



**ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MULTICRITÈRE
DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PLUS
COURANTS SUR LE MARCHÉ DE OUAGADOUGOU.
(Burkina Faso)**

Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2ie avec grade de master

Spécialité : GÉNIE CIVIL

Option : Routes et Ouvrage d'Art

Présenté et soutenu publiquement le 4 juillet 2019 par

Kodjo Dodji GBEDEMA (2013 1425)

Directeur de mémoire : Pr Adamah MESSAN, maitre de conférences CAMES

Jury d'évaluation du stage :

Président : M. Abdourazackou SANOUSSI

Membres et correcteurs : M. Césaire HEMA

M. Arnaud OUEDRAOGO

Promotion 2018/2019



DÉDICACE

À l'Éternel, créateur de l'univers pour tous les bienfaits dont il m'a fait grâce.

*À mon père M. GBEDEMA Komlavi Agbeko T. j'aimerais que vous receviez ici tout le témoignage
de mon profond respect, car sans votre confiance, cette œuvre aurait été inexistante...*

*À ma mère ADJISSEKOU Afiwavi Berthe, j'adresse toute ma gratitude pour son soutien et ses
prières.*

CITATION

« Courage doesn't always roar.
Sometimes courage is the quiet voice at the end of the day saying,
'I will try again tomorrow.' »

Mary Anne Radmacher

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut International de l'Eau, de l'Énergie et de l'Environnement (2IE), et la Haute École d'ingénierie et de gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD, Suisse). Nous avons pu bénéficier d'accompagnement, en déplacement, au transport des matériaux et participer à des ateliers de formations. Nous présentons à ces institutions nos sincères remerciements.

L'aboutissement de ce document a été possible grâce au concours de personnes de bonne volonté que nous voulons mentionner ci-dessous ; veuillez trouver ici, l'expression de toute notre reconnaissance.

- Le professeur Adamah MESSAN responsable, du laboratoire éco matériaux et habitats durables(LEMHaD) pour sa disponibilité durant toute ma formation.
- Monsieur Arnaud OUEDRAOGO, ingénieur de recherche au Laboratoire éco matériaux et habitats durables (LEMHaD)
- Monsieur Salifou KABORE, opérateur d'essais au Laboratoire éco matériaux et habitats durables (LEMHaD)
- Monsieur Mahamadou Zi, le directeur général de la structure ZI-MATERIAUX pour sa bonne volonté à nous fournir toutes les informations et pour la collaboration de son personnel.
- Mlle Gaëlle TALLANDIER, pour son concours à l'avancement de ce mémoire.
- Claude Boris AMOUGOU, ancien étudiant du 2ie en génie électrique et énergétique.
- Jérôme EBOE, pour sa présence inconditionnelle, et la motivation constante.

Merci pour vos encouragements...

RÉSUMÉ

Plusieurs études menées sur les briques en terre comprimée, les adobes, les briques en latérite ont permis de valider leur utilisation comme matériaux de remplissage dans les structures de bâtiment au Burkina Faso en dehors des parpaings (briques de ciment). L'étude de ces matériaux vise à connaître leur niveau de présence sur le marché de la construction à Ouagadougou par la recherche des paramètres essentiels entrant dans le cadre du confort thermique et la durabilité des futurs édifices.

La conductivité thermique des Briques de latérite taillée tourne autour de $0,83 \text{ W/m.K}^{-1}$; elle est de l'ordre de $0,98 \text{ W/m.K}^{-1}$ pour la Brique en Terre comprimée dosée à 15 % de ciment, de 0,94 pour celle à 8 %. Les mesures indiquent une conductivité thermique moyenne de $0,77 \text{ W/m.K}^{-1}$ au niveau des parties faites de mortier, pour les parpaings. Les essais sur l'adobe portent la valeur de la conductivité à 0,66.

Au niveau de l'absorption, celle des BLT varie de 18,7 à 23 % alors les parpaings sont dans la gamme de 7,95 à 14,32 %. Le coefficient d'absorption capillaire des BTC est compris entre 14 et 20 %.

La résistance en compression moyenne pour les blocs de parpaings produits industriellement est de 6,10 MPa et de 0,83 MPa pour ceux issus du secteur informel. La résistance en compression des briques en terre comprimée est de 5 MPa et pour les briques de latérites taillées elle vaut 3 MPa. L'adobe a une résistance de 2 MPa.

La brique latéritique de Dano a une résistance en flexion de 1,84 MPa alors que celle de la BTC dosée à 8 % de ciment est de 1,50 MPa. Les briques latéritiques issues de la carrière de Boassa ont une résistance en flexion de 0,61 MPa, tandis que les BTC stabilisées à la chaux ont une résistance de 0,54 MPa. La dernière partie des travaux effectués dans le cadre de ce mémoire est consacrée à l'analyse du cycle de vie des matériaux.

Mots Clés :

- 1 - Adobe
- 2 - BLT
- 3 - BTC
- 4 - Confort thermique
- 5 - Analyse du cycle de vie

ABSTRACT

Several studies conducted on compressed earth bricks, adobes, laterite bricks have validated their use as filler materials in building structures in Burkina Faso. In addition to cinder blocks (cement bricks), the study of these materials aims to determine their level of presence on the construction market in Ouagadougou by looking for essential parameters within the framework of thermal comfort and the durability of buildings.

From the thermal point of view, the conductivity of the BLT revolves around 0.83 W/m.K^{-1} , is of the order of 0.98 W/m.K^{-1} for the CESB dosed at 15% of cement, of 0.94 for that at 8%. As for concrete blocks in general, measurements indicate 0.77 W/m.K^{-1} when Adobes show 0.66 W/m.K^{-1} for thermal conductivity. These results are essentials for the planning concerning future buildings, thermal comfort. Absorption studies show BLT results in range from 18.7 to 23% while cement blocks are in the range of 7,95 to 14.32%. The result of absorption of CESB is found between 14 and 20%.

The mechanical study, found that on average, the compressive strength of industrial cement blocks is 6,10 Mpa, while it is 0.83 for the blocks bought from the market. CESB blocks show 5 Mpa, and Lateritic Sharpened Blocks, 3 Mpa. The strength of adobes in compression is 2 Mpa.

In lateritic bricks, particularly BLT from Dano with 1.84 Mpa, are more resistant than 8% of cement dosed BTC, which has a bending strength of 1.50 Mpa. The bending strength of lateritic bricks from the Boassa Quarry is 0.61 Mpa. The strength of lime BTC is 0.54 Mpa.

Keywords:

- 1 -Adobes
- 2 - Lateritic Sharpened Blocks
- 3 - Compressed Earth Stabilized Block
- 4 - Thermal Comfort
- 5 - Life Cycle Analysis

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BLT: Briques latéritiques taillées

BTC : Briques en Terre comprimée

ACV : Analyse de cycle de vie

CED_{NRE} : Cumulative Energy Demand Non-Renewable Energy

CED : Cumulative Energy Demand

GWP : Global Warning Potential

SOMMAIRE

DÉDICACE	ii
CITATION.....	iii
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	ii
LISTE DES FIGURES	iii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	3
I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	6
I.1. Présentation de la zone d'étude.....	6
I.2. Généralités sur les matériaux courants pour réaliser des enveloppes de bâtiments à Ouagadougou	8
I.2.1. Présentation des matériaux locaux ou appropriés	8
I.2.2. L'adobe ou brique de terre crue	10
I.2.3. La brique de latérite taillée (BLT).....	11
I.2.3.1. Définition.....	11
I.2.3.2. La Brique de latérite taillée (BLT) et l'habitat au Burkina Faso	13
I.2.4. La Brique de Terre comprimée (BTC)	13
Utilisation de la brique de terre comprimée	17
I.2.5. Le parpaing/aggloméré de ciment	17
I.2.5.1. Matériaux et matériels	19
I.2.5.2. Mode opératoire.....	19
II. MATÉRIELS ET MÉTHODES	21

**ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MULTICRITÈRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PLUS
COURANTS SUR LE MARCHÉ DE OUAGADOUGOU (Burkina Faso)**

II.1. Propriétés thermiques des matériaux	21
II.1.1. Procédure de détermination	21
II.1.2. Conductivité Thermique	21
II.1.3. Effusivité Thermique	22
II.1.4. Diffusivité thermique	22
II.1.5. Résistance thermique	23
II.1.6. La capacité thermique ou chaleur spécifique :	23
II.2. Propriétés hydriques des matériaux	23
II.2.1. Essai de détermination de l'absorption d'eau par capillarité	23
I	24
I.2.1.1 Expression des résultats	25
II.2.2. Essai de Saturation par immersion	25
II.2.3.1. Mode opératoire	26
II.3. Propriétés mécaniques des matériaux	26
II.3.1. Détermination de la résistance en compression simple des différents matériaux	26
II.3.1.1. But de l'essai	26
II.3.1.2. Principe de l'essai	26
II.3.2. Détermination de la résistance à l'essai de flexion en trois points des différents matériaux	29
II.3.2.1. But de l'essai	29
II.3.2.2. Principe de l'essai	29
III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	30
III.1. Paramètres thermiques	30
III.2. Paramètres physiques	30
III.2.1. Essai de l'absorption capillaire	30
III.2.1.1. Cas des parpaings	31
III.2.1.2. Cas des BLT	33

**ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MULTICRITÈRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PLUS
COURANTS SUR LE MARCHÉ DE OUAGADOUGOU (Burkina Faso)**

III.2.2. Essai de porosité des parpaings	35
III.3. Propriétés mécaniques des matériaux	36
III.3.1. Résistance à la compression sèche	36
III.3.1.1. Résistance à la compression des adobes	36
III.3.1.2. Résistance à la compression des Briques Latéritiques Taillées:	37
III.3.1.3. Résistance à la compression des briques de terre comprimée	37
III.3.1.4. Résistance à la compression des parpaings.....	38
III.3.2. Résistance à la flexion en trois points :	38
III.3.3. Récapitulatif des propriétés mécaniques des matériaux.....	39
III.4. Étude sur l'analyse du cycle de vie de la BTC (ACV/BTC)	39
III.4.1. Introduction et objectifs de l'étude	39
III.4.2. Définition de l'ACV	40
III.4.3. Méthodes retenues pour l'estimation et l'exploitation des données.....	40
III.4.4. L'analyse par le calcul des paramètres pertinents pour l'analyse du cycle de vie (ACV) ...	41
III.4.5. Matières premières utilisées	41
III.4.6. Unité fonctionnelle	42
III.4.7. Frontières du système	42
III.4.8. Qualité des données calculées	43
III.4.9. Méthodes d'évaluation des impacts.....	43
III.4.10. Inventaire du cycle de vie	44
III.4.11. Période d'enregistrement et représentativité des données	44
III.4.12. Besoins en matières premières et en consommables	44
III.4.13. Besoins en énergie pour le site de production	45
III.4.14. Distances et modes de transport des matières premières.....	45
III.4.15. Déchets de production et émissions de polluants dans l'air et l'eau	45

**ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MULTICRITÈRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PLUS
COURANTS SUR LE MARCHÉ DE OUAGADOUGOU (Burkina Faso)**

III.4.16. Processus exclus des frontières du système.....	45
III.4.17. Étape de fin de vie des produits.....	46
III.4.18. Inventaire pour l'étape d'élimination	48
III.4.19. Évaluation des impacts environnementaux et interprétations	48
III.4.20. Fabrication et élimination.....	49
III.4.21. Répartition des impacts de fabrication	49
III.4.22. Répartition pour la BTC-8%.....	49
III.4.23. Répartition pour la BTC-12%.....	50
III.4.24. Répartition des impacts d'élimination.....	51
III.4.25. Conclusion partielle.....	52
CONCLUSION.....	53
BIBLIOGRAPHIE.....	54
ANNEXES.....	56
Annexe 1 : Résultats des Essais Résistance en compression des BLT de DANO	I
Annexe 2 : Résultats des Essais Résistance en compression des BLT de BOASSA.....	I
Annexe 3 : Résultats des Essais Résistance en compression de La Brique en Terre comprimée (BTC) dosée à 8 % en ciment.....	I
Annexe 4 : Résultats des Essais de résistance en compression de l'adobe du barrage de Kamboinse .	II
Annexe 5 : Résultats des Essais de résistance en compression de l'adobe de la carrière à Kamboinse	II
Annexe 6 : Résultats des Essais pour déterminer la résistance à la compression des parpaings Nina Construction	III
Annexe 7 : Résultats des Essais pour déterminer la résistance à la compression des parpaings Zi Matériaux	III
Annexe 7 : Résultats des Essais de résistance des agglomérés creux d'épaisseur 15 cm (YACOUBA)	I

**ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MULTICRITÈRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PLUS
COURANTS SUR LE MARCHÉ DE OUAGADOUGOU (Burkina Faso)**

Annexe 8 : Résultats des Essais de résistance des agglomérés creux d'épaisseur 15 cm (GAGRE et Frères).....	I
Annexe 9 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BLT de DANO.....	I
Annexe 10 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BLT de BOASSA.....	I
Annexe 11 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BTC dosé à 7 % de chaux	I
Annexe 12 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BTC à 8 % de ciment	I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quantité de matériaux par type de brique	15
Tableau 2 : Dimension des agglomérés et leur domaine d'utilisation	18
Tableau 3 : Rendement en briques par paquet de ciment	19
Tableau 4 conductivité, effusivité et diffusivité thermiques des matériaux	30
Tableau 5 : Récapitulatif de l'absorption des différents types de parpaings	32
Tableau 6 : Récapitulatif de l'absorption des blocs latéritiques	33
Tableau 7 : Récapitulatif des paramètres de porosité sur les parpaings	35
Tableau 8 Récapitulatif des propriétés mécaniques des matériaux	39
Tableau 9 : données entrant en considération pour l'ACV	41
Tableau 10: inventaire des flux pour la fabrication de la brique de terre comprimée dosée à 12 % de ciment.....	47
Tableau 11 : Inventaire du flux pour l'élimination des produits pur (pir) et pur premium, suisse.....	48
Tableau 12 : Résultats des impacts environnementaux	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de l’extension de Ouagadougou de 1956 à nos jours	8
Figure 2 : Confection de briques d’adobe (Photo personnelle).	11
Figure 3 : Répartition des couvertures latéritiques à la surface du globe, Nahon,2003.	12
Figure 4 : Équipements de préparation de la terre de confection de BTC	17
Figure 5 : Parpaing industriel (bloc de béton)	20
Figure 6 : Parpaing artisanal (local).....	20
Figure 7 : Schéma de principe de l’essai d’absorption par capillarité	24
Figure 8 : Principe de la pesée hydrostatique	25
Figure 9 Schémas du principe de l’essai de compression simple	28
Figure 10 : Essai de flexion	29
Figure 11 : graphique d’évolution de l’absorption des parpaings.....	32
Figure 12 : Graphique d’évolution de l’absorption des BLT.....	34
Figure 13 : Essai de porosité accessible à l’eau	36
Figure 14 : Résistance en compression minimale admissible pour les BTC <i>Source</i> :(CANAS, 2012) ..	38
Figure 15 Présentation d’un fournisseur de parpaings en production artisanale	38
Figure 16 Résistances en flexion de la BTC et la BLT.....	38
Figure 17 : Étape de conception du cycle de vie d’un bâtiment	40
Figure 18 : aspect final et mise en œuvre des briques de terre comprimée	42
Figure 19 : Schéma simplifié des procédés à l’œuvre dans l’étape de fabrication des BTC	44
Figure 20 : Contribution relative des procédés de fabrication pour chacun des indicateurs	50
Figure 21 : Contribution relative aux impacts des principaux flux pour la fabrication de la btc-12%....	51
Figure 22 : Contribution relative aux impacts des principaux flux pour l’élimination des BTC	51

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Bien que tardivement entré dans le processus d'urbanisation, le continent africain a vu s'accélérer de façon impressionnante la croissance de ses villes. Près du tiers de la population africaine vivait en ville en 1990 contre seulement 14,5 % au début des années cinquante et des projections des Nations Unies, prévoit que d'ici à 2030, plus de la moitié des Africains résidera en zone urbaine. Bien que les rythmes se soient aujourd'hui essoufflés, la plupart des capitales croissent encore au rythme d'environ 4 % par an, ce qui signifie un doublement de leur population en moins de 20 ans, conduisant à une véritable explosion démographique notamment dans les pays du sahel où la population urbaine pourrait se multiplier par dix en 40 ans.

Le Burkina Faso, pays de l'Afrique occidentale, d'une superficie d'environ 274 200 km², comptait, selon les projections de l'INSD, environ 17,88 millions d'habitants en 2014.

La croissance en général sur le continent africain s'accompagne de grands challenges à relever pour améliorer les conditions de vie des populations. Le déficit de logements et d'infrastructures décentes et adaptés fait partie des défis majeurs. L'extension spatiale des agglomérations suscite de multiples problèmes de voirie, de transport, de logement, d'alimentation en eau et en électricité, sans parler des problèmes liés à l'occupation anarchique des espaces. Dans la ville de Ouagadougou, il existe des quartiers issus d'une agglomération formelle et planifiée avec des habitations modernes contrairement à des zones montrant une absence de planification, où la disposition spatiale des habitats est le plus souvent précaire, faiblement équipés dominés par un style de construction dont le matériau de base est la terre. (SANOU et All, 1986)

Le premier texte réglementaire qui régit les terrains et le logement, c'est la loi 77/60/AN de juillet 1960 modifiée huit ans plus tard par la loi 68/47/PRES de novembre 1968. Ces textes qui étaient une reproduction des dispositions coloniales en la matière avaient reconnu le droit foncier coutumier parallèlement, au droit de type moderne. Une crise du logement a eu lieu dans les années 1970 et a atteint au long des années suivantes des niveaux explosifs, qui n'a pu être atténuée ou retardée que par la prise d'assaut des zones non loties qui représentaient en 1980 déjà 60 % de la superficie de la ville et près de 50 % de la population totale (Les enjeux des extensions urbaines à Ouagadougou, BURKINA FASO 1984-1990, 1990).

Conscient du rôle moteur des villes pour le développement des pays et aussi du fait que ce rôle moteur n'est assumé que dans la ville maîtrisée, l'état burkinabé s'est engagé en 1996 comme les autres états du monde à relever les défis urbains consignés dans l'agenda pour l'habitat de 1996 dont les deux (2) principaux étaient de : - parvenir au « logement convenable pour tous » : doter leurs populations des moyens d'acquérir un logement salubre, garanti, sécurisé, accessible et abordable, muni par ailleurs du confort, des installations et des équipements sanitaires élémentaires, entièrement compatibles avec les

normes en vigueur en matière de droits de l'homme ; - Opérer des « aménagements des zones d'habitation viables » : développer auprès de leurs communautés respectives les possibilités d'exploitation raisonnable des ressources disponibles en adéquation avec les charges des écosystèmes et à assurer à l'ensemble de leurs populations, en particulier aux groupes vulnérables et défavorisés, l'égalité des chances de jouir d'une vie salubre, sécurisée et productive en harmonie avec leur cadre naturel, leur patrimoine culturel et leurs valeurs spirituelles et culturelles... (Rapport Final de l'Elaboration Du Rapport National Habitat III Du Burkina Faso, Mars 2015)

Dans ce contexte où la demande explose dans le secteur du bâtiment au Burkina Faso, les entreprises de la place doivent mettre sur le marché, des matériaux de construction adaptés au contexte local, bon marché et de qualité.

Une évaluation quantitative et qualitative des différents types de matériaux employés lors de la réalisation d'édifices à Ouagadougou (Burkina Faso) s'impose en vue de constituer une base d'information sur différents éléments et propriétés particulières des matériaux en cours d'emploi.

La présentation des matériaux en fonction de leur appréciation par les constructeurs et les différents acteurs du marché de la construction pour comprendre les perceptions par rapport aux produits disponibles et une approche de mise en valeur des autres produits à travers des études comparatives des performances propres et des analyses pour une meilleure utilisation des matériaux dans les conditions appropriées. Les domaines d'utilisation, définis et intégrés aux bases de données relatives au confort thermique des matériaux, dont les paramètres d'utilisation ont déjà été bien définis fournissent le cadre nécessaire pour une planification de la construction, telle que les nouvelles technologies le permettent.

Pour réaliser des bâtiments durables, des études du cycle de vie des bâtiments s'imposent ; « L'énergie consommée par les bâtiments pour le chauffage, l'éclairage et la climatisation représente 85 % des effets [sur l'environnement] qu'un bâtiment aura au cours de son cycle de vie. Ces effets ne sont pas seulement causés par l'utilisation directe de l'énergie, mais comprennent aussi les répercussions liées à la production de cette énergie. L'utilisation d'énergie fossile (mazout, gaz naturel, etc.) pour le chauffage des bâtiments et la production d'électricité ont des répercussions importantes sur l'environnement et la santé humaine. Par exemple, la combustion d'énergie fossile produit du dioxyde de carbone (CO₂), un gaz à effet de serre aggravant la problématique des changements climatiques. Les conséquences potentielles des changements climatiques (élévation du niveau de la mer, inondation

côtière, sécheresse, migration des maladies et insectes, etc.) touchent les collectivités du monde entier »(Montréal)

Notre étude se portera sur quatre matériaux de réalisation des enveloppes de bâtiment, à savoir les adobes, les parpaings, les BTC et les BLT suivant trois aspects bien distincts tels que les paramètres thermiques, hydriques, et les paramètres mécaniques.

Le présent mémoire est composé de trois parties :

- La première présente une revue documentaire sur les matériaux de construction couramment utilisés dans la zone d'étude, Ouagadougou.
- La seconde partie du document, est consacrée aux matériels et méthodes utilisés pour la caractérisation des échantillons de matériaux retenus lors des essais et des tests au laboratoire afin de déterminer leurs propriétés physiques, thermiques et mécaniques.
- La dernière partie de l'étude comporte les résultats des essais divers réalisés sur les matériaux sélectionnés, les discussions, ainsi qu'une analyse du cycle de vie réalisée sur la Brique de Terre comprimée.

I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

En nous référant aux résultats d'études réalisées sur le plan mondial et local, et à l'aide d'un état des lieux sur le sujet des matériaux de construction durables, pourrions-nous mieux appréhender les conditions actuelles de sollicitations des matériaux dans la construction de bâtiments et les limites possibles à leur utilisation ? Les définitions suivantes sont issues des pratiques constructives en rapport avec les exigences auxquelles sont rattachées les recherches effectuées concernant les matériaux de notre étude.

Maison solaire

Née dans les années 70, elle n'utilisait que le soleil direct comme solution d'économie d'énergie. Les maisons bioclimatiques d'aujourd'hui en sont l'aboutissement.

Construction bioclimatique

Une construction bioclimatique est un bâtiment qui tire le meilleur parti du rayonnement solaire (en s'en protégeant ou en profitant de ses bienfaits) et de la circulation naturelle de l'air pour maintenir des températures agréables, contrôler l'humidité, favoriser l'éclairage naturel, tout en réduisant les besoins énergétiques.

Bâtiment HQE

C'est un bâtiment qui relève d'une démarche visant à limiter les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement, durablement, tout en assurant à l'intérieur des conditions de vie saine et confortable.

Construction écologique

C'est une construction qui a un faible impact sur l'environnement et qui prend en compte des critères comme : l'économie d'énergie, la durabilité et la non-toxicité, voire l'esthétique. Elle tient aussi compte des conditions de l'environnement local et s'adapte au mode de vie. Sa fonction est de maintenir en bonne santé la planète, mais aussi ses habitants. La construction écologique est donc attachée à la non-toxicité qui préserve un environnement extérieur et intérieur sain.

I.1. Présentation de la zone d'étude

Le Burkina Faso est un pays d'Afrique occidentale, situé entre 3° de longitude Est et 6° de longitude Ouest, et les parallèles 9° et 15° de latitude Nord. Il jouit d'un climat tropical, de type soudano-sahélien avec deux saisons très contrastées : une saison pluvieuse d'environ quatre mois avec des précipitations

comprises entre 300 mm et 1200 mm et une saison sèche durant laquelle souffle l'harmattan, un vent chaud, sec et chargé de poussière. Pays sahélien en voie de développement, l'agriculture occupe une forte proportion de la population active. La densité urbaine est faible bien que le taux d'urbanisation ne cesse d'augmenter depuis 1975. (Rapport Final de l'Elaboration Du Rapport National Habitat III Du Burkina Faso, Mars 2015)

En 1996, une loi pour le droit foncier est entrée en vigueur : la réorganisation agraire et foncière (RAF). Celle-ci stipule que l'acquisition d'un terrain peut se faire par attribution, achat ou héritage et définit des zones loties et des zones non loties. Mais un manque de terrains à bâtir, a donné lieu à des spéculations foncières qui obligent bon nombre de familles à construire en zones non loties. Ces quartiers spontanés sont particulièrement présents dans la périphérie de Ouagadougou. Ils sont généralement construits de façon désordonnée en « banco » de mauvaise qualité, car ils peuvent être détruits à tout moment quand ont lieu les lotissements. Lors de ceux-ci, les attributions de parcelles sont toujours inférieures à la demande, obligeant de nombreuses familles à partir s'installer ailleurs, ce qui contribue fortement à l'étalement de la ville (figure 1). Que ce soit en zones loties ou en zones non loties, c'est l'auto-construction qui est la plus représentée pour des raisons économiques.

(Paulus, 2014-2015)

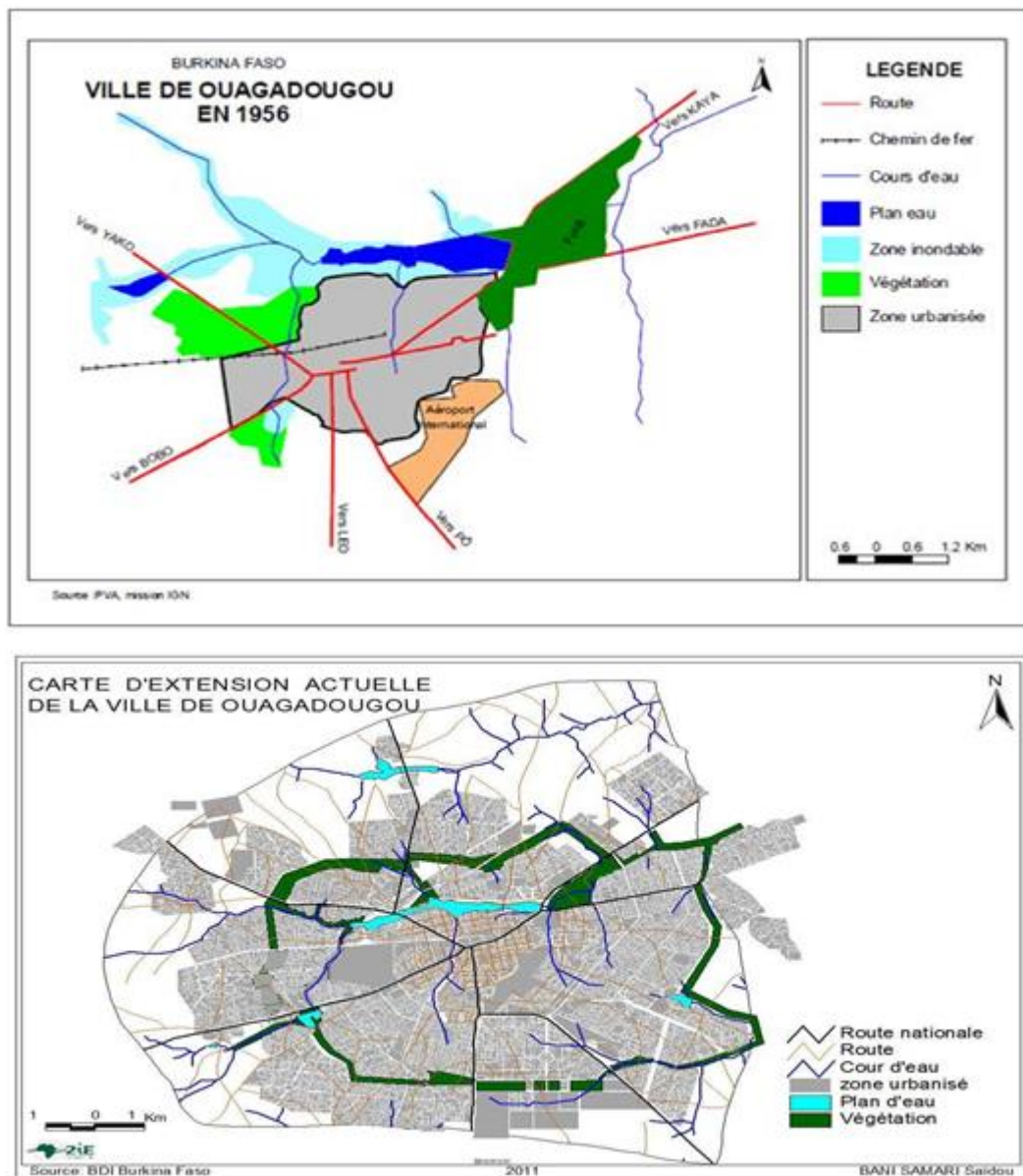


Figure 1 : Carte de l'extension de Ouagadougou de 1956 à nos jours

I.2. Généralités sur les matériaux courants pour réaliser des enveloppes de bâtiments à Ouagadougou

I.2.1. Présentation des matériaux locaux ou appropriés

La construction d'un bâtiment, qu'il soit destiné à un usage industriel ou à l'habitation devrait respecter certains critères permettant la protection des biens et des personnes en conformité avec les normes techniques particulières à l'environnement dans lequel le projet sera réalisé.

Ces critères visent en premier lieu à garantir la stabilité de l'ouvrage face aux sollicitations mécaniques de l'élément vis-à-vis de lui-même, mais aussi face aux actions liées aux charges climatiques ou à l'usage qui seront exercées sur l'élément par l'environnement.

À cet effet, plusieurs types de réalisations sont possibles en fonction des moyens disponibles au moment de la construction, mais il serait de bon ton de partir des principes visant à concevoir un bâtiment acceptable du point de vue financier, mais tout aussi capable de fournir un confort et un cadre de vie saine et agréable à ses destinataires. On pourrait noter trois points essentiels tels que :

- Une conception adaptée sur le plan thermique aux réalités climatiques de son milieu de réalisation
- Une efficacité énergétique améliorée et opérationnelle face à toute variation des conditions normales
- Le respect des règles de qualité que l'on peut exiger d'un bâtiment neuf et un guide d'exploitation afin de comprendre les atouts et les domaines des faiblesses pouvant subsister.

Un atelier s'est déroulé du 03 au 11 novembre 2016 dans les locaux de l'Institut international de l'Eau et de l'Environnement (2IE) à Ouagadougou, dont l'objectif visait à sensibiliser les étudiants et les professionnels ainsi que la population à une nouvelle façon d'aborder la conception des logements. Utiliser les matériaux locaux permettant de vivre dans un environnement sain et intégrer une politique de construction durable aux techniques et habitudes des consommateurs était le sujet à l'ordre du jour. « ...les gens n'ont pas accès aux logements et les bâtiments prennent beaucoup d'énergie en matière de climatisation...réfléchir sur la réduction du coût de la climatisation et permettre à la population de vivre dans les bâtiments décents... » (Pr Adamah Messan), pouvait-on lire sur le site internet du journal Le Faso, sous le titre : valorisation des matériaux locaux pour la construction, 2IE mène la réflexion à Ouaga. Madame Valérie Sanou, à l'époque directrice générale de l'architecture, de l'habitat et de la construction soulignait que cet atelier allait en droite ligne avec l'objectif du Ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat, de permettre à tout le monde de loger décemment, vivre mieux et d'aider à normaliser les matériaux locaux. Monsieur Sébastien Lasvaux, représentait la Haute École spécialisée de Suisse Occidentale, à cet atelier et il a déclaré que cette formation visait à éviter l'importation de matériaux dans la construction en se basant sur des ressources locales. Ainsi, la précarité de l'habitat serait réduite

en améliorant le confort et de surcroît l'impact environnemental des matériaux pourrait baisser significativement.

I.2.2. L'adobe ou brique de terre crue

L'adobe est avant tout de la terre argileuse, mélangée à de l'eau en faible quantité avec parfois de la paille hachée ou d'autres sortes de fibres pour façonner des briques.

Par extension, l'adobe ou banco est aussi le nom de la brique en terre crue, séchée au soleil et utilisée comme matériau de construction.

Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde. Les briques d'adobe sont coulées dans un cadre ouvert, un rectangle dont les dimensions sont : 9x18x23 cm, 10x25x36 cm, 10x14x38 cm et bien d'autres suivant les régions et les techniques des bâtisseurs. La terre à utiliser est prélevée dans des zones avec un potentiel argileux assez élevé comme les terres rétentrices d'eau de pluie, le plus souvent les lits des cours d'eau ou des barrages comme on le remarque dans la zone de Ouagadougou et ses environs.

La terre prélevée mouillée, battue ou pétrie avec les pieds, est laissée à reposer pendant des heures et le processus est repris jusqu'à l'obtention d'un mélange assez consistant et d'une ouvrabilité assez bonne selon l'appréciation de l'utilisateur, ensuite elle est enlevée à la main, placée dans le moule, tassée puis lissée avec une taloche humide. Retiré, on obtient une brique d'épaisseur égale à la hauteur du moule (figure 2).

Après le retrait du moule et le séchage de la brique sur une face, on la retourne sur leur tranche pour terminer le séchage. Lors du séchage, les briques peuvent être placées à l'ombre pour minimiser le retrait et éviter les fissures.



Figure 2 : Confection de briques d’adobe (Photo personnelle).

La plus grande structure construite en adobe est l’Argé-Bam, citadelle de Bam en Iran, qui a subi d’importants dommages lors du tremblement de terre du 26 décembre 2003. Parmi les constructions d’envergure présentes dans le monde, on peut mentionner la Huaca de sol au Pérou, construite avec 100 millions de briques. Plusieurs mosquées d’Afrique occidentale telles que la grande mosquée de Djenné et celle de Tombouctou au Mali étaient en adobe.

I.2.3. La brique de latérite taillée (BLT)

I.2.3.1. Définition

Les latérites sont les sols rouges très répandus dans les régions tropicales et subtropicales (figure 3). Ces sols fortement altérés qu’on trouve en faible profondeur ; riches en oxydes de fer et d’aluminium représenteraient 33 % des continents (Persons, 1970)

Le mot « latérite » qui vient du latin « later » et qui signifie « brique » a été suggéré (Buchanan, 1807) pour désigner un matériau servant à la construction, exploité dans les régions montagneuses de Malabar (Inde). Ce matériau présente l’aspect d’un dépôt ferrugineux, à morphologie vésiculaire. Lorsqu’il est frais, il peut être facilement découpé en blocs réguliers à l’aide d’un instrument tranchant. Exposé à l’air ou au soleil, il se durcit rapidement et résiste alors remarquablement aux agents météorologiques. Il résulte de ces propriétés son emploi fréquent comme matériau de construction (emploi comparable à celui des briques).

Plusieurs travaux réalisés par différents chercheurs tentent de préciser la définition des latérites sur des bases chimiques, parfois minéralogiques. Ils soulèvent de nombreuses controverses, en particulier sur la nature et les proportions relatives d'oxydes caractéristiques.

Les difficultés de donner une définition définitive viennent du fait qu'il n'est pas facile de relier le thème latérite ; trop largement défini à des milieux ou des processus spécifiques à un domaine purement morphologique, physique, ou chimique.

Actuellement cuirasses ou carapaces, plinthites, sols ferrallitiques, kaolisols, lithosols, oxisols sont autant de vocabulaires qui remplacent et couvrent ce qui, dans un sens très large, peut être appelé latérite.

Cependant, « latérite » est encore très largement employée. Il est toujours attaché à des formations rouges, riches en sesquioxydes d'alumine, de fer ou de manganèse, à morphologie variée, mais toujours indurée. Une cuirasse latéritique est une roche dont la résistance, acquise ou en devenir est due essentiellement au fer (ferricrete). Leur caractéristique d'ameublissement naturel varie du conglomerat compact à la terre friable.

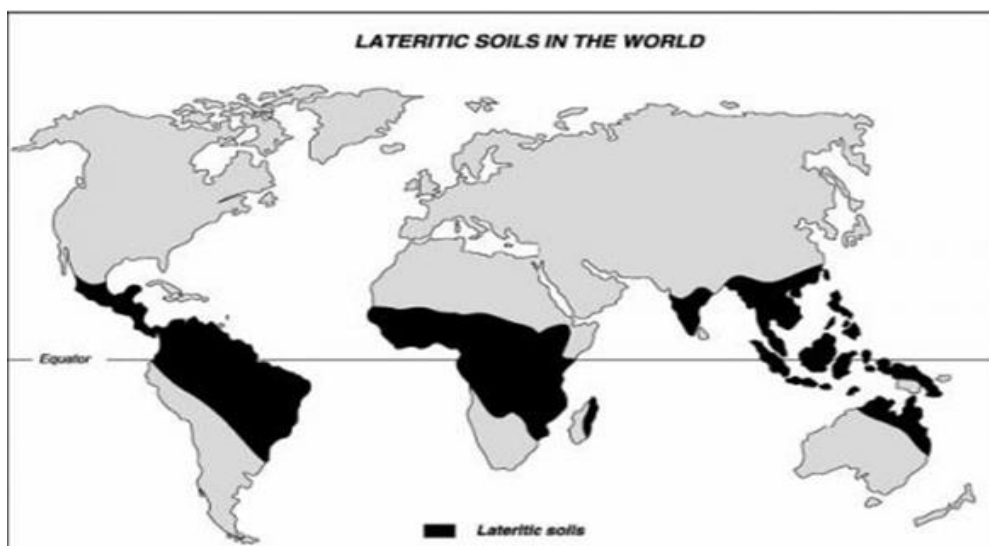


Figure 3 : Répartition des couvertures latéritiques à la surface du globe, Nahon,2003.

I.2.3.2. La Brique de latérite taillée (BLT) et l'habitat au Burkina Faso

Les briques de latérite sont des blocs latéritiques de formes cubique ou parallélépipédique extraits de sols latéritiques compactés et durcis à une faible profondeur pendant plusieurs années.

Utilisés depuis des millénaires dans le génie civil, des vestiges d'ouvrages retrouvés dans certains pays du monde témoignent de la présence de ce matériau :

Les infrastructures, tel le pont Angkorien en blocs de latérite à Kampung Kdei au Cambodge datant du 8^e siècle, large de 16 m est toujours en service.

Au Burkina Faso, l'utilisation des BLT remonte à l'époque de la colonisation et a connu une évolution par phases (Wyss, 2005) les ruines de Loropéni à Gaoua constituent les vestiges d'une civilisation florissante éteinte.

I.2.4. La Brique de Terre comprimée (BTC)

La Brique de Terre comprimée est une brique obtenue en modifiant les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière (Hugo Houben, 1989). Un bloc de terre comprimée (BTC) est un élément de maçonnerie, de dimensions réduites et de caractéristiques régulières et contrôlées obtenu par compression statique ou dynamique de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. (Guides Pratiques Des Blocs de Terre Comprimée, normes, 1998)

La stabilisation fait intervenir de nombreux paramètres parmi lesquels :

- Les propriétés à stabiliser
- Les améliorations envisagées
- L'économie du projet : coûts et délais de réalisation
- Les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et les systèmes constructifs.
- La maintenance du projet réalisé : coût d'entretien

Les objectifs principaux poursuivis par la stabilisation de la terre sont :

- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques : augmenter la résistance à la compression sèche et humide, la résistance à la traction et au cisaillement
- Obtenir une meilleure cohésion

- Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement – retrait à l’eau
- Améliorer la résistance à l’érosion du vent et de la pluie : réduire l’abrasion de surface et imperméabiliser.

Les étapes de la fabrication des Briques de Terre comprimée

- Essais réalisables sur la terre : (Essais de terrain)

Les essais du toucher et du lavage :

Si la terre se lave facilement on est certainement en présence d’une terre graveleuse ou sableuse

Si la terre se colle, cela indique une terre silteuse ou argileuse. La terre doit être lavable, mais demeurer tout de même un peu collante.

Une large gamme de tests est possible à divers stades du processus de la fabrication afin de s’assurer d’une production remplissant des critères de satisfaction prévus.

L’Essai du cigare, L’Essai de la pastille ou L’Essai de sédimentation à l’aide d’une bouteille

- Extraction de la terre

Terre à utiliser : Un sol comportant de la végétation n’est pas approprié, il est courant de pratiquer un décapage ou un débroussaillage pour obtenir un sol composé de 65 à 75 % de fractions inertes et de 8 à 30 % de fractions actives. La fraction de particules inertes se présente comme suit :

Cailloux : 20 à 200 mm, Gravier : 2 à 20 mm, sables : 0,02 à 2 mm, Silts : 0,002 à 0,02 mm

Quant à la fraction de particules actives, elle est constituée d’argiles, dont les grains présentent un diamètre, en moyenne inférieur à 0,002 mm.

- Préparation de la terre :

Préparer la terre à utiliser consiste à tamiser le sol extrait immédiatement de la carrière afin d’obtenir un matériau dont la granulométrie est fixée par l’emploi de deux tamis dont la maille est comprise entre 8 mm et 15 mm et faire en sorte que la moitié de terre tamisée présente une granulométrie inférieure à 5 mm.

- Dosage Terre-Ciment-Eau

Types d’outils et de récipients courants sur un chantier

Une pelle : env. 5 l

Un seau de maçon : 10 l ou 20 l

Une boîte de peinture : 20 l

Une brouette : (50 l – 60l) arasée ou 80 l remplie

Afin d'obtenir le dosage en ciment souhaité, on peut faire une boîte sur mesure pour une quantité de brouettes de terre donnée. Les recommandations formulées par le projet LOCOMAT/BFK97/013, avec l'appui du Ministère burkinabé des Infrastructures de l'habitat et de l'urbanisme donnent en exemple pour un dosage à 8 % de ciment, d'avoir 2 brouettes de terre et une boîte de 7,6 l de ciment.

On pourrait aussi faire un dosage par brouettes et par sac de ciment. Il faudra alors mouiller le mélange en plusieurs fois, juste avant l'utilisation. Exemple pour un dosage à 8 % de ciment, on a 8 brouettes pour un sac de ciment.

Les mélanges peuvent être faits à sec ou de façon humide, mais il est recommandé d'utiliser le mélange dans les 30 minutes suivant l'arrosage.

Tableau 1 : Quantité de matériaux par type de brique

DOSAGES USUELS	6 %	8 %
Nombre de brouettes pour un sac de ciment	11	8
Litres d'eau pour un sac de ciment	45	40
Nombre de BTC par sac de ciment	140	110
Nombre de volume de terre pour 1 volume de ciment	16	12

▪ Le pressage :

Il est fait avec une presse mécanique ou manuelle, avec ou sans empreintes selon la destination de la brique.

Afin de s'assurer que la quantité de terre est toujours la même, et que les blocs obtenus soient réguliers, on se sert d'un doseur. Enfin, une plaquette métallique permet d'araser le contenu du moule et par un geste manuel pour comprimer la terre aux angles du moule, on prévient les défauts.

À cette étape, on va donner sa forme calibrée à la brique et aussi assurer sa résistance mécanique. On distingue tout d'abord les presses manuelles qui utilisent un bras de levier agissant sur un piston qui comprime le béton de terre contenu dans un moule. Elles présentent un faible rendement, car elles nécessitent plusieurs manipulations. Il existe toutefois des presses mécaniques à moteur thermique ou

électrique qui sont capables de fournir une plus grande pression. De plus, elles peuvent assurer plusieurs opérations et comporter plusieurs moules.

- **Le transport :** Il est important que les briques conservent leur forme après la cure, ainsi le transport et le stockage des blocs doivent être faits correctement. Par exemple, on pourrait fabriquer une brouette plate adaptée à la forme des blocs et aussi pratiquer des empilements réguliers pour éviter les cassures.
- **La cure :** Une cure humide est conseillée en stockant les blocs sous un plastique ou sous abri.

Ensuite, il convient de marquer les blocs afin de pouvoir les enlever dès la fin de la cure (14 jours)

Il faut ensuite arroser et recouvrir le stock par du plastique.

Les caractéristiques des principaux éléments :

La terre : la fabrication des briques est constituée généralement de : 1/3 de gravier (fin < à 10 mm), de 1/3 de sable et de 1/3 de particules fines. Ce sont les éléments fins qui vont jouer le rôle de liants entre les gravillons et les grains de sable.

L'eau : Pour la fabrication de béton, l'utilisation de l'eau est indispensable pour permettre au liant de jouer son rôle. De plus, elle va jouer un rôle de fluidifiant lors de la compression. La teneur en eau du mélange est aussi un facteur clé, qui va influencer sur la qualité de la brique de terre comprimée. En effet s'il n'y a pas assez d'eau, la résistance de la brique sera plus faible et elle s'effritera facilement. L'excès d'eau peut aussi causer une mauvaise compression dans la presse puisque l'eau est un fluide compressible. De plus, le risque de retrait lors du séchage est augmenté.

Le liant : L'argile est le liant naturel d'une brique BTC, toutefois on peut aussi ajouter de la chaux hydraulique ou du ciment. L'ajout de ciment ou de chaux va améliorer la résistance mécanique de la brique. Dans les régions fortement exposées aux risques de gel, l'ajout de ciment est préconisé afin de permettre à la BTC de mieux résister au gel.

Le séchage : Phase importante dans la chaîne de fabrication des briques en terre comprimée. En effet, c'est au cours de cette étape que la prise du ciment aura lieu. La phase de séchage doit être progressive puisque l'évaporation de l'eau présente dans les briques doit se faire lentement. Pour ne pas perturber le cycle du séchage, les briques doivent être mises à l'abri des intempéries, mais aussi du vent. Ce dernier pourrait entraîner un séchage trop rapide.

Utilisation de la brique de terre comprimée

Le domaine d'utilisation de la brique de terre comprimée dans la construction est assez large et dépend de la fonction à laquelle l'ouvrage est destiné. Essentiellement, elle est employée pour la réalisation de murs (clôtures et enveloppe de bâtiment de types et de formes différents), d'éléments de sollicitation limitée tels que des potelets... On rencontre alors des éléments dont la forme varie pour s'adapter aux diverses formes des structures que l'on souhaite réaliser.

L'utilisation des briques en terre comprimée peut être notamment envisagée pour la réalisation de mur porteur ou en double parement (figure 4). Il est aussi nécessaire de faire en sorte que l'eau ne puisse pas pénétrer le mur et y stagner.



Figure 4 : Équipements de préparation de la terre de confection de BTC

I.2.5. Le parpaing/aggloméré de ciment

Les parpaings, ou agglomérés de ciments sont des blocs obtenus essentiellement après le mélange de granulats (87 % de sable), de ciment (7 %) et d'eau (6 %), le tout mis en forme par des moules et exposé à l'air libre en respectant des dispositions favorables à leur cure. Leur composition entièrement minérale faite d'eux des matériaux totalement recyclables. Le parpaing offre un avantage non négligeable qui est la résistance et le prix.

On rencontre généralement plus d'une centaine d'éléments de parpaings, différents en forme ou en composition, mais au Burkina Faso, comme partout dans la sous-région, les parpaings pleins ou creux deviennent pratiquement les seuls matériaux de construction de murs utilisés et même dans les environnements ruraux, les matériaux de construction en terre ne constituent plus, un premier choix

pour la réalisation d'enveloppe de bâtiment. Statistiquement, les agglomérés creux sont plus fréquemment employés pour les murs en surface et les pleins pour les fondations.

Dans la construction, la maçonnerie d'agglomérés est particulièrement employée pour la réalisation de murs de façades et de murs de refends. Pour le remplissage en éléments porteurs, les agglomérés pleins d'épaisseurs 10 cm, 15 cm et 20 cm demeurent les plus adaptés pour une meilleure résistance mécanique et phonique. Les agglomérés diffèrent selon leur mode d'utilisation (Tableau 2).

Ce matériau est toutefois assez conducteur avec une conductivité thermique avoisinant $0,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Mais selon son traitement et sa composition, il peut être beaucoup plus, ou même moins isolant.

Les blocs de béton sont fabriqués dans des centrales conçues à cet effet, mélangeant les composants dans les proportions voulues, en vibrant intensivement les blocs afin de lui conférer le maximum de résistivité. Ce procédé améliore les propriétés physiques du bloc. Le bloc encore humide est alors séché naturellement entre un et deux jours et est prêt à remplir sa fonction (figure 5).

Tableau 2 : Dimension des agglomérés et leur domaine d'utilisation

Dimensions des agglomérés	Domaine d'utilisation
Parpaings de 10x20x40	Utilisés uniquement pour les cloisons
Les parpaings de 15x20x40	Utilisés pour les murs de refend intérieurs, extérieurs protégés
Parpaings de 20x20x40	Utilisés pour les murs de soubassements (bourré), murs extérieurs exposés aux intempéries.
Parpaings spéciaux	Parpaings d'angles placés généralement aux angles et jouant le rôle de coffrage pour le coulage des poteaux
Parpaings en U	Servent de coffrages pour le coulage du chaînage, des linteaux des baies ;
Parpaings avec des redents au niveau des joues	

I.2.5.1. Matériaux et matériels

Un moule, des pelles, des brouettes, un arrosoir et une planche constituent l'essentiel du matériel employé pour la confection des agglomérés.

Les matériaux entrant dans la composition sont : le ciment, du sable, des graviers et de l'eau (Tableau 3).

Tableau 3 : Rendement en briques par paquet de ciment

Catégories	Sable	Gravier	Ciment	Rendement
Murs non porteurs lourds ou cloisons	3 brouettes	Absence	1sac	22 agglos de 20 30 agglos de 15 37 agglos de 10
Murs porteurs lourds	1 brouette et demie	Concassé 1,5 brouette	1 sac	22 agglos de 20 30 agglos de 15 37 agglos de 10
Murs non porteurs cloisons	2 brouettes	Gravier de pouzzolane 1brouette	1sac	22 agglos de 20 30 agglos de 15 37 agglos de 10

I.2.5.2. Mode opératoire

- Nettoyage de l'aire servant de chantier ;
- Préparation du gâcher (sable+ gravier ou pouzzolane ou pas) ;
- Introduction du ciment dans le gâcher ;
- Faire le mélange homogène sans eau ;
- Verser de l'eau à l'aide d'un arrosoir ;
- Mélanger de nouveau jusqu'à faire disparaître de l'eau et en vérifiant la teneur ;
- Mouiller les faces latérales et le fond du moule avec de l'eau ;
- Charger le mortier dans le moule ;
- Taper le moule chargé au sol ou sur une planche ;
- Recharger le moule ;

- Couper et lisser à l'aide d'une pelle-bêche ;
- Tenir le moule par ses deux machettes horizontalement puis le retourner ;
- Retirer d'abord le casque en appuyant le mamelon vers le bas à l'aide de ses deux pouces de la main ;
- Une fois le casque retiré, enlever le mamelon pour retourner le contenu avec une légère pression au sol et ainsi de suite jusqu'à l'épuisement du mélange.

Après séchage, ils peuvent déjà être utilisables pour le travail prévu (figure 6).

Remarques : Le matériel doit être correctement nettoyé après usage. En plus, ne pas laisser traîner les parpaings longtemps au soleil ou sous la pluie après leur fabrication. Il est de loin préférable de faire sécher les parpaings sous un l'abri pour éviter une évaporation trop rapide de l'eau du liant.



Figure 5 : Parpaing industriel (bloc de béton)



Figure 6 : Parpaing artisanal (local)

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1. Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou plusieurs types d'échanges thermiques.

Elles expriment le comportement du matériau soumis aux transferts dynamiques : diffusivité thermique, effusivité thermique.

Les propriétés régissant les transferts par conduction et convection sont aussi appelées propriétés de transport, car elles sont liées à l'agitation des atomes et des molécules du milieu qui transportent la chaleur.

Les propriétés thermiques se rapportent aussi à la capacité du matériau à absorber de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer (changement des propriétés physiques ou d'état du matériau) : capacité thermique, enthalpie de fusion (ou autre transformation), coefficient de dilatation thermique...

Toutes les propriétés thermiques des matériaux sont dépendantes de la nature du corps et de sa température.

II.1.1. Procédure de détermination

Un échantillon de chaque spécimen de brique appartenant au même type de matériau a été sélectionné et après avoir été portées à température constante à l'étuve, les valeurs de la conductivité sont relevées à partir du DESPROTHERM, un dispositif qui fait partie de la gamme des matériels de mesure de paramètres thermiques des matériaux, fonctionnant sur la base de résolution d'équations de manière complètement analytique et d'utilisation de la modélisation numérique pour mettre en évidence l'influence des différents paramètres.

Les différents matériaux caractérisés et tous les paramètres thermiques obtenus concernent les adobes, les BLT, les BTC et les parpaings ordinaires en ciment.

II.1.2. Conductivité Thermique

La conductivité ou conductibilité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction.

Notée K cette grandeur apparaît dans la loi de Fourier, où elle représente l'énergie (Quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 K ou 1 degré Celsius/mètre. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$

sa valeur permet de quantifier le pouvoir du matériau à conduire la chaleur (en matière d'amplitude). Plus elle est faible, plus le matériau est isolant des matériaux pour une épaisseur donnée (conduction faible).

Exemples conductivité thermique de matériaux de gros œuvre : terre sèche : 0,75 ($W/m. K$) ; béton cellulaire : 0,14 - 0,23 ($W/m. K$) ; briques de terre cuite : 0,3 - 0,96 ($W/m. K$) ; béton ordinaire : 1,6 - 2,1 ($W/m. K$).

II.1.3. Effusivité Thermique

L'effusivité thermique est l'intensité avec laquelle, un matériau va pouvoir absorber et restituer la chaleur. Elle caractérise, l'aptitude d'un matériau à changer de température, lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique. Unité : $J.K^{-1}.m^{-2}.S^{-1/2}$

$$b = \sqrt{\lambda.\rho.Cp}$$

Les matériaux ayant une faible effusivité donnent une impression de chaleur quand on s'en approche, car leur effusivité se rapproche de celle du corps humain ($400 J.m^{-2}.K^{-1}.S^{-1/2}$). Ils demandent un faible flux de chaleur sur un court temps de contact pour avoir une sensation de confort.

Quelques exemples : terre sèche : $J.m^{-2}.K^{-1}.S^{-1/2}$; béton cellulaire : [237 - 429] $J.m^{-2}.K^{-1}.S^{-1/2}$; briques de terre cuite : 480 - 1300 $J.m^{-2}.K^{-1}.S^{-1/2}$; béton ordinaire : 1960 - 2350 $J.m^{-2}.K^{-1}.S^{-1/2}$

II.1.4. Diffusivité thermique

Afin de prédire des processus de refroidissement, ou de simuler des champs de température, la diffusivité thermique doit être connue. Dans le cas d'un matériau de construction, c'est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à point.

$$a = \frac{\lambda}{\rho.Cp}$$

II.1.5. Résistance thermique

Elle sert à quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée et s'exprime en $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{\Delta T.S}{\varphi}$$

Une paroi est d'autant plus isolante, que sa résistance thermique est élevée. Cette grandeur est particulièrement utilisée dans les applications d'isolation thermique.

Exemple de résistance thermique des matériaux de gros œuvre pour une épaisseur de 14 cm :
terre sèche : $R = 0,19$; béton cellulaire : $R = 1 - 0,61$; briques de terre cuite : $R = 0,47 - 0,15$;
béton ordinaire : $R = 0,09 - 0,07$.

II.1.6. La capacité thermique ou chaleur spécifique :

La capacité thermique d'un matériau est sa capacité à emmagasiner de la chaleur. Il s'agit de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température d'un volume d'un (1m^3) du matériau. Plus la densité du matériau est élevée, plus sa capacité thermique augmente.

Unité : $\text{kJ}/\text{m}^3.\text{K}$. D'autre part, un matériau à faible capacité thermique se réchauffera plus rapidement qu'un matériau à forte capacité thermique.

Quelques exemples : terre sèche : $900 - 2250\text{ kJ}/\text{m}^3.\text{K}$; béton cellulaire : $1000\text{ kJ}/\text{m}^3.\text{K}$;
briques de terre cuite : $600 - 900\text{ kJ}/\text{m}^3.\text{K}$; béton ordinaire : $1100\text{ kJ}/\text{m}^3.\text{K}$.

« Les matériaux dont S varie entre 400 et $1000\text{ kJ}/\text{m}^3.\text{K}$, sont bons pour les parois extérieures, mais ils ne peuvent stocker la chaleur ». En deçà de ces valeurs, ce sont des matériaux isolants ; au-delà, les matériaux emmagasinent efficacement la chaleur.

II.2. Propriétés hydriques des matériaux

II.2.1. Essai de détermination de l'absorption d'eau par capillarité

Ce mode opératoire, décrit principalement une méthode d'essai permettant de déterminer, l'absorption capillaire de bétons moulés ou carottés.

Principe : L'essai consiste, à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement pré conditionné par un étuvage à $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. (figure 7)

Matériel : Une balance de précision, de l'ordre de 0,1 g près.

Un récipient d'une hauteur intérieur, de l'ordre de 50 mm, et pouvant contenir au moins trois éprouvettes. Un dispositif permettant de s'assurer, du maintien de l'eau à un niveau constant dans le récipient. ($l=20\text{cm}$; $L=40\text{cm}$).

Mode opératoire : Conserver les blocs pendant 24h dans le laboratoire. Peser chacun des blocs à 2 g près et les numérotés. Placer les blocs dans l'étuve selon leur position en œuvre, de telle façon que l'air chaud circule sur toutes les faces. Les blocs doivent être desséchés jusqu'à atteindre une masse constante. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives effectuées à 24h d'intervalle font apparaître une diminution de masse $< 0,1\%$ de la masse initiale. Laisser les blocs se stabiliser dans le laboratoire durant 6h, vérifier que la variation de la température pendant toute la durée de l'essai n'excède pas $\pm 3^\circ\text{C}$. Peser chaque bloc, soit : P_0 (en grammes). Immerger une face lisse de parement de façon qu'elle soit 5 mm au-dessous du niveau de l'eau. Réaliser cette immersion en posant les produits sur des cales installées dans le fond des bacs de façon que l'eau circule sur l'ensemble de la face immergée. Positionner le flacon rempli d'eau afin de maintenir un niveau d'eau constant. Après 10 min, retirer chaque bloc de l'eau et l'essuyer avec un linge humide ou une peau de chamois. Le peser, soit : P_1 (en grammes).

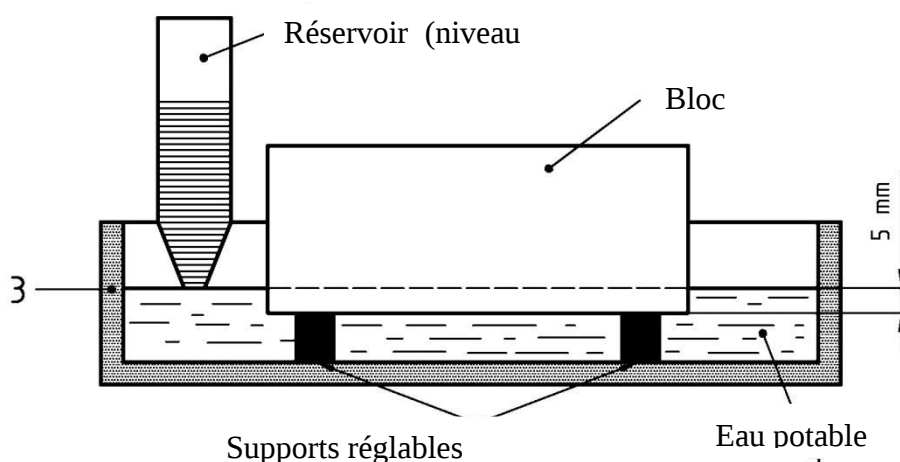


Figure 7 : Schéma de principe de l'essai d'absorption par capillarité

I

I.2.1.1 Expression des résultats

Le coefficient d'absorption d'eau (Ca) de chaque bloc est exprimé par la formule :

$$Ca = \frac{100(M_x - M_o)}{A\sqrt{t}}$$

M_x : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg)
 M_o : Masse initiale de l'éprouvette
 A : Section de l'éprouvette (m²)
 t : durée d'immersion du bloc (min).

Pour les blocs présentant un motif régulier sur les deux faces, on prendra en compte la surface développée. Dans les autres cas, l'on ne tiendra pas compte des irrégularités de surface dans le calcul de la surface.

II.2.2. Essai de Saturation par immersion

L'essai consiste à saturer l'éprouvette, par absorption d'un liquide (eau) dans le milieu poreux de l'échantillon. Ainsi, l'éprouvette étant complètement immergée dans l'eau et l'accroissement de sa masse est déterminée par simple pesée pendant des intervalles de temps donnés jusqu'à saturation.

(figure 8). La réalisation de cet essai se base sur la norme NF EN 14617-1 73 sur les blocs de dimensions 14x14x9,5. Cet essai ne concerne que les échantillons de BTC. La teneur en eau du matériau est ensuite déterminée par l'équation :

$$Q_p = \frac{(M_h - M_s)}{M_s}$$

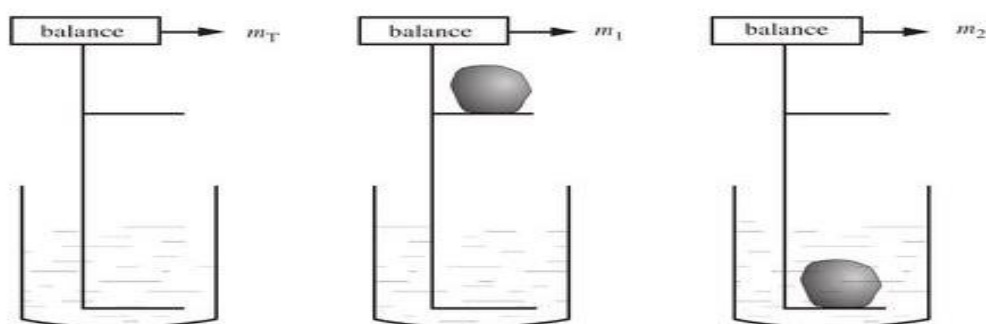


Figure 8 : Principe de la pesée hydrostatique

I.2.3. Porosité accessible à l'eau

Le but de l'essai de porosité accessible à l'eau (Peau) (NF EN 18-459 essais pour béton durci, essai de porosité et de masse volumique) est de mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du béton.

II.2.3.1. Mode opératoire

Saturation pendant 72 h

Pesée hydrostatique : M_{eau} est la masse en grammes pesée sous l'eau

Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau, M_{air}

Séchage à $T = 105^{\circ}$ jusqu'à masse constante

Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche M_{sec}

Calcul de la porosité accessible à l'eau

$$P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \text{ (Valeur donnée en pourcentage à } \pm 0,75 \text{ point)}$$

II.3. Propriétés mécaniques des matériaux

II.3.1. Détermination de la résistance en compression simple des différents matériaux

II.3.1.1. But de l'essai

L'essai de détermination de la résistance en compression est pratiqué sur les blocs secs ou humides (blocs ayant subi un essai de remontées capillaire, ou d'immersion). Le résultat permet dans une certaine limite de déterminer la résistance d'une brique dans la construction.

II.3.1.2. Principe de l'essai

II.3.1.2.1. Détermination de la résistance en compression des adobes:

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de prédire la résistance à la compression d'une terre sans la mesurer expérimentalement. Connaître la densité, la teneur en eau ou en argile ne suffit pas. Beaucoup d'autres paramètres entrent en jeu dans les mécanismes de cohésion de la terre qui déterminent sa résistance. Le lien entre la microstructure de la terre et ses propriétés mécaniques macroscopiques est extrêmement complexe.

La résistance à la compression d'une terre mise en œuvre pour la construction peut varier entre 0,4 et 5 MPa. (Mariette Moevus, Juin 2012)

Les normes imposent souvent des protocoles d'essai qui ne permettent pas de mesurer la résistance intrinsèque au matériau ; or la mesure est en partie influencée par le dispositif d'essai. Cela est dû en partie à la transposition d'essais utilisés pour les bétons de ciment à des normes concernant la terre crue, alors que les propriétés mécaniques de ces deux matériaux sont complètement différentes.

II.3.1.2.2. Détermination de la résistance en compression des BLT:

La détermination de la résistance en compression des Briques latéritiques taillées a été possible grâce à la norme EN 1926:1999, méthode d'essai pour pierres naturelles.

Les éprouvettes sont des cubes de (70 +/- 5) mm d'arêtes.

II.3.1.2.3. Détermination de la résistance en compression des BTC:

Il existe quelques normes détaillant la méthodologie de réalisation de l'essai permettant de déterminer la résistance en compression simple des briques en terre comprimée au niveau sous régional et régional, cependant, par rapport à la disponibilité, les principes de la norme XP 13901 nous ont permis de caractériser la résistance mécanique des BTC.

Mode opératoire :

- À l'aide d'une scie mécanique, nous avons coupé les blocs en deux, à défaut de réaliser un essai de traction au préalable.
- Les blocs superposés, humidifiés et collés par un fin joint de mortier de 1 cm au maximum sont laissés 2 à 3 jours à température ambiante pour le séchage du mortier.
- Deux éléments en plastique épais graissés entre eux sont disposés sur le plateau inférieur de la presse, afin de servir de dispositif anti-fretage, autorisant les déplacements transversaux libres de l'échantillon.

L'ensemble des étapes mentionnées est résumé à travers le schéma illustré par la figure ci-dessous (figure 9).

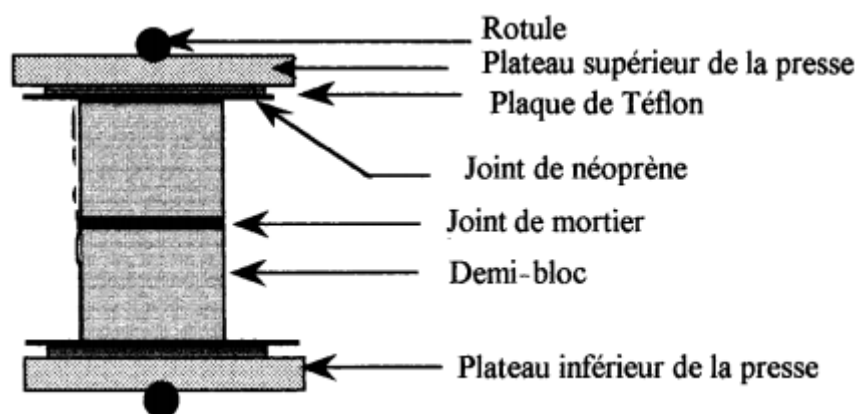


Figure 9 Schémas du principe de l'essai de compression simple

II.3.1.4. Détermination de la résistance en compression des parpaings :

Grâce à une presse mécanique la brique est placée entièrement sur la presse exactement comme elle est posée lors de la pose d'un mur, mais face des vides tournée vers la presse inférieure, car le mouvement d'ascension de la presse se fait du bas vers le haut. Dans la réalité, la face des vides est en haut, car la charge augmente en empilant les briques verticalement, la brique inférieure supportant plus de charges.

La résistance à la compression sèche des blocs est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F}{b' \cdot l'}$$

RC : résistance à la compression en MPa

F : charge maximale supportée par la brique (kN)

b' : la base (mm) ; (base de la brique diminuée du vide)

L' : la longueur (mm) ; (Longueur de la brique diminuée du vide)



Figure 10 Dispositifs de détermination des essais en compression

II.3.2. Détermination de la résistance à l'essai de flexion en trois points des différents matériaux

II.3.2.1. But de l'essai

L'essai de détermination de la résistance à la flexion en trois points d'un échantillon permet de prévoir l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis excentrés et soumis à l'application d'un effort à mi-distance de ses extrémités.

II.3.2.2. Principe de l'essai

L'échantillon à tester sera posé sur une de ses grandes faces et les deux appuis, espacés d'une distance l_0 . Les éprouvettes prismatiques de type (bxhxl) utilisé pour ce type d'essai travaillent en flexion simple avec un moment maximal, au centre de l'éprouvette (figure 11). La valeur de la résistance est donc la contrainte obtenue en ce point, avec ce moment.

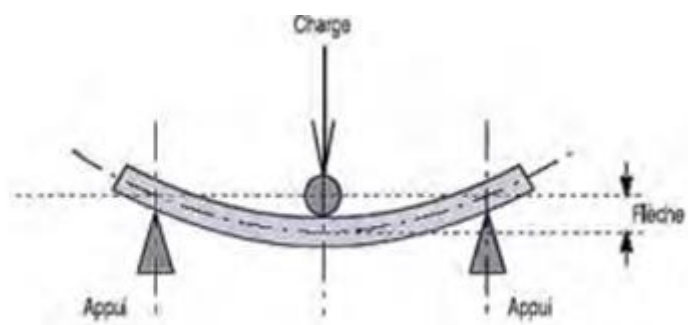


Figure 10 : Essai de flexion

La résistance à la flexion des blocs est donnée par la formule suivante : $R_f = \frac{3Fl_0}{2bh^2}$

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Paramètres thermiques

Les paramètres thermiques dans leur ensemble ont été déterminés par le dispositif d'estimation de Propriétés Thermiques DESPROTHERM (conf. II.1.1) et les moyennes de chaque paramètre sont consignées dans un tableau récapitulatif (tableau 4). Les principales données influençant les échanges de chaleur dans les matériaux de construction du bâtiment comme la conductivité thermique et la chaleur spécifique par exemple sont elles-mêmes fonction de propriétés physiques des matériaux choisis. Des études, notamment celles de : (J.-P., 1987) ; démontrent que la densité spécifique et la porosité ont une part importante dans le comportement du point de vue thermique du matériau.

Tableau 4 conductivité, effusivité et diffusivité thermiques des matériaux

Paramètre	BTC	Adobe	BLT	Parpaing
λ (W/m.K)	0,977 (1) 0,937 (2)	0,655	0,827	0,774
b (J.K-1.m-2.S-1/2)	1498,8 (1) 1468,0 (2)	1227,4	1378,9	1334,5
a	4,25 E-07 (1) 4,08 E-07 (2)	2,85 E-07	3,60 E-07	3,37 E-07

III.2. Paramètres physiques

III.2.1. Essai de l'absorption capillaire

Lorsqu'un échantillon de terre est mis en contact avec de l'eau, celle-ci va pénétrer le matériau par remontée capillaire dans les pores fins, sous l'action de la succion. La propriété intrinsèque du matériau qui permet de décrire son aptitude à absorber l'eau par capillarité est la diffusivité hydrique capillaire, qui s'exprime en m^2/s . Mais cette propriété est rarement déterminée en tant que telle pour les matériaux de construction. Les essais normalisés s'intéressent plutôt à la vitesse initiale de succion ($kg/m^2.min$) ou au coefficient d'absorption capillaire ($kg/m^2 \sqrt{min}$), et à la quantité d'eau absorbée au bout d'une durée déterminée [EN 1015-18] [NF XP P 13-901].

L'essai décrit dans la norme [NF XP P 13-901] consiste à tremper une face lisse d'un bloc de terre dans 5 mm d'eau en posant le bloc sur des cales. Le niveau d'eau est maintenu constant. L'échantillon, est pesé toutes les 10 min. Le coefficient d'absorption capillaire ne doit pas excéder $40 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{min}}$ (pas d'exigence particulière pour des blocs destinés à être utilisés en environnement sec).

Pour comparaison, ce coefficient est de l'ordre de $50 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{min}}$ pour la terre cuite et $10 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{min}}$ pour une pâte de ciment. Hall et Djerbib ont proposé un test plus approprié au matériau terre qui, étant très sensible à l'eau par rapport à d'autres matériaux plus couramment utilisés, peut se désagréger légèrement s'il est trempé directement dans l'eau. Il doit de plus être essuyé avant chaque pesée. Les auteurs proposent ici de poser l'échantillon sur un matériau très capillaire lui-même partiellement immergé de sorte que l'éprouvette ne soit pas en contact direct avec l'eau. La résistance capillaire de ce matériau ainsi que la résistance à l'interface sont négligeables. Les résultats obtenus avec cet essai sont comparables aux résultats obtenus selon la norme BS 3921, surtout pour de faibles porosités (c'est le cas de la terre compactée) [(Hall, 2004)].

Les auteurs comparent l'absorption de 10 échantillons de terre compactée de granulométries différentes à celle d'échantillons de briques de terre cuite et de béton C30. La quantité d'eau absorbée par la terre au bout de 5 minutes varie entre 0,15 et 0,74 % pour l'échantillon le moins dense, contre 0,77 à 1,29 % pour les briques. Le béton absorbe 0,31 % d'eau en 5 minutes.

III.2.1.1. Cas des parpaings

L'étude expérimentale de détermination de l'absorption capillaire des parpaings ou agglomérés de ciment porte sur quatre échantillons de matériaux que nous avons choisis parmi les fournisseurs de ce type de matériau dans différentes zones de la capitale.

Chaque fournisseur diffère par son organisation et les moyens de production mis en œuvre, ce qui nous amène à retrouver des producteurs utilisant des moyens courants comme les pelles, les brouettes. Dans cette catégorie, nous avons deux fournisseurs : l'entreprise Gagre et Frères et l'entreprise Yacouba et Frères (Parp2). Parmi les producteurs qui utilisent des moyens de

production de briques plus ou moins mécanisés, nous avons sélectionné la société Nina construction (Parp1) et l'entreprise ZI-matériaux (Parp3).

Tableau5 : Récapitulatif de l'absorption des différents types de parpaings

t(s)	$\sqrt{t}$	Parp.1	Parp.2	Parp.3
900	30,00	1,95	4,60	1,59
1800	42,43	2,65	5,66	1,59
3600	60,00	3,89	6,54	3,18
7200	84,85	4,42	8,13	4,95
14400	120,00	5,66	9,73	6,90
28800	169,71	6,90	12,02	9,02
86400	293,94	7,96	14,32	11,85

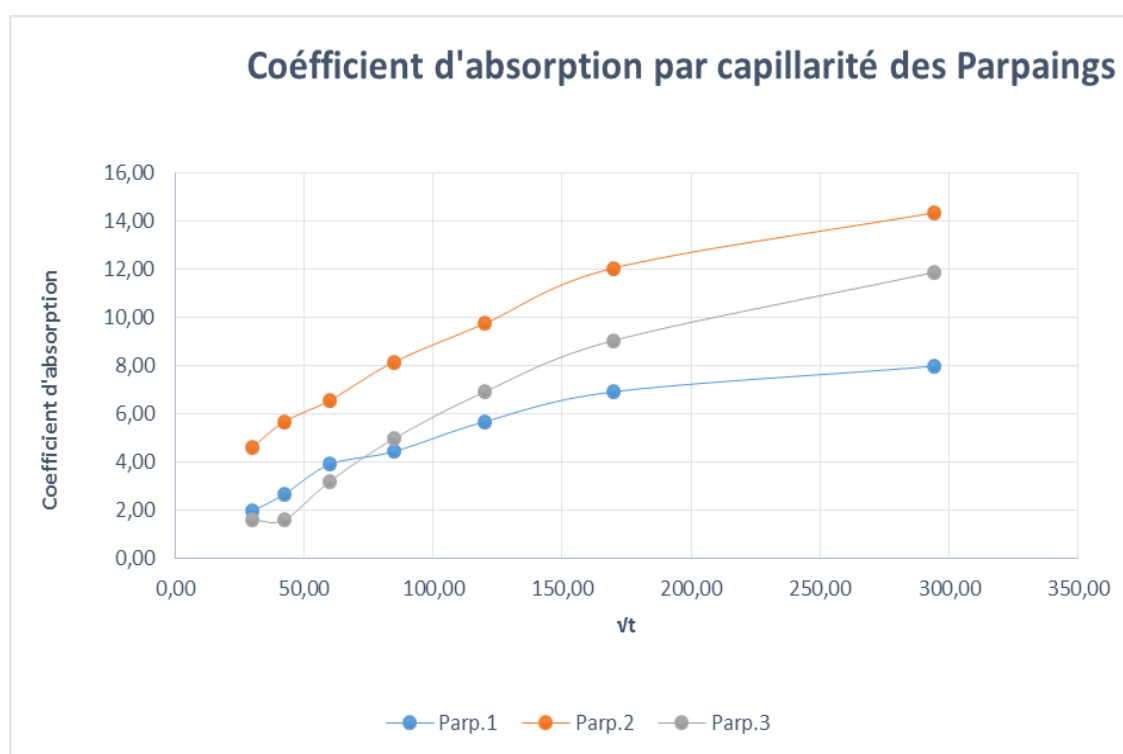


Figure 11 : graphique d'évolution de l'absorption des parpaings

III.2.1.2. Cas des BLT

La procédure expérimentale adoptée pour la détermination de l'absorption capillaire au niveau des parpaings est la même que celle utilisée pour étudier l'absorption capillaire au niveau des BLT. Parmi les nombreux fournisseurs que nous pouvons trouver dans la capitale, nous avons choisi trois dont les matériaux sont souvent utilisés pour réaliser des travaux comme la carrière latéritique de BOASSA située à proximité de la ville, la carrière de DANO qui a fait l'objet d'études récentes menées au niveau du 2^{ie} par M. Lawane, dans le cadre de sa thèse (LAWANE, 2014).

Ensuite, une carrière peu citée qui est celle de Kamboinse a été ajoutée compte tenu de sa position par rapport au site d'étude, permettant ainsi donc un approvisionnement facile et à moindre coût. De cette différence par rapport aux lieux d'approvisionnement, découlent les appellations BLT de DANO (BLT 1), BLT de BOASSA (BLT 3) et BLT de Kamboinse (BLT 2).

Tableau 6 : Récapitulatif de l'absorption des blocs latéritiques

t(s)	$\sqrt{t}$	BLT1	BLT2	BLT3
900	30,00	5,56	5,11	4,08
1800	42,43	5,37	6,64	6,12
3600	60,00	5,37	6,64	6,12
7200	84,85	6,67	8,68	7,03
14400	120,00	9,26	14,05	9,52
28800	169,71	12,78	15,58	12,93
86400	293,94	18,70	22,99	19,05

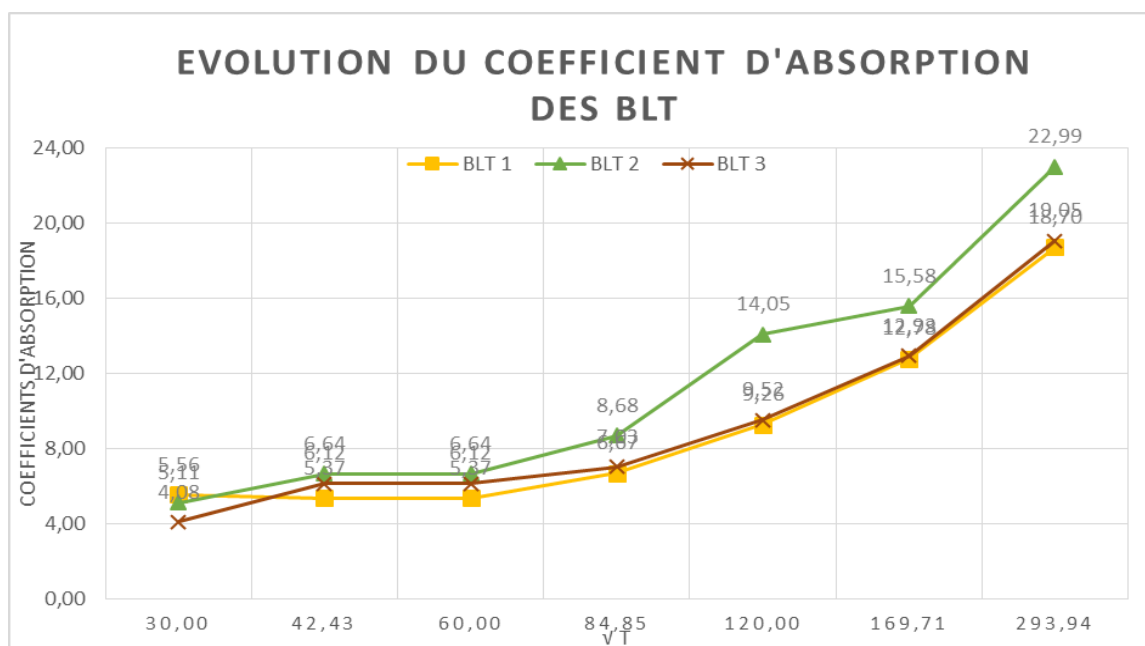


Figure 12 : Graphique d'évolution de l'absorption des BLT

III.2.2. Essai de porosité des parpaings

L'essai de porosité est particulièrement dédié à la détermination des phénomènes explicatifs des valeurs obtenues lors de la détermination de l'absorption capillaire au niveau des parpaings (conf. III.2.1.1.). Des comparaisons entre les coefficients de porosité des différents matériaux étudiés nous permettent d'obtenir le graphique de la figure 14.

L'échantillon de parpaing appelé PN provient d'un fournisseur disposant de moyens de production mécanisés comprenant une presse d'une capacité moyenne de 2000 briques/jrs. Elle produit un bloc de béton qui possède une porosité assez faible. L'entreprise ZI matériaux, a fourni un échantillon de briques qui possèdent en moyenne, une porosité légèrement plus élevée. Par contre, les porosités des échantillons PGF et PY, assez élevés sont caractéristiques des échantillons produits manuellement, selon un dosage non constant et à même le sol (figure 16).

L'écart relativement grand entre les deux catégories de produit, relevé dans le (Tableau 7) est directement tributaire de la qualité des matériaux et permet de comprendre les faibles résistances obtenues lors des tests de résistance mécanique (Tableau 8, *L) et annexe (Tableaux I.2.3 et I.2.4).

Tableau 7 : Récapitulatif des paramètres de porosité sur les parpaings

	P _{GF}	P _N	P _{ZI MAT}	P _Y
m sec(g)	1495.74	2171.13	2298.75	2040.6
m air(g)	1672.46	2321.35	2481.62	2247.43
m eau(g)	868.74	1270.23	1358.57	1192.71
Porosité (%)	21.99	14.29	16.28	19.61

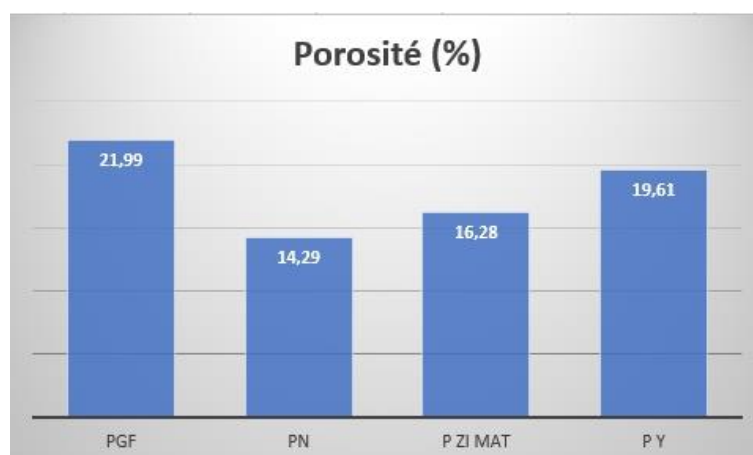


Figure 13 : Essai de porosité accessible à l'eau

III.3. Propriétés mécaniques des matériaux

Les propriétés mécaniques que nous avons étudiées et dont les résultats relevés ont été discutés et consignés sont la résistance à la compression simple et l'essai de résistance en flexion.

III.3.1. Résistance à la compression sèche

La résistance à la compression sèche, correspond à la résistance en compression simple.

III.3.1.1. Résistance à la compression des adobes

(C.H. Kouakou, 2009) a réalisé les tests sur l'adobe naturel en bloc de $31 \times 15,2 \times 7,3$ cm³ avec un élanement de 2 et pour une humidité relative de 60. La masse volumique de son matériau est de 1920-1975 kg/m³ et la résistance en compression des briques d'adobe confectionnées se situe entre 2,37-2,71 MPa.

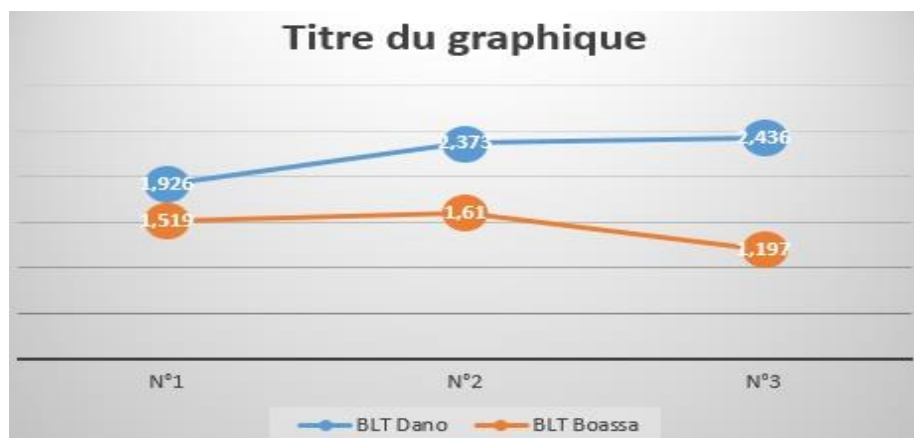
Dans notre cas d'étude, le matériau choisi pour la confection de la brique est du sable argileux présent sur les abords du barrage de Kamboinse dont quelques valeurs caractéristiques se présentent comme suit : longueur= 34 cm ; largeur= 18 cm ; hauteur= 9 cm.

Masse volumique $\rho = 2031,6$ kg/m³ et RC= 2,098 MPa

Pour le deuxième matériau que nous avons testé dans cette partie, nous pouvons noter les valeurs suivantes : longueur= 40 cm ; largeur= 14 cm ; hauteur= 10 cm.

Masse volumique $\rho = 1501,79$ kg/m³ et RC= 1,5 MPa

III.3.1.2. Résistance à la compression des Briques Latéritiques Taillées:



III.3.1.3. Résistance à la compression des briques de terre comprimée

Pour déterminer la qualité des briques de terre comprimée, la résistance en compression est la valeur qui est généralement étudiée. Celle-ci est étroitement liée au type de terre utilisé, à la teneur en stabilisant ajoutée, aux dimensions du bloc ainsi qu'à la procédure de compaction employée. Selon la norme utilisée et le pays de référence, les propriétés mécaniques exigées pour les BTC diffèrent légèrement. Ainsi, si on compare les normes suivantes : IS 1725 (Inde), NBR (Brésil), ARS (Afrique), NT (Tunisie), NZS (Nouvelle-Zélande), KS 02-1070 (Kenya), XP P13901 (France), NTC 5324 (Colombie), UNE 41410 (Espagne), SLS 1382 (Sri Lanka), ASTM E2392M-10 (Amérique), NMAC 147.4 (Nouveau-Mexique), la résistance en compression minimale admissible pour les BTC (qu'elles soient stabilisées ou non) prend les valeurs suivantes (pour un état sec et un état humide). (Paulus, 2014-2015)

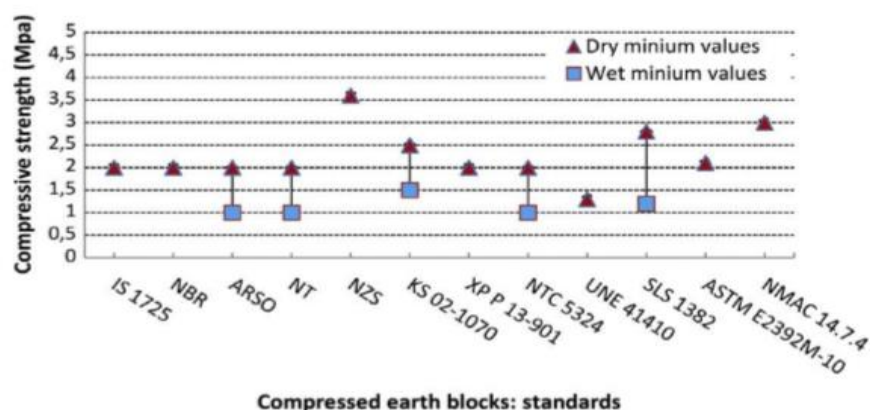


Figure 14 : Résistance en compression minimale admissible pour les BTC

Source : (CANAS, 2012)

III.3.1.4. Résistance à la compression des parpaings



Figure 15 Présentation d'un fournisseur de parpaings en production artisanale

III.3.2. Résistance à la flexion en trois points :

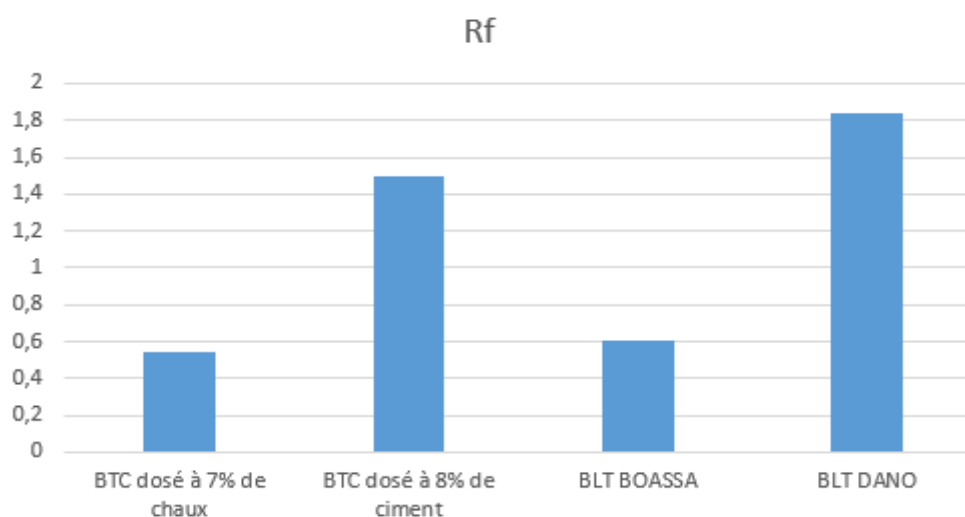


Figure 16 Résistances en flexion de la BTC et la BLT

Les études de résistances en flexions comparées des BLT et des BTC montrent que les BLT de Dano sont plus résistantes que les BTC dosées à 8 % de ciment, elles-mêmes meilleures que les BLT de Boassa qui résistent mieux que les BTC dosées à 7 % de chaux.

III.3.3. Récapitulatif des propriétés mécaniques des matériaux

Les propriétés mécaniques déterminées permettent de choisir le matériau qui convient au type de réalisation qui sera faite en se basant sur la résistance des matériaux sollicités en flexion ou en compression simple. (Tableau 8)

Tableau 8 Récapitulatif des propriétés mécaniques des matériaux

Compression sèche (Mpa)	BTC	Adobe	BLT	Parpaing
Rc	5	2	3	0,826 (L*)
				6,106 (I*)

I*: Industriel

L*: Local

Résistance en flexion (Mpa)	BTC dosé à 7% de chaux	BTC dosé à 8% de ciment	BLT DANO	BLT BOASSA
Rc	0,54	1,5	1,84	0,61

III.4. Étude sur l'analyse du cycle de vie de la BTC (ACV/BTC)

III.4.1. Introduction et objectifs de l'étude

Le but de cette étude est de calculer les impacts environnementaux des briques de terre comprimée stabilisées au ciment (8 % et 12 %).

La méthode employée est l'analyse de cycle de vie (ACV, ou écobilan) simplifiée : une partie seulement des normes ISO 14040 et ISO 14044, sont suivies, de même qu'une partie des règles méthodologiques et de qualité ecoinvent v2.2. Les écobilans établis pourront servir à valoriser les produits fabriqués au Burkina Faso, mais également à fournir à l'institut 2iE la possibilité de réaliser de nouvelles analyses du cycle de vie par un transfert de connaissances. Les données acquises de cette étude, comprendront un inventaire des impacts spécifiques aux matériaux, un mode d'exploitation des résultats, un procédé pour considérer l'unité de charge

écologique, des paramètres nécessitant la connaissance du type d'énergie utilisée pour la production, la réalisation de bilans environnementaux autour des installations ou pour des bâtiments entiers, la possibilité d'évaluer les impacts environnementaux de la production des matériaux étudiés en chiffres.

III.4.2. Définition de l'ACV

L'analyse de cycle de vie évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service, d'un système en relation avec une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Elle permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et elle contribue au développement de nouveaux produits. Cet outil est avant tout employé pour comparer les charges environnementales des produits, services ou systèmes entre eux ainsi que les différentes étapes du cycle de vie d'un même produit. (Olivier JOLLIET)



Figure 17 : Étape de conception du cycle de vie d'un bâtiment

III.4.3. Méthodes retenues pour l'estimation et l'exploitation des données

- Établissement de fiches d'enquête destinées aux acteurs de la fabrication des briques sur la base de la thématique développée dans l'ACV ;

- Enquête de terrain auprès d'une entreprise productrice des matériaux en question dans l'étude.
- Suivi du remplissage du questionnaire et de la prise en compte effective des champs concernés par l'étude ;
- Prise de notes et inventaire du matériel de l'entreprise afin de vérifier les dépenses énergétiques effectuées.

III.4.4. L'analyse par le calcul des paramètres pertinents pour l'analyse du cycle de vie (ACV)

Tableau 9 : données entrant en considération pour l'ACV

Matériau	BTC stabilisé à 8 %
Masse avant maturation	8 kg
Masse après maturation	6,5 kg
Stockage des briques	Entrepôt ouvert
Surface totale de stockage	525 m ²
Caractéristiques du liant	Ciment Eléphant/Burkina Faso CEMI/II 42,5 MPa

III.4.5. Matières premières utilisées

Les matières premières utilisées sont : la terre crue, l'eau, le ciment CEM I et CEM II (à proportions égales). Les quantités fournies par le fabricant Zi Matériaux ont été utilisées pour modéliser l'inventaire du cycle de vie des briques.

III.4.6. Unité fonctionnelle

Catégories de produits étudiées	Unité de référence	Masse volumique humide (kg/m³)	Masse volumique sèche (kg/m³)
Brique de terre comprimée (8 %)	1 kg humide	2,15	2,28
Brique de terre comprimée (12 %)	1 kg humide	1,81	1,92

L'unité fonctionnelle choisie est la fabrication et l'élimination d'un kilogramme de produit. Pour cela, l'unité de référence est le kilogramme de produit. Les masses volumiques ont été estimées à partir des informations fournies par l'Institut 2iE (dimensions et masses des briques avant et après séchage).



Figure 18 : aspect final et mise en œuvre des briques de terre comprimée

III.4.7. Frontières du système

Les données d'inventaire de cycle de vie des briques sont calculées pour les étapes de production et de fin de vie. L'étape de production commence à l'extraction des matières premières et de l'énergie nécessaire aux procédés de fabrication, elle s'arrête à la porte de sortie de l'usine.

III.4.8. Qualité des données calculées

L'écobilan réalisé est dit « simplifié » : des hypothèses ont été considérées pour le calcul de certains flux de l'inventaire. Ce type d'étude met en évidence les contributions principales des flux aux impacts, ce qui permet d'obtenir une tendance pour les résultats ainsi que de cibler les informations pour lesquelles des précisions sont nécessaires pour une nouvelle itération d'ACV.

III.4.9. Méthodes d'évaluation des impacts

Les indicateurs retenus pour quantifier les impacts environnementaux des produits étudiés correspondent aux deux méthodes d'évaluation des impacts suivantes :

- **Demande Cumulée en Énergie (CED)**

La demande cumulée en énergie représente l'ensemble des sources d'énergies non renouvelables et renouvelables consommé dans le cycle de vie d'un produit. Trois indicateurs sont calculés :

- CED non renouvelable (CED_{NRE}), exprimé en kilowattheure (kWh) ou mégajoule (MJ) et intégrant uniquement les parts fossile, nucléaire ainsi que la part biomasse issue de forêts primaires ;
- CED renouvelable (CED_{RE}), exprimé en mégajoule (MJ) et intégrant uniquement les parts hydraulique, solaire, éolienne, géothermique et biomasse ;
- CED total (CED), exprimé en mégajoule (MJ), il est la somme du CED_{NRE} et du CED_{RE} , il intègre ainsi les ensembles des parts fossiles, nucléaire, hydraulique, solaire, éolien, géothermique et biomasses.

- **Potentiel de Réchauffement climatique (GWP 2013)**

L'effet de serre résulte des effets cumulés de différents gaz à effet de serre (ex. : CH_4 , N_2O , CO_2) par rapport aux effets du dioxyde de carbone (CO_2), substance de référence. L'effet de serre est évalué au moyen du potentiel de réchauffement climatique de chaque gaz selon différents horizons temporels, 20, 100, 500 ans (IPCC, Climate change 2013). Dans cette étude, l'horizon de temps considéré est 100 ans. L'indicateur abrégé sous l'acronyme anglais GWP (Global Warming Potential) s'exprime en kilogramme de CO_2 équivalent ($kg\ CO_{2-eq}$).

III.4.10. Inventaire du cycle de vie

Le point de départ de la fabrication d'une brique de terre comprimée est l'extraction de la terre et sa préparation pour que le mélange avec le ciment et l'eau soit homogène.

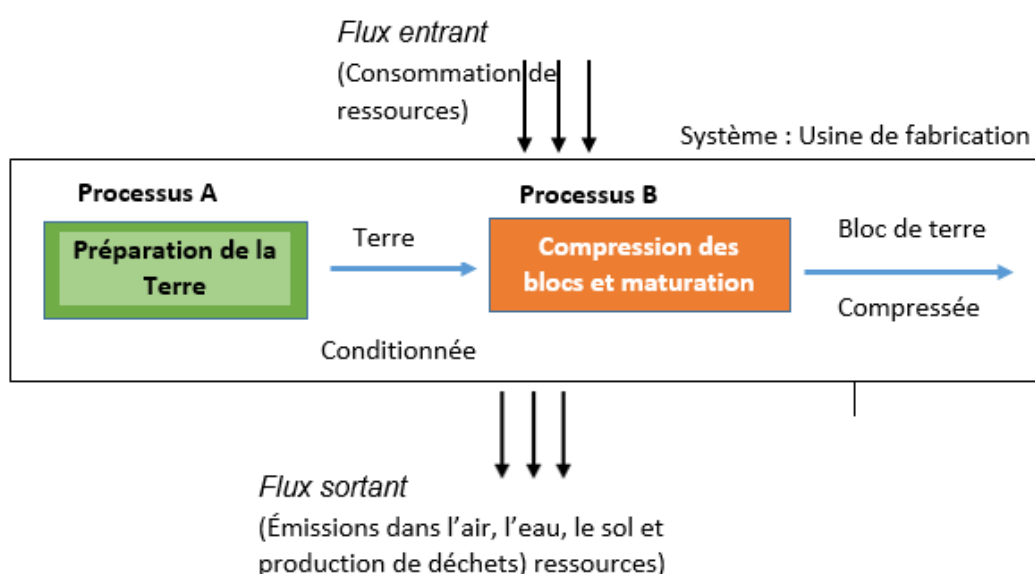


Figure 19 : Schéma simplifié des procédés à l'œuvre dans l'étape de fabrication des BTC

Hypothèses de calcul (règles spécifiques au fabricant)

III.4.11. Période d'enregistrement et représentativité des données

Les charges et émissions liées à la fabrication des produits étudiés correspondent à la production moyenne des dernières années de l'entreprise Zi Matériaux. Cette production est jugée représentative en termes de volumes de production et de consommation de matières premières. Infrastructures et site de production : Les surfaces de bâtiments ont été prises en compte dans l'inventaire.

III.4.12. Besoins en matières premières et en consommables

Les besoins en matières premières regroupent la terre, le ciment et l'eau. Les hypothèses concernant l'extraction et préparation de la terre proviennent d'une autre étude d'ACV de brique de terre comprimée réalisée en Suisse. Les conditions peuvent donc être différentes de

celles du Burkina Faso : une prochaine étude devrait vérifier la conformité des hypothèses considérées et envisager leur adaptation au contexte burkinabé.

III.4.13. Besoins en énergie pour le site de production

L'énergie pour la fabrication des BTC est consommée sous forme d'électricité. En l'absence d'information, une hypothèse de consommation par kilogramme a été considérée à partir d'une autre étude réalisée en Suisse (autre modèle de brique de terre comprimée).

III.4.14. Distances et modes de transport des matières premières

Les distances de transport considérées pour l'approvisionnement du ciment et de la terre correspondent à celles d'une autre étude réalisée en Suisse. L'incertitude sur cette donnée peut influencer le résultat final.

III.4.15. Déchets de production et émissions de polluants dans l'air et l'eau

Les émissions considérées dans les frontières du système sont les émissions de vapeur d'eau (séchage de la brique) et les pertes de matières dans les procédés de fabrication (impact nul car déchet inerte).

Les déchets de production dont le traitement d'élimination est pris en compte dans les frontières du système sont les sacs de ciment. Leur quantité est estimée à partir de celle d'une autre étude réalisée en Suisse.

III.4.16. Processus exclus des frontières du système

Les inventaires incluent les émissions à long terme, mais les consommations et émissions associées aux départements de direction, de recherche et développement, d'administration et de marketing sont exclues de ces inventaires. La consommation de petit matériel est également négligée. Une étude de sensibilité devrait toutefois vérifier que cette consommation représente des impacts négligeables par rapport aux impacts finaux du matériau.

III.4.17. Étape de fin de vie des produits

La fin de vie considérée pour les briques de terre comprimée est la mise en décharge pour matériaux inertes. En l'absence d'information précise, une distance de transport entre le site de déconstruction et l'usine d'incinération est prise en compte à hauteur de 10 km.(Ecoinvent report n°1: Overview and Methodology, 2007)

**Tableau 10: inventaire des flux pour la fabrication de la brique de terre comprimée
dosée à 12 % de ciment**

Intrant	Procédé	Sortant	Quantité / UF	Unité	Ecoinvent dataset
Terre extraite et préparée	CO MP RE PR SS OD ÉE UC ST TIO AB. N 12 BL % OC CI DE ME TE NT RR E		9.6902E-01	kg	Donnée d'ACV créée par le LESBAT
Eau du réseau potable			1.5529E-01	kg	tap water, unspecified natural origin OECD, at user/RER OU tap water, at user
Ciment CEM I			5.8141E-02	kg	CEM I
Ciment CEM II			5.8141E-02	kg	CEM II/B cement, at plant
Transport de : ciment CEM II/B			5.3490E-04	t.km	transport, freight, lorries 32–40 metric ton, fleet average
Transport de : terre extraite et préparée			9.6902E-03	t.km	transport, freight, lorries 32–40 metric ton, fleet average
Électricité - réseau national suisse			2.4100E-03	kWh	electricity, low voltage, production from oil, at grid
Machines (toutes confondues)			3.8715E-05	kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant
Bâtiments-usines			8.4690E-06	m2	Building, hall, steel construction
		bloc de terre comprimée 12 %-ciment	1.0000E+00	kg	
		Émissions	1.8519E-01	kg	Water, BF/low. Pop.

ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MULTICRITÈRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PLUS COURANTS SUR LE MARCHÉ DE OUAGADOUGOU (Burkina Faso)

		dans l'air : eau séchage			
		Émissions dans le sol : pertes	5.5408E-02	kg	inerte, pas d'impact
		Déchets : sacs de ciment	3.8715E-05	kg	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration

III.4.18. Inventaire pour l'étape d'élimination

Tableau 11 : Inventaire du flux pour l'élimination des produits pur (pir) et pur premium, suisse

Intrant	Process	Sortant	Quantité /UF	Unité	Ecoinventdataset
Procédé d'incinération	Élimination Pur (pir) & Pur Premium		1.00E+00	Kg	disposal, polyurethane, 0.2% water, to municipal incineration
Transport vers usine d'incinération			1.00E-02	t.km	Transport, lorries 20–28t, fleetaverage
		UF : Fin de vie panneaux PUR/PIR (tout type)	1.00E+00	kg	

III.4.19. Évaluation des impacts environnementaux et interprétations

Le logiciel d'ACV SimaPro 8.0.4.26 a été utilisé pour modéliser le système ainsi que pour calculer l'inventaire de cycle de vie et les impacts environnementaux des briques. Les données d'arrière-plan sont issues de la base de données KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 ; elles suivent les exigences de qualité des données ecoinvent v2.2.

III.4.20. Fabrication et élimination

Le tableau présente les résultats des impacts environnementaux selon les indicateurs CED_{NRE}, CED, et GWP 2013 par kilogramme de produit, d'après l'ensemble des hypothèses de calcul.

Tableau 12 : Résultats des impacts environnementaux

Étape produite	CED_{NRE} MJ/kg	CED MJ/kg	GWP IPCC 2013 kg CO₂-eq/kg
Fabrication, brique 8 % de ciment	0,571	0,597	0,077
Fabrication, brique 12 % de ciment	0,672	0,706	0,099
Élimination, brique de terre comprimée	0,228	0,23	0,009

Employer un taux de ciment de 12 % au lieu de 8 % représente ainsi une hausse d'impact de 20 % (indicateurs de consommation d'énergie primaire) à 30 % (indicateur des émissions de CO₂) pour le matériau final.

III.4.21. Répartition des impacts de fabrication

Les paragraphes suivants rendent compte des principaux facteurs d'impact pour les produits étudiés. L'identification des principaux facteurs d'impact permet de fournir des indications sur les leviers potentiels de réduction d'impact environnemental.

III.4.22. Répartition pour la BTC-8%

La figure 7 présente la contribution relative des procédés de fabrication pour chacun des indicateurs d'impacts pour la BTC-8%.

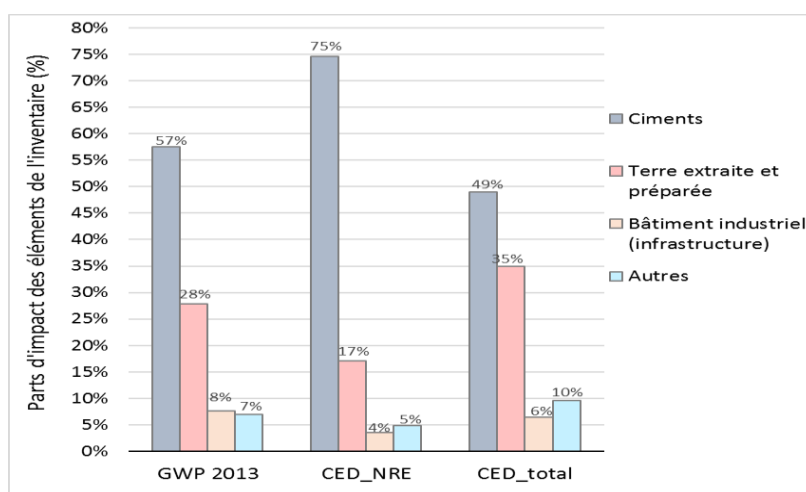


Figure 20 : Contribution relative des procédés de fabrication pour chacun des indicateurs

Les profils d'impact selon les trois indicateurs considérés montrent que la consommation de ciments (CEM I et CEM II réunis) est responsable de la majeure partie des impacts (de 50 % à 75 %), suivi par la préparation de la terre (env. 20 % à 35 %). Étant donnée la charge significative de la préparation de la terre, une étude complémentaire devrait être envisagée pour vérifier la conformité des hypothèses considérées et envisager leur adaptation au contexte burkinabé.

Le bâtiment représente une part d'impact faible, mais non négligeable, tandis que les autres flux de l'inventaire représentent ensemble maximum 10 % des impacts. Ces autres flux regroupent les éléments suivants de l'inventaire : consommation d'eau, transports des matières premières, consommation d'électricité et élimination des sacs de ciment.

III.4.23. Répartition pour la BTC-12%

La figure 8 présente la contribution relative des procédés de fabrication pour chacun des indicateurs d'impacts pour la BTC-12%.

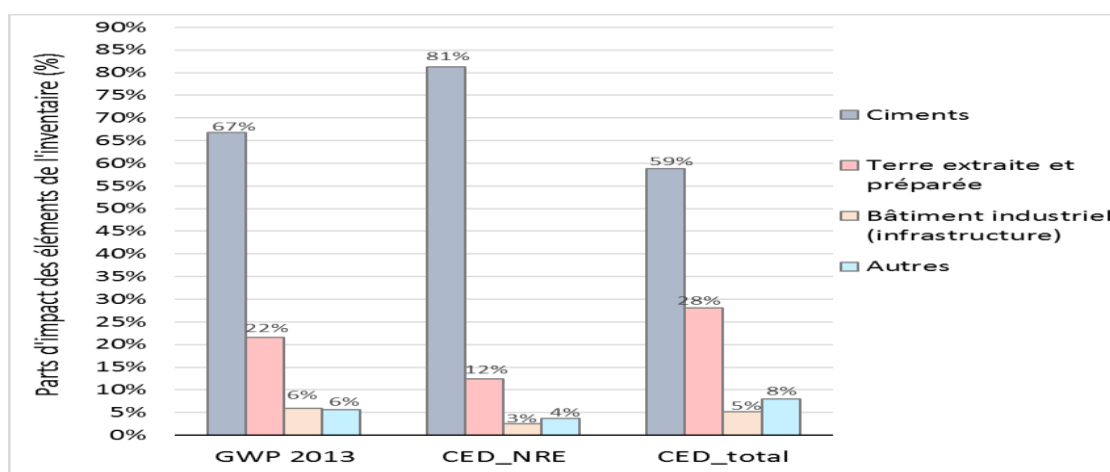


Figure 21 : Contribution relative aux impacts des principaux flux pour la fabrication de la btc-12%

Les profils d'impact sont similaires à ceux de la BTC-8% : la consommation de ciment prédomine, suivi par la préparation de la terre extraite, le bâtiment et les autres flux de l'inventaire. La différence concerne la part d'impact du ciment qui est plus importante (de 60 % à 80 %), ce qui s'explique par le taux de ciment plus élevé.

III.4.24. Répartition des impacts d'élimination

La figure 9 présente la contribution relative des procédés d'élimination considérés (mise en décharge pour matériaux inertes) pour les briques étudiées.

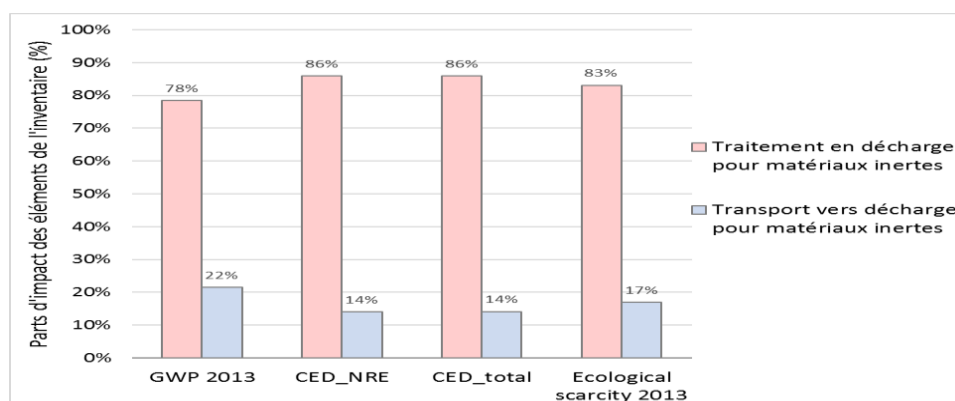


Figure 22 : Contribution relative aux impacts des principaux flux pour l'élimination des BTC

Quel que soit l'indicateur considéré, le facteur d'impact prépondérant est le procédé de traitement en décharge pour matériaux inertes (env. 85 %, essentiellement de la manutention

avec des engins motorisés), tandis que le transport vers le site de traitement représente une part d'environ 15 %.

III.4.25. Conclusion partielle

En collaboration avec l'Institut 2iE, le LESBAT a établi ces écobilans simplifiés pour deux briques de terre comprimée stabilisées au ciment (8 % et 12 %). Ces écobilans ont été calculés selon les indicateurs suivants : demande cumulée en énergie primaire non renouvelable (CEDNRE), demande cumulée en énergie primaire totale (CED total), potentiel de réchauffement climatique (GWP 2013).

Les résultats montrent qu'employer un taux de ciment de 12 % au lieu de 8 % représente une hausse d'impact de 20 % (indicateurs de consommation d'énergie primaire) à 30 % (indicateur des émissions de CO₂) pour le matériau final. Ainsi, le dosage du ciment représente un critère important pour contrôler l'impact environnemental du matériau. Cela est confirmé par l'étude des contributions aux impacts qui révèle que le ciment représente la contribution principale aux impacts des matériaux (jusqu'à plus de 80 %), suivi par la préparation de la terre pour le mélange (maximum 35 %). Les hypothèses pour le calcul des impacts de la préparation de la terre proviennent d'une autre étude d'ACV de brique de terre comprimée (réalisée en Suisse). Ainsi, afin d'affiner les résultats, il convient de réaliser une étude complémentaire pour vérifier la conformité des hypothèses considérées pour l'extraction de la terre et envisager leur adaptation au contexte burkinabé.

Les résultats de cette étude peuvent orienter Zi Matériaux, le fabricant ayant participé à l'étude, dans une démarche de réduction d'impacts environnementaux et de valorisation de ses matériaux selon des critères environnementaux. Cette étude sert par ailleurs d'exemple de base pour de prochaines études d'ACV simplifiées qui pourraient se réaliser à l'Institut 2iE.

CONCLUSION

L'importance de s'intéresser et d'étudier le marché informel des matériaux de construction les plus courants à Ouagadougou au Burkina ainsi que les différentes chaînes de valeurs associées (de la fabrication du matériau à sa mise en œuvre dans la construction) est capitale car tout décideur ou partenaire technique aura besoin de valeurs clés ou d'indices clairement établis dans le processus d'étude des marchés avant la prise de décision.

Dès lors, l'étude de caractérisation, objet du présent mémoire, se voudrait un départ pour une présentation et une mise en valeur des matériaux locaux basées sur une meilleure connaissance de leurs caractéristiques physico-mécaniques afin de promouvoir le respect de l'environnement, la promotion de l'emploi, et la maîtrise des fluctuations.

Ce travail pourrait constituer une base pour élaborer des directives et des normes à la fois dans le domaine fabrication des matériaux de construction et de leur mise en œuvre, mais permettra en outre d'identifier les besoins de formation et de compétences dans la chaîne de mise en valeur des matériaux locaux de construction.

Un tel travail pourrait donc permettre, à terme, de mettre sur pied des programmes d'actions dans les domaines de formations spécifiques pour améliorer d'une part, la qualité des matériaux locaux de construction, mais aussi leur promotion et leur vulgarisation dans la construction des bâtiments.

Globalement, les travaux du présent mémoire ont permis d'obtenir des résultats intéressants qui viennent soit confirmer les valeurs connues ou qui donnent lieu à des réflexions sur des paramètres à revoir au niveau des méthodes, et des conditions d'essais ou tout simplement nous indiquent qu'il reste encore à faire dans le domaine de la recherche sur les matériaux locaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Buchanan. (1807).
- C.H. Kouakou, J. M. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, Vol. 44(N° 1–2), pp. 27–34.
- CANAS. (2012). p. 739.
- CEN, ISO 14044. (2006). *Management environnemental, analyse du cycle de vie, exigences et lignes directrices* ».
- De Florence Fournet, A. M.-N. (s.d.). Ouagadougou (1850-2004) : Une urbanisation différenciée.
- (2007). *Ecoinvent report n° 1 : Overview and Methodology*. Dübendorf.
- (1998). *Guides pratiques des Blocs de Terre comprimée, normes*.
- Hall, M. D. (2004). *Moisture ingress in rammed earth: Part 1—the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction. Construction and Building Materials* . Construction and Building Materials.
- Hugo Houben, H. G. (1989). *Traité de Construction en Terre*.
- Institut National de la Statistique et de Démographie ; Burkina Faso. (s.d.). Ouagadougou.
- J.-P., L. (1987). *Propriétés thermiques du matériau terre*. Cahiers du CSTB, CSTB.
- LAWANE, A. (2014). *Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l’habitat en Afrique*. Ouagadougou.
- (1990). *Les enjeux des extensions urbaines à Ouagadougou, BURKINA FASO 1984-1990*. Ouagadougou.
- Mariette Moevus, L. F. (juin 2012). *Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature*. Laboratoire CRAterre-ENSAG.
- Moevus, F.e. (2012).
- Montréal, O. M. (s.d.). *Office municipal d’habitation de Montréal*. Montréal.
- Olivier JOLLIET, M. S. (s.d.). *Analyse du cycle de vie, comprendre et réaliser un écobilan ; 2e édition, mise à jour et augmentée*.

- Paulus, J. (2014-2015). *Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – application à un cas pratique : Ouagadougou*. Liège : Université de Liège/Faculté des Sciences appliquées.
- Persons. (1970).
- (Mars 2015) *Rapport final de l'élaboration du rapport national Habitat III du Burkina Faso*. Ouagadougou.
- SANOU et All. (1986).
- T. F. Stocker, D. Q. (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- Wyss. (2005).

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats des Essais Résistance en compression des BLT de DANO

Désignation	Masse (kg)	Force (kN)	R _c (MPa)	Ecartype résistances
BLT de DANO	5,32	37,47	1 926	0,278
	5,25	46,52	2 373	
	5 717	47,75	2 436	

Annexe 2 : Résultats des Essais Résistance en compression des BLT de BOASSA

Désignation	Masse (kg)	Force (kN)	R _c (MPa)	Ecartype Résistances
BLT de BOASSA	6 194	29,78	1 519	0,217
	6,26	31,53	1,61	
	6 556	23,47	1 197	

Annexe 3 : Résultats des Essais Résistance en compression de La Brique en Terre comprimée (BTC) dosée à 8 % en ciment

N° éprouvette	Masse [g]	Surface effective (mm ²)	Charge de rupture (N.)	Résistance effective (MPa)
1	5569	20 650	93 078,97	4 507
2	5400	20 650	107 380	5 200
3	5290	20 650	120 063	5 814
4	5357	20 650	89 206,03	4 320
5	5350	20 650	113 704,5	5 506
6	5743	20 650	104 740,1	5 072

Annexe 4 : Résultats des Essais de résistance en compression de l'adobe du barrage de Kamboinse

N°	Masse [g]	Surface effective (mm ²)	Charge de rupture (N.)	Résistance effective (MPa)
1	11 330	30 600	58 140,00	1,9
2	10 445	30 600	71 910,00	2,35
3	11 580	30 600	83 844,00	2,74
4	11 491	30 600	48 042,00	1,57
5	11 055	30 600	60 588,00	1,98
6	11 244	30 600	62 730,00	2,05

Annexe 5 : Résultats des Essais de résistance en compression de l'adobe de la carrière à Kamboinse

N°	Masse [g]	Surface effective (mm ²)	Charge de rupture (N.)	Résistance effective (MPa)
1	8527	28 000	42 280,00	1,51
2	8276	28 000	37 520,00	1,34
3	8850	28 000	35 280,00	1,26
4	8185	28 000	46 760,00	1,67
5	7921	28 000	50 960,00	1,82
6	8674	28 000	39 200,00	1,4

Annexe 6 : Résultats des Essais pour déterminer la résistance à la compression des parpaings Nina Construction

Numéro éprouvette	Masse [kg]	Surface effective (mm²)	Charge de rupture (N)	Résistance effective (MPa)
1	20,18	60 000	372 842	6 214
2	19,63	60 000	225 564	3 759
3	20,06	60 000	411 254	6 854
4	20,02	60 000	259 548	4 326
5	20,25	60 000	414 873	6 915

Annexe 7 : Résultats des Essais pour déterminer la résistance à la compression des parpaings Zi Matériaux

N° éprouvette	Masse [kg]	Surface effective (mm²)	Charge de rupture (N)	Résistance effective (MPa)
1	15,05	40 000	252 159	6 304
2	14,95	40 000	240 156	6 004
3	15,5	40 000	324 928	8 123
4	15,06	40 000	261 007	6 525
5	15,09	40 000	274 256	6 856

**Annexe 7 : Résultats des Essais de résistance des agglomérés creux
d'épaisseur 15 cm (YACOUBA)**

N°	Maturité [jours]	Masse [kg]	Surface effective (mm ²)	Charge de rupture (N.)	Résistance effective (MPa)
1	7 jours	13,46	20 900	25 889	1 239
2	7 jours	12,62	20 900	17 923	0,858
3	7 jours	13,28	20 900	15 979	0,765
4	7 jours	13,1	20 900	16 833	0,805
5	7 jours	13,59	20 900	17 544	0,839
6	7 jours	13,45	20 900	21 005	1 005

**Annexe 8 : Résultats des Essais de résistance des agglomérés creux
d'épaisseur 15 cm (GAGRE et Frères)**

N°	Maturité [jours]	Masse [kg]	Surface effective (mm ²)	Charge de rupture (N)	Résistance effective (MPa)
1	7 jours	12,81	20 900	16 074	0,769
2	7 jours	12,22	20 900	9768	0,467
3	7 jours	12,79	20 900	10 337	0,495
4	7 jours	13,72	20 900	41 252	1 974
5	7 jours	12,96	20 900	11 901	0,569
6	7 jours	12,77	20 900	12 233	0,585

Annexe 9 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BLT de DANO

Composition	Masse avant Essai (g)	Force (N.)	R _f (MPa)	Ecartype Résistances
BLT de DANO	6640	3830	1,07	0,59
	7880	6550	1,84	
	8090	2330	0,65	

Annexe 10 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BLT de BOASSA

Composition	Masse avant Essai	Force (N.)	R _f (MPa)	Ecartype Résistances
BLT de BOASSA	5955	1354,72	0,50	0,15
	6480	1547,56	0,61	
	5760	942 249	0,32	

Annexe 11 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BTC dosé à 7 % de chaux

Composition	Masse avant Essai	Force (N.)	R _f (MPa)	Ecartype R _f
BTC CHAUX _{7 %}	5770	1 288 817	0,35	0,11
	5760	1 952 352	0,54	
	5710	1 283 213	0,34	

Annexe 12 : Résultats à l'essai de résistance en flexion des BTC à 8 % de ciment

Composition	Masse avant Essai	Force (N)	R _f (MPa)	Ecartype R _f
BTC en ciment dosé à 8 %	6420	3 020 069	0,83	0,35
	6440	4 874 229	1,34	
	6730	5 444 828	1,50	