



LABORATOIRE NATIONAL DU BATIMENT
ET DES TRAVAUX PUBLICS

Etude de faisabilité au Burkina Faso de l'application en trottoir
des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de
concassé granitique et au ciment– performances, coûts et
impacts environnemental

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE GENIE CIVIL – BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS

**Présenté et soutenu publiquement le 23/01/2024 par
YAKA Sompouïré Jucicaël Mohamed (20210562)**

Directeur de mémoire : Dr. Philbert NSHIMIYIMANA, Enseignant Chercheur -
Fondation 2iE

Maître de stage : M. OUEDRAOGO Fabrice, Ingénieur Géotechnicien, LNBTP

Structure d'accueil du stage : Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics

Jury d'évaluation du mémoire :

Dr. Mamadou DIOP (Président du jury)

M. Issa MADOUGOU (Examineur)

M. Mamadou Pousga Junior KABORE (Examineur)

Promotion [2023/2024]

DEDICACES

Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail :

∞ Au Seigneur mon créateur, mon protecteur, lui qui me guide et veille toujours sur moi;

∞ À mon très Cher Père et à ma très Chère Mère, qui sont pour moi des modèles de résilience dans le travail et une source d'inspiration. Ceci est le fruit de votre amour, de votre rigueur, votre soutien et de vos innombrables sacrifices ;

∞ À Papi Gabriel et Mamie Céline pour m'avoir toujours conseillé, prié pour moi et partager leurs expériences et leurs-sagesses;

∞ À mes Oncles et Tantes pour leurs encouragements et soutien ;

∞ À mes Frères pour leurs encouragements et soutien ;

∞ À mes Cousins et Cousines pour leurs encouragements et soutien ;

∞ À tous ceux et celles qui me sont chers et qui m'ont soutenu moralement et matériellement.

YAKA Sompouïré Jucicaël Mohamed

REMERCIEMENTS

A l'issu de ce stage pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, il nous tient à cœur de remercier vivement tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail. Nous remercions particulièrement pour leurs disponibilités, les conseils et efforts consentis à notre égard tout au long de notre stage pratique, les structures et personnes ci-après:

- ❖ La Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et l'ensemble du personnel pour leur engagement à nous offrir une formation de qualité.
- ❖ Monsieur Seydou TRAORE, Directeur général du Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) pour m'avoir permis d'effectuer ce stage ;
- ❖ Monsieur Amadou ZI, Directeur général de Zi Matériaux pour m'avoir permis de produire mes prototypes ;
- ❖ Monsieur Fabrice OUEDRAOGO, Chef de service études géotechniques à la Direction des Etudes et du Contrôle des Infrastructures de transport (DECGIT) au LNBTP, mon maître de stage qui a su m'apporter tout le soutien dont j'avais besoin.
- ❖ Docteur Philbert NSHIMIYIMANA, Enseignant chercheur à 2ie, pour sa disponibilité. Votre abnégation et votre passion pour le travail ont su m'influencer positivement et pour cela je vous suis vraiment reconnaissant ;

Je remercier également tout le personnel que j'ai pu côtoyer au sein des deux laboratoires d'accueil (LNBTP et LEMHaD) et qui a participé au bon déroulement de cette recherche.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tout le personnel de Zi Matériaux, qui ont grandement contribué à mise en œuvre de mon projet.

J'exprime par ailleurs ma reconnaissance aux amis et camarades de promotion qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon parcours à 2iE.

Enfin, je traduis ma reconnaissance à toute ma famille pour son soutien inconditionnel. Un merci spécial à mon père et ma mère, pour m'avoir comblé de tout ce dont j'avais besoin.

Puissez-vous trouvez ici, l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

Cette étude se présente comme étant une étude de faisabilité d'emploi des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique à 10, 15, 20% et au ciment à 8% comme alternative pour paver les trottoirs non carrossables au Burkina Faso. Il serait donc question de se pencher sur les performances, coûts et impacts qu'induiront ces pavés sur l'environnement. Un ensemble de caractérisation a été effectué pour déterminer si les performances des pavés en terre avec résidus valident les exigences prescrites par la norme **NF EN 1338 : 2003 (P 98-338)** sur les pavés et la norme **ARS 670 : 1996** sur les BTC.

Les rapports sur l'effet de l'ajout des résidus de concassée granitique à différents dosages à la terre ont montré une réelle amélioration du comportement des pavés en terre en présence de l'eau. L'absorption capillaire montre des variations entre 0,2 g/cm² à 0,4 g/cm² contre une moyenne supérieure à 0.35 g/cm² pour le pavé en terre comprimée préexistant. L'absorption par immersion varie de 12 à 14% contre une moyenne supérieure à 14,5% pour les pavés en terre comprimée préexistant. Les performances en compression sèche et humide sont comprises entre 1,5 à 10 MPa et pour la résistance au fendage sec et humide, les valeurs globalement sont inférieures à 1 MPa pour une exigence chiffrée à 3,6 MPa.

Dans le souci de proposer une vision globale de ces produits comme alternative, il a été réalisé une étude de prix, estimant le pavé T1 à 185 f/unité soit 4625f/m² pour T1, 190 f/unité soit 4750f/m² pour T2 et 195 f/unité soit 4875 f/m² pour T3 contre une moyenne de 7200f /m² pour les pavés de trottoir de 6 cm selon la mercuriale Ouagadougou de 2024. Par la suite, un ensemble d'analyse de cycle de vie des pavés de l'étude a été réalisé afin de mieux comprendre le comportement des pavés face à l'environnement. Il en ait ressorti que le pavé en béton est extrêmement polluant avec un pourcentage d'impact égal à 100% contre une réduction significative de plus de 70% pour les pavés en terre avec résidus et ciment n'impactant principalement que les facteurs tournant autour de la terre tel que l'écotoxicité terrestre etc.

Mots clés :

1. Pavés
2. BTC
4. Coût
5. ACV

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

ABSTRACT

This following study presents himself as a study of the possibility to use compressed earth paving stone stabilized with granite dust at 10, 15, 20% and cement at 8% as an alternative to pave no-drivable sidewalk in Burkina Faso. The focus will be on looking at performances, costs and impacts that these paving stone will have to environmental. A set of characterizations was performed to determine whether performance of clay paving stones stabilized with granite dust validates all the requirements prescribed by paving stone and BTC standards.

Results on the effect of adding granite dust at different dosages to the earth arise showed a real improvement in the behavior of the compressed clay paving stone stabilized with granite dust facing the water. Capillary absorption shows some variations to 2 g/cm² at 4 g/cm² compared to an average greater than 0.35 g/cm² for the pre-existing compressed clay paving stone. Absorption by immersion varies from 12 to 14% against an average higher than 14,5% for the pre-existing compressed clay paving stone. Performance in dry and wet compression range from 1.5 to 10 MPa for resistance to dry and wet splitting, the overall values are less than 1MPa for a requirement of 3.6MPa.

In order to propose a global vision of these products as an alternative, a price study was carried out, estimating the paving stone T1 at 185 f/units then 4625f/m², 190 f/units then 4750f/m² for T2 and 199 f/units then 4875 f/m² for T3 compared to an average of 7200f/m² for 6 cm sidewalk paving stones according to Ouagadougou 2024 market price. Subsequently, a set of Life cycle assessment (LCA) and Comparative LCA of studie's paving stone were carried out in order to understand the behavior of clay paving stone in relation to the environment. It emerged that, concrete paving stone is extremely polluting with an impact percentage equal to 100% compared to a significant reduction of more than 70% for the compressed clay paving stone with granite dust and cement mainly impacting only factors revolving around earth such as terrestrial ecotoxicity etc.

Key words :

1. Pavement
2. CEB
4. Cost
5. LCA

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
A.C.V	: Analyse du cycle de vie
B.T.C	: Bloc de Terre Comprimée
B.T.S	: Bloc de Terre Comprimée stabilisé au Sable
D.E.C.S.E.M	: Direction des Etudes et du Contrôle des Structures, des Equipements Techniques et des Matériaux
cm	: Centimètre
cm²	: Centimètre carré
F CFA	: Franc de la Communauté Financière Africaine - XOF
CO₂	: Dioxyde de Carbone
O.P.M	: Optimum Proctor Modifié
O.N.E.A	: Office National de l'Eau et de l'Assainissement du BURKINA FASO
NF P	: Norme Française, Bâtiment et Génie civil
NB F	: Norme Burkina Faso
Ip	: Indice de Plasticité
ISO	: International Organization for Standardization
kWh	: Kilowattheure
kN	: Kilo newton
L.N.B.T.P	: Laboratoire National des Bâtiments et des Travaux Publics
LEMHaD	: Laboratoire Eco-Matériau et Habitats Durables
m	: Mètre
m²	: Mètre carré
m³	: mètre cube
mm	: millimètre
MPa	: Méga pascal
VBS	: Valeur au Bleu de Méthylène
WI	: Limite de Liquidité
Wp	: Limite de Plasticité
SO.NA.B.EL	: Société National Burkinabé d'Electricité
SO.NA.B.HY	: Société National Burkinabé d'Hydrocarbure

SOMMAIRE

DEDICACES	1
REMERCIEMENTS	2
RESUME.....	3
ABSTRACT	4
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	5
LISTE DES TABLEAUX.....	9
LISTE DES FIGURES	10
INTRODUCTION GENERALE.....	12
CHAPITRE 1 - REVUE DE LITTERATURE	14
I. Les pavés non carrossables	14
1. Présentation et généralités sur les pavés en béton non carrossables	14
2. Synthèse sur les prescriptions relatives aux pavés non carrossables	15
II. Les blocs de terre comprimée	16
1. Présentation et généralités sur les BTC et cycle de production	16
1. Synthèse sur les normes en matière de BTC.....	17
III. Critères de choix des matières premières et les méthodes de stabilisation.....	18
1. Critères de choix des matières premières.....	18
2. Les méthodes de stabilisation	21
IV. Méthodologies d'évaluation des coûts et de l'impact environnemental.....	23
1. Méthodologies d'évaluation des coûts.....	23
2. Méthodologies d'évaluation des impacts environnementaux	23
CHAPITRE 2 : Matériaux et méthodes expérimentales	25
I. Diagnostique des pavés en terre comprimée existants	25
1. Méthode de contrôle des caractéristiques visuelles, tactiles et géométriques.....	25
2. Méthode de caractérisation des performances physique et mécanique.....	25
II. Matériaux, formulations et caractérisations expérimentales	26

1.	Matériaux	26
2.	Formulation et caractérisation géotechnique	26
3.	Formulation et processus de fabrication des prototypes de pavés en terre	27
III.	Caractérisation des pavés.....	29
1.	Propriétés physiques	29
2.	Propriétés mécaniques	30
CHAPITRE 3 : Résultats et Discussion		32
I.	Diagnostic des pavés en terre comprimées existants.....	32
1.	Présentation de l'existant	32
2.	Résultat du contrôle des caractéristiques visuelles, tactiles et géométriques	32
2.	Bilan des dégradations et de leurs ampleurs/quantités sous code couleur.....	35
II.	Identification et caractérisation des matières premières.....	36
1.	Résultat des essais d'identification et de caractérisation géotechnique.....	36
2.	Bilan des résultats – caractéristiques géotechniques de base des matériaux	40
III.	Résultats et discussions de la caractérisation physico-mécanique des pavés de l'étude	40
1.	Propriétés physiques	41
2.	Propriétés mécanique ²	43
3.	Vérification des résultats de performance des pavés par rapport aux exigences normatives	45
IV.	Etude de prix.....	47
1.	Coûts de production	47
2.	Evaluation sommaire du marché des pavés, coûts et performances	49
V.	Impact environnemental	50
1.	Processus de réalisation de l'analyse du cycle de vie des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment	50
2.	Résultats de l'analyse du cycle de vie des pavés de l'étude	51
3.	Résultats de l'analyse du cycle de vie comparative des pavés de l'étude.....	52

CONCLUSION GENERAL	46
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- Epaisseur selon la destination - NF EN 1338 P 98-338 [5]	15
Tableau 2- Les tolérances dimensionnelles - NF EN 1338 P 98-338 [5].....	15
Tableau 3- Prescriptions physico-mécaniques BTC de parement - ARS 670 : 1996 [7].....	18
Tableau 4 - Performances de la stabilisation par ajout de minéraux.....	22
Tableau 5 - Système de notation	25
Tableau 6- Bilan des dégradations et de leurs ampleurs/quantité sous code couleur	35
Tableau 7- Les limites d'Atterberg des matériaux.....	38
Tableau 8 - Valeurs au bleu de méthylène	39
Tableau 9 - Valeurs des optimums Proctor normal.....	39
Tableau 10 - synthèse des caractéristiques géotechnique des matériaux	40
Tableau 11 – Vérification des exigences BTC.....	45
Tableau 12 – Vérification des exigences pour les pavés.....	46
Tableau 13- Coût de la production	48
Tableau 14 - Coût unitaire et du mètre carré des pavés en terre	48
Tableau 15-Coût des pavés en béton - mercuriale BTP de Ouagadougou 2024 à la page 57..	49
Tableau 16- Performances et coûts	49
Tableau 17 - Profils environnementaux de la production d'un kg de pavé en terre stabilisé à 10%, 15%,20% de résidus de concassé granitique avec à 8% de ciment.....	41
Tableau 18 - Profils environnementaux de la production d'un kg de pavé en béton, de pavé en terre (10, 15,20%) et de pavé stabilisé à 8% de ciment	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Pavés en béton non carrossables.....	14
Figure 2 - Bloc de Terre Comprimée BTC	16
Figure 3- Fuseau granulaire ARS- 680	19
Figure 4 - Diagramme de plasticité ARS- 680.....	19
Figure 5- Classification des matériaux selon leur nature ARS- 680	20
Figure 7 - Provenance et condition de concassage à la carrière de granite de Pissy.....	26
Figure 8- Processus de malaxage des prototypes	28
Figure 9- Conduite et condition de cure.....	29
Figure 10 - Essai de compression sèche et humide	30
Figure 11 - Essai de fendage sec et humide	31
Figure 12 – Les pavés en terre comprimées existants - Forme et Dimensions	32
Figure 13 - Présence de délitage	33
Figure 14 - Présence d'épaufrures	33
Figure 15 - Présence de crevasses	33
Figure 16 - Présence de lessivage ou perte de matière.....	34
Figure 17 - La présence de rugosité exagéré ou de crevasses	34
Figure 18- Courbe granulométrique de la terre crue	36
Figure 19 - Courbe granulométrique des résidus de concassage	37
Figure 20 - Ensemble des courbes granulométriques de la terre crue et des mélanges	37
Figure 21 - Fuseau de plasticité des matériaux recommandés pour les BTC.....	38
Figure 22 - Les courbes Proctor des matériaux T0, T1, T2 et T3	39
Figure 23- Classification des matériaux selon leur nature	40
Figure 24 - Coefficient d'absorption d'eau par capillarité	41
Figure 25 - Absorption d'eau par immersion totale.....	42
Figure 26 - Photographie des effets du prolongement de l'immersion sur les pavés préexistants et les prototypes de pavés de l'étude.....	43
Figure 27 - Résistance à la compression sèche et humide	44
Figure 28 - Résistance au fendage.....	45
Figure 29 - Présentation de Sima Pro version 9.0 et de la méthode de calcul	50
Figure 30 - Présentation de la base de données réalisée pour l'étude	51
Figure 31 - l'ACV Comparative de la production d'un kg de pavé en terre stabilisé à 10%, 15%,20% de résidus de concassé granitique avec à 8% de ciment.....	40

Figure 32 - l'ACV Comparative de la production d'un kg de pavé en béton, de pavé en terre (10, 15,20%) et de pavé préexistant 42

INTRODUCTION GENERALE

L'aménagement des espaces publics est devenu de plus en plus fréquent dans les villes et campagnes africaines, apportant une forte présence de matériaux dite modulaire. Parmi ces matériaux, le pavé se présente régulièrement dans le choix des concepteurs du B.T.P comme un matériau fiable et avantageux, tant sur le plan économique que social en respectant les performances physico-mécaniques satisfaisantes. Spécifiquement le pavé en béton a réussi à s'imposer leader parmi ses congénères lors des phases de conception des projets.

Cependant, la problématique de la disponibilité des ressources composant les pavés en béton se pose. Sachant que les méthodes de construction actuelles reposent sur des matériaux industriels dont la production est très énergivore[1], le choix des matériaux doit apporter des performances environnementales acceptables, compte tenu de l'urgence du changement climatique en prenant en compte les réalités de l'environnement économique et technique du milieu.

Evidemment, des études antérieures ont eu à proposer des solutions intéressantes pour remédier à ces problèmes, comme la fabrication de pavés faits à base de déchets plastiques ou à base de bétons recyclés. Malheureusement ces pavés usent toujours de matériaux granulaires dispendieux, peu accessibles et demandent une mise en œuvre millimétrée réduisant les libertés d'action en plus d'être tout de même polluants. Ainsi, se pencher sur l'amélioration durable des pavés incite à les produire avec un matériau largement disponible et adapté à nos réalités économiques en prenant en compte leurs impacts.

Des études menées par le bureau national des mines et de la géologie du Burkina sur la mise en valeur des substances utiles et les matériaux de construction entre 1999-2001, atteste que la terre est un matériau quasiment présent dans toute l'étendue du territoire burkinabé contre 500 sites dénombrés de sables, de graviers et de roches similaires. La terre se présente alors comme une alternative. Depuis 1917, plusieurs chercheurs se sont penchés sur des méthodes permettant l'utilisation de la terre dans divers usages, produisant des techniques novateurs appelés « techniques de stabilisation des sols ». Parmi ces techniques de stabilisation, la stabilisation au liant hydraulique sort du lot en permettant d'obtenir un nombre conséquent de résultats prometteurs sur le plan physico-mécanique [2] à travers l'amélioration considérable de la résistance mécanique de la terre ou encore en assurant une meilleure résistance à l'eau [3]. De plus, le travail de la terre demande peu d'énergie, avec environ 1140 kWh pour 1 mètre cube de terre crue contre environ 2640 kWh pour 1 mètre cube de béton [4]. L'obtention du matériau

et la production des blocs sont généralement in situ et génère une économie locale plutôt que des dépenses en matériaux d'importation [4] Tout cela fait de la terre, un matériau devenu de plus en plus compétitif sur le plan technique, scientifique, économique et social pouvant changer la donne.

C'est dans cette optique que s'inscrit, notre thématique « **Etude de faisabilité de l'application en trottoir des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment – performances, coût et impacts** ». La vision globale de notre étude est de proposer des pavés en terre comprimée avec addition de résidus de concassage et du ciment pour trottoir non carrossable. L'étude devra ainsi faire ressortir leurs performances, coûts et leurs impacts sur l'environnement à travers les objectifs ci-dessous :

- Réaliser des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment prêt à l'emploi et conforme aux normes en vigueur pour sa conception et sa production;
- Caractériser des pavés de l'étude afin de tirer leurs propriétés physico-mécaniques;
- Déterminer des coûts relatifs à l'unité et au mètre carré des pavés terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment ;
- Réaliser des analyses de cycle de vie et des profils environnementaux sur les pavés de l'étude.

Le présent mémoire s'articule ainsi autour de 3 chapitres. Le chapitre I présente la revue de littérature. Le chapitre II sera consacré aux matériaux et méthodes expérimentales utilisés. Le chapitre III présente les résultats et discussion autour du sujet.

CHAPITRE 1 - REVUE DE LITTÉRATURE

Introduction partielle

Ce premier chapitre propose une synthèse bibliographique sur les éléments-clés de l'étude. L'objectif est de capitaliser un ensemble d'informations sur les normes relatives aux pavés et aux BTC, les modalités de choix, l'identification et la caractérisation des matériaux en se basant sur les recommandations techniques. Aussi, il s'agit d'appréhender les méthodes de stabilisation, d'évaluation des propriétés physico-mécanique et environnemental des pavés et de procéder à la définition de la méthode de calcul du coût des pavés en terre comprimée.

I. Les pavés non carrossables

1. Présentation et généralités sur les pavés en béton non carrossables

a. Présentation des pavés en béton non-carrossable

Les pavés se présentent comme étant des éléments de construction sous forme de bloc, destiné au revêtement des sols. Ils ont été inventés par les Romains pendant l'Antiquité pour revêtir leurs routes. De nos jours, il est fréquent d'observer l'emploi des pavés sous diverses formes géométriques, composés de tous type de matériau (en pierre, en bois, etc.) et d'usages variés.

b. Généralités sur les pavés en béton non carrossables

Prisé pour la réalisation de grands espaces publics, le pavé non carrossable propose de bonnes résistances tant sur le plan physico-mécanique que sur le plan de la durabilité. Il est réalisé à base d'un matériau composite et homogène appelé le béton provenant du mélange de granulat, de ciment, d'eau et d'adjuvant si le besoin en ait.



Figure 1- Pavés en béton non carrossables

Le pavé non carrossable peut être fabriqué avec un seul et même béton ou avec des bétons différents (pour la couche de parement et le fond). Il peut être produit avec des profils

fonctionnels et/ou décoratifs et la surface du pavé peut-être texturée ou avoir subi un traitement secondaire ou chimique [5].

2. Synthèse sur les prescriptions relatives aux pavés non carrossables

La synthèse présente entre autres les exigences portant sur les résistances physiques face aux charges et face aux intempéries ainsi que les tolérances dimensionnelles de ce type de produit. De façon à proposer une base technique, le DTR B.C.2.2 [6] relatif aux chargements sur le béton et la norme NF EN 1338 P 98-338 [5] relative aux pavés ont été pris en référence.

❖ Dimensions et tolérances dimensionnelles - NF EN 1338 : 2003 (P 98-338)

La norme NF EN 1338 P 98-338 [5] propose à ce sujet les dimensions présentées ci-dessous dans le tableau 1 et les tolérances dimensionnelles dans le tableau 2.

Tableau 1- Epaisseur selon la destination - NF EN 1338 P 98-338 [5]

Destination	Epaisseurs recommandées
Les entrées commerciales	8 cm - tolérance de ± 3 ou 4 mm
Les entrées résidentielles	7 cm - tolérance de ± 3 ou 4 mm
Les trottoirs et patio	5 cm - tolérance de ± 3 ou 4 mm

Tableau 2- Les tolérances dimensionnelles - NF EN 1338 P 98-338 [5]

Epaisseur du pavé	Longueur	Largeur
< 100 mm	± 2	± 2
≥ 100 mm	± 3	± 3

Il est aussi recommandé selon la norme NF EN 1338 P 98-338 [5] de s'assurer de la bonne planéité des éléments. Ainsi, pour les éléments de 300 mm de calibre, l'écart maximal sur la convexité est de 1,5 mm et sur la concavité est de 1 mm. Par contre pour des éléments de 400 mm de calibre l'écart maximal sur la convexité est de 2 mm et la concavité de 1,5 mm.

❖ Exigences et recommandations physico-mécaniques

Au sujet des exigences physico-mécaniques, la norme NF EN 1338 P 98-338 [5] propose les recommandations suivantes :

- Exigence sur l'aspect - NF EN 1338 P 98-338 [5]

La norme NF EN 1338 P 98-338 [5] préconise la validation des pavés en béton n'ayant subi aucun défaut, fissure, crevasse ou délaminage. De façon à ne retenir que les pavés nets.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

- Recommandation sur le taux d'absorption de l'eau par capillarité et le taux d'absorption de l'eau par immersion - [NF EN 1338 P 98-338](#) [5]

Selon la norme [NF EN 1338 P 98-338](#) [5], il est recommandé d'avoir un taux d'absorption de l'eau inférieur à 0,1 g/cm², lors du test d'absorption par capillarité et 6 %, par immersion.

- Recommandation sur la résistance à la compression - [6]

Il est recommandé d'atteindre une valeur de 5kN/m² selon le [DTR B.C.2.2](#)[6]. Ce qui représente une charge d'exploitation à destination des lieux de circulation piétonne, cette valeur prend en compte les accumulations statiques et les actions dynamiques de personnes.

- Exigence sur la résistance à la traction par fendage - [5]

La norme [NF EN 1338 P 98-338](#) [5] exige d'atteindre une valeur supérieure à 3,60 MPa pour la résistance à la traction par fendage. Aucun des résultats individuels ne doit être inférieur à 2,9 MPa, ni présenter une charge de rupture inférieure à 250 N/mm de longueur de rupture.

II. Les blocs de terre comprimée

1. Présentation et généralités sur les BTC et cycle de production

Présentation des BTC

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne de l'adobe communément appelé «Banco». Il est défini selon la norme [ARS 670](#) [7] comme étant un élément de maçonnerie de dimension réduite et de caractéristique régulier, contrôlé et obtenu par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivie d'un démoulage.

a. Généralités sur les BTC

De façon générale, les BTC se caractérisent comme étant des briques. Ce qui les rend attractif est leur faible coût comme matériau de construction respectueux de l'environnement. Selon les besoins, différents types de BTC ont été élaborés. Les plus répandus sont les blocs de terre de parement et de cloisonnement avec une forme du type parallélépipédique rectangle.

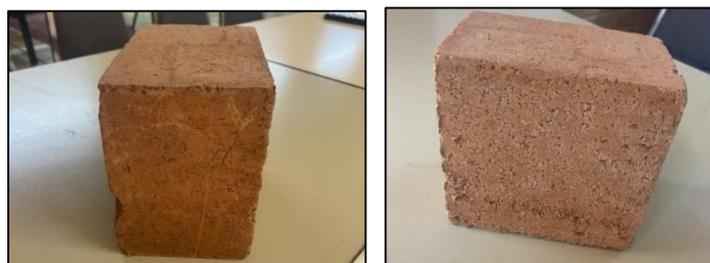


Figure 2 - Bloc de Terre Comprimée BTC

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

Au Burkina Faso, on peut observer pas mal de constructions en BTC tel que :

- **Opéra village** construit par l'architecte burkinabé Francis Kéré en 2013: Il s'agit d'un complexe de bâtiments en BTC. Au niveau structurel, les murs sont en BTC stabilisées au ciment de dimensions standard 30x14x9cm, pressées mécaniquement.
- **Marché de Koudougou** conçus par l'architecte suisse Séchaud en 2010: Il est composé de deux parties, le premier est un grand hall continu qui abrite le cœur du marché et la seconde est constituée d'un ensemble de hangars autonomes en BTC.

1. Synthèse sur les normes en matière de BTC

La synthèse suivante présente les BTC du type « **BTC-P** » et « **BTC-C** » car ces types de BTC représentent le plus, les efforts et agressions que pourraient subir les pavés en terre sujets de l'étude. La norme [ARS 670 : 1996](#) [7] servira de référence en matière de BTC. Elle régit l'identification, la sélection des terres jusqu'à la production des blocs en passant par la vérification qualitative.

❖ Les tolérances dimensionnelles - [ARS 670 : 1996](#) [7]

Il est prescrit selon la norme, une tolérance de + 1 à - 3 mm pour la longueur, une tolérance de + 1 à - 2 mm pour la largeur et une tolérance de ± 2 mm au niveau de l'épaisseur.

❖ Exigences physico-mécaniques [ARS 670 : 1996](#)

Les exigences physico-mécaniques d'un BTC de parement varient selon sa classe de sollicitation environnementale et sa classe de sollicitation mécanique de la façon suivante :

▪ Classe de sollicitation environnementale - [ARS 670 : 1996](#) [7]

- **Classe P** : Les BTC P résistent à l'agression de l'eau arrivant par aspersion latérale.
- **Classe C** : Les classe C, ont la capacité de résister à l'agression de l'eau par pénétration verticale telle que les remontées capillaires, pénétrations par gravité, succions etc.

▪ Classe de sollicitation mécanique - [ARS 670 : 1996](#) [7]

- **La classe 1** : le BTC reprend des faibles sollicitations. Il peut être un élément de structure non porteur pouvant résister à des faibles charges extérieures.
- **La classe 2** : le BTC subit d'importantes sollicitations provenant de charges extérieures. Il peut être un élément de structure pouvant résister à des charges permanentes et d'exploitations d'une terrasse d'un R+1.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

- **La classe 3** : le BTC reprend de très grandes sollicitations. Il peut reprendre des charges dans le cas d'un bâtiment de 3 étages dont les éléments porteurs de la structure sont minces.

Tableau 3- Prescriptions physico-mécaniques BTC de parement - ARS 670 : 1996 [7]

Désignation	Catégorie de sollicitation environnementale	Catégorie de sollicitation mécanique	f_{bsec} N/mm ²	f_{bhum} N/mm ²
BTC – P	Action de l'eau par aspersion latérale	1	≥ 2	≥ 1
BTC – P		2	≥ 4	≥ 2
BTC – P		3	≥ 6	≥ 3
BTC – C	Action de l'eau par pénétration verticale	1	≥ 2	≥ 1
BTC – C		2	≥ 4	≥ 2
BTC – C		3	≥ 6	≥ 3

III. Critères de choix des matières premières et les méthodes de stabilisation

1. Critères de choix des matières premières

Pour réaliser les bons choix de matériau, le CraTerre propose un ensemble de fuseau et de tableau formant une ligne directrice dans le choix des matières premières.

a. Le matériau terre

La terre constitue la matrice principale des BTC. Ce matériau de couleur rouge ou brune, provient d'une intense altération météorique des roches magmatiques sous les climats tropicaux [8]. Elle abonde donc dans les régions telles que l'Afrique de l'Ouest.

❖ Connaissance du matériau

Des études menées sur la terre montrent que sur le plan :

- **Morphologique** : la terre peut-être une terre latéritique indurée ou une terre latéritique meuble qui est un matériau hétérogène, discontinu et plus ou moins graveleux. Cette dernière est généralement utilisée pour la confection des BTC [9].

- **Minéralogique** : la terre est composée de minéraux néoformés secondaires [10] tel que les minéraux de fer néoformés, de minéraux d'aluminium néoformés etc.

- **Chimique** : On compte, la présence de 3 types d'éléments classés [10]: Les dominants composés par la silice (SiO_2), de l'hématite (Fe_2O_3) qui lui confère le coloris rouge. Les secondaires composés d'oxyde de manganèse, l'oxyde de sodium, etc. Et les éléments accessoires que sont le chrome (Cr), le vanadium (V) et le dioxyde de titane (Ti_2O_2).

❖ Critères de choix

La norme **ARS- 680** [11], nous renseigne sur le type de terre prompte à l'élaboration de BTC. Les critères soulignés sont les suivants :

- **Critère 1 - La granularité** : Il est recommandé d'avoir une granularité inscrite dans le fuseau du diagramme de texture présenté dans la norme **ARS- 680** [11].

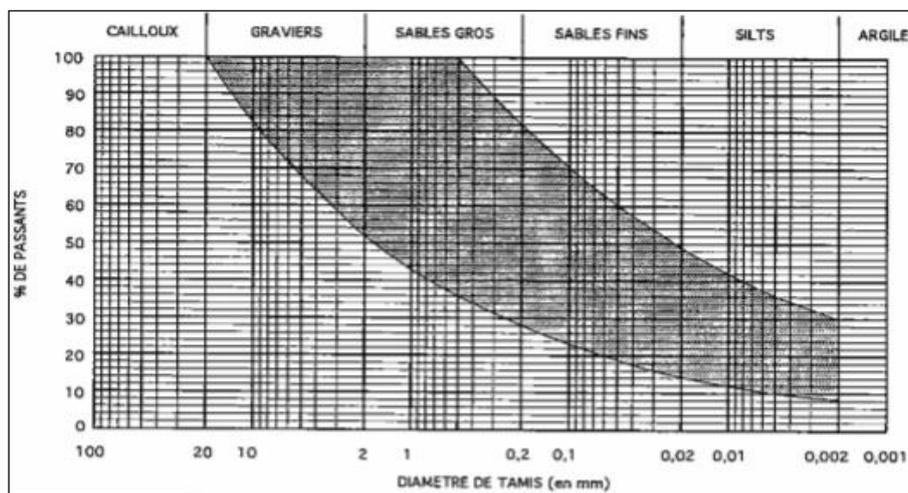


Figure 3- Fuseau granulaire [11] ARS- 680

- **Critère 2 - La plasticité** : La plasticité de la terre, désignée par sa limite de liquidité à la coupelle de Casagrande et sa limite de plasticité au rouleau, devra être inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité présenté dans la norme **ARS- 680** [11].

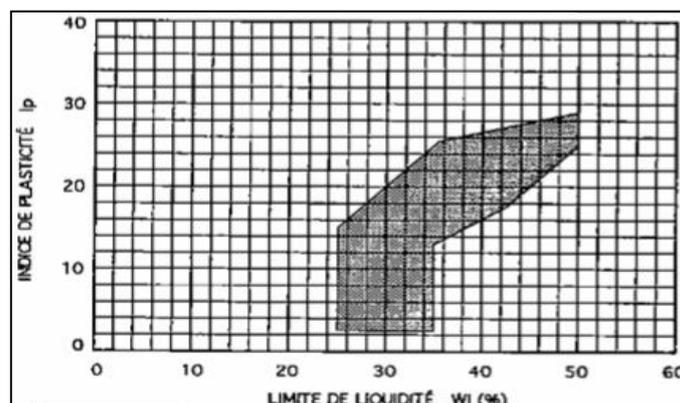


Figure 4 - Diagramme de plasticité [11] ARS- 680

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

- **Critère 3 - La classification des matériaux selon leur nature** : La classification des matériaux selon leur nature est déterminée en combinaison des valeurs issues des essais de granulométrie, de plasticité et de test au bleu de méthylène.

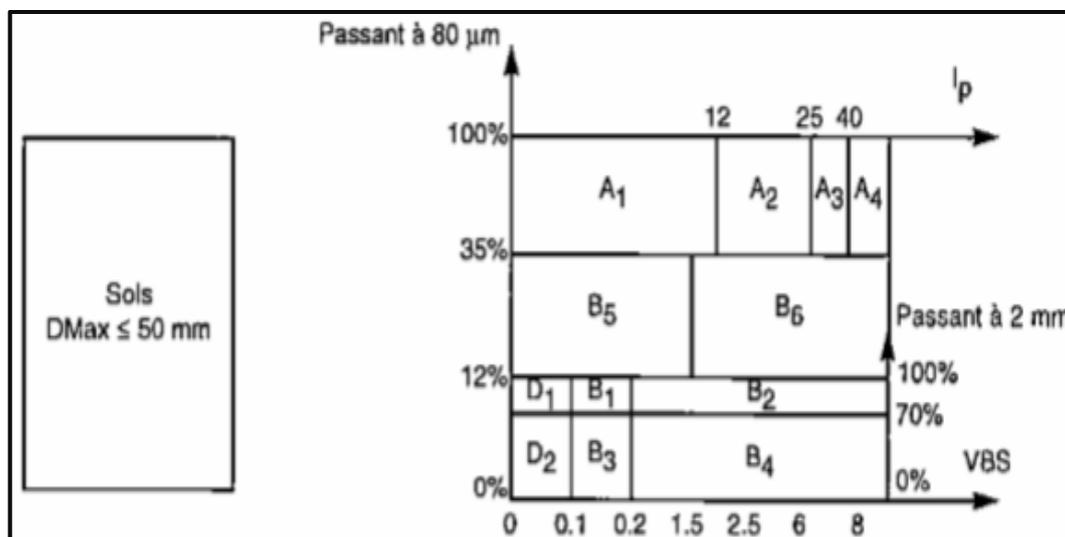


Figure 5- Classification des matériaux selon leur nature - [11] ARS- 680

Pour la lecture, il faudra prendre l'intersection de la droite reliant les passants à 80 μm et à 2 mm et celle reliant la valeur de bleu de méthylène à l'indice de plasticité. Cela permet d'attribuer un symbole de classification au matériau étudié. Le tableau de correspondance des symboles (**ANNEXE 1**) regroupe les symboles de classification des matériaux selon leur nature.

b. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui résulte du mélange de clinker et d'autres constituants tels que laitiers, pouzzolanes, servant à la production du mortier et du béton [12].

❖ Critères de choix du ciment

Selon la norme Burkinabé **NBF 02-005** [13], sur les BTC, il est conseillé l'utilisation du ciment portland de classe 42,5 soit CPA ou CPJ CEM II.

c. Concassé granitique

Il s'agit d'un sous-produit du concassage des granulats communément utilisés pour le béton.

❖ Critères de choix

Le choix se porte sur les roches granitiques inscrites soit dans la zone des fillers à celui des sables. Elle apporte plus de résistance et n'est pas absorbative et réduit les vides.

2. Les méthodes de stabilisation

L'exploration des différents types de stabilisation est essentielle pour comprendre comment les utiliser. Quelques ouvrages nous présentent les informations suivantes :

a. Mode de fonctionnement général

La stabilisation est un processus permettant de modifier les propriétés d'un matériau dans le but d'augmenter ses performances. Il existe plusieurs techniques de stabilisation parmi lesquelles on peut citer :

- Stabilisation physique

La méthode de stabilisation physique consiste dans la plupart des cas à intervenir sur la texture du matériau dans le but de le rendre plus adéquat selon le but visé. Pour cela, il est proposé généralement l'incorporation de fractions de grains d'autres matériaux [14].

- Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique prône la réduction des vides. Cette méthode influe par ricochet sur la porosité du matériau en resserrant les grains de celui-ci rendant le matériau acceptable [15]. Le processus tourne autour de la presse (manuelle ou mécanique). Il existe plusieurs types de compactage tel que le compactage statique, dynamique, par vibration etc.

- Stabilisation chimique

Elle consiste à ajouter un liant organique ou minéral à la terre afin de modifier ses propriétés. Les additifs les plus souvent utilisés pour la stabilisation des briques en terre sont, le ciment et la chaux. Le choix et la quantité du liant à ajouter dépendent de la nature du sol, du type de liant et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité [16].

b. Détails et Performances sur la stabilisation au ciment sur les BTC

Pour mieux appréhender la méthode de stabilisation au ciment des BTC, les recherches de [Boffoue et al.](#) [17], [B. Taallah](#) [14] et [Kerali](#) [18] ont été utilisés. Tel est la synthèse :

- ❖ Détails sur la stabilisation au ciment sur les BTC

Le ciment renforce la cohésion entre les différents constituants des blocs de terre. Les travaux de [Boffoue et al.](#) [17] mets en évidence ce phénomène en mettant en observation deux types de BTC ; l'un stabilisé à 3% de ciment et l'autre non stabilisé. La première observation, nous apprend que des éléments appelés « micelles d'argile » se sont collées les unes aux autres produisant une matrice compacte avec la présence de pores par endroits. La seconde

observation, montre qu'en présence d'eau il y a formation d'hydrates de ciment. Les hydrates de ciment sont composés de plaquettes de portlandite (CH) et de silicate de calcium hydraté (C-S-H). Ils sont en général plus ou moins compacts et se développent aussi bien dans la matrice argileuse que dans la zone de contact argile-sable. Selon les études de Boffoué et al. , la présence de ces formations (liaisons argile-ciment et/ou argile-sable-ciment) dues au ciment ayant été hydratée renforce l'aptitude des blocs à résister aux sollicitations physico-mécaniques. [17]

❖ Performances de la stabilisation au ciment sur les BTC

Plusieurs documents présentent les performances de la stabilisation au ciment sur les BTC. Les études menées par B. Taallah et Kerali, présentent quelques données concrètes ont été recueillies à propos de :

- Propriétés mécaniques : La résistance en compression augmente avec la teneur en ciment selon une fonction linéaire. Les travaux menés par B.Taallah sur l'effet de la stabilisation du ciment sur la résistance des sols montrent que sous différentes teneurs en ciment les sols évoluent différemment mais toujours sous fonction linéaire. Pour une cure de 28 jours, la meilleure résistance en compression est d'environ 10 MPa avec 10 % de ciment. [14]

- Propriétés physiques : Une augmentation de la densité des blocs et une diminution de ses propriétés absorbantes sont constatées sur les blocs après une stabilisation au ciment. Selon les études de Kerali, le fait d'ajouter du ciment améliore la densité sèche et apporte une diminution des capacités d'absorption du bloc. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un taux de stabilisation d'environ 11 % en ciment en moyenne 2150 kg/m³ en densité sèche et 5 % de capacité d'absorption d'eau pour une contrainte de compactage de 10 MPa.[18].

c. Détails et Performances sur la stabilisation par rajout de minéraux

A propos de la stabilisation avec ajout de minéraux, le tableau 5 présente quelques données :

Tableau 4 - Performances de la stabilisation par ajout de minéraux

Auteur	Matériel	Essais	Pourcentage	Durée (jours)	Rc(MPa)
SOLOMO	BTC avec	Résistances en compression simple	8%	28	3,5
AYED	le ciment		4%	28	2
Pierre	BTC avec	Résistances en compression simple	6%	28	5,2
MENKAN	le ciment		8%	28	6,5
A			10%	28	8

- **Propriétés mécaniques** : L'ajout de sable contribue, en plus de l'obtention d'une plus grande résistance, à solidifier le BTC en lui permettant de résister à l'absorption et à l'érosion [3]. Les études de G. Kiki et al, nous démontre que le rajout de minéraux concassés a été un apport en résistance mécanique au squelette du bloc. [19]

- **Propriétés physiques** : Les études menées par Alfred B. Ngowi ont montré aussi qu'un sol qui a un taux d'incorporation de sable élevé soit environ 60% résiste plus à l'absorption et l'érosion d'eau, une fois stabilisée au ciment (5% en ciment au moins). [20]

IV. Méthodologies d'évaluation des coûts et de l'impact environnemental

1. Méthodologies d'évaluation des coûts

- ❖ Méthode de calcul du coût d'une production [21]

Le manuel de production des BTC propose simplement l'addition de l'ensemble des charges fixe (la main d'œuvre, la matière première etc.) entrant dans la réalisation du produit.

- ❖ Méthode de calcul du coût d'un mètre carré et d'une unité [21]

Le manuel de production des BTC propose de diviser le coût d'une production par le nombre de bloc produits. Pour déterminer le prix du mètre carré, la surface supérieure du pavé doit être déterminée, de façon à diviser le mètre carré par la surface supérieur du pavé et multiplier le nombre obtenu par le prix unitaire du pavé.

2. Méthodologies d'évaluation des impacts environnementaux

Plusieurs méthodes permettent d'analyser les impacts des matériaux tout en suivant les principes définis par la norme ISO 14040 : 2006 et ISO 14044 : 2006. Cependant deux méthodes sortent du lot pour l'analyse de ce type de produit à savoir :

- **Les méthodes de l'empreinte**

Les méthodes d'empreinte écologique sont des outils visant à déterminer les impacts sur un seul critère environnemental que peut induire un produit [22]. Ces méthodes ne couvrent pas l'intégralité de tous les impacts potentiels que peuvent produire ces matériaux.

- **La méthode de l'analyse du cycle de vie A.C.V**

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation se reposant sur deux principes fondamentaux : l'approche multi-échelle et l'approche multicritères. L'analyse du cycle de vie permet d'évaluer une gamme variée d'impacts fournissant une vision globale pour des prises

de décisions équilibrées et informées [23]. Pour réaliser cette méthode, l'outil SimaPro est la solution logicielle d'ACV la plus utilisée dans le monde [24].

Conclusion partielle

Ce chapitre avait pour objectif, de passer en revue les connaissances actuelles autour de l'étude. Dans ce sens il s'agissait de s'imprégner des sciences tournant autour des normes, des bases pour le choix des matériaux, des moyens d'identification et de caractérisation des matériaux et des pavés, d'évaluation de coûts et d'impacts.

La revue littéraire nous fait part de la norme [NF EN 1338](#) [5] P 98-338 et [ARS 670- 1996](#) [7] comme base conceptuelle des pavés en terre compressée. Pour le choix des matériaux, la norme [ARS 680- 1996](#) [11] et la norme [NBF 02-005](#) [13] apporte des indications claires en passant par les moyens d'identification et de caractérisation des matériaux. Les différentes méthodes de stabilisation, nous apportent des bases et des comparatifs sur les performances physico-mécaniques que procurent ces méthodes sur les BTC. Nous exploiterons ces résultats en terme de méthodologie et à des fins de comparaison face aux résultats qui seront obtenus lors de l'étude. Il existe différents processus de calcul des coûts le plus adéquat dans cette discipline est celui proposé par le [manuel de production des BTC](#) de Vincent Rigassi [21]. La technique d'évaluation environnementale pour ce type produit montrant des résultats acceptables la plus concluante, est celle de la méthode de l'analyse de cycle de vie réalisée à l'aide du logiciel Sima Pro qui est la solution logicielle la plus utilisée suivant les prescriptions de la norme [ISO 14040: 2006](#) et [ISO 14044 : 2006](#). Au vu de cette synthèse bibliographique, il ressort que le suivi des normes est le chemin pour la réalisation de l'étude. Ainsi, doté des bagages techniques et normatifs, notre chapitre suivant sera une vitrine des méthodes, techniques et matériaux utilisés pour la concrétisation de l'étude.

CHAPITRE 2 : Matériaux et méthodes expérimentales

Introduction partielle

Ce chapitre partage les techniques et principaux dispositifs expérimentaux misent en œuvre selon les protocoles normatifs pour la réalisation de l'étude et la détermination de résultats.

I. Diagnostic des pavés en terre comprimée existants

Pour pouvoir s'enquérir des performances de ces pavés, un bilan physico-mécanique a été effectué au Laboratoire National des Bâtiments et Travaux Publics en suivant ces points :

- Le contrôle des caractéristiques visuelles, tactiles et géométriques
- Caractérisation des propriétés physiques et mécaniques

1. Méthode de contrôle des caractéristiques visuelles, tactiles et géométriques

Pour effectuer ce bilan, la méthode préconisée, a été celle-ci proposé par la norme [ARS- 675](#) [25]. La méthode a consisté à vérifier si les recommandations sont respectées par rapport aux caractéristiques déterminables de façon :

- **Visuelle** : Observer s'il y'a la présence de fissures, piques, de feuilletages etc.
- **Tactile** : Déterminer par toucher la présence de rugosités exagérées, crevasses, etc.
- **Géométrique** : Vérifier si la géométrie est régulière entre autres.

✚ Appréciation du bilan du contrôle des caractéristiques des pavés préexistants

A la suite du contrôle des caractéristiques, une appréciation globale de l'ensemble des dégradations a été réalisée par le prisme du système de notation coloré ci-dessous.

Tableau 5 - Système de notation

Mineur	Moyen	Majeur
--------	-------	--------

2. Méthode de caractérisation des performances physique et mécanique

Les performances de l'existant ont été principalement déterminées en usant des méthodes de caractérisation proposées par les normes [NF EN 1338](#) [5] et [XP P 13-901](#) [26] à savoir :

- Essai de résistance à la compression sèche et humide - [XP P 13-901](#) [26]
- Essai de résistance au fendage sec et humide - [NF EN 1338](#) [5]
- Essai d'absorption par capillarité - [AFPC - AFREM – XP P 19](#) [27]
- Essai d'absorption par immersion totale - [NF EN 1338](#) [5]

II. Matériaux, formulations et caractérisations expérimentales

1. Matériaux

Les matériaux utilisés pour l'expérimentation sont la terre, des résidus de concassé granitique et du ciment pour la stabilisation chimique des pavés.

- ❖ **Le ciment** : le ciment utilisé est un ciment portland CPA de classe 42,5 de CIMBURKINA tel que recommandé par la norme [NBF 02-005](#) [13].
- ❖ **La terre** : la terre utilisée dans le cadre de l'étude provient de l'entreprise Zi Matériaux. L'entreprise située à Kossodo, extrait la terre d'une carrière à 3km de l'entreprise. L'emplacement géographique de la carrière est de 12°43'84'' Nord pour la latitude, 1°45'6''Ouest pour la longitude et présente 304 m d'altitude.
- ❖ **Les résidus de concassé granitique** : les résidus utilisés proviennent de la carrière de granité de Pissy. L'emplacement géographique de la carrière est de 12°20'50'' Nord pour la latitude, 1°33'57.6''Ouest pour la longitude et présente 304 m d'altitude. Les résidus proviennent du concassage manuel du granite par les travailleuses du site.



Figure 6 - Provenance et condition de concassage à la carrière de granite de Pissy

2. Formulation et caractérisation géotechnique

Dans le sens de pouvoir prendre des choix vis-à-vis des matériaux, les techniques de caractérisation géotechniques suivantes ont été employé :

- ❖ L'analyse granulométrique et sédimentométrie

Elle a consisté à déterminer les proportions pondérales des grains qui constituent un matériau grenu. L'analyse granulométrique par tamisage à sec des grandes particules (5 mm - 80 microns) a été effectuée selon la norme [NF P 18-560](#) [28] et complétée par la sédimentométrie pour les particules fines de moins de 80 micromètres conformément à la norme [NF P 94-057](#) [29, p.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

94]. La sédimentométrie a été réalisé uniquement sur la terre crue et l'analyse granulométrique sur la terre crue et le mélange terre + résidus sous ce dosage :

Mélange T1 : un mélange de 90% de terre, 10% de résidus de concassage 0/5.

Mélange T2 : un mélange de 85% de terre, 15% de résidus de concassage 0/5.

Mélange T3 : un mélange de 80% de terre, 20% de résidus de concassage 0/5.

- ❖ Valeur de bleu de méthylène de la matrice (NF P 94-068, 1998, p. 94-068)

La quantité, l'activité et le caractère gonflant de la fraction argileuse contenue dans le matériau ont été évalués par l'essai au bleu de méthylène. Cet essai a été effectué selon la norme (NF P 94-068, 1998) tant sur la terre crue **T0** ainsi que sur les mélanges **T1**, **T2** et **T3**.

- ❖ Plasticité de la matrice principale (NF P94-051, 1993, p. 94-051)

La plasticité propre à chaque matériau a été déterminée en cherchant à découvrir les limites d'Atterberg. Les deux valeurs limites ont été déterminées respectivement par la méthode de la coupelle de Casagrande et la méthode du rouleau sur **T0** et les mélanges **T1**, **T2** et **T3**.

- ❖ Détermination de la teneur en eau optimale de la matrice principale (NF P94-093, 1999)

La teneur en eau optimale (WOPN) du matériau sec destiné à la production des BTC et les conditions de compactage qui envoient au meilleur compactage faisable ont été déterminées par l'essai Proctor normal selon la norme (NF P94-093, 1999) sur **T0** et les mélanges **T1**, **T2** et **T3**.

3. Formulation et processus de fabrication des prototypes de pavés en terre

Le processus de fabrication des blocs employé a suivi les recommandations du manuel de production des BTC [21] ;

Etape 1 - La préparation des matériaux:

La terre a été broyée de sorte à exclure la présence de mottes ou nodules de terre (car celle-ci fragilise les blocs) et obtenir des grains de dimensions inférieures à 200 mm. Les résidus de concassage ont subi un simple nettoyage manuel dans le sens de retirer les déchets plastiques.

Etape 2 - Tamisage et brouillage :

Pour effectuer le tamisage, un tamis incliné à environ 50° a été employé. La technique a simplement consisté à jeter la terre crue au sommet du tamis.

Etape 3 – Dosage du ciment et des concassés granitiques :

Le dosage s'est effectué à l'aide d'une balance et d'un seau de sorte à obtenir les mélanges :

- La terre mélangée **T1** : un mélange de granulométrie optimale 82% de latérite, 10% de résidus de concassage 0/5 et 8% de ciment, le tout à la teneur en eau optimale.
- La terre mélangée **T2** : un mélange de granulométrie optimale 77% de latérite, 15% de résidus de concassage 0/5 et 8% de ciment, le tout à la teneur en eau optimale.
- La terre mélangée **T3** : un mélange de granulométrie optimale 72% de latérite, 20% de résidus de concassage 0/5 et 8% de ciment, le tout à la teneur en eau optimale.

Etape 4 – Le malaxage :

A l'aide d'un malaxeur TERSTARAM, le mélange a d'abord été effectué à sec avec l'incorporation à la terre des résidus de concassage puis du ciment. L'eau n'a été ajoutée en pluie qu'en fin de malaxage, jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène pendant 5 minutes.



Figure 7- Processus de malaxage des prototypes

Etape 5 – Pressage, démoulage:

Le pressage a été effectué par une presse manuelle TERSTARAM. Pour faciliter la réalisation des essais, le moule plein de dimensions 29cm x14 cm x9.5 cm a été choisi.

Etape 6 – Conduite et condition de cure :

Les blocs ont été abrités du soleil et du vent, mais aussi maintenus en ambiance humide et chaude. Les blocs ont été recouverts d'un film de plastique qui maintient une élévation bénéfique et donnant une humidité relative proche de 100%. La durée de cure a été de 28 jours puis les briques ont été laissées à l'air libre.



Figure 8- Conduite et condition de cure

III. Caractérisation des pavés

Les essais de caractérisation physico-mécanique réalisée sur les pavés allient les techniques de caractérisation des pavés en béton et des BTC conformément aux protocoles respectifs.

1. Propriétés physiques

- Résistances à l'absorption capillaire - [protocole AFPC / AFREM - XP P 19-901](#)

Les essais ont été réalisés en s'inspirant du protocole [AFPC / AFREM - XP P 19-901](#) [27]. Il a consisté à mesurer l'accroissement de la masse des pavés placés dans un récipient dont le niveau d'eau est à 1 cm au-dessus de la face inférieure (**ANNEXE 2**) de l'éprouvette environ 15 minutes d'abord puis sur plus de quatre heures. En pratique, cette condition est obtenue en disposant les échantillons sur un lit de gravillons. L'absorption en eau par capillarité a été mesurée par pesée en fonction du temps en heure et calculée à base de l'équation suivante:

Équation 1- Coefficient d'absorption protocole AFPC / AFREM

$$C_{ac} = \frac{M_2 - M_1}{S_h}$$

Avec : C_{ac} : coefficient absorption par capillarité (g / m^2) ; M_2 : masse de l'éprouvette après absorption d'eau (g) ; M_1 : masse de l'éprouvette séchée à $105^\circ C$ (g) ; S_h (m^2) : section de l'éprouvette en contact avec l'eau (m^2).

- Résistances à l'absorption par immersion [5]

Aucune norme ne spécifie comment réaliser cet essai pour les pavés en terre. Dans ce sens, le choix s'est porté sur les recommandations de la norme [NF EN 1338](#). Le principe de l'essai stipule que les échantillons (**ANNEXE 2**) seront totalement immergés en position verticale dans de l'eau, jusqu'à masse constante M_1 . Les échantillons sont ensuite séchés à l'étuve à $105^\circ C$ jusqu'à masse constante M_2 . Le coefficient d'absorption d'eau est donné par la formule

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Équation 2 - Coefficient d'absorption d'eau par immersion NF EN 1338

$$W_a = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\%$$

Avec : W_a : coefficient absorption par immersion (g / m²), M_2 : masse de l'éprouvette humide après absorption d'eau (g), M_1 : masse de l'éprouvette séchée à 105° C (g).

2. Propriétés mécaniques

- Résistance à la compression sèche et humide [26, p. 13]

Les échantillons de 30 jours d'âge ont été soumis à une compression simple à l'aide d'une presse hydraulique CONTROLAB jusqu'à la rupture technique de l'ensemble. Les mesures ont été gardées et par la suite utilisées pour la réalisation de graphiques. Cet essai a été effectué sur l'ensemble des pavés les pavés. La résistance a été calculée sur la base de l'équation suivante :

Équation 3 - Résistance à la compression XP P 13-901

$$R_c = 10 \times \frac{F_r}{S}$$

Avec : R_c : résistance en compression (MPa) ; F_r : force de rupture (kN) et S : surface de contact de l'échantillon avec la plaque de la presse (cm²)



Figure 9 - Essai de compression sèche et humide

- Résistance au fendage du bloc à l'état sec et humide [5]

- *Test de fendage humide* [5]:

Les pavés ont été immergés pendant 24 heures dans de l'eau, puis ont été sortis, essuyés et placés dans la machine d'essai, en veillant à ce que les bandes de chargement de l'axe des appuis coïncident avec la section de rupture. Ils ont subi continuellement et progressivement une augmentation de la contrainte de 0,05 MPa. Au moment de la ruine, la charge de rupture a été enregistrée. La résistance au fendage a été calculée sur la base de l'équation suivante:

Équation 4 - Résistance au fendage NF 1338 2003

$$T = 0,637 \times k \times \frac{P}{S}$$

Avec : T : La résistance en méga-pascal ; P : La charge de rupture en Newton ; K : Le facteur de correction de l'épaisseur du pavé, S : La surface de rupture $S = l \times t$.

- *Test de fendage à sec* : Par curiosité, cet essai a été effectué à l'état sec, dans le sens de ressentir la variation que l'état du pavé peut créer dans le sens de la résistance au fendage. En ce moment le pavé ne sera pas immergé mais directement testé. Le calcul sera effectué selon la formule classique du fendage par l'ordinateur de la fendeuse.



Figure 10 - Essai de fendage sec et humide

Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de situer des approches techniques et géotechniques normatives promptes à l'étude, ceci selon la disponibilité du matériel au LNBTP et la représentativité de l'échantillon de mesure. De ces méthodes ont découlé diagnostics, identifications, caractérisations et productions. L'ensemble des résultats obtenus sont exposés dans le chapitre suivant avec des observations prenant en compte la revue littéraire. Les résultats découlant de ces différentes mesures expérimentales sont présentés en 5 points répondant chacun à un objectif spécifique :

- ◆ Le diagnostic des pavés en terre comprimée préexistants ;
- ◆ L'identification et la caractérisation des matières premières ;
- ◆ La caractérisation physico-mécanique des pavés de l'étude ;
- ◆ L'étude du prix de production des pavés en terre comprimée ;
- ◆ L'analyse de cycle de vie et des profils environnementaux de la production des pavés

CHAPITRE 3 : Résultats et Discussion

Introduction

Ce chapitre se focalise sur la présentation des résultats obtenus grâce aux expérimentations réalisées. En premier lieu, il sera présenté le diagnostic des pavés en terre comprimées existants. Puis s'en suivra, les résultats relatifs à la caractérisation des pavés de l'étude, d'où découleront les propriétés physico-mécaniques des éléments. Le processus et les résultats de l'estimation du coût des pavés en terre seront présentés, en apportant un aspect performances/coût. Enfin, une évaluation des impacts ainsi que les profils environnementaux des pavés seront présentés

I. Diagnostic des pavés en terre comprimées existants

Le point suivant présente le diagnostic réalisé sur l'existant. Il vise à déterminer la dégradation la plus prononcée et les causes. L'objectif est d'éviter la reproduction de ces tares.

1. Présentation de l'existant

Les pavés en terre comprimée existants ont été réalisés et posés au Ciné Burkina au centre-ville, par l'entreprise Zi Matériau en 2004. Ils sont de forme hexagonale avec les côtés mesurant 12 cm, 25 cm de largeur et 22 cm de longueur. Les pavés font 6 cm d'épaisseur et ont été posés sur un lit de sable non stabilisé. Ils sont disposés de façon classique avec des lignes de joint discontinu. Selon le concepteur (chef de production), les pavés en terre comprimée existants seraient constitués de terre à 92% et de 8% de ciment tel un BTC classique stabilisé au ciment.

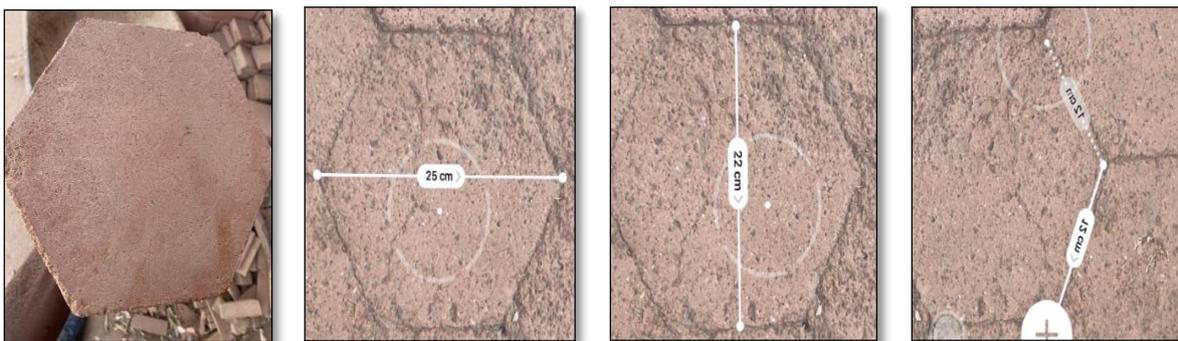


Figure 11 – Les pavés en terre comprimées existants - Forme et Dimensions

2. Résultat du contrôle des caractéristiques visuelles, tactiles et géométriques

a. Contrôle visuelle

Les lignes suivantes présentent les dégradations qui ont pu être identifiées et leurs causes.

❖ Présence de délitage sur le matériau modulaire

Ce phénomène fait que le pavé s'effrite sous forme de feuillets sous la direction du cycle chaud/froid saisonnier. Cela en général est dû à l'utilisation prématurée des pavés sur le terrain.



Figure 12 - Présence de délitage

❖ Présence d'épaufrures sur les côtés du matériau modulaire

Plusieurs raisons ont pu provoquer les épaufrures. Soit le matériau a été mis en œuvre à un trop jeune âge ou alors le malaxage n'a pas permis une bonne dispersion du ciment, créant un manque de solidité aux niveaux des bordures, d'où les pertes de matériau sur les côtés.



Figure 13 - Présence d'épaufrures

❖ Présence de crevasses

La présence de crevasses a pu être observé sur certains pavés. Cela est dû principalement aux intempéries, qui au fil du temps, ont eu raison de la surface du pavé.



Figure 14 - Présence de crevasses

❖ Présence de lessivage ou perte de matière du matériau modulaire

Le lessivage est dû aux intempéries ou à l'action humaine. Les eaux de ruissellement ont eu à emporter de la matière composant la couche supérieure. Il est aussi possible que le lavage et le balayage répété de la surface du pavé aient joué un rôle dans ce lessivage.



Figure 15 - Présence de lessivage ou perte de matière

b. Contrôle par le toucher

Le toucher a permis de sentir la présence de rugosité exagérée et de crevasses sur certains pavés. Le ressenti obtenu lors du toucher provient du lessivage subi par les pavés ainsi que du manque d'élément grossier dans le pavé. Les images ci-dessous présentent les faits.



Figure 16 - La présence de rugosité exagérée ou de crevasses

c. Contrôle géométrique

Le contrôle a été effectué en mesurant les variations géométriques des pavés. Les mesures ont été effectuées avec un mètre de précision métallique étalonné du laboratoire. De façon générale, les pavés avaient une géométrie régulière avec des variations de +/- 1 cm sur les côtés dû aux épaufrures. Par curiosité, il a été vérifié le pourcentage de perte de matériau par pesée sur 5 pavés existant sortis d'usine et ceux en activité pour obtenir approximativement les pertes occasionnées par les dégradations. Il s'est avéré une perte de 1% de leur masse moyenne.

❖ Bilan des caractéristiques

Les dégradations observées, sont les indices des efforts et des agressions que les pavés existants ont eu à subir de 2004 à 2023. Il y'a des dégradations sur l'ensemble des pavés du Ciné Burkina.

L'appréciation globale de l'ensemble des dégradations a été réalisée par le prisme du système de notation coloré ci-dessous, basé sur la quantité de dégradations et l'ampleur de ceux-ci.

Tableau 6- Bilan des dégradations et de leurs ampleurs/quantité sous code couleur

2. Bilan des dégradations et de leurs ampleurs/quantités sous code couleur		
Désignation	Note	Note final
c. Contrôle visuelle		
Présence de délitage	Moyen	
Présence d'épaufrure	Majeur	
Présence de crevasse	Mineur	
Présence de lessivage	Mineur	
Résultat intermédiaire 1		Moyen
d. Contrôle par le toucher		
Rugosité dû au lessivage	Moyen	
Rugosité dû aux crevasses	Mineur	
Résultat intermédiaire 2		Moyen
Contrôle géométrique		
Régularité de la géométrie du pavé	Moyen	
Epaisseur du pavé in-situ par rapport à celui à l'usine	Moyen	
Résultat intermédiaire 3		Moyen
Contrôle en général		
Résultat final		Moyen

 **Commentaire :**

Le bilan montre que la dégradation la plus conséquente est l'épaufrure. Techniquement, les épaufrures apparaissent quand le malaxage entre la terre et le ciment n'est pas aboutie, entraînant un manque de solidité au niveau des bordures. En effet, le ciment renforce la cohésion entre les différents constituants des blocs de terre selon les travaux de Boffoue et al. [17] en plus d'augmenter la densité des blocs créant une diminution de ses propriétés absorbantes [18].

Ainsi les parties n'ayant pas reçu de ciment à cause du mauvais malaxage ne peuvent que finir dégradées et perdre en force. La chose à retenir c'est qu'il faut un bon temps de malaxage pour réaliser un matériau moins prompt aux dégradations avec une cure adéquate.

II. Identification et caractérisation des matières premières

Ce point présente principalement les résultats, accompagnés de discussions sur la caractérisation des matériaux composites des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment.

1. Résultat des essais d'identification et de caractérisation géotechnique

Les graphiques qui seront présentés ont pour objectif de nous situer sur l'identité et les caractéristiques des matériaux entrant dans notre étude.

a. Les courbes granulométriques

Les figures qui suivront sont la représentation de la composition granulométrique de nos matériaux et des différents mélanges à 10, 15 et 20% réalisés pour cette étude.

❖ La terre crue

La courbe de la terre crue est inscrite dans le fuseau prescrit par le CraTerre et suit tout aussi les prescriptions recommandées par la norme. Le matériau est recevable.

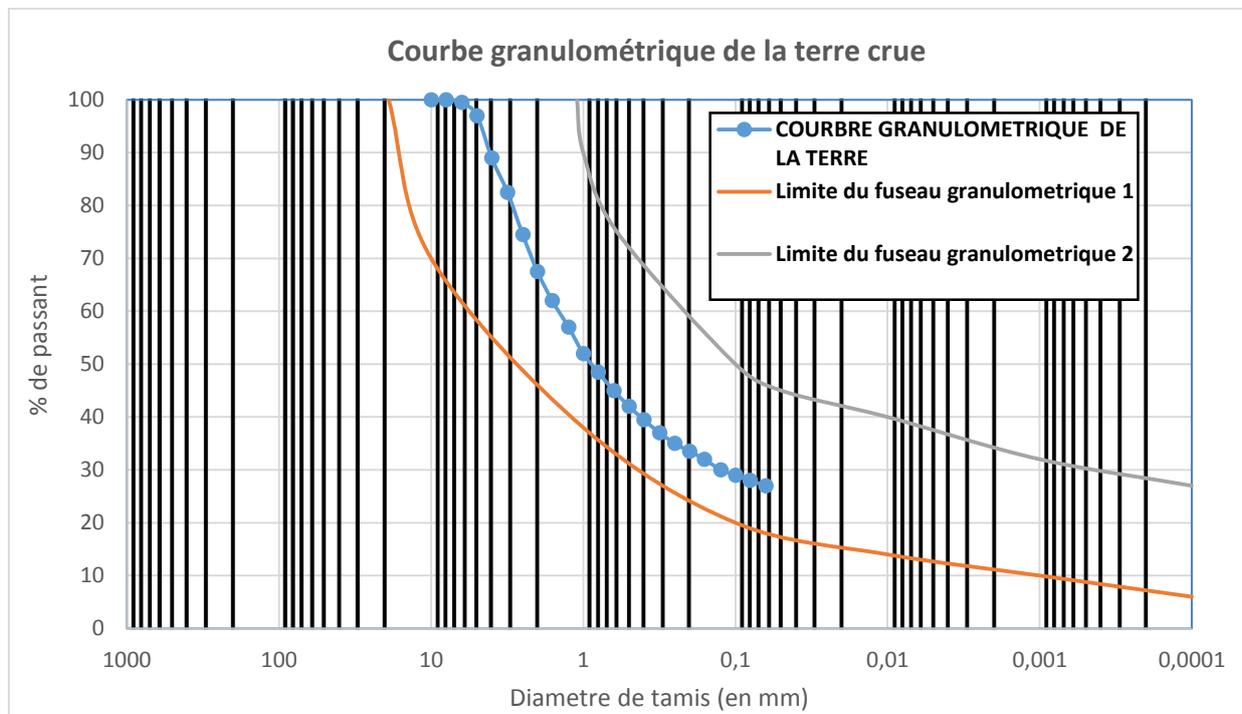


Figure 17- Courbe granulométrique de la terre crue

❖ Le résidu de concassage

La courbe présente un matériau à cheval entre la section gravier et gros sable. Ce qui est idéal pour proposer un renforcement squelettique à la structure granulaire des pavés prototypes.

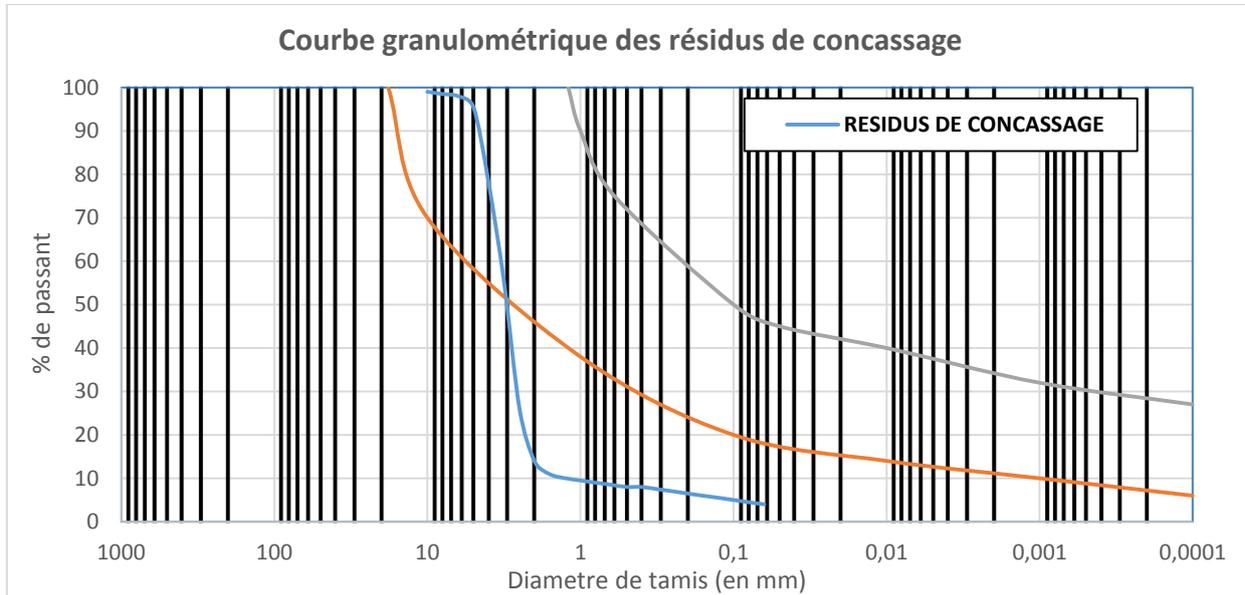


Figure 18 - Courbe granulométrique des résidus de concassage

❖ Les mélanges

Les résultats présentés sur la figure montrent que l'ensemble des courbes répondent aux délimitations du fuseau des sols recommandés pour la confection des blocs de terre comprimée par la norme XP P 13-901 [26, p. 13- 901]. En somme les mélanges sont aptes à être utilisés.

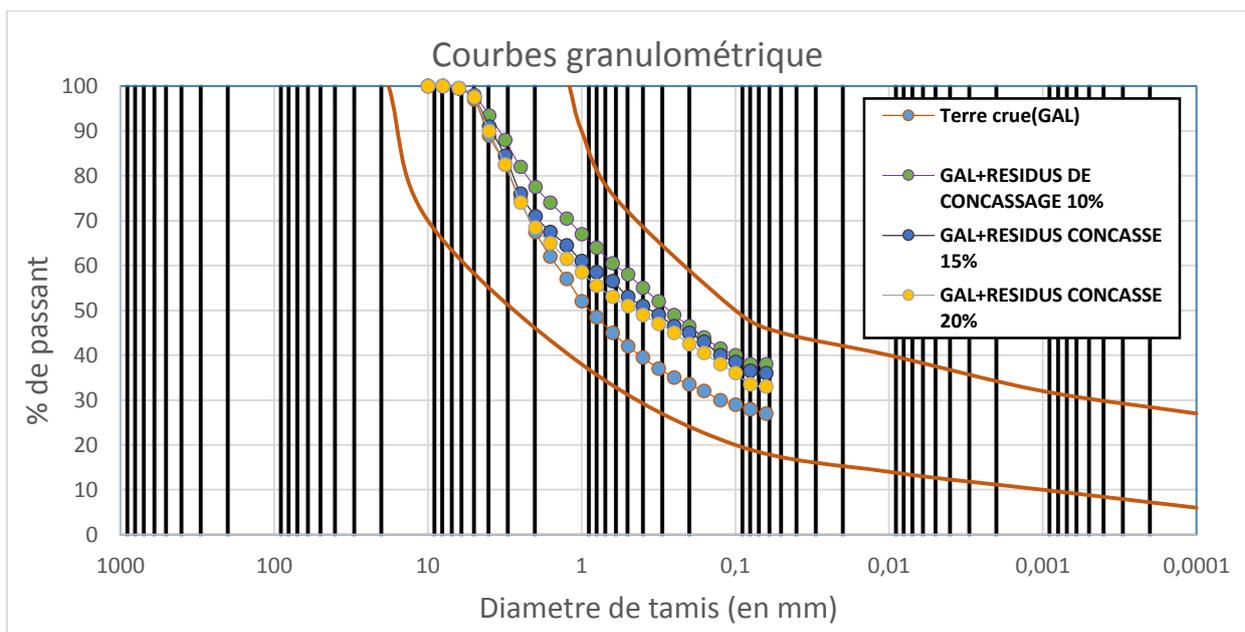


Figure 19 - Ensemble des courbes granulométriques de la terre crue et des mélanges T1, T2, T3

b. Les limites d'Atterberg

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous, décrivent le degré de plasticité des différents mélanges. Selon les données, les mélanges sont tous plastiques car leurs I_p est compris entre : [15 - 40].

Tableau 7- Les limites d'Atterberg des matériaux

Limite d'Atterberg				
	Wl %	Wp %	Ip %	Degré de plasticité
T0	45.4	23.5	21.9	Plastique
T1	43,6	22.1	21,5	Plastique
T2	39,8	21.3	20,3	Plastique
T3	37,6	20.1	17.5	Plastique

La figure suivante présente le fuseau recommandé et les points de plasticité des mélanges. Les lignes orange présentent les limites prescrites par la norme sur les matériaux pour la production des BTC. En observant la figure, il s'avère que les différents mélanges T1, T2, T3 répondent aux exigences en termes de plasticité du fait de leur présence à l'intérieur du fuseau.

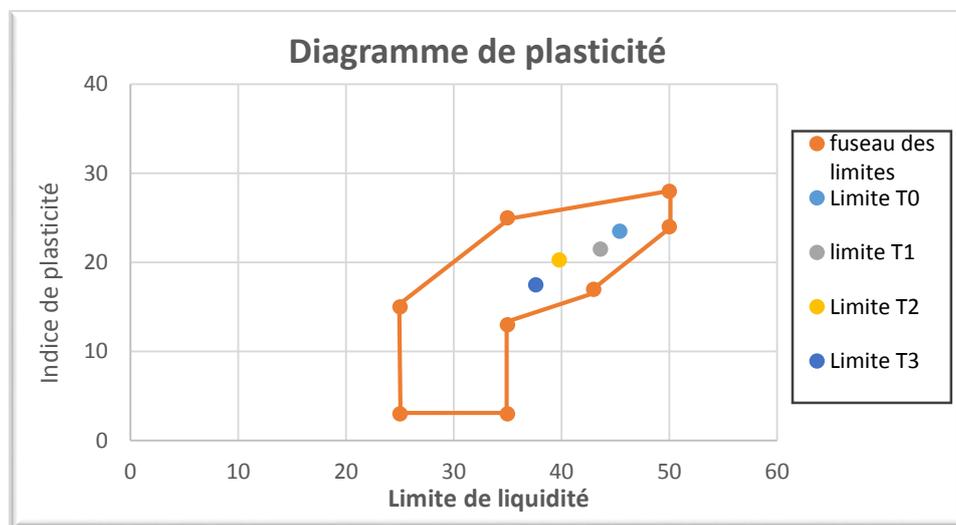


Figure 20 - Fuseau de plasticité des matériaux recommandés pour les BTC

c. Les valeurs au bleu de méthylène V.B.S

Le tableau ci-dessous, nous présente la sensibilité de nos matériaux face aux liquides. Ces valeurs permettent d'avoir une idée sur le degré de présence argileuse des fines contenues dans les matériaux d'étude. Nos matériaux sont peu plastiques et peu sensibles à l'eau globalement.

Tableau 8 - Valeurs au bleu de méthylène

	Masse sèche prise en g	VBS en %	Observation
T0	30	3	Sol limoneux- argileux de plasticité moyenne
T1	31	0.63	Sol limoneux peu plastique et peu sensible à l'eau
T2	30	0.63	Sol limoneux peu plastique et peu sensible à l'eau
T3	32	0.58	Sol limoneux peu plastique et peu sensible à l'eau

d. Les optimums Proctor normal

Les résultats ci-dessous, permettront d'éclairer la situation des matériaux de l'étude afin de trouver le juste milieu pour former des matériaux denses et compacts.

Tableau 9 - Valeurs des optimums Proctor normal

	W_{OPN} en %	Densité sèche
T0	14.8	1.90 ⁵
T1	17.5	1.76 ⁵
T2	17.8	1.76
T3	14.7	1.77

❖ Les courbes Proctor des matériaux T0, T1, T2 et T3.

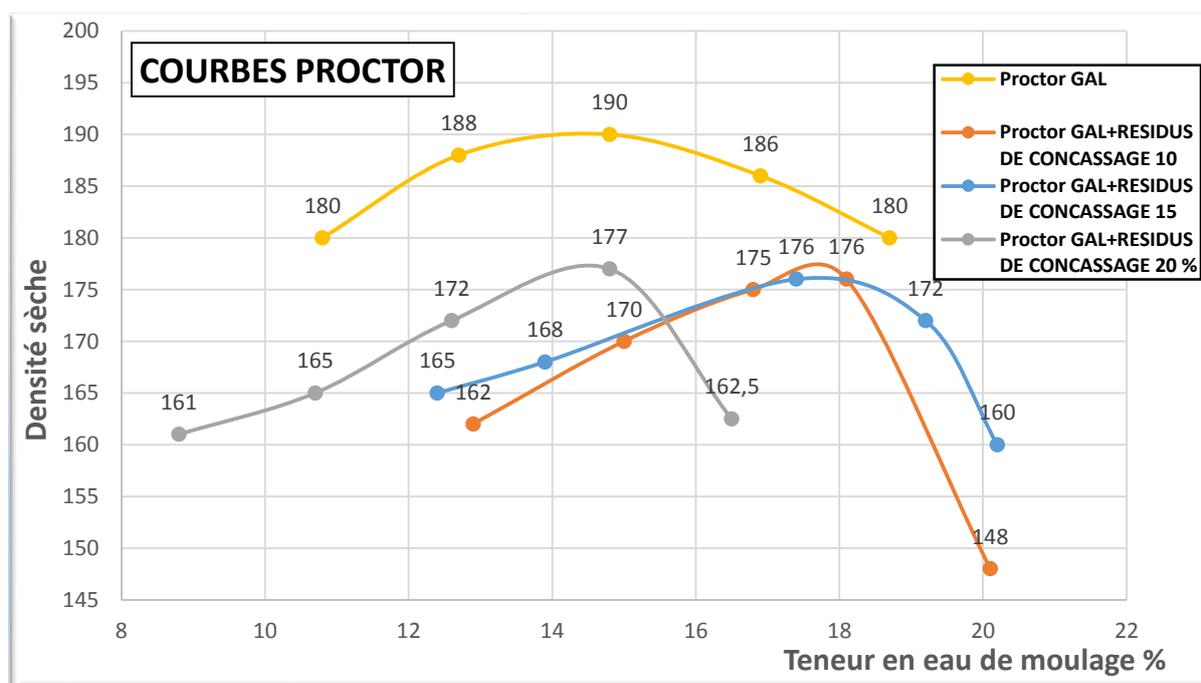


Figure 21 - Les courbes Proctor des matériaux T0, T1, T2 et T3

Les matériaux T1, T2 ont des teneurs en eau à l'optimum Proctor relativement proches. Il en est de même dans le cas des valeurs de la densité sèche. Quant à T3, nous constatons une baisse de près de 3% de la teneur en eau mais avec légère augmentation de la densité sèche

2. Bilan des résultats – caractéristiques géotechniques de base des matériaux

Le tableau ci-après présente une synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux.

Tableau 10 - synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux

Caractéristiques des matériaux						
	W _l %	W _p %	I _p %	VBS	W _{OPN} en %	Densité sèche
T0	45.4	23.5	21.9	3	14.8	1.90 ⁵
T1	43,6	22.1	21,5	0.63	17.5	1.76 ⁵
T2	39,8	21.3	20,3	0.63	17.8	1.76
T3	37,6	20.1	17.5	0.58	14.7	1.77

En se reposant sur les résultats obtenus et le diagramme synoptique des matériaux de taille inférieure à 50 mm, le matériau T0 est de classe A2, ce qui est réputé nécessiter un traitement. Les matériaux T1, T2 et T3 sont de classe A1.

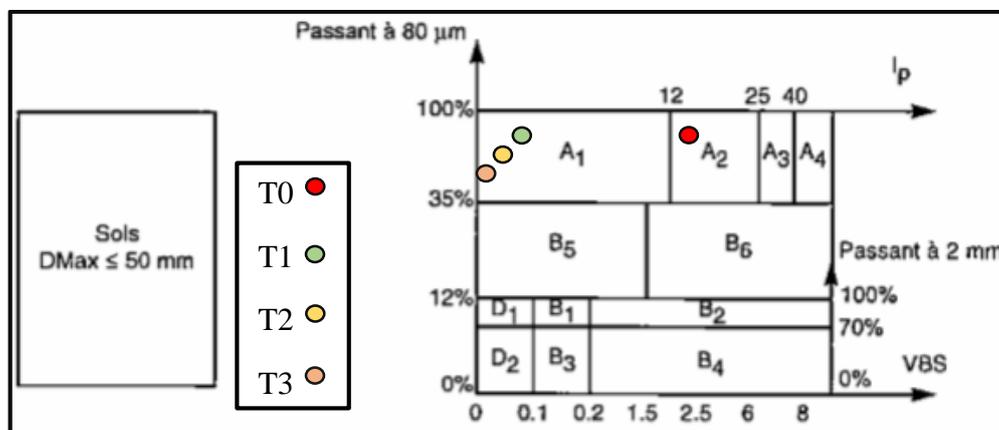


Figure 22- Classification des matériaux selon leur nature

III. Résultats et discussions de la caractérisation physico-mécanique des pavés de l'étude

Ce point présente principalement les résultats des différentes caractérisations sous formes de graphes représentant les tendances physiques et mécaniques des pavés de l'étude. Des discussions seront menées autour des résultats physiques et mécaniques que proposent les pavés de l'étude.

1. Propriétés physiques

Les figures 14 et 15 représentent respectivement les coefficients d'absorption par capillarité et l'absorption d'eau par immersion totale des pavés en fonction de la racine du temps.

❖ Absorption d'eau par capillarité

Le résultat obtenu montre que les taux d'absorptions capillaires des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique est assez haut. Malgré les stabilisations effectuées les pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et ceux préexistants, sont comptés comme étant des éléments de la catégorie de matériau extrêmement poreux selon Siegesmund et al [33]. En faisant le lien, cette extrême porosité explique donc la tendance d'absorption relativement rapide en fonction du temps que proposent ces pavés en terre.

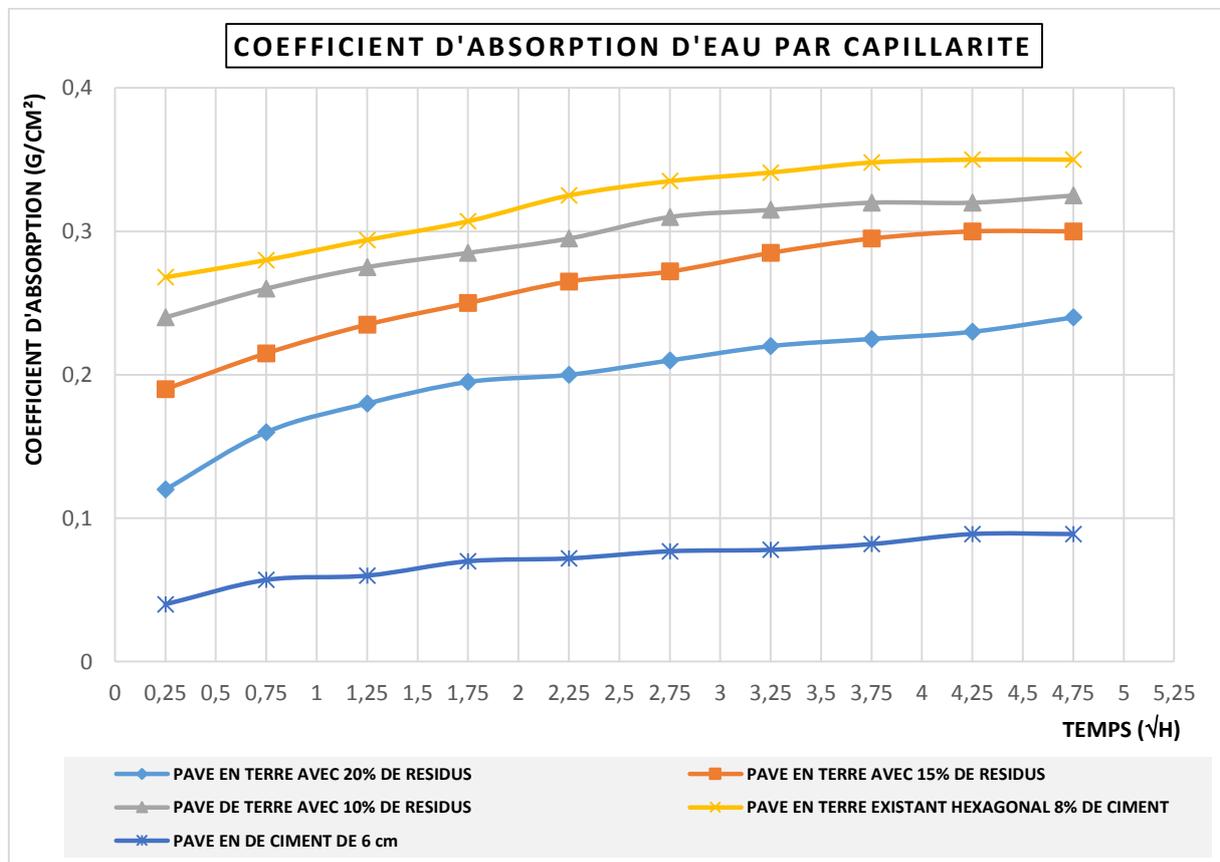


Figure 23 - Coefficient d'absorption d'eau par capillarité

Toutefois, en se basant sur le témoin de référence qui est dans ce cas le pavé existant stabilisé à 8% de ciment, on s'aperçoit que ces pavés avec résidus sont dans la moyenne, c'est à dire qu'ils ont une faible capillarité du point de vue des éléments en terre comprimée. La norme NF EN 1338 [5] recommande un coefficient inférieur à 1 g/cm². Ne répondant pas à cette norme, on peut déduire qu'il y'a non-conformité en terme d'absorption capillaire des pavés en terre.

❖ Taux d'absorption d'eau par immersion totale

Les résultats d'absorption d'eau par immersion totale montrent que la porosité des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique est assez élevée. En effet, les pavés atteignent des pics de taux d'absorption aux alentours de 14% qui est élevé par rapport à la prescription de la norme NF EN 1338 [5] recommandant un taux d'absorption d'eau inférieur à 6 %. Une si grande capacité d'absorption d'eau peut être éventuellement causé par l'abondance d'argile dans la matrice du pavé comme *Kasthurba et al* [34] a eu à le notifier ou simplement provenir du fait que l'énergie de compactage n'est pas suffisamment élevée pour réduire totalement les vides. Quant à la vitesse d'absorption, elle fluctue d'autant plus si le diamètre des pores est grand [35]. Ainsi les résultats, donnent une idée sur l'évolution du rayon moyen des pores par rapport aux différentes formulations.

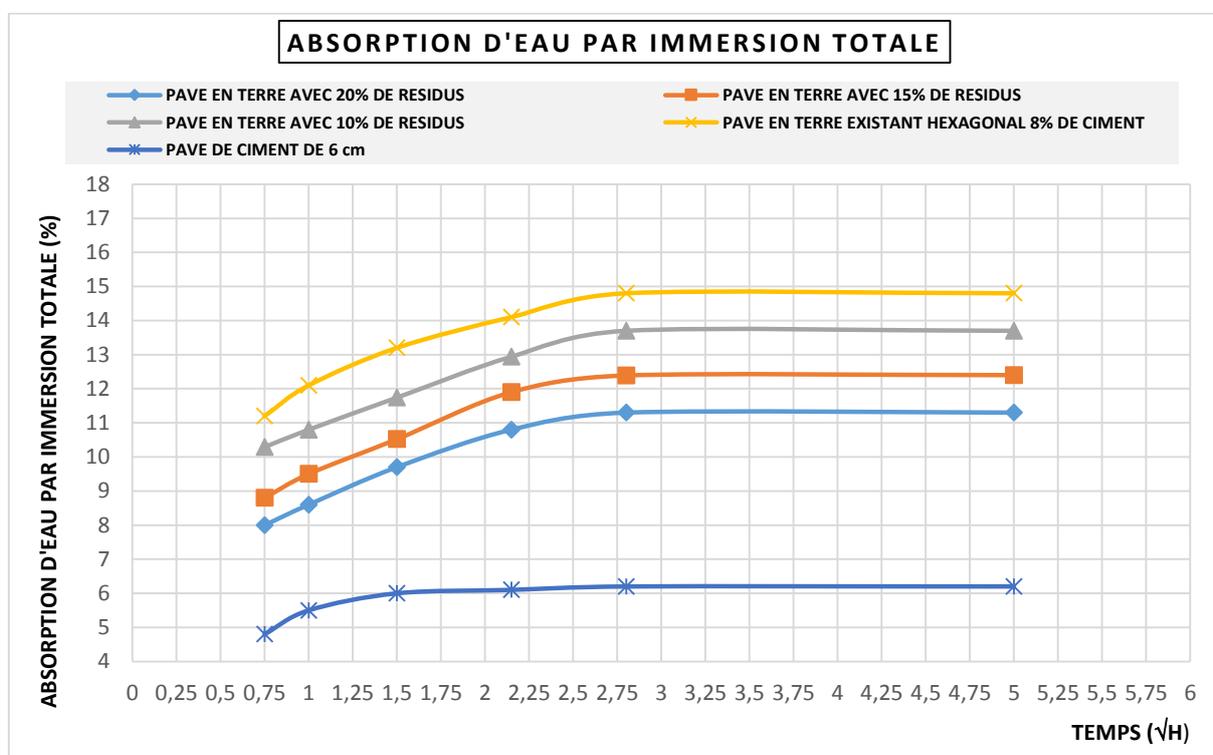


Figure 24 - Absorption d'eau par immersion totale

Un point particulier est à relever : l'influence des résidus face à l'absorption. Les pavés existant ne contenant pas de résidus ont présenté un taux d'absorption 1.5 fois plus élevé que les pavés avec résidus. Ainsi, il apparaît clairement que le taux de stabilisation en résidus influe sur le coefficient d'absorption dans le sens où la forte présence de résidus réduit l'absorptivité des pavés. En effet, les études menées par *Mahamat* [3] et *Alfred B. Ngowi* [20] rapportent de pareils faits en démontrant que l'apport du sable comme en plus du ciment sur les BTC réduit la porosité du bloc et par corrélation le coefficient d'absorption du matériau.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

- Tenue général des pavés de l'étude à l'eau

Pour déterminer si l'homogénéité des pavés sera effective au cours d'une inondation prolongée. L'expérimentation a été poussé sur une immersion prolongée de 21 jours afin d'observer la tenue générale. Il a été constaté que les pavés existant se sont vus apparaitre des fissures et des pertes de matériaux voir figure 26. Quant aux pavés stabilisés aux résidus de concassé granitique et au ciment, ils sont restés homogènes même si on peut noter la présence de légère fissure sûrement dû aux chocs thermiques entre l'eau et les pavés conservés au soleil après la cure.

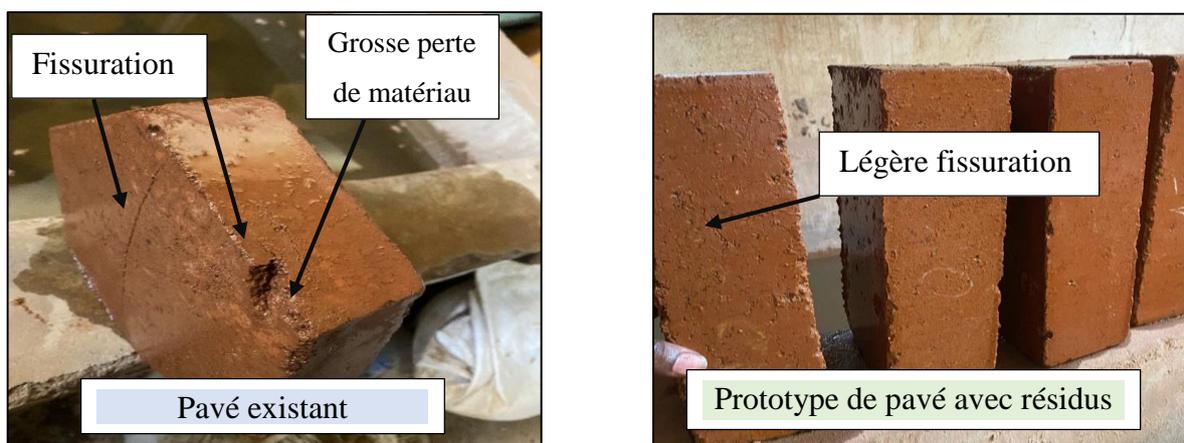


Figure 25 - Photographie des effets du prolongement de l'immersion sur les pavés préexistants et les prototypes de pavés de l'étude

Cependant, la norme NF EN 1338 [5] exige un taux d'absorption d'eau inférieur à 6 %. Ainsi, les pavés stabilisés aux résidus de concassé granitique et au ciment sont en non-conformité avec de façon sommaire 12-14% de taux d'absorption d'eau.

2. Propriétés mécanique ²

Les Figure 16 et Figure 17 présentent les résultats des caractérisations mécaniques des pavés.

❖ Résistance à la compression sèche et humide

Les pavés de l'étude proposent de bonne tenue en compression. Cela est en lien avec l'ajout du ciment. Les liaisons formées par le ciment entre les minéraux du pavé sont plus étroitement liées et robustes, ce qui confère aux pavés des résistances plus élevées. Les travaux de Boffoué et al. [17] appuient ce point en démontrant le renforcement de l'aptitude des blocs stabilisés au ciment à résister aux sollicitations mécaniques et physiques. On constate que les pavés avec résidus proposent de meilleures résistances. Par exemple avec un pavé ayant 20% de résidus et 8% de ciment on obtient 10.05 MPa pour la compression sèche et 3.17 MPa pour la compression humide.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

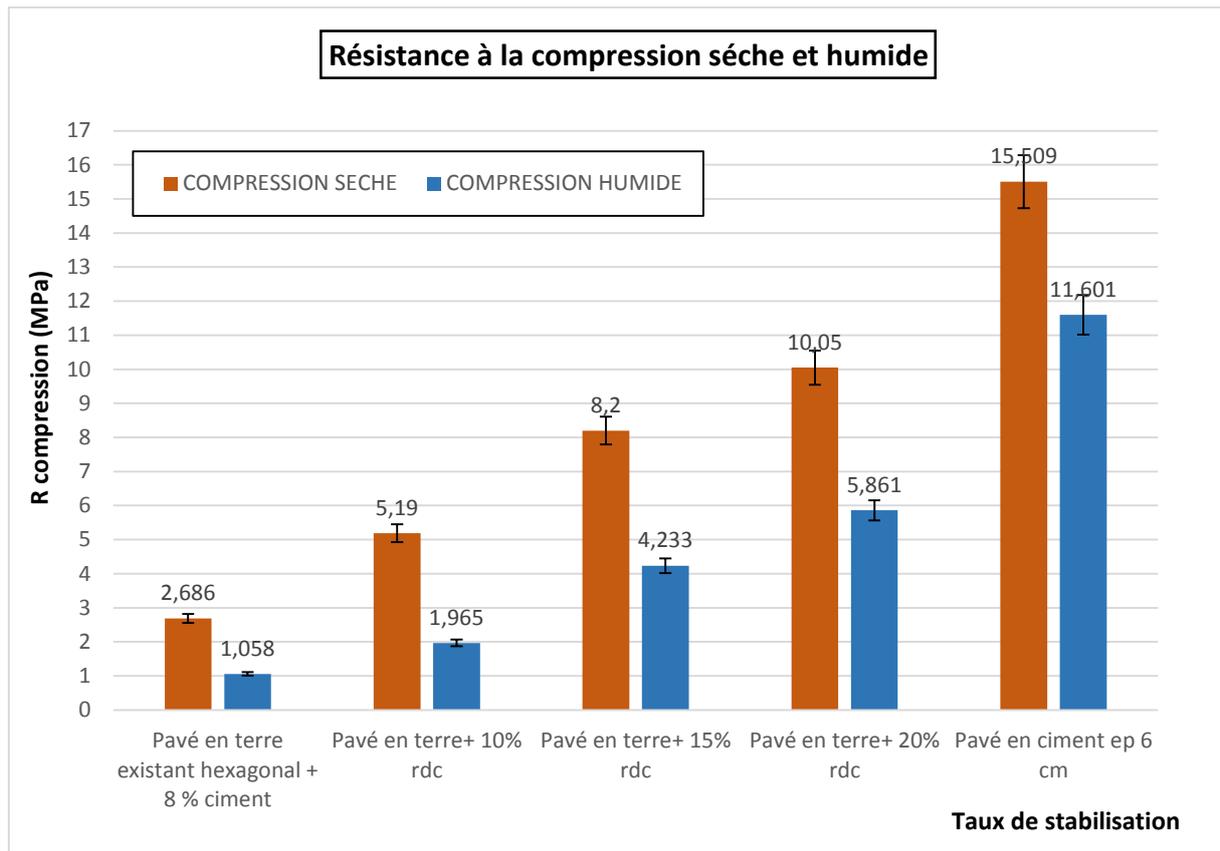


Figure 26 - Résistance à la compression sèche et humide

Cette amélioration constatée ne peut être dû qu'à la présence des résidus apportant un squelette au pavé en témoigne le pavé préexistant qui propose avec 8% de ciment, 2,68 MPa pour la compression sèche et 1,05 MPa pour la compression humide. Du point de vue technique et normatif, les exigences proposées pour les pavés de trottoirs préconisent 5kN/m² pour la compression, ce qui équivaut à 0.005 MPa. Dans ce sens l'ensemble des pavés en terre répondent à ce point technique qu'ils soient dans un état sec ou humide.

❖ Résistance au fendage humide et sec

La résistance des pavés en terre présente les valeurs les plus faibles avec 0.09 MPa en fendage humide contre de 0.258 MPa en fendage à sec pour le préexistant. Et les plus hautes avec 0.316 MPa pour le fendage humide et 0.76 MPa pour le fendage à sec et pour le pavé à 20 %. Les valeurs obtenues sont relativement faibles et pour cause les matériaux terreux de type BTC ont un module de Young relativement faible par rapport au module de Young du béton. La remarque finale, est la forte diminution de la résistance en compression comme en fendage des pavés en état humide. Une étude réalisée par Ojo et Brook [36] et Dessandier [37] explique ce phénomène par la diminution de l'énergie de surface de contact entre les grains, ce qui par corrélation pousse à la modification des liens inter-granulaires lorsqu'il y a présence d'eau.

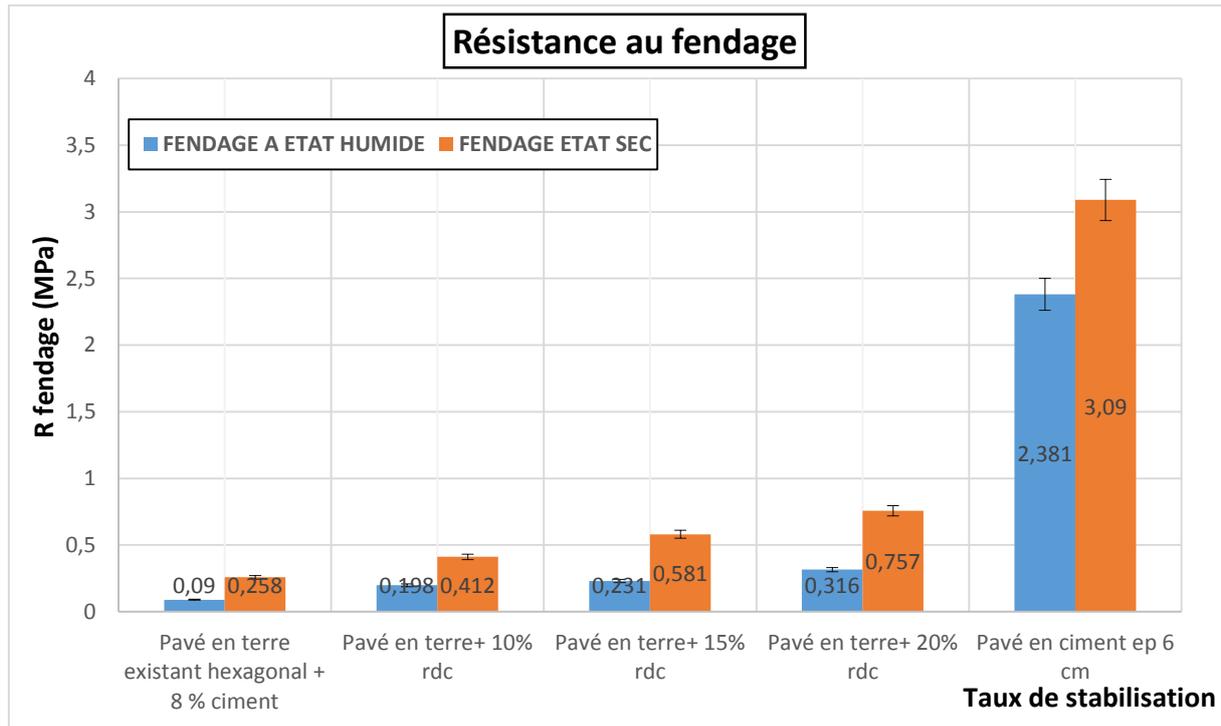


Figure 27 - Résistance au fendage

3. Vérification des résultats de performance des pavés par rapport aux exigences normatives

Un ensemble de caractérisation a été effectué pour déterminer les performances des pavés. Ces performances seront confrontées aux exigences des normes sur les pavés et les BTC.

Tableau 11 – Vérification des exigences BTC

Exigences établies par la norme	Valeurs établies par la norme	Résultats obtenus Pavé en terre T1	Validé	Résultats obtenus Pavé en terre T2	Validé	Résultats obtenus Pavé en terre T3	Validé
Exigences BTC							
Les tolérances dimensionnelles ARS 670 : 1996	Longueur : ± 3 mm Largeur : ± 3 mm Epaisseur : ± 2 mm	Longueur : ± 1 mm Largeur : ± 1 mm Epaisseur: ± 1 mm	■	Longueur: ± 1 mm Largeur : ± 1 mm Epaisseur: ± 1 mm	■	Longueur: ± 1 mm Largeur : ± 1 mm Epaisseur: ± 1 mm	■
Exigence sur l'aspect - NF EN 1338 : 2003	BTC sans défaut, fissure, crevasse	Sans défauts flagrants	■	Sans défauts flagrants	■	Sans défauts flagrants	■
Exigences choix des matériaux ARS 670 : 1996 Classe C – 2	≥ 4 N/mm ²	Conforme voir chap. 2	■	Conforme voir chap. 2	■	Conforme voir chap. 2	■

Tableau 12 – Vérification des exigences pour les pavés

Exigences établies par la norme	Valeurs établies par la norme	Résultats obtenues Pavé en terre T1	Validé	Résultats obtenues Pavé en terre T2	Validé	Résultats obtenue Pavé en terre T3	Validé
Exigences pour les pavés							
Epaisseur selon la destination NF EN 1338 : 2003 (P 98-338) Trottoirs et patio	5 cm - tolérance de ± 3 ou 4 mm	9,5 cm Avec tolérance ± 1 mm		9,5 cm Avec tolérance ± 1 mm		9,5 cm Avec tolérance ± 1 mm	
Les tolérances dimensionnelles NF EN 1338 : 2003 (P 98-338)	Longueur : ± 3 mm Largeur : ± 3 mm	Longueur: ± 1 mm Largeur : ± 1 mm		Longueur: ± 1 mm Largeur : ± 1 mm		Longueur: ± 1 mm Largeur : ± 1 mm	
Exigences sur l'aspect - NF EN 1338 : 2003	pavés en béton sans défaut	Sans défauts flagrants		Sans défauts flagrants		Sans défauts flagrants	
Exigence sur le taux d'absorption de l'eau capillaire- NF EN 1338 : 2003	taux d'absorption d'eau inférieur à 0,1 g/cm ²	0,325 g/cm ²		0,30 g/cm ²		0,25 g/cm ²	
Exigence sur le taux d'absorption de l'eau par immersion - NF EN 1338 : 2003	taux d'absorption d'eau inférieur à 6 %	13,8 %		12,5 %		11,2 %	
Recommandation sur la résistance à la compression sèche - DTR B.C.2.2	Supérieur ou égale à 5kN/m ²	5,19 MPa		8,2 MPa		10,05MPa	
Recommandation sur la résistance à la compression humide - DTR B.C.2.2	Supérieur ou égale à 5kN/m ²	1,96 MPa		4,2 MPa		5,86 MPa	
Exigence sur la résistance à la traction par fendage sèche - NF EN 1338 : 2003	Supérieure à 3,60 MPa	0,4 MPa		0,5 MPa		0,7 MPa	
Exigence sur la résistance à la traction par fendage humide - NF EN 1338 : 2003	Supérieure à 3,60 MPa	0,19 MPa		0,2 MPa		0,3 MPa	

Les pavés en terre sont des éléments prometteurs de par leurs résistances en compressions touchant les 10 MPa, leurs tenues à l'eau et leurs faciles respect de l'aspect et des dimensions.

IV. Etude de prix

Ce point présente principalement le processus et le résultat de l'estimation des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment réalisé lors de l'étude dans le but d'atteindre l'objectif fixé celui de déterminer le prix unitaire et du métré carré.

1. Coûts de production

- a. Calcul des coûts pour une production de pavé en terre à partir de 8 m³ de terre

La détermination du coût de production sur lequel le prix unitaire et celui du métré carré du pavé sera déterminé par la suite, demande d'abord la détermination du cycle de production et de la capacité de production à notre disposition pour cette étude.

❖ Cycle et capacité de production

L'estimation réalisée pour le cycle de production (ANNEXE 3) tourne autour de 30 minutes pour la production de 40 pavés en terre équivalent à la quantité de mélange remplissant un malaxeur. Les cycles peuvent s'enchaîner par deux en une heure de travail, soit 16 cycles au bout d'une journée complète de travail. La capacité de production tourne autour de 80 blocs par heure. Cependant, par précaution, il a été déduit une perte de 5%, en prenant en compte les erreurs et les pertes. Ainsi, 608 blocs peuvent aisément être produit et mise en cure par jour. Ainsi au bout de 5 jours, il est estimé possible d'obtenir environ 3040 pavés en terre.

❖ Coût de la production

- Calcul du cout de la main d'œuvre

Selon le cycle et la capacité de production, Il est estimé que le travail s'étalera sur 5 jours, pour un salaire de 2.500 franc / jour/ ouvrier. Ayant 5 ouvriers, le total est de 62.500 franc CFA.

- Calcul du cout de la matière première

Il a été supposé à disposition, une quantité de 8 m³ de terre, à base duquel le calcul des quantités des matériaux (résidus, ciment, eau) composant le mélange, a été déterminé. Pour le calcul du coût de l'énergie électrique, il a suffi de composer avec la consommation des machines et la taxation électrique de la zone industrielle. Dans l'ensemble, une consommation de 105 kWh a été recensée tout au long des 5 jours de production. En effet, la malaxeuse se mets en marche 16 fois pendant 5 minutes ce qui équivalait à une consommation d'environ 10 kWh et le broyeur prêt de 11 kWh pour une seule utilisation journalière de 30 minutes. S'agissant de l'eau, il a

suffi de déterminer les quantités par rapport aux résultats obtenus par l'essai du Proctor normal tout en prenant en compte la facturation de l'ONEA pour les zones industrielles.

Tableau 13- Coût de la production

N	Désignation	Prix unitaire	Quantité Pavé en terre T1	Quantité Pavé en terre T2	Quantité Pavé en terre T3
1	Terre	9 500 f / m ³	8	8	8
2	Résidus	40 f / kg	800	1200	1600
3	Ciment	6250 f / sac	13	13	13
4	Electricité	138 f / kWh	39	39	39
5	Eau	1104 f / m ³	0,5	0,8	1,1
Totale Matières premières			204 292 f	220 624 f	236 955 f
Totale Main d'œuvre			62 500 f	62 500 f	62 500 f
TOTAL			257 684 f	274 016 f	290 347 f

b. Calcul du coût unitaire d'un pavé et du mètre carré de pavé

En faisant le rapport entre le coût de production du pavé et le total estimé de pavé en fin de production soit les 3040 blocs, il est obtenu : les 3040 blocs estimés en fin de production. Pour le prix du mètre carré, il a suffi de déterminer la surface du pavé puis d'estimer le nombre de pavé par mètre carré et réaliser une multiplication par le coût unitaire du pavé en question.

- ❖ Coût du pavé en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment

En prenant en compte la marge bénéficiaire plus les frais de marche de l'usine, que nous estimons à 100 francs CFA, le prix unitaire du pavé seras fixé globalement à autour de 188 à 199 francs CFA. Ceci pourrait varier dépendamment des frais annexes et du bénéfice souhaité.

Tableau 14 - Coût unitaire et du mètre carré des pavés en terre

N	Désignation	Coût sans bénéfice	Coût Unitaire avec bénéfice	Coût m ²	Commentaires
1	Pave en terre T1	85 f	185	4625 f	Les pavés sont rectangulaires, avec L=29 cm, l=14 cm et h=9,5 cm. Ainsi S=L*l= 0.0406 m ² . Soit 1m ² /0.0406= 25 pavés/m²
2	Pave en terre T2	90 f	190	4750 f	
3	Pave en terre T3	95 f	195	4875 f	

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

2. Evaluation sommaire du marché des pavés, coûts et performances

Dans le sens d'effectuer une comparaison sommaire entre le produit réalisé et ceux existant, il a été réalisé une évaluation des prix retrouvés sur le marché avec leurs performances.

➤ Le marché des pavés de trottoir au Kadiogo

Les pavés en terre : L'entreprise Zi matériau propose des pavés en terre hexagonaux de 6 cm d'épaisseur en terre stabilisé à 8% au ciment à 3500 f CFA/m² soit l'unité à 300 f CFA.

Les pavés en béton : Selon la mercuriale des prix du BTP de Ouagadougou 2024, le prix des pavés en béton varie selon l'épaisseur et le design de ceux-ci. Les prix figurant dans le tableau ci-dessous ont été pris selon l'épaisseur prescrit pour les pavés de trottoir, comme suit :

Tableau 15-Coût des pavés en béton - mercuriale BTP de Ouagadougou 2024 à la page 57

Désignation	Unité	Prix HTVA 2024 en FCFA		
		Ouagadougou		
		Minimum	Moyen	Maximum
Fourniture et pose Pavés ordinaire d'épaisseur 6cm	m ²	6.500	7.200	8.000
Fourniture et pose Pavés de luxe d'épaisseur 6cm	m ²	10.500	12.000	13.500

➤ Performances et coûts

Dans le sens d'aider à l'analyse, un tableau présentant les résistances physico-mécaniques des produits et leurs coûts au mètre carré est proposé ci-dessous.

Tableau 16- Performances et coûts

Désignation	Résistance compression (MPa)	Résistance fendage (MPa)	Taux d'absorption (%)	Prix m ² en F CFA
Pavés ordinaire d'épaisseur 6cm	11,601	3,105	6	6.500 f
Pavés en terre T3	5,861	0,316	11,3	4975 f
Pavés en terre T2	4,233	0,231	12,4	4850 f
Pavés en terre T1	1,965	0,198	13,7	4700 f
Pavés en terre existant	1,058	0,09	14,8	3500 f

V. Impact environnemental

Le point suivant vise à obtenir premièrement, les impacts que produiront les pavés entrant dans l'étude. Deuxièmement, déterminer quel pavé est le plus polluant et quel facteur est le plus influencé. Troisièmement, une évaluation des impacts seront réalisé afin de tirer les points les plus polluants autour de ces pavés et quelle procédure mener pour atténuer ces impacts.

1. Processus de réalisation de l'analyse du cycle de vie des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment

Le processus utilisé pour définir l'analyse de cycle de vie des pavés en terre comprimée suit les principes définis par la norme ISO 14040 :2006 et la norme ISO 14044 :2006.

➤ Définition de l'objectif, du champ d'application et de l'unité d'étude

L'objectif est de déterminer les impacts qu'induiront les pavés sur l'environnement. Ce travail est borné de l'extraction des matières premières à la production des pavés (**ANNEXE 4**) et se concentre sur le Burkina Faso. L'étude portera sur la production d'un kilogramme de matériau.

➤ Inventaire du cycle de vie d'un 1 kg de pavé en terre

Pour la collecte des données, les méthodes d'observation sur le terrain et l'examen de base de données ont été employées. Une bonne partie des données utilisées proviennent de la base de données du LEMHAD 2iE.

➤ Présentation de Sima Pro version 9.0 et de la méthode de calcul

Sima Pro est un logiciel d'analyse du cycle de vie et de calcul des impacts environnementaux des produits et services. Il permet la gestion des données et des scénarios environnementaux. La méthode employée est l'analyse. Elle se chargera de nous proposer l'analyse de nos données.

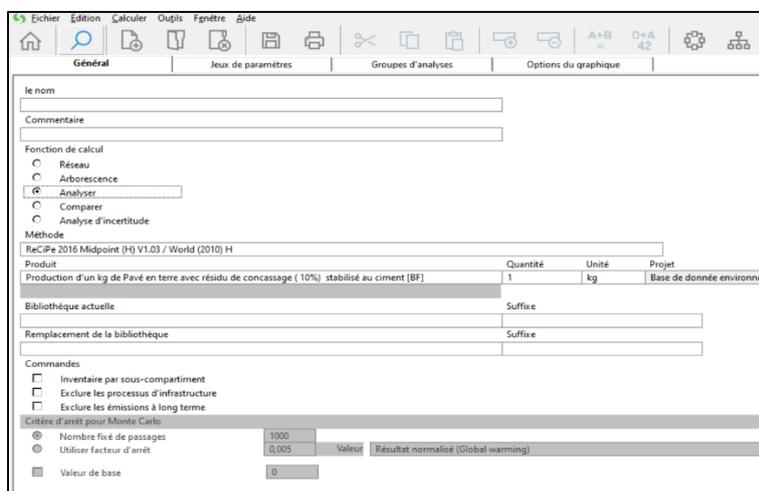


Figure 28 - Présentation de Sima Pro version 9.0 et de la méthode de calcul

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

➤ Présentation de la base de données réalisée pour l'étude

Une base de données dénommée "Base de données environnementales Judicaël " a été réalisée dans le but d'intégrer tous les processus associés à la chaîne de production de chaque pavé étudié.

le nom	Unité	Type de déchets	Projet
Production d'un Kg de Ciment Portland (BF)	kg	Brick	Base de donnée environnementale Ju
Production d'un Kg de Pavé en béton (BF)	kg	Cement	Base de donnée environnementale Ju
Production d'un Kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (10%) stabilisé au ciment (BF)	kg	Brick	Base de donnée environnementale Ju
Production d'un Kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (15%) stabilisé au ciment (BF)	kg	Brick	Base de donnée environnementale Ju
Production d'un Kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (20%) stabilisé au ciment (BF)	kg	Brick	Base de donnée environnementale Ju
Production d'un Kg de Pavé préexistant ZI Matériaux (BF)	kg	Brick	Base de donnée environnementale Ju

Figure 29 - Présentation de la base de données réalisée pour l'étude

C'est à base de ces processus qui nous fournissent un inventaire des données impliquées dans la modélisation de chaque chaîne de matériaux que sont réalisées toutes les évaluations d'impacts des matériaux. En (ANNEXE 4) les processus de 1 kilogramme de pavé vous sont présentés.

2. Résultats de l'analyse du cycle de vie des pavés de l'étude

Une analyse des processus, profil environnemental et évaluation des impacts ont été réalisés suivant le champ d'application de chaque matériau. Les résultats sont affichés en fonction des processus qui contribuent majoritairement suivant l'indicateur d'impact considéré et usent d'une catégorisation des indicateurs étudiés et associent à chacun des indicateurs la valeur représentative d'ensemble de 100%. L'évaluation des impacts est élaborée par le biais de la méthode ReCiPe H. Il s'agit d'un modèle qui fournit une évaluation complète des impacts environnementaux. Elle use des indicateurs présentés en ANNEXE 4. À partir de la base de données, un profil environnemental pour chaque différent pavé a été établi. Les analyses des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique et au ciment à 8% vous sont présentés en ANNEXE 4.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

3. Résultats de l'analyse du cycle de vie comparative des pavés de l'étude

Deux analyses comparatives des produits entrant dans l'étude ont été réalisées. La première compare les pavés en terre avec résidus (analyse : figure 20 et profil environnemental : tableau 15) et la seconde compare l'ensemble des pavés entrant dans l'étude (analyse : figure 21 et profil environnemental : tableau 16), tout cela à base des données des ACV de chaque pavé précédemment réalisé. Les résultats obtenus sont présentés comme suit :

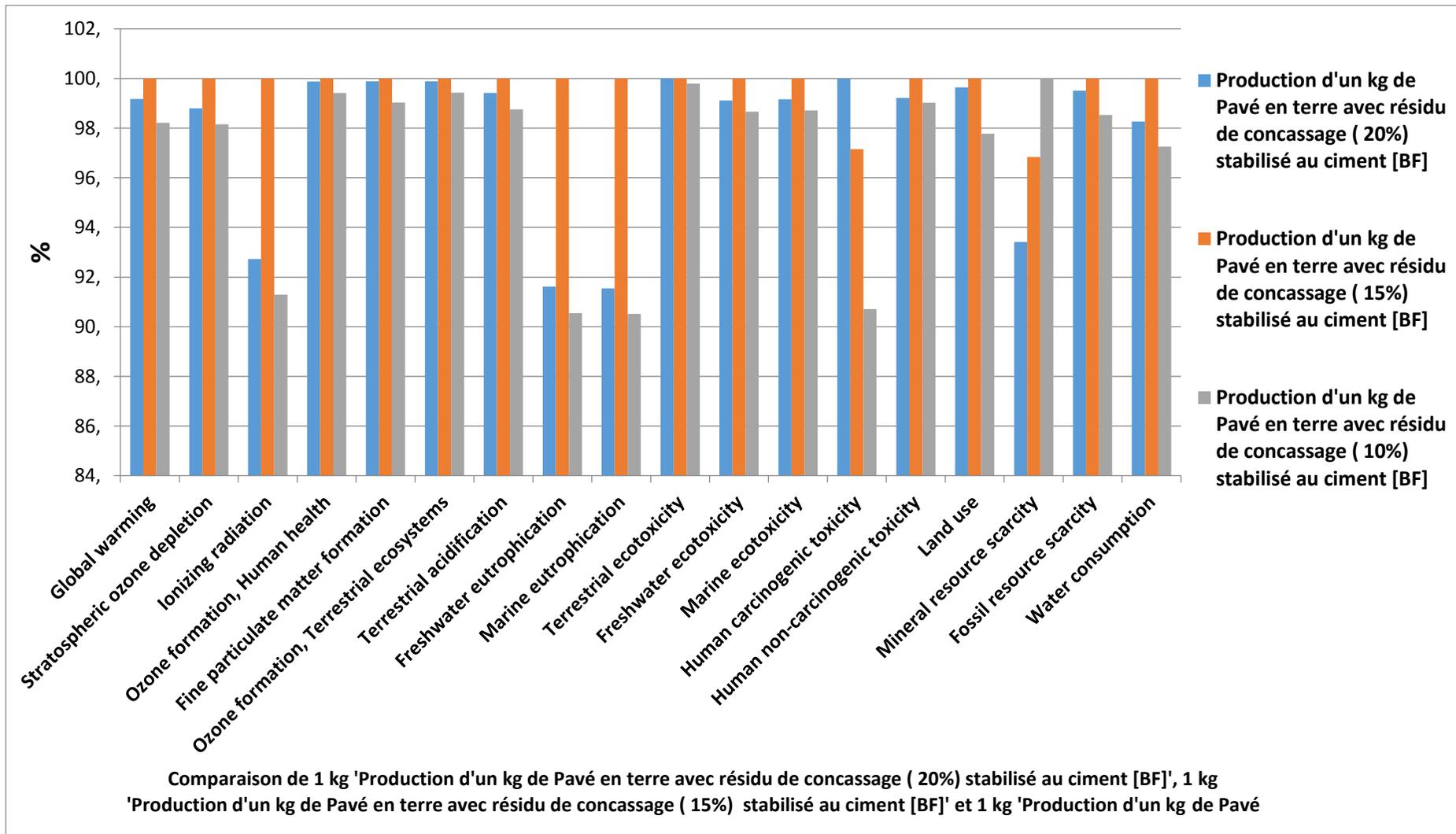


Figure 30 - l'ACV Comparative de la production d'un kg de pavé en terre stabilisé à 10%, 15%,20% de résidus de concassé granitique avec à 8% de ciment

Tableau 17 - Profils environnementaux de la production d'un kg de pavé en terre stabilisé à 10%, 15%,20% de résidus de concassé granitique avec à 8% de ciment

Exporté de Sima Pro 9.0.0.48
Comparaison de processus
Méthode : ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H / Caractérisation
Unité utilisée : %

Libellé	Production d'un kg de Pavé en terre T1	Production d'un kg de Pavé en terre T2	Production d'un kg de Pavé en terre T3
Global warming	98,2133	100	99,1713
Stratospheric ozone depletion	98,1564	100	98,802
Ionizing radiation	91,2955	100	92,7283
Ozone formation, Human health	99,4186	100	99,8824
Fine particulate matter formation	99,0286	100	99,8932
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	99,428	100	99,8876
Terrestrial acidification	98,7527	100	99,4184
Freshwater eutrophication	90,5446	100	91,6188
Marine eutrophication	90,5182	100	91,5449
Terrestrial ecotoxicity	99,7939	99,9967	100
Freshwater ecotoxicity	98,6616	100	99,1111
Marine ecotoxicity	98,7189	100	99,1665
Human carcinogenic toxicity	90,7084	97,1521	100
Human non-carcinogenic toxicity	99,0194	100	99,2123
Land use	97,7739	100	99,6472
Mineral resource scarcity	100	96,8402	93,4175
Fossil resource scarcity	98,5338	100	99,508
Water consumption	97,261	100	98,2649

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
 Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

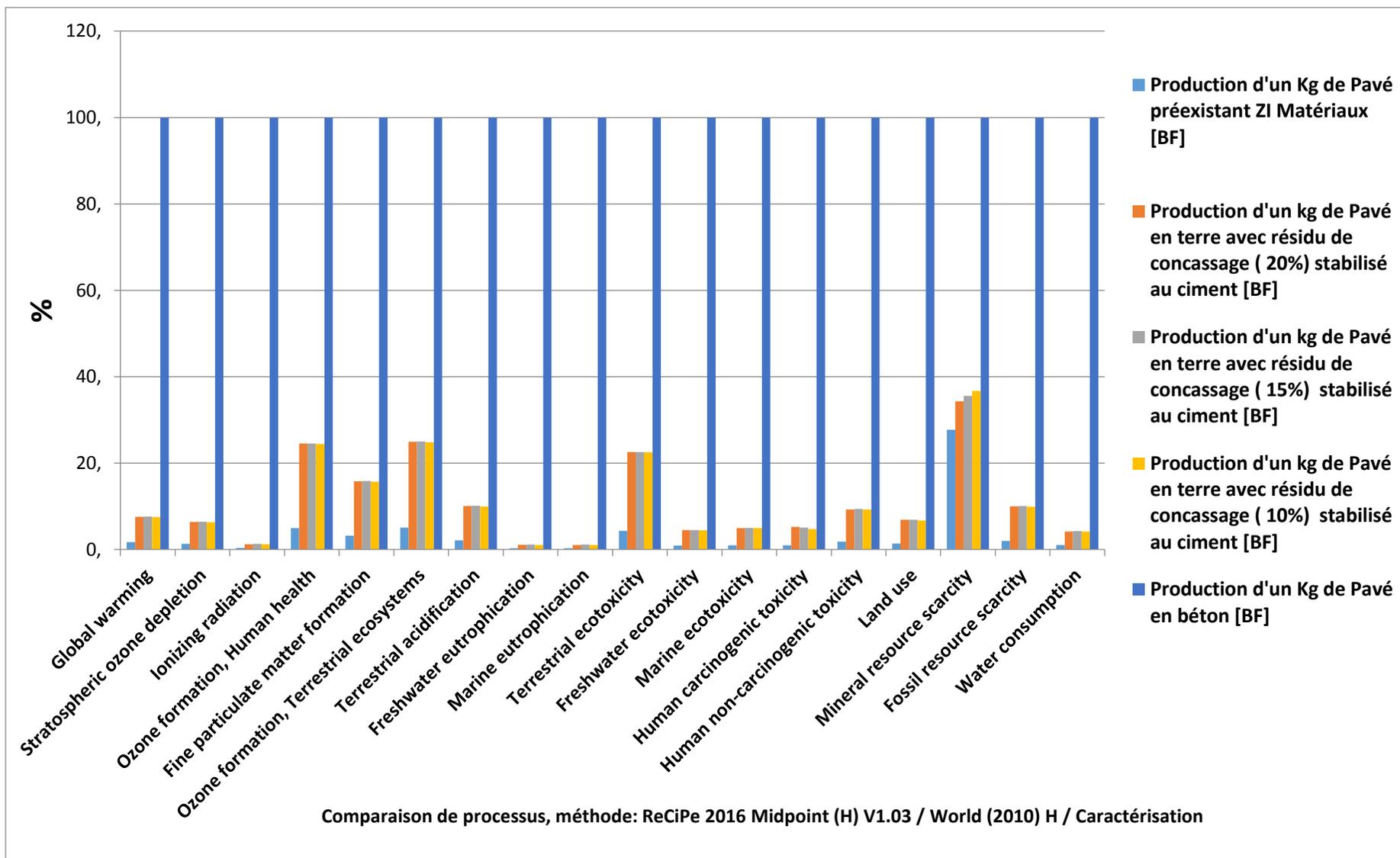


Figure 31 - l'ACV Comparative de la production d'un kg de pavé en béton, de pavé en terre (10, 15,20%) et de pavé préexistant

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
 Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-educ.org - www.2ie-educ.org

Tableau 18 - Profils environnementaux de la production d'un kg de pavé en béton, de pavé en terre (10, 15,20%) et de pavé stabilisé à 8% de ciment

Exporté de Sima Pro 9.0.0.48
Comparaison de processus
Méthode : ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H / Caractérisation
Unité utilisée : %

Libellé	Production d'un Kg de Pavé préexistant	Production d'un kg de Pavé en terre T3	Production d'un kg de Pavé T2	Production d'un kg de Pavé T1	Production d'un Kg de Pavé en béton
Global warming	1,7347	7,5754	7,6387	7,5022	100
Stratospheric ozone depletion	1,3	6,3744	6,4516	6,3327	100
Ionizing radiation	0,3353	1,2288	1,3252	1,2098	100
Ozone formation, Human health	4,9712	24,5462	24,5752	24,4323	100
Fine particulate matter formation	3,1876	15,8214	15,8384	15,6845	100
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	5,0749	24,9543	24,9824	24,8395	100
Terrestrial acidification	2,0975	10,0453	10,1041	9,978	100
Freshwater eutrophication	0,3163	1,0712	1,1691	1,0586	100
Marine eutrophication	0,3132	1,0626	1,1607	1,0507	100
Terrestrial ecotoxicity	4,3347	22,5472	22,5465	22,5008	100
Freshwater ecotoxicity	0,9027	4,4915	4,5318	4,4711	100
Marine ecotoxicity	0,9962	4,9715	5,0133	4,949	100
Human carcinogenic toxicity	0,977	5,2452	5,0958	4,7578	100
Human non-carcinogenic toxicity	1,8536	9,2977	9,3716	9,2797	100
Land use	1,3723	6,8672	6,8915	6,738	100
Mineral resource scarcity	27,7229	34,2978	35,5544	36,7145	100
Fossil resource scarcity	2,0066	9,9964	10,0458	9,8985	100
Water consumption	1,04	4,186	4,2599	4,1432	100

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Institut 2iE – Rue de la science – 01 BP 594 – Ouagadougou 01 – Burkina Faso – IFU 00007748B
Tel. : (+226) 25.49.28.00 – Fax : (+226) 25.49.58.01 – Email : 2ie@2ie-educ.org - www.2ie-educ.org

❖ Analyse et commentaire

Le manque de documentation scientifique sur les pavés en terre, ne permet pas la confrontation des résultats de la littérature aux résultats obtenus lors de l'étude. Pour y pallier, l'analyse se fera donc entre les pavés en terre stabilisés au ciment et aux résidus (T1, T2, T3) et les pavés en terre existant. Avant d'y parvenir, il est important de se pencher tout d'abord sur les résultats globaux de l'ACV comparative qui place le pavé en béton comme étant le plus polluant avec un pourcentage égal à 100%, ce qui notifie sa supériorité en termes de pollution peu importe l'indicateur environnemental observé. Cela s'explique par le fait que ses composants sont des matériaux dont l'extraction et la production est extrêmement énergivore en plus d'être polluant. Dans la même lancée, T2 se place derrière le pavé en béton, cela est dû au facteur transport, distance, quantité d'eau pour l'atteinte de l'optimum Proctor normal. Enfin, nous avons T1 et enfin T3 (voir figure 18). Le pavé préexistant vient en dernière position avec de très faibles impacts relativement aux autres types de pavé.

Plusieurs ACV ont été réalisés lors de l'étude, dans le but de pouvoir tirer certaines idées sur les pavés stabilisés au ciment et aux résidus (T1, T2, T3) et les pavés en terre existant entrant dans l'étude. L'information pertinente réside dans la connaissance du matériau qui pollue le plus et cela suivant l'indicateur d'impact concerné. Dans notre cas, nous constatons que dans la majeure partie des indicateurs d'impact, c'est le pavé en terre comprimée et stabilisé aux résidus qui pollue le plus avec des valeurs touchant 15% de pollution globale contre moins de 8% dans le cas les pavés en terre existant. Les pavés stabilisés au ciment et aux résidus, influent le plus sur l'acidification terrestre, l'écotoxicité terrestre, la diminution des ressources minéral et la santé humaine tout comme les pavés préexistants mais avec des valeurs légèrement plus élevées. Cela s'explique en grande partie par le fait que ces facteurs sont en lien direct avec l'extraction de la terre, la collecte des résidus et sa transformation, l'utilisation de matériaux cimentaire lors de la formulation mais également de résidus de concassé qui pour son obtention et sa collecte requière l'utilisation de moyen de déplacement motorisé pour sa collecte. A l'instar des pavés stabilisés au ciment et aux résidus, les pavés existants ne contiennent pas de résidus ce qui les exemptes de tout impacts relatifs à leurs emplois. Les résultats nous montrent que les pavés stabilisés au ciment et aux résidus sont plus polluant que les pavés existant. Néanmoins si l'on considère les performances que chaque pavé propose, on se rend compte que ce facteur pourrait largement faire incliner la balance pour les pavés stabilisés au ciment et aux résidus. Si l'on effectue un ratio temps par pourcentage de pollution pour chaque pavé en terre, on se réalise que les pavés stabilisés au ciment et aux résidus suivants étant plus résistant,

propose un ratio plus intéressant que le pavé en terre existant et donc serait une alternative intéressante. Pour rendre le matériau encore plus vert, il est possible d'envisager une atténuation des impacts des pavés stabilisés au ciment et aux résidus. Pour cela, il est essentiel d'identifier l'indicateur d'impact sur lequel on souhaite effectuer une atténuation. Le type d'indicateur choisi nuance sur l'empreinte écologique du matériau. Ainsi, lorsque l'on considère l'indicateur lié au réchauffement climatique, il est constaté que les processus qui contribuent majoritairement sont ceux liées à l'utilisation des moyens de transport (93.7%) puis des matériaux et du ciment (4.02%). Cela peut se comprendre car les résidus sont récupérés à 20 km, la terre à 3km et le ciment à 500 m du site de fabrication. Pour réduire donc l'impact lié au réchauffement climatique, il faut songer à réduire les temps de transport, utilisé dans engins moins polluants et si possible réduire la quantité de ciment entrant dans les pavés. Les conclusions sont donc assez différentes en fonction du type d'indicateur, ce qui montre qu'il est important d'avoir une vision globale des différents indicateurs pour ne pas fausser la prise de décision au sujet de l'atténuation

Pour conclure, notre analyse nous dirige à réaliser que bien que les pavés stabilisés au ciment et aux résidus soient une alternative intéressantes avec plus de 70% de réduction en termes de pollution général par rapport au pavé en béton et une résistance d'au moins 40% supérieur au pavé préexistant, il reste moins écologique de prime abord face aux pavés existant. Cependant en prenant du recul et en y intégrant l'aspect performance, on se rend bien compte que les pavés stabilisés au ciment et aux résidus reste un matériau viables. Enfin dans l'idée de parfaire dans le sens environnemental, les pavés stabilisés au ciment et aux résidus, les propositions d'optimisations se doivent d'être pris en compte tout en gardant à l'esprit qu'elles sont dépendantes de l'indicateur d'impact choisis pour être atténué.

CONCLUSION GENERAL

L'objectif principal de cette étude était de déterminer s'il est possible d'utiliser des pavés en terre comprimée stabilisée aux résidus de concassé granitique (10%,15% et 20%) et à 8% de ciment comme alternative pour pavé de trottoir au Burkina Faso, en se basant sur les normes tout en faisant ressortir leurs performances, coûts et impacts sur l'environnement.

La caractérisation physico-mécanique des pavés a révélé que sur le plan du taux d'absorption par capillarité et par immersion, les taux d'absorption capillaire variaient entre 2 à 4 g/cm² pendant que la norme exige une valeur en dessous de 0,1 g/cm² et 12% à 14% l'absorption par immersion pour contre 6% prescrit par la norme même si les pavés sont très résistants en présence d'eau et restent homogènes. Par contre, sur le plan de la résistance en compression sèche et humide, les valeurs obtenues étaient comprises entre 1,5 à 10 MPa, ce qui est largement au-dessus de la valeur de 5 kN/m² recommandé par la norme. Pour la résistance au fendage sec et humide, les valeurs globalement sont inférieures à 1 MPa pour une exigence chiffrée à 3,6 MPa. Cependant, malgré leurs tendances physiques et hydriques défavorables, les pavés sont prometteurs et peuvent être utilisés semblent utilisables dans des lieux peu humides où les efforts de fendage sont moindres. Un cas pratique, celui des pavés existants, moins performants que les pavés stabilisés aux résidus de concassé granitique et de ciment mais qui ont été utilisés pendant plus d'une quinzaine d'années sans présenter de rupture brutale, alors il semble possible d'utiliser de ce type de pavé sur trottoir selon les cas. Les pavés en terre stabilisée aux résidus et au ciment ont été estimés à 185 f/unité soit 4625f/m² pour T1, 190 f/unité soit 4750f/m² pour T2 et 195 f/unité soit 4875 f/m² pour T3. L'analyse des cycles de vie, présente les pavés prototypes en terre comme étant une alternative écologique avec des effets en lien direct avec le matériau abondant et dont le taux de gravité est moindre en plus d'être éligible à l'atténuation.

Cette étude apporte des données sur l'effet physicomécanique des résidus granitiques dans le mélange terre-ciment, en plus de proposer une documentation sur la thématique des pavés en terre qui semble presque inexistante, ce qui est innovant en soi. Ces travaux pourraient constituer une base pour le développement d'adaptation des BTC en pavé viable selon le cadre normatif. Pour cela, il serait pertinent d'étudier des techniques de réduction ou d'obstruction des pores dans les pavés, en envisageant toujours la croissance de la résistance au fendage sec et humide afin de pallier aux tares hydriques. Comme piste d'étude, les travaux d'Agostino Walter et al. en 2015 présentent une technique de compression du matériau en terre qui pourrait réduire significativement la porosité de l'élément en terre, pouvant le rendre plus résistant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Architecture : L'Afrique pourrait en finir avec le tout-béton ».
- [2] R. Bahar et M. Benazzoug, « Performance of compacted cement-stabilised soil, Cem. Concr. Compos. », 2004, doi: 10.1016.
- [3] S. Mahamat, « ETUDE COMPARATIVE ENTRE L'AMELIORATION DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEE STABILISEE PAR LE CIMENT ET LA CHAUX ETEINTE ». 2010.
- [4] V. R. Fetra et I. A. Rahman, « Preliminary Study of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). "Australian Journal of Basic and Applied Sciences ». 12 2011.
- [5] NF EN 1338, « Pavé en béton - Prescriptions et méthodes d'essai ». Afnor, 2003.
- [6] DTR B.C.2.2, « Ministère de l'habitat d'algerie ». octobre 1988.
- [7] ARS 670- H. Houben, « blocs de terre comprime, normes, Brux. CRAterre- EAG ISBN ». 1996.
- [8] W. Schellmann, « A new definition of laterite, Mem. Geol. Surv. India. 120 ». 1986.
- [9] O. SORE, « Synthèse et caractérisation des liants géopolymères à base des matériaux locaux du Burkina Faso en vue d'une stabilisation des Briques en Terre Comprimées (BTC) ». 2017.
- [10] A. Lawane Gana, « Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique ». Le Havre et la Fondation 2iE, 2014.
- [11] ARS 680 - H. Houben, « Serie technologies no. 11, blocs de terre comprime, normes, Brux. » CRAterre- EAG ISBN., 1996.
- [12] NF EN 197-1, « Compositions, Spécification et critères de conformité des ciments courants ». 2001.
- [13] NBF 02-005, « Spécifications techniques pour les blocs de terre comprimée ». ABNORM, 2009.
- [14] B. Taallah, « Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers ». Constr. Build. Mater. 18, 2014.
- [15] P.Meukam, « Thermo physical characteristics of economical building materials ». Constr. Build. Mater. 18, 2004.
- [16] In Mango-Itulama, L. A., « Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée ». 2019.
- [17] Boffoue et al., « Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée ». 2015.
- [18] Kerali, « Durability of compressed and cement-stabilised building blocks ». 2001.
- [19] G. Kiki et al et P. Nshimiyimana, « Physico-mechanical and durability performances of compressed earth blocks incorporating quackgrass straw: An alternative to fired clay ». 2023.
- [20] Alfred B. Ngowi, « Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana ». 1997.
- [21] Vincent Rigassi, « GRATERRE-EAG, Blocs de Terre Comprimée, Manuel de production Volume I ». 1998.
- [22] Hauschild et al., « Introduction to LCA Methodology. In Life Cycle Assessment : Theory and practice ». 2018.
- [23] Gruescu & Menet, « Utilisation de la méthodologie d'Analyse du cycle de vie (ACV) pour le choix des matériaux d'un élément de construction. » 2021.
- [24] PÉCHENART & ROQUESALANE, « SimaPro : Logiciel d'analyse de cycle de vie. Techniques de l'Ingénieur, 23. <https://doi.org/10.51257/a-v1-ag6781> ». 2014.
- [25] ARS 675-H. Houben, « blocs de terre comprime, terminologies, Brux. CRAterre- EAG ISBNARS 675 ». 1996.

- [26] XP P 13-901, « Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception ». AFnor, 2017.
- [27] AFPC - AFREM – XP P 19, « Durabilité des bétons - Mesure de l'absorption d'eau par capillarité ». 1997.
- [28] NF P 18-560, « Analyse granulométrique par tamisage ». 1990.
- [29] NF P 94-057, « Analyse granulométrique des sols -Méthode par sédimentation ». 1992.
- [30] NF P 94-068, « Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux ». 1998.
- [31] NF P94-051, « Détermination des limites d'Atterberg - Limite de Liquidité à la coupelle et Limite Plasticité au rouleau ». 1993.
- [32] NF P94-093, « Détermination des références de compactage d'un matériau - Proctor Normal et Proctor Modifié ». PhD Thesis, Tours., 1999.
- [33] Siegesmund et al, « Stone in Architecture: Properties, Durability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3>. » 2014.
- [34] Kasthurba et al, « Investigation of Laterite Stones for Building Purpose from Malabar Region, Kerala, SW India - Chemical Analysis and Microstructure Studies ». Construction and Building Materials 22, 2008.
- [35] Franck Cassagnabère et al., « Caractérisation Performantielle D'un Liant Ternaire À Base de Ciment, Laitier et Métakaolin ». 2011.
- [36] Ojo et Brook, « The effect of moisture on some mechanical properties of rock ». Mining Science and Technology 10 (2): 145-56, 1990.
- [37] Dessandier, « Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine: application à la durabilité des pierres en oeuvre ». 1995.

ANNEXES

Illustration 1 - Correspondance des symboles de classification des matériaux - [11] CraTerre	50
Illustration 2 - Dispositif du protocole [27]	50
Illustration 3 - Dispositif de quartage.....	51
Illustration 4 - Immersion totale des pavés [5].....	51
Illustration 5 - Dispositifs de pesé utilisés au laboratoire et sur site	51
Illustration 6 - Dispositif de mesure de précision utilisé au laboratoire.....	51
Illustration 7 - Cycle de production.....	52
Illustration 8- Cycle de vie d'un pavé en terre comprimée stabilisé- Le champ d'application	52
Illustration 9 - Processus de production d'un kg pavé en terre comprimée à 8% de ciment préexistant ZI Matériaux	53
Illustration 10 - Processus de production des pavés en terre comprimée stabilisé aux résidus à 10 % de concassé granitique et à 8% de ciment.....	53
Illustration 11 - Processus de production des pavés en terre comprimée stabilisé aux résidus à 15 % de concassé granitique et à 8% de ciment.....	54
Illustration 12- Processus de production des pavés en terre comprimée stabilisé aux résidus à 20 % de concassé granitique et à 8% de ciment.....	54
Illustration 13 - Processus de production des pavés en béton	55
Illustration 14 - Indicateurs d'impacts de la méthode ReCipe H.....	55
Illustration 15 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre Préexistant.....	56
Illustration 16- Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre comprimée stabilisé aux résidus à 10 % de concassé granitique et à 8% de ciment.....	56
Illustration 17 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre comprimée stabilisé aux résidus à 15 % de concassé granitique et à 8% de ciment.....	57
Illustration 18 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre comprimée stabilisé aux résidus à 20 % de concassé granitique et à 8% de ciment.....	57
Illustration 19 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en béton	58

ANNEXE 1 : Critères de choix des matériaux pour BTC

Illustration 1 - Correspondance des symboles de classification des matériaux - [11] CraTerre

Symbole	Nature
A1	Matériau acceptable, mais ayant un peu trop de fines
A2	Matériau acceptable, mais ayant trop de fines
A3	Matériau acceptable, mais demandant une attention particulière
A4	Matériau délicat à utiliser, car très actif
B1	Matériau sableux demandant un rajout de fines pour être acceptable
B2	Matériau acceptable ayant un léger déficit de fines
B3	Matériau sableux demandant un rajout considérable de fines
B4	Matériau acceptable ayant un déficit de fines
B5	Matériau acceptable, mais manquant un peu de fines
B6	
D1	Matériau graveleux demandant un rajout de fines pour être acceptable
D2	Matériau sableux demandant un rajout considérable de fine pour être accepté

ANNEXE 2 : DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Illustration 2 - Dispositif du protocole [27]

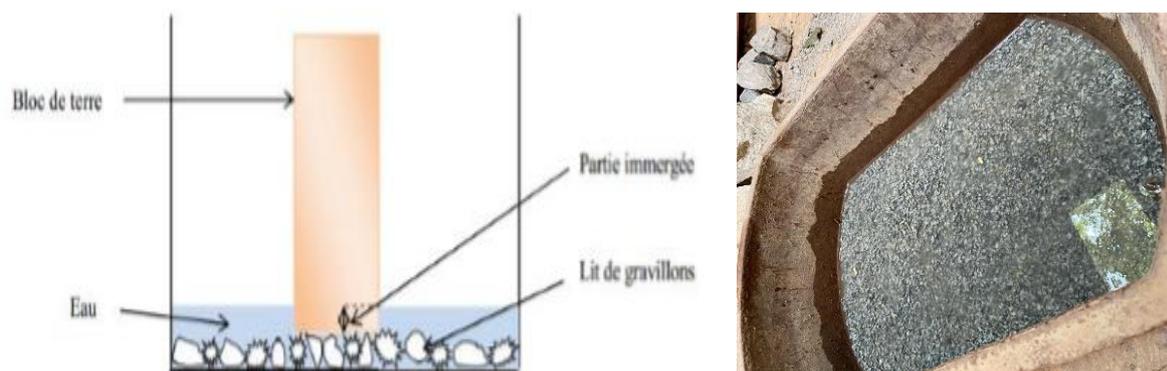


Illustration 3 - Dispositif de quartage



Illustration 4 - Immersion totale des pavés [5]



Illustration 5 - Dispositifs de pesé utilisés au laboratoire et sur site

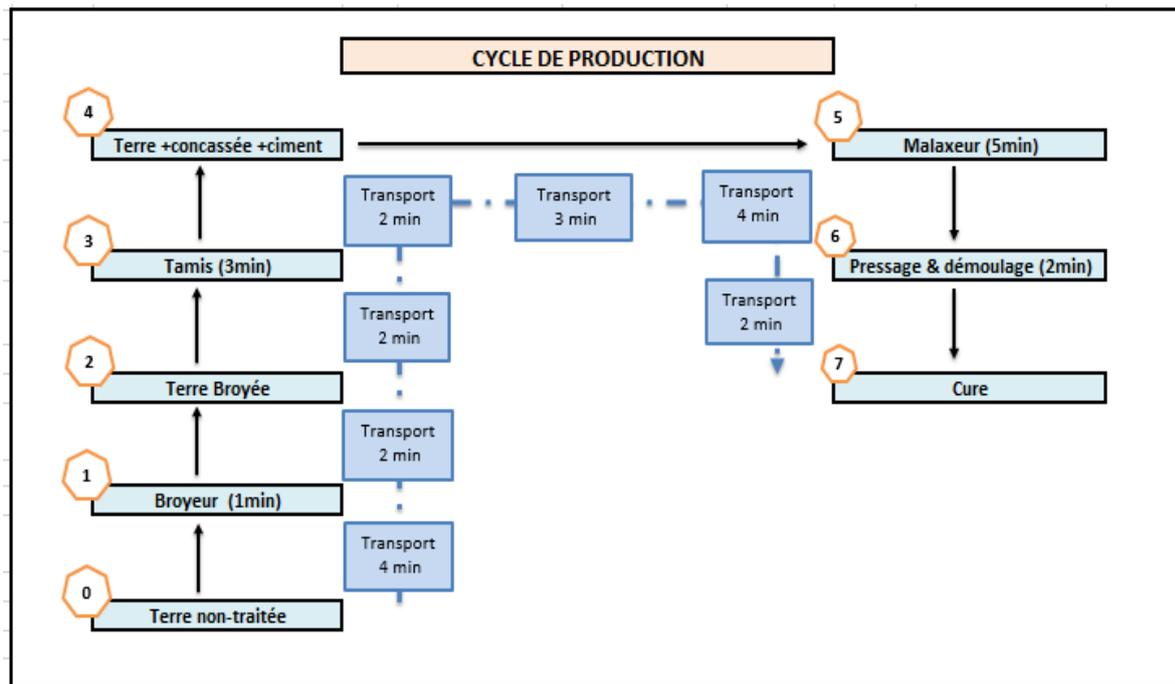


Illustration 6 - Dispositif de mesure de précision utilisé au laboratoire



ANNEXE 3 : Etude de prix

Illustration 7 - Cycle de production



ANNEXE 4 : Analyse du cycle de vie

Illustration 8- Cycle de vie d'un pavé en terre comprimée stabilisé- Le champ d'application

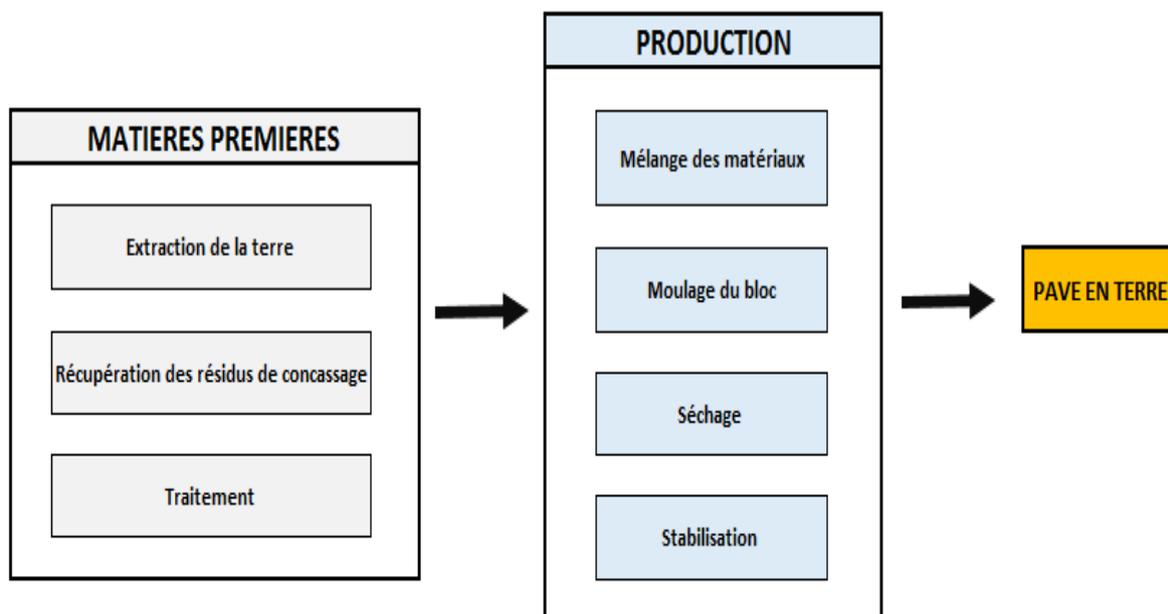


Illustration 9 - Processus de production d'un kg pavé en terre comprimée à 8% de ciment préexistant ZI Matériaux

Produits							
Sortants connus vers la technosphère. Produits et co-produits	Quantité	Unité	Affectation ?	Type de déchets	Catégorie	Commentaire	
Production d'un Kg de Pavé préexistant ZI Matériaux (BF)	1	kg	Mass	100 %	Brick	Construction/Bricks	Cet ensemble de données représente la production de 1 kg de briques de BTC stabilisées adapté au contexte burkinabé
(insérer une ligne ici)							
Sortants connus vers la technosphère. Produits évités	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire	
(insérer une ligne ici)							
Entrées							
Entrées connues de la nature (ressources)	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire
Water, well, BF	in water	0,0002035	m3	Lognormal	1,5639		Quantité d'eau entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
Clay, unspecified	in ground	1,012	kg	Indéfini			Quantité d'argile entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
(insérer une ligne ici)							
Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire	
Clay pit infrastructure (GLO) market for APOS, U	1,0E-10	p	Lognormal	3,2649			Infrastructure nécessaire pour la production de la brique de BTC stabilisée.
Production d'un Kg de Ciment Portland (BF)	0,088	kg	Indéfini				Quantité de ciment entrante pour la fabrication d'un Kg de brique. la chaux est remplacé par du ciment Portland pour la stabilisation à 8% de la quantité totale de matériaux entrante
Transport, freight, light commercial vehicle (RoW) market for transport, freight, light comm	0,05*3,5 = 0,175	tkm					Le moyen de transport utilisé pour le transport des concassés est un motorcycle de capacité 50KG pour le ciment le meme engin mais sur 500m ainsi que la latérite sur 3km
(insérer une ligne ici)							
Entrées connues de la technosphère (électricité/chaueur)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire	
Electricity, medium voltage (DE) electricity voltage transformation from high to medium vol	13,875+18,75+6,6664 = 39,3	Wh					La matrice énergétique de l'Allemagne se rapproche majoritairement à celle du Burkina Faso, nous utiliserons donc leur donnée énergétique. l'énergie nécessaire pour la fabrication d'une brique : il s'agit de l'énergie utilisé par la press TERSTARAM pour la compression d'une brique avec une pression inférieure à 200 Tonnes avec une puissance de 5 KWh avec un temps moyen de 2mn (0,0333h) pour la formulation d'une brique. Energie utilisés par le malaxeur pour le mélange sec et humide des matériaux pour 2mn(0,08333) de malaxage la préparation des matériaux, le tamisage, l'extraction d'eau le mélange des matériaux tous des travaux manuels. Pour les

Illustration 10 - Processus de production des pavés en terre comprimée stabilisé aux résidus à 10 % de concassé granitique et à 8% de ciment

Produits							
Sortants connus vers la technosphère. Produits et co-produits	Quantité	Unité	Affectation ?	Type de déchets	Catégorie	Commentaire	
Production d'un kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (10%) stabilisé au ciment (BF)	1	kg	Mass	100 %	Brick	Construction/Bricks	Cet ensemble de données représente la production de 1 kg de Pavé en terre avec résidu de concassage stabilisé au ciment adapté au contexte burkinabé
(insérer une ligne ici)							
Sortants connus vers la technosphère. Produits évités	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire	
(insérer une ligne ici)							
Entrées							
Entrées connues de la nature (ressources)	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire
Water, well, BF	in water	0,0002035	m3	Lognormal	1,5639		Quantité d'eau entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
Clay, unspecified	in ground	0,902	kg	Indéfini			Quantité d'argile entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
(insérer une ligne ici)							
Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire	
Clay pit infrastructure (GLO) market for APOS, U	1,0E-10	p	Lognormal	3,2649			Infrastructure nécessaire pour la production de la brique de BTC stabilisée.
Production d'un Kg de Ciment Portland (BF)	0,088	kg	Indéfini				Quantité de ciment entrante pour la fabrication d'un Kg de brique. la chaux est remplacé par du ciment Portland pour la stabilisation à 8% de la quantité totale de matériaux entrante
Transport, freight, light commercial vehicle (RoW) market for transport, freight, light comm	0,05*18,8 = 0,94	tkm					Le moyen de transport utilisé pour le transport des concassés est un motorcycle de capacité 50KG, pour le ciment le meme engin mais sur 500m ainsi que la latérite sur 3km
Shale brick (RoW) production APOS, U	0,12	kg	Indéfini				Quantité de résidus de concassage entrante dans la production d'un kg de pavé
(insérer une ligne ici)							
Entrées connues de la technosphère (électricité/chaueur)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire	
Electricity, low voltage (DE) market for APOS, U	0,15	kcal	Indéfini				L'énergie utilisé lors du concassage du granite pour obtenir le résidu de concassage et pour la compression de la brique
(insérer une ligne ici)							
Sortants							
Émissions vers l'air	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire

Illustration 11 - Processus de production des pavés en terre comprimée stabilisé aux résidus à 15 % de concassé granitique et à 8% de ciment

Produits								
Sortants connus vers la technosphère. Produits et co-produits	Quantité	Unité	Quantité	Affectation ?	Type de déchets	Catégorie	Commentaire	
Production d'un kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (15%) stabilisé au ciment [BF]	1	kg	Mass	100 %	Brick	Construction/Bricks	Cet ensemble de données représente la production de 1 kg de Pavé en terre avec résidu de concassage stabilisé au ciment adapté au contexte burkinabé	
(Insérer une ligne ici)								
Sortants connus vers la technosphère. Produits évités	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire	
(Insérer une ligne ici)								
Entrées								
Entrées connues de la nature (ressources)	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire
Water, well, BF	in water	0,0002035	m3	Lognormal	1,5639			Quantité d'eau entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
Clay, unspecified	in ground	0,847	kg	Indéfini				Quantité d'argile entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
(Insérer une ligne ici)								
Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire	
Clay pit infrastructure (GLO) market for APOS, U	1,0E-10	p	Lognormal	3,2649			Infrastructure nécessaire pour la production de la brique de BTC stabilisé.	
Production d'un Kg de Ciment Portland [BF]	0,088	kg	Indéfini				Quantité de ciment entrante pour la fabrication d'un Kg de brique. la chaux est remplacé par du ciment Portland pour la stabilisation à 8% de la quantité totale de matériaux entrante	
Transport, freight, light commercial vehicle (RoW) market for transport, freight, light comme	0,05*18,8 = 0,94	tkm					Le moyen de transport utilisé pour le transport des concassés est un motorcycle de capacité 50kg ,pour le ciment le meme engin mais sur 500m ainsi que la latteinte sur 3km	
Shale brick (RoW) production APOS, U	0,17	kg	Indéfini				Quantité de résidus de concassage entrante dans la production d'un kg de pavé	
(Insérer une ligne ici)								
Entrées connues de la technosphère (électricité/chaueur)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire	
Electricity, medium voltage (DE) electricity voltage transformation from high to medium vol	13,875+18,75+6,6664 = 39,3	Wh					La matrice énergétique de l'Allemagne se rapproche majoritairement à celle du Burkina Faso, nous utiliserons donc leur donnée énergétique. l'énergie nécessaire pour la fabrication d'une brique : il s'agit de l'énergie utilisé par la press TERSTARAM pour la compression d'une brique avec une pression inférieure à 200 Tonnes avec une puissance de 5 KWh avec un temps moyen de 2mn (0,0333h) pour la formulation d'une brique. Energie utilisés par le malaxeur pour le mélange sec et humide des	

Illustration 12- Processus de production des pavés en terre comprimée stabilisé aux résidus à 20 % de concassé granitique et à 8% de ciment

Produits								
Sortants connus vers la technosphère. Produits et co-produits	Quantité	Unité	Quantité	Affectation ?	Type de déchets	Catégorie	Commentaire	
Production d'un kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (20%) stabilisé au ciment [BF]	1	kg	Mass	100 %	Brick	Construction/Bricks	Cet ensemble de données représente la production de 1 kg de Pavé en terre avec résidu de concassage (20%) stabilisé au ciment adapté au contexte burkinabé	
(Insérer une ligne ici)								
Sortants connus vers la technosphère. Produits évités	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire	
(Insérer une ligne ici)								
Entrées								
Entrées connues de la nature (ressources)	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire
Water, well, BF	in water	0,0002035	m3	Lognormal	1,5639			Quantité d'eau entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
Clay, unspecified	in ground	0,792	kg	Indéfini				Quantité d'argile entrante pour la fabrication d'un Kg de brique
(Insérer une ligne ici)								
Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire	
Clay pit infrastructure (GLO) market for APOS, U	1,0E-10	p	Lognormal	3,2649			Infrastructure nécessaire pour la production de la brique de BTC stabilisé.	
Production d'un Kg de Ciment Portland [BF]	0,088	kg	Indéfini				Quantité de ciment entrante pour la fabrication d'un Kg de brique. la chaux est remplacé par du ciment Portland pour la stabilisation à 8% de la quantité totale de matériaux entrante	
Transport, freight, light commercial vehicle (RoW) market for transport, freight, light comme	0,05*18,8 = 0,94	tkm					Le moyen de transport utilisé pour le transport des concassés est un motorcycle de capacité 50kg ,pour le ciment le meme engin mais sur 500m ainsi que la latteinte sur 3km	
Shale brick (RoW) production APOS, U	0,22	kg	Indéfini				Quantité de résidus de concassage entrante dans la production d'un kg de pavé	
(Insérer une ligne ici)								
Entrées connues de la technosphère (électricité/chaueur)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire	
Electricity, low voltage (DE) market for APOS, U	0,015	kcal	Indéfini				L'énergie utilisé lors du concassage du granite pour obtenir le résidu de concassage et pour la compression du pavé	
(Insérer une ligne ici)								
Sortants								
Émissions vers l'air	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou	Min	Max	Commentaire

Illustration 13 - Processus de production des pavés en béton

Produits							
Sortants connus vers la technosphère. Produits et co-produits	Quantité	Unité	Quantité	Affectation ?	Type de déchets	Catégorie	Commentaire
Production d'un Kg de Pavé en béton [BF]	1	kg	Mass	100 %	Brick	Construction\Bricks	EcoSpold01Location=DE Production Volume Amount: 3.75794150472829
Entrées							
Entrées connues de la nature (ressources)	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type*2 ou Min	Max	Commentaire
Water, well, BF	in water	7,36E-5	m3	Lognormal	1,2214		(3,3,5,5,1,na) Calculated based on literature, (Vionnet, S., Quantis Water Database - Technical Report, 2012).
Gravel	in ground	0,476923077	kg	Indéfini			
Clay pit infrastructure (GLO) market for APOS, U		1,0E-10	p	Lognormal	5,0151		(1,1,5,5,1,na) EcoSpold01Location=CH estimated
Sand (GLO) market for APOS, U		0,476923077	kg	Indéfini			
Production d'un Kg de Ciment Portland [BF]		0,167741935	kg	Indéfini			Quantité de ciment entrante dans la production d'un pavé en béton de 1kg
Sodium silicate, solid (RoW) market for sodium silicate, solid APOS, U		0,003354839	kg	Indéfini			elle est utilisée de façon optionnelle pour donner la couleur aux pavés; il y a un ajout de 1kg de Silicates en poudre pour un sac de 50kg de ciment
Transport, freight, light commercial vehicle (RoW) market for transport, freight, light comm		0,05*10,5 = 0,525	tkm				Le moyen de transport utilisé pour le transport du ciment, du sable et du grave est un motorcycle de capacité 50kg le ciment le sur 500m, le sable et le grave 10km
Electricity, low voltage (DE) market for APOS, U		13,875+18,75+6,6664 = 39,3	kWh				La matrice énergétique de l'Allemagne se rapproche majoritairement à celle du Burkina Faso, nous utiliserons donc leur donnée énergétique. l'énergie nécessaire pour la fabrication d'une brique; il s'agit de l'énergie utilisé par la press TERSTARANI pour la compression d'une brique sur une pression inférieure à 100 Tonnage sur une matrice

Illustration 14 - Indicateurs d'impacts de la méthode ReCipe H

Indicateurs Environnementaux			
Indicateurs	Unité	Indicateurs	Unité
Rareté des ressources minérales	Kg Cu eq	Eutrophisation en eau douce	Kg P eq
Consommation d'eau	m3	Acidification terrestre	Kg SO2 eq
Utilisation des sols	m2a crop eq	Écotoxicité marine	Kg 1,4-DCB
Rayonnement ionisant	KBq Co- 60 eq	Formation d'ozone, écosystèmes terrestres	Kg NOx eq
Formation de particules fines	Kg PM2.5 eq	Écotoxicité en eau douce	Kg 1,4-DCB
Rareté des ressources fossiles	Kg oil eq	Écotoxicité terrestre	Kg 1,4-DCB
Appauvrissement de l'ozone stratosphérique	Kg CFC11 eq	Eutrophisation marine	Kg N eq
Réchauffement de la planète	Kg CO2 eq		

Illustration 15 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre Préexistant

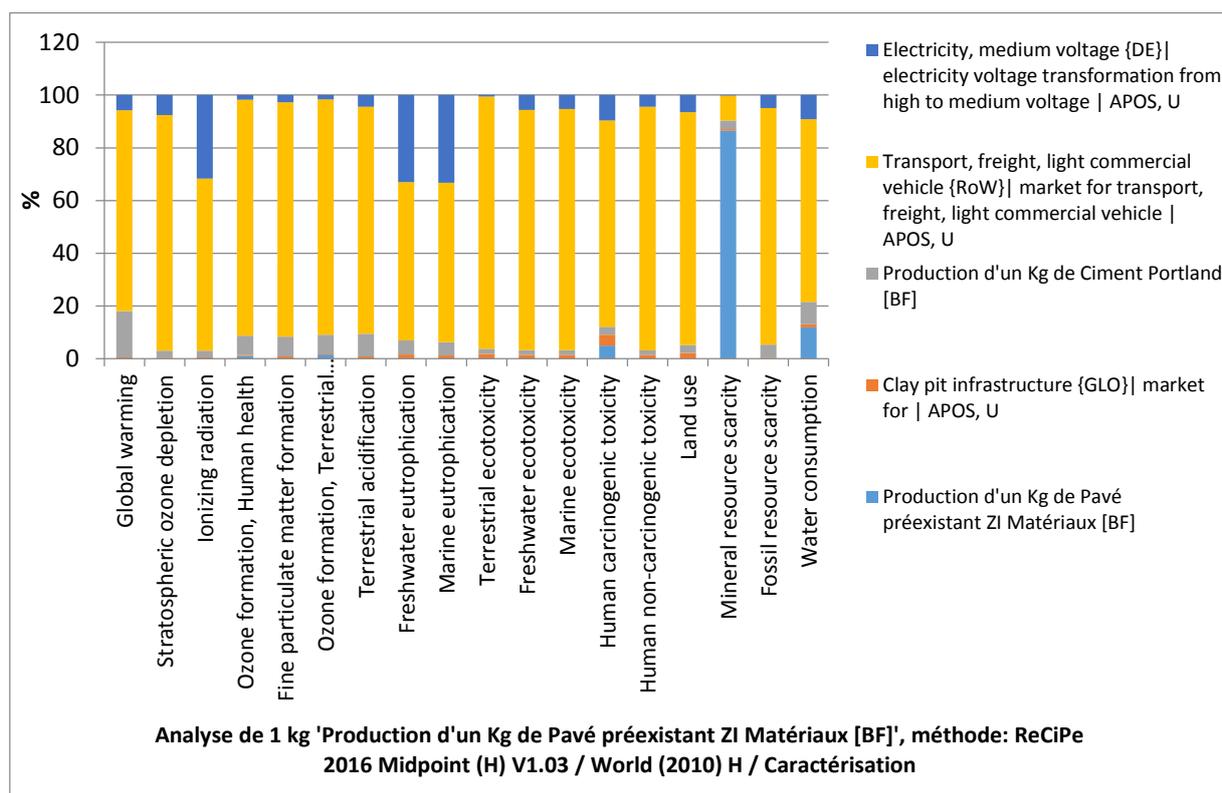


Illustration 16- Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre comprimée stabilisé aux résidus à 10 % de concassé granitique et à 8% de ciment

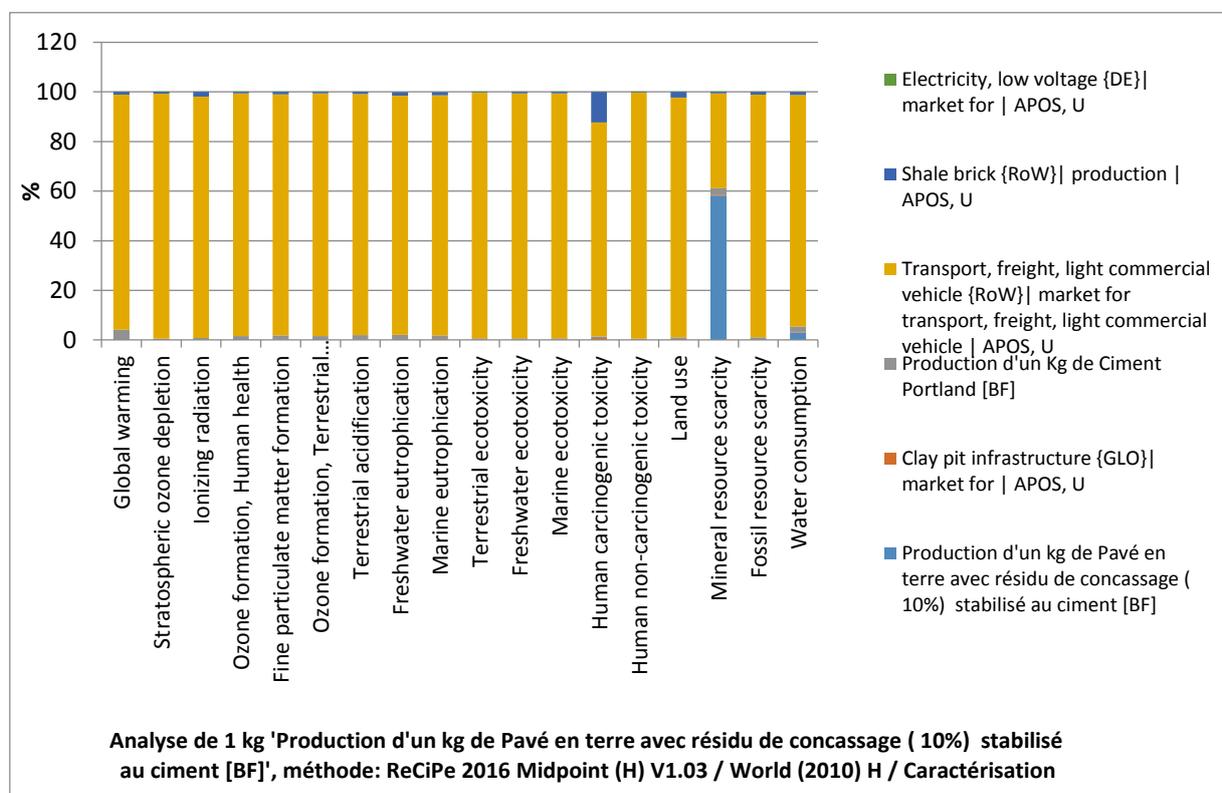


Illustration 17 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre comprimée stabilisée aux résidus à 15 % de concassé granitique et à 8% de ciment

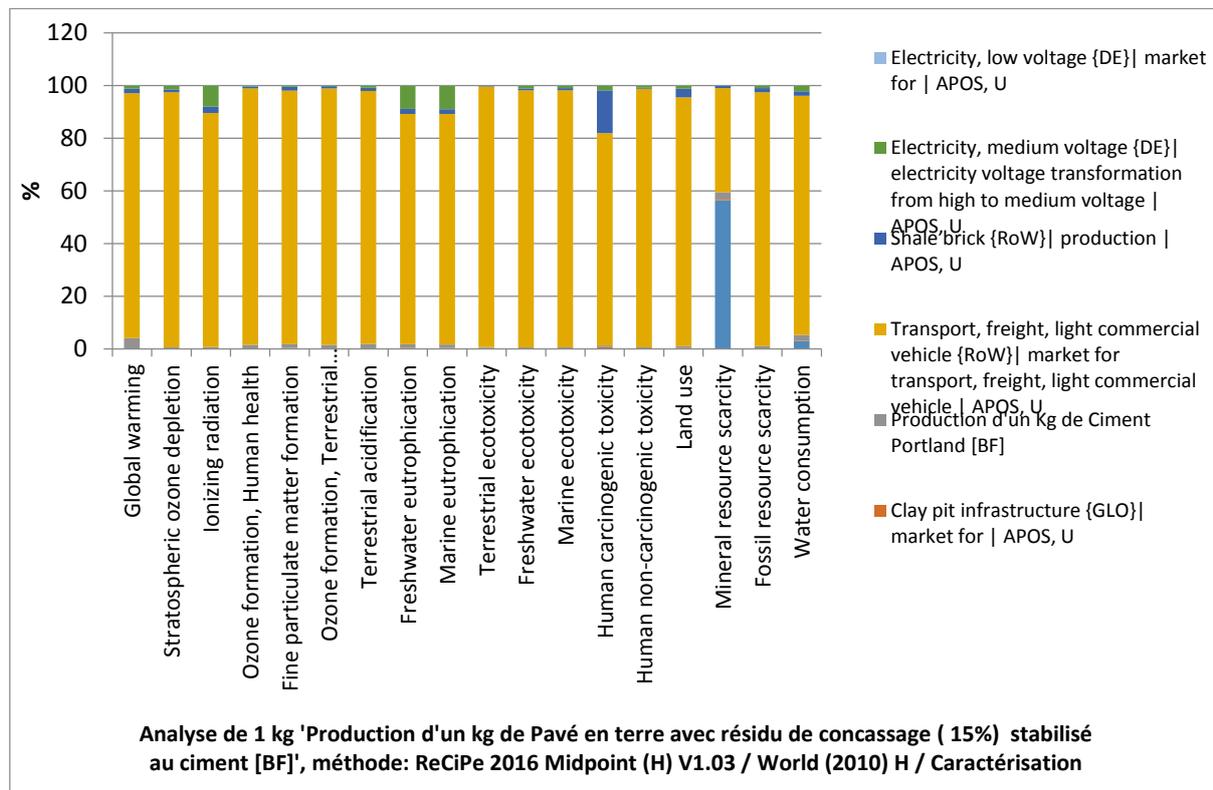


Illustration 18 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en terre comprimée stabilisée aux résidus à 20 % de concassé granitique et à 8% de ciment

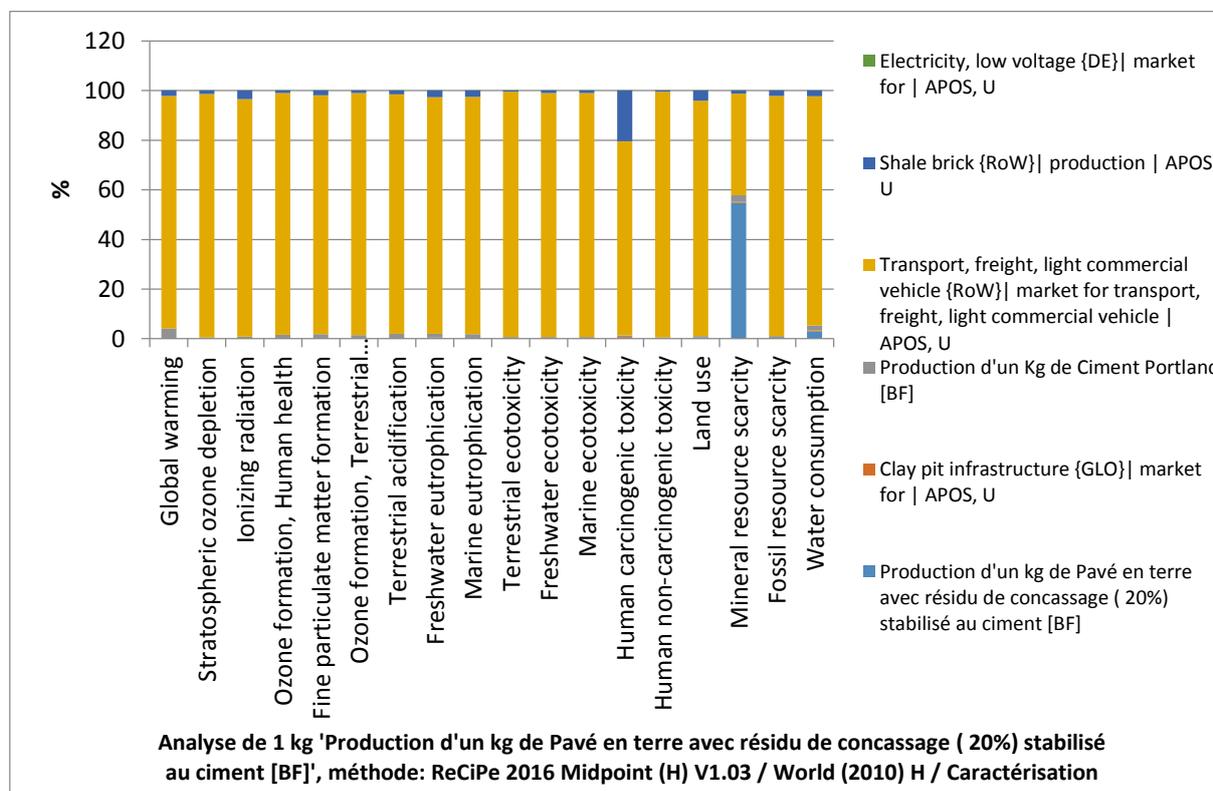


Illustration 19 - Analyse du processus de production de 1 kg pavé en béton

