des gains relatifs avec les conditions de maturation étudiés.

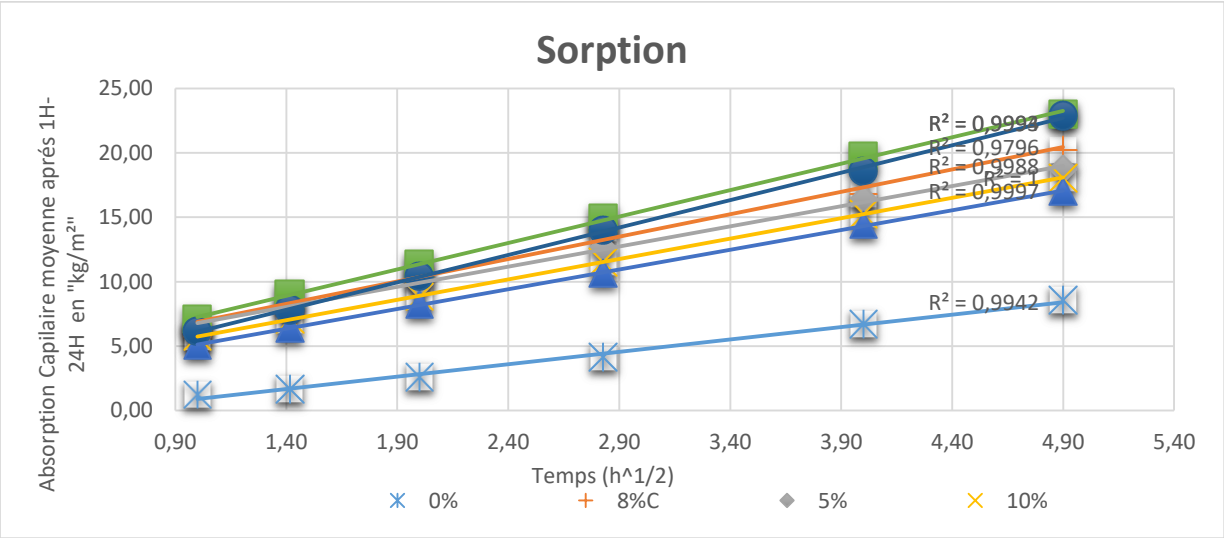


Illustration 1: Courbe de Sorption

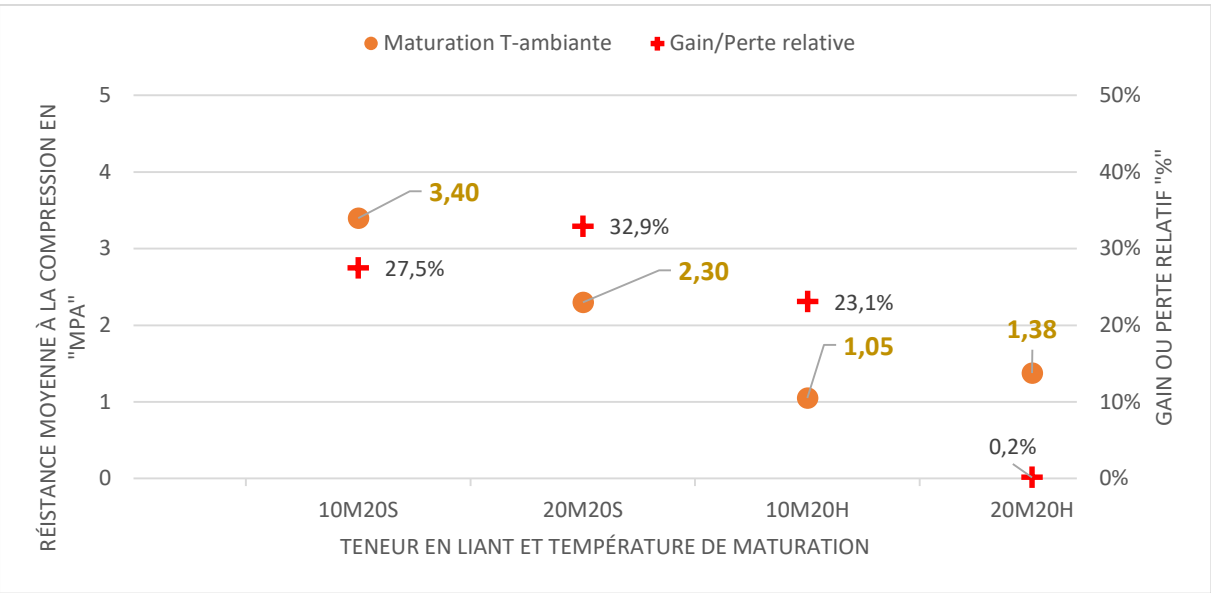


Illustration 2: Gains en résistance à la compression après maturation à 20 °C

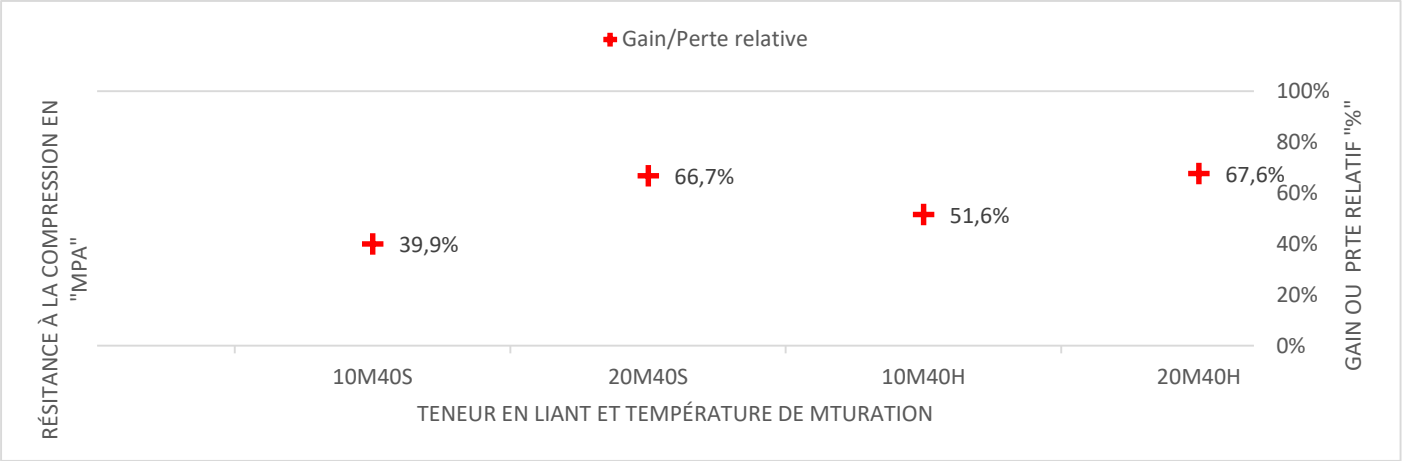


Illustration 3: Gains en résistance à la compression après maturation à 40 °C

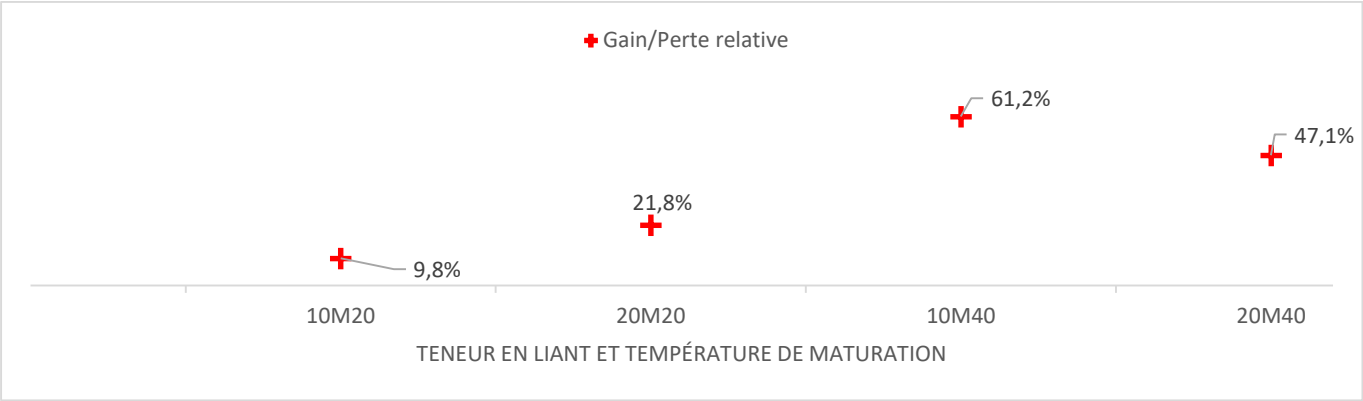


Illustration 4: Gain en résistance à la traction

2. ANNEXE 2 : MINÉRALOGIE ET CRITÈRES DE CHOIX DES MATÉRIAUX POUR BTC

Cette annexe présente essentiellement les structures minéralogiques des argiles rencontrées dans le matériau de Pabré, et les critères de permettant de choisir les meilleurs matériaux pour la fabrication de BTC. Cette annexe présente également la localisation des carrières utilisées dans le cadre de cette étude et les aspects des matières premières.

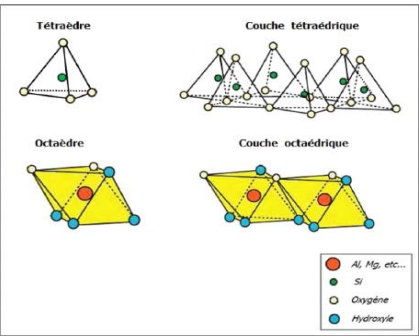


Illustration 5: Structure d'une couche tétraédrique et/ou octaédrique (Abdelhadi EL HACHMI 2013)

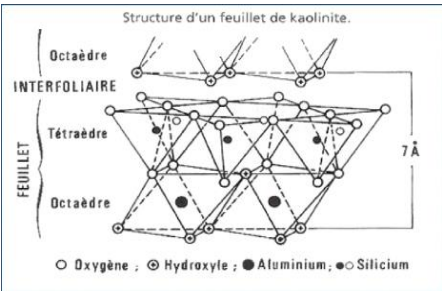


Illustration 6: Structure d'un feuillet de kaolinite (Abdelhadi EL HACHMI 2013)

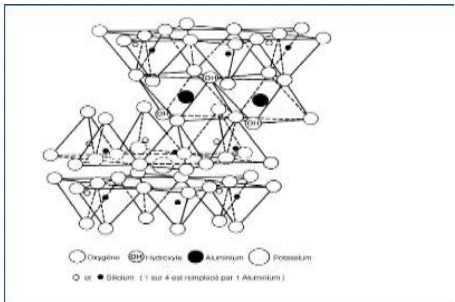


Illustration 7: Structure des minéraux de la famille des micas (l'illite) (Abdelhadi EL HACHMI 2013).

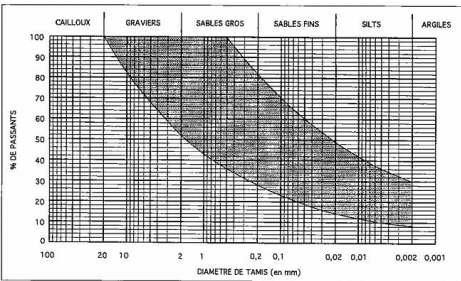


Figure (a)

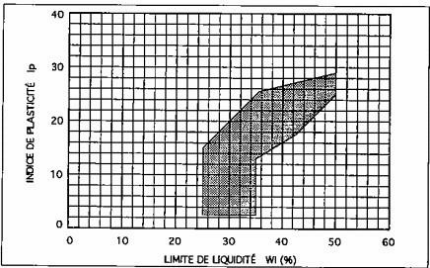


Figure (b)

Illustration 8: Fuseaux granulaires et de plasticité des matériaux recommandés pour les BTC (H. Houben 1998)



Illustration 9: Argile quartée et tamisée et Carbure de calcium résiduel séché, broyé et tamisé

Localité de Pabré-KADIOGO-BURKINA FASO

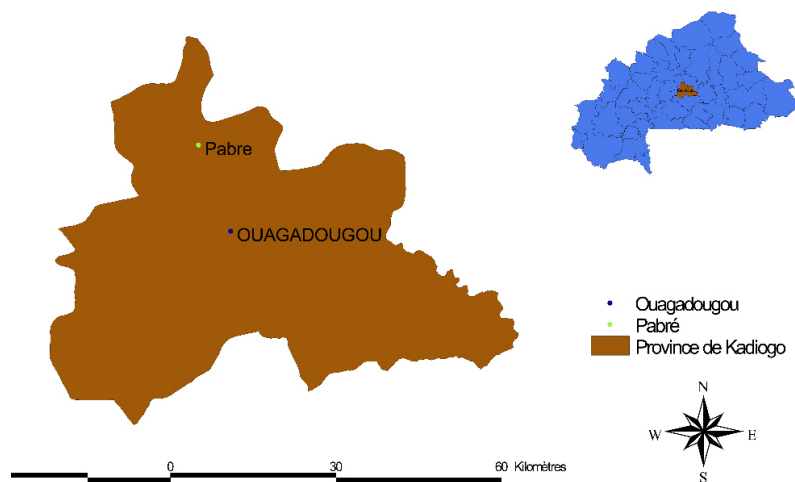


Illustration 10: Localisation des sites de carrières argileuses et de CCR utilisés

3. ANNEXE 3 : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Cette annexe présente essentiellement les principaux dispositifs expérimentaux utilisés au cours des expérimentations de cette étude. Les bancs d'essai et de manipulation pour les principales mesures sont présentés ici

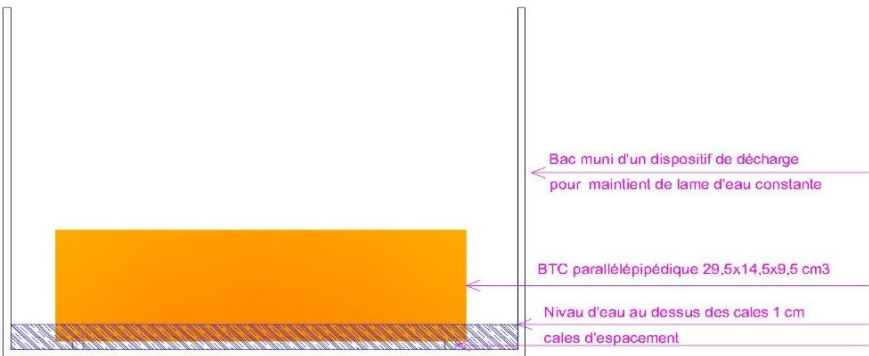


Illustration 11: Dispositif de détermination de la capillarité des échantillons de BTC

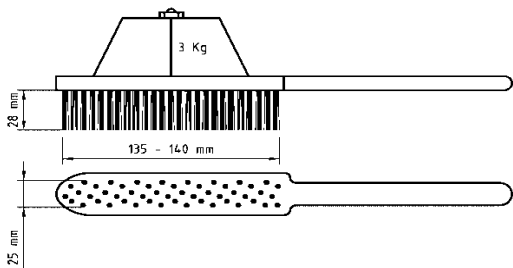


Figure (a)

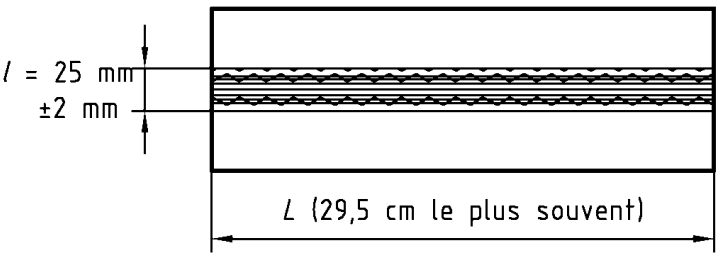


Figure (b)

Illustration 12: Dispositif pour l'essai d'abrasion(M. Olivier et al. 1997)

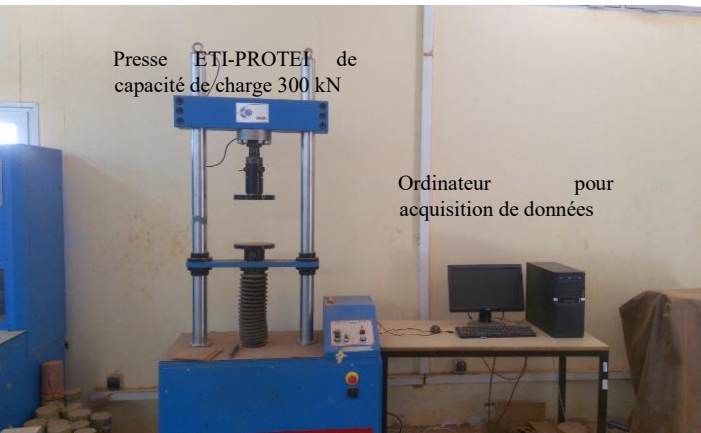


Illustration 13: Dispositif de test des résistances mécaniques

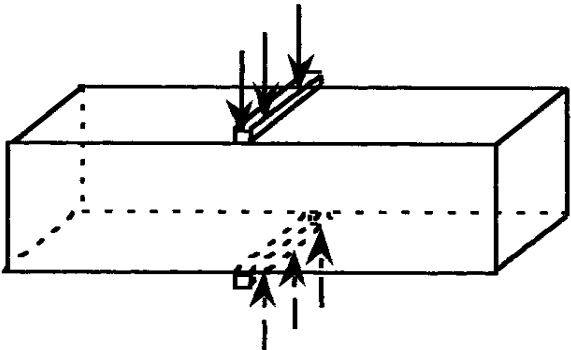


Illustration 14: Dispositif de fendage (M. Olivier et al. 1997)



Illustration 15: Mesure des propriétés thermiques des échantillons de BTC en utilisant DesProTherm

4. ANNEXE 4 : ANALYSE DE DONNÉES

Cette annexe présente essentiellement les illustrations aidant à mieux comprendre notre analyse par composante principale sur l'illustration 16, les variables sont représentées deux à deux.

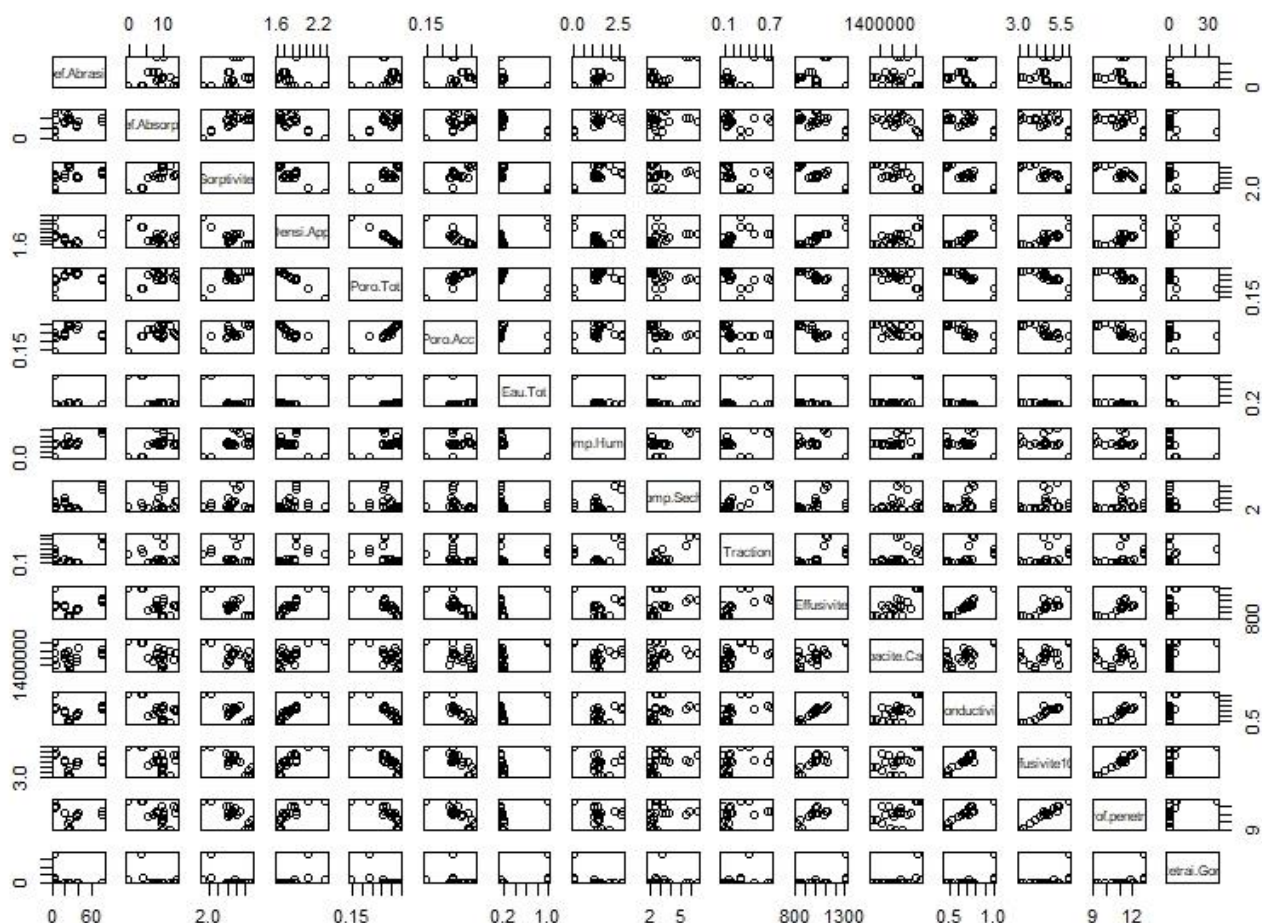


Illustration 16: nuage de points de représentation des variables entre elles

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Coef.Abrasion	-0.28	0.87	0.23	-0.16	-0.15
Coef.Absorption	-0.70	0.18	-0.38	0.44	0.34
Sorptivite	-0.94	0.13	0.12	0.10	-0.01
Densi.App	0.96	0.12	-0.06	-0.12	0.04
Poro.Tot	-0.97	-0.04	0.05	0.13	-0.04
Poro.Acc	-0.84	-0.19	0.34	0.19	-0.14
Eau.Tot	0.84	-0.32	0.37	-0.05	0.00
Comp.Humide	-0.58	0.78	-0.05	-0.02	0.05

Comp.Seche	0.19	0.94	-0.02	0.13	0.03
Traction	0.45	0.83	0.25	0.09	-0.10
Effusivite	0.97	0.19	0.02	0.05	-0.01
Capacite.Calor	0.74	0.14	0.28	-0.09	0.54
Conductivite	0.98	0.10	-0.08	0.10	-0.06
Diffusivite10..7	0.90	0.07	-0.30	0.17	-0.14
Prof.penetra	0.89	0.04	-0.34	0.18	-0.16
Retrai.Gonf	0.61	-0.21	0.48	0.55	-0.03

Illustration 17: Coordonnées factorielles de variables

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Coef.Abrasion	0.81	23.31	5.15	3.70	4.13
Coef.Absorption	5.06	1.04	13.85	26.91	21.95
Sorptivite	8.99	0.49	1.34	1.46	0.02
Densi.App	9.57	0.42	0.30	1.89	0.39
Poro.Tot	9.64	0.05	0.26	2.38	0.38
Poro.Acc	7.32	1.09	10.73	5.26	3.70
Eau.Tot	7.21	3.22	12.75	0.39	0.00
Comp.Humide	3.52	18.55	0.26	0.06	0.40
Comp.Seche	0.38	27.19	0.05	2.36	0.19
Traction	2.04	21.04	5.81	1.03	2.12
Effusivite	9.70	1.13	0.02	0.35	0.02
Capacite.Calor	5.57	0.57	7.68	1.22	57.09
Conductivite	9.83	0.33	0.68	1.27	0.66
Diffusivite10..7	8.41	0.15	8.72	4.12	3.79
Prof.penetra	8.15	0.04	10.98	4.72	5.01
Retrai.Gonf	3.81	1.36	21.42	42.89	0.16

Illustration 18: Contributions des variables à la construction des axes factoriels

Variable	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Coef.Abrasion	0.08	0.76	0.05	0.03	0.02
Coef.Absorption	0.49	0.03	0.15	0.19	0.11
Sorptivite	0.87	0.02	0.01	0.01	0.00
Densi.App	0.93	0.01	0.00	0.01	0.00
Poro.Tot	0.94	0.00	0.00	0.02	0.00
Poro.Acc	0.71	0.04	0.11	0.04	0.02
Eau.Tot	0.70	0.11	0.13	0.00	0.00
Comp.Humide	0.34	0.61	0.00	0.00	0.00
Comp.Seche	0.04	0.89	0.00	0.02	0.00
Traction	0.20	0.69	0.06	0.01	0.01
Effusivite	0.94	0.04	0.00	0.00	0.00
Capacite.Calor	0.54	0.02	0.08	0.01	0.30
Conductivite	0.96	0.01	0.01	0.01	0.00
Diffusivite10..7	0.82	0.01	0.09	0.03	0.02
Prof.penetra	0.79	0.00	0.12	0.03	0.03
Retrai.Gonf	0.37	0.04	0.23	0.31	0.00

Illustration 19: Qualité de représentation des variables ($\cos^2$)

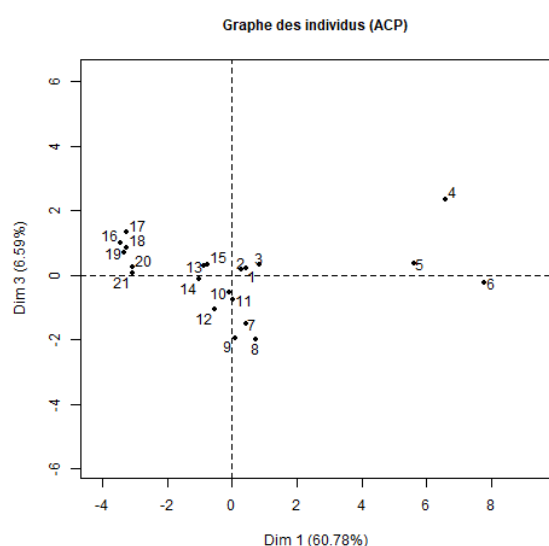


Illustration 20: Graphe des individus dans le second plan factoriel

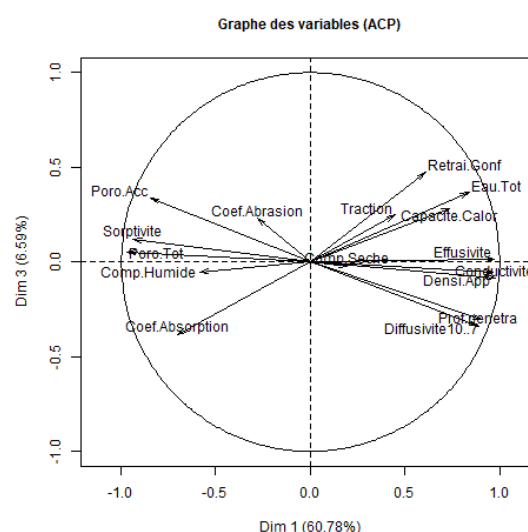


Illustration 21: Graphe des Variables dans le second plan factoriel

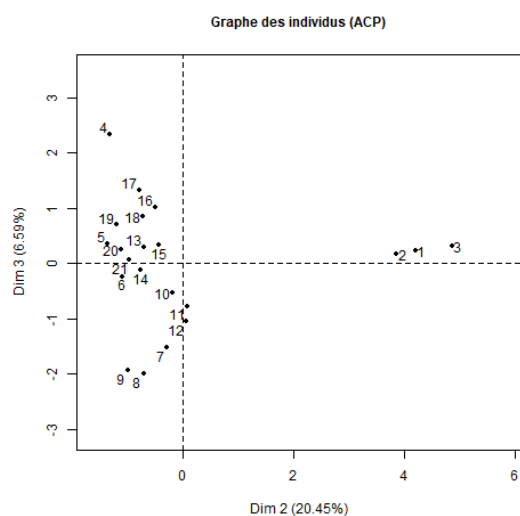


Illustration 22: Graphe des individus dans le troisième plan factoriel

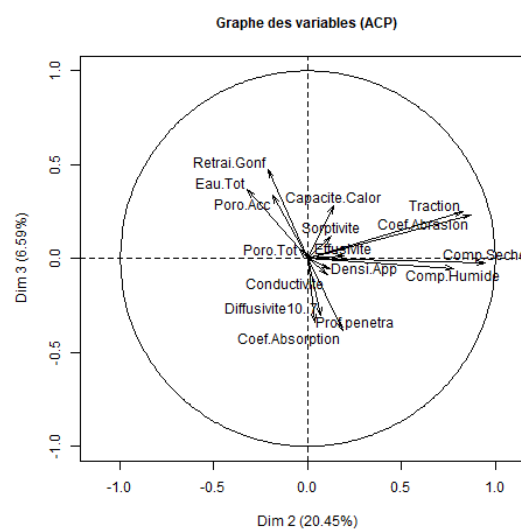


Illustration 23: Graphe des variables dans le troisième plan factoriel