AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

École Doctorale des Sciences de **l'Ingénieur** (ED-SDI)

N° **d'ordre** : 73

École Doctorale Science et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés, et de **l'énergie (ED SIMPPÉ)**
**N° d'ordre** :

# Thèse de Doctorat en cotutelle

Présentée **pour l'obtention du grade de** :

## Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Spécialité : Génie Civil - Matériaux et Structures

**&**

## Docteur de l'Université de Lorraine (France)

Mention : Énergie et Mécanique

# VALORISATION DE REBUTS DE BOUTEILLES EN VERRE ET DES CENDRES DE BOIS DANS LA FABRICATION DE BRIQUES EN ARGILE CUITE

Présentée et soutenue publiquement le 05 novembre 2019 par :


## Gbènondé Sèna Gladys MILOHIN

Ingénieur de conception en Génie Civil-BTP **&**
DEA en Matériaux et Structures


Devant le jury composé de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Rapporteurs | Mohammed LACHI, | Professeur, | Université de Reims Champagne Ardenne, France |
| | Émile Adjibadé SANYA, | Professeur, | Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques Abomey - Bénin |
| Examinateurs | Mahdia HATTAB, | Professeur, | Université de Lorraine - France |
| | Mohamed GIBIGAYE, | Maître de Conférences, | Université d'Abomey-Calavi - Bénin |
| Directeurs de thèse | Victor S. GBAGUIDI, | Maître de Conférences, | Université d'Abomey-Calavi - Bénin |
| | Malahimi ANJORIN, | Professeur, | Université d'Abomey-Calavi - Bénin |
| | André DONNOT, | Maître de Conférences | Université de Lorraine - France |
| | Riad BENELMIR, | Professeur | Université de Lorraine - France |
| Invité | Yvette TANKPINOU KIKI, | Maître de Conférences | Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques Abomey - Bénin |

# DEDICACE



© Gbènondé S. Gladys MILOHIN, 2019

À ma famille !

# AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée en cotutelle entre l'Université de Lorraine en France et celle d'Abomey-Calavi au Bénin. La cotutelle a été possible notamment avec l'appui du Service de Coopération et d'action Culturelle de l'Ambassade de France près le Bénin et avec le soutien du gouvernement béninois à travers le programme d'appui à la formation des doctorants dont j'ai bénéficié. Profondes gratitudes !

Au Bénin, les recherches ont été menées tant à l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) qu'à l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey (UNSTIM-Abomey) à travers les laboratoires de recherches :

- Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) particulièrement au Laboratoire du Département de Génie Civil de l'École Polytechnique de l'Université d'Abomey-Calavi (EPAC) ;
- Laboratoire de Caractérisation Thermophysique des Matériaux et d'Appropriation Énergétique (LABO-C.T.M.A.E.) de l'Université d'Abomey-Calavi ;
- Laboratoire d'Essais et de Recherches en Génie Civil (LERGC) ;
- Laboratoire de Génie Civil de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP) de l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey (UNSTIM-Abomey).

En France, les recherches ont été effectuées à l'Université de Lorraine au :

- Laboratoire d'Essais et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMAB) sis à la Faculté des Sciences et Technologies (FST) de Vandœuvre-lès-Nancy ;
- Laboratoire de Génie Civil de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Nancy-Brabois ;
- Laboratoire de Recherche en Science des Matériaux de l'Institut Jean Lamour situé sur le Campus Artëm à Nancy ;
- Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux LEM3 à Metz.

Sincères remerciements !

# REMERCIEMENTS

Au Tout-Puissant, Créateur de toute chose et à Qui revient toute gloire ! Tu es insondable Seigneur. Merci d'avoir permis la concrétisation de cette thèse ! Tu as mis sur les sentiers de ma vie, des personnes par le biais desquelles Tu agis !

Qu'il me soit donc permis de faire une mention particulière à toutes celles et tous ceux qui ont œuvré inlassablement à l'aboutissement de ce travail. J'exprime ainsi ma profonde gratitude :

Aux responsables de nos Universités, Écoles et Laboratoires de recherches :

- Monsieur Pierre MUTZENHARDT, Professeur à l'Université de Lorraine, Président de l'Université de Lorraine, France.
- Monsieur Maxime da CRUZ, Professeur Titulaire des Universités du Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur (CAMES), Recteur de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) au Bénin, et, Madame et Messieurs les Vice-Recteurs.
- Monsieur Gérard DEGAN, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Recteur de l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey (UNSTIM-Abomey) au Bénin et son Vice-Recteur, Monsieur SANYA Émile, Professeur Titulaire des Universités du CAMES.
- Madame Christine GÉRARDIN, Professeur à l'Université de Lorraine, Directrice de l'École Doctorale Science et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés, et de l'énergie (ED SIMPPÉ) de l'Université de Lorraine.
- Monsieur Antoine VIANOU, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Directeur de l'École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) et au Directeur Adjoint, Monsieur Victor S. GBAGUIDI, Maître de Conférences des Universités du CAMES.
- Monsieur Guy Alain ALITONOU, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Directeur de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) et au Directeur Adjoint, Monsieur François-Xavier FIFATIN, Maître de Conférences des Universités du CAMES.
- Monsieur Philippe GÉRARDIN, Professeur à l'Université de Lorraine, Directeur du Laboratoire d'Essais et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMAB).
- Monsieur Emmanuel OLODO, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directeur du Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées (LEMA).
- Monsieur Crépin ZEVOUNOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Ancien Directeur du Laboratoire d'Essais et de Recherches en Génie Civil (LERGC).

À Mes Directeurs et encadreurs de thèse :

- Monsieur Malahimi ANJORIN, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur au département de Génie Mécanique et Énergétique de l'École Polytechnique de l'Université d'Abomey-Calavi qui a initié ces travaux de thèse et m'a donné le goût de la recherche. Pour votre disponibilité

permanente, compréhension, soutiens de tous ordres qui m'ont été d'un grand secours ; vous avez mes plus vives reconnaissances.

- Monsieur Victor Senouhoua GBAGUIDI, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur au département de Génie Civil de l'École Polytechnique de l'Université d'Abomey-Calavi (EPAC), Président Directeur Général (PDG) du Bureau d'études Engineering Consulting and Construction Office Génie-Civil (ECCO-GC) au Bénin. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité, son esprit de travail et ses nombreux conseils ont contribué à l'accroissement de ma culture scientifique. Son ingéniosité est un modèle à suivre et un véritable atout. Pour son soutien moral, scientifique et sa grande générosité, pour avoir été toujours disponible quand je criais au secours, qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance.

- Monsieur André DONNOT, Maître de Conférences à l'Université de Lorraine. Pour la confiance qu'il a manifestée à mon égard, pour m'avoir soutenue et toujours encouragée à mener à bien cette thèse. Merci pour toutes les marques de sympathie sans cesse renouvelées, pour la disponibilité permanente et pour l'intérêt constant accordé à mes travaux et tout votre investissement avec beaucoup d'enthousiasme.

- Monsieur Riad BENELMIR, Professeur à l'Université de Lorraine ; pour avoir accepté diriger cette thèse, malgré vos multiples occupations. Je reste redevable de m'avoir acceptée, supportée et soutenue sans relâche. J'ai beaucoup appris de vous, le goût du travail bien fait, le sens du travail en équipe… Merci !

À tous les membres du jury, Merci de consacrer de votre précieux temps pour apporter vos critiques en vue d'améliorer la qualité scientifique de ce travail.

À Monsieur Daton MEDENOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Secrétaire Général du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS) au Bénin.

À Monsieur Edmond ADJOVI, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur au département de Génie Civil de l'École Polytechnique de l'Université d'Abomey-Calavi (EPAC) au Bénin. Je suis très sensible à tous les rôles que vous avez joués dans la réalisation de cette thèse. Ma gratitude pour l'implication et l'intérêt particulier que vous avez nourris pour ma personne.

À Monsieur Cokou Pascal AGBANGNAN DOSSA, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Chef du Département de Génie Chimique-Procédés (GC-P) de l'EPAC /UAC/Bénin. Merci pour ton accompagnement.

À Madame Yvette TANKPINOU KIKI, Maître de Conférences des Universités du CAMES, pour la disponibilité et l'attention particulière portée à ce travail.

À Madame Mahdia HATTAB-BUMBIELER, Professeure à l'Université de Lorraine, du Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3), pour la simplicité, l'ouverture, la disponibilité et la contribution manifeste à la réussite de ce travail. Merci de m'avoir accueilli au LEM3 et pour tous tes apports.

À Monsieur Khelil ABDELOUHAB, Professeur à l'Université de Lorraine, pour la promptitude et la disponibilité manifestées et pour avoir été d'un grand éclairage. Recevez mes sincères remerciements.

À Monsieur André LECOMTE, Professeur à l'Université de Lorraine, pour m'avoir ouvert les portes du Laboratoire de Génie Civil de l'IUT-Nancy-Brabois. Recevez mes sincères remerciements.

A Messieurs Jean-Michel MICHELING, Maître de Conférences HDR à l'Université de Lorraine, Mohamad JRAD, Ingénieur Recherche et Olivier, Technicien à l'Université de Lorraine, merci pour toutes vos contributions.

À toutes les enseignantes et tous les enseignants des Universités d'Abomey-Calavi (UAC) et d'Abomey (UNSTIM-Abomey) notamment le corps professoral du département de Génie Civil, pour les précieux et féconds conseils ; vous qui m'aviez accompagné dans ce voyage scientifique, je vous rends un hommage sincère et plus que mérité.

- Monsieur Gossou Jean HOUINOU, Maître-Assistant des Universités du CAMES ; Chef du Département de Génie Civil (GC) de l'EPAC /UAC/Bénin ;
- Monsieur Clément AHOUANNOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES pour la mise à disposition du dispositif et les moyens pour la réalisation des essais thermophysiques au Bénin ;
- Monsieur Mohamed GIBIGAYE, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Monsieur Aristide HOUNGAN, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directeur de l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Lokossa-UNSTIM-Abomey ;
- Madame Elisabeth ALLOGNON, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directrice-Adjointe de l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Lokossa-UNSTIM-Abomey ;
- Monsieur Alain Alexis ADOMOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directeur de l'Institut National Supérieur des Techniques Industrielles (INSTI Lokossa) de l'UNSTIM-Abomey et Madame Tognon Clotilde GUIDI, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directrice Adjointe ;
- Monsieur Adolphe TCHEHOUALI, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directeur de Institut National Supérieur des classes Préparatoires aux Études d'Ingénieurs (INSPEI) de l'UNSTIM-Abomey ;
- Monsieur Christian Djidjoho AKOWANOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Directeur Adjoint de l'INSPEI de l'UNSTIM-Abomey ;
- Monsieur Léopold Gérard GBAGUIDI AÏSSE, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Fondateur Directeur Général de l'École Supérieure de Génie Civil - VÉRÉCHAGUINE A.K. ;
- Monsieur Vincent PRODJINONTO, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Chef du Département de Génie Mécanique et Énergétique (GME) de l'EPAC /UAC/Bénin ;
- Monsieur Ézéchiel ALLOBA, Maître-Assistant des Universités du CAMES ;
- Monsieur Codjo Luc ZINSOU, Maître-Assistant des Universités du CAMES ;
- Monsieur Gédéon CHAFFA, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Monsieur Macaire AGBOMAHENA, Maître Assistant des Universités du CAMES et Secrétaire Permanent de l'ED-SDI ;

- Monsieur Valéry Kouandété DOKO, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- Monsieur K. Agapi HOUANOU, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- Monsieur Armand DJOSSOU, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- Madame Agathe HOUINOU, Assistante des Universités du CAMES ;
- Monsieur Arthur SANYA, Assistant des Universités du CAMES ;
- Monsieur Edmond C. VODOUNNOU, Assistant des Universités du CAMES.

Vous avez toute ma profonde reconnaissance.

Merci pour vos sages conseils et encouragements.

Il est dit : « Chaque enfant qu'on enseigne est un homme qu'on gagne » !

À Monsieur Franck KIDJO, Directeur de l'usine de production de brique d'argile cuite NATURE BRIQUE du Bénin et à tout son personnel.

Aux ingénieurs : Constant ADISSIN, Jean-Philippe AKPINFA, Ulrich SAGBOHAN, Hospice ADJAI, Toussaint TOSSOU, Charlie GNANCADJA, Adèle ADIGBE, Philippe FANGNON, Fanny MONTEIRO, Daniel SODO, Kenneth KENAGNON, Donald HOUEMAVO, Virtus TOHOUNGBA, Carl Lionel COMLANVI. Je vous dis merci de m'avoir aidé dans toutes les manipulations, et pour la complicité et la bonne ambiance au sein de l'équipe.

Aux stagiaires : Chaymae SAHOU, Brito MEDEGAN, Samir DOUDAH, Boualem BENCHAIB, Saer SOW, Kocaila BOUDJEMLINE, Bial KABACHE, Soukayna DAHRABOU, Yacine LAMALI, Ouassila BALLOUK, Sihame ECH-CHAYKH, Ouijdane OUGRIBE.

A tout le personnel de ECCO-GC, LERGC, CERA, Lycée Technique de KPONDEHOU, ESTBR, les manœuvres à divers niveaux ; en particulier, à Monsieur Servais AMOUSSOU, Technicien supérieur au Laboratoire de Génie Civil de l'ESTBR. Puisse l'Éternel vous combler de ses bénédictions !

A tout le personnel administratif et de soutien de l'EPAC, en particulier Madame Saratou FATOKE, Julienne ZANOU, Sèna Nathalie AHOMANDIKPOHOU pour leur accueil toujours chaleureux à notre égard.

À ma famille du LERMAB, qui m'a soutenu, aidé, encouragé tout au long de cette thèse, je pense tout particulièrement à : Emmanuel MARTIN, Corinne COURTEHOUX, Nicolas HOUSSEMENT, Soudani ALLAOUA, Dalila ABBAZ, Laetitia MOURITANY-NANTZ, Béatrice GOERGES, Jean-Louis TANGUIER.

À tous mes proches, mes camarades de promotion ou amis dans la vie active, mes collègues chercheurs qui, sous une quelconque forme m'ont aidé tout au long de ce travail, qui m'ont offert un encouragement permanent et qui ont su créer une ambiance propice à mon essor : Dr Edem CHABI, Dr Jonathan GUIDIGO, Dr Onésime AKOWANOU, Dr Sibiath O. G. OSSENI, Dr Clément LABINTAN, Dr Abakar ALI, Dr Richy Maurel AZA-GNANDJI, Dr Crespin Prudence YABI, Dr Wilfried ADIHOU, Dr Wilfried HODE, Dr Fructueux GODONOU, Dr John AOGA, Dr Arsène TANDJE, Franck EGBOHO, Hyppolite HOUNOU, Georges HEYIHIN, Carlos AGOSSOU, Mohamed DAOUDA, Daniel AGOSSOU, Chéissou KOTO TAMOU, Éric ODUNLAMI, Ghislain FANOU, Hospice ADJAÏ, Ruben AZA-GNANDJI, Christian ADADJA, Mariette ADAGBE, Berléo APOVO, Damien AGAGBE, Sèfiou AVAMASSE.

Aux familles d'HOUTAUD, de SOUZA et alliées. Merci à vous pour votre accueil, soutien, présence et accompagnement pendant mes séjours à Nancy et pour l'amitié que dis-je la fraternité ! Vous êtes ma famille de Nancy. Viviane, Maguette, Antonio, Lucie, Benoît, Monique, Alphonse, Laetitia, Isabelle, Victorine, Hortense, Zachée, Moïse, Émilie, Samuel, Madeline, Pierre, Marc, Colombe, Armand, Isis, Émilie, Maelisse, Liam, Ignace, Teeyah, merci pour les moments en famille que vous m'avez offerte ! Vous avez été d'un grand réconfort. Dieu vous bénisse !

À ma famille dans sa globalité : AHOGNISSE, HOUNDJE, MILOHIN, QUENUM, SOUNOU, ZOUNDJI et alliées ; pour les constants encouragements, l'amour, le soutien quotidien et indéfectible. Trouvez dans ce travail le témoignage de ma gratitude.

- Une mention spéciale à mes parents Odile AHOGNISSE et Fidèle Cossi MILOHIN qui m'ont toujours accompagnée, encouragée et soutenue inconditionnellement dans mon parcours universitaire, comme dans la vie. Vous vous êtes évertués à élever en nous le sens de la dignité et le goût du travail bien fait. Vos efforts n'ont pas été vains. Ce travail, faible témoignage de mon attachement aux valeurs que vous nous avez inculquées, est aussi le vôtre. Recevez-le de bon cœur et que le Tout-Puissant daigne vous accorder santé et longévité afin que vous puissiez jouir pleinement des fruits de votre semence.
- Et bien sûr, je ne peux terminer sans te remercier, toi mon cher C. qui a su supporter mon stress, m'épauler et me remonter le moral avec une patience infinie pendant ces années où je fus la plupart du temps absente. Tu as été mon moteur et tu restes mon inépuisable source de force, celui qui me fera toujours aller de l'avant. Ton sens de la rigueur s'allie harmonieusement à ta compréhension pour rassurer les uns et les autres. Ta détermination et ton attachement m'ont été d'un soutien réel dans la réalisation de ce travail. Sois assuré de ma tendre affection.

La liste n'est certainement pas exhaustive. De ce fait, j'exprime mes vifs remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, moralement et ou matériellement ont contribué de quelque manière que ce soit, à l'édification de ma personne et à l'aboutissement de ce travail.

Que Dieu vous bénisse !

# RESUME

Le présent travail a pour but d'étudier la possibilité d'incorporer des cendres de bois ou des verres broyés dans la formulation de briques cuites. L'étude expérimentale réalisée sur des blocs à l'échelle de laboratoire a porté sur différentes formulations en vue de trouver le dosage qui favorise des caractéristiques optimales des blocs cuits. Trois argiles sont utilisées : celle de Xeuilley en France, de Sèmè-Podji et de Zogbodomey au Bénin. Des essais d'identification physique, minéralogique et chimique sont réalisés sur ces sols afin d'avoir une meilleure connaissance de leur nature. Des cendres de bois obtenues en France sont associées à l'argile de Xeuilley et des cendres de bois obtenues au Bénin à l'argile de Zogbodomey. L'étude de l'influence du type de cendres de bois sur les propriétés des produits a été faite avec l'argile de Sèmè-Podji. Les différents constituants sont préparés à une granulométrie inférieure à 400 µm. Le dosage en cendres de bois et en verres broyés a été varié de 0% à 50% par rapport à la masse totale du mélange sec. L'étude de la teneur en eau optimale de confection des blocs d'argile a été effectuée. Les blocs des trois argiles sont confectionnés en France, à l'aide d'une presse hydraulique d'atelier munie d'un piston mobile qui applique la charge de compactage parallèlement à la plus grande dimension du bloc. Par ailleurs, l'étude de l'influence du compactage sur les performances des blocs d'argile de Zogbodomey a été effectuée. Ainsi, des blocs d'argile de Zogbodomey sont confectionnés au Bénin, à l'aide d'une presse à Bloc de Terre Comprimée (BTC), dont la charge de compactage s'exerce parallèlement à l'épaisseur du bloc. La conductivité thermique et la capacité thermique massique des blocs d'argile de Zogbodomey étudiés au Bénin ont été déterminées par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures ; la conductivité thermique des blocs élaborés en France a été déterminée en régime permanent et en géométrie cylindrique. L'étude expérimentale montre que la cuisson des blocs d'argile de Xeuilley est très difficile. Ces blocs ont présenté d'importantes déformations et l'ajout des cendres de bois ou des verres broyés a fortement dégradé leurs propriétés. Le dosage de 5% de cendres de bois est l'optimal pour l'argile de Sèmè-Podji. L'ajout de verres broyés favorise une meilleure cuisson de ces blocs et les résistances mécaniques maximales sont enregistrées pour le dosage de 20%. La substitution de l'argile de Zogbodomey par 5% de cendres de bois du Bénin ou 20% de verres broyés permet d'obtenir les blocs cuits présentant un accroissement de la résistance à la traction par flexion trois points et des résistances en compression comparables à celle des blocs sans ajout. Les résistances mécaniques des blocs ayant subis le compactage vertical sont nettement améliorées comparées à celles des blocs ayant subis le compactage horizontal. Contrairement aux performances mécaniques enregistrées, l'influence du dosage en ajout ne serait pas marquée sur la conductivité thermique et la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey. L'estimation des caractéristiques thermiques dynamiques d'une paroi constituée des blocs d'argile cuits de Zogbodomey a montré un déphasage thermique de 9 heures pour une épaisseur de mur de 20 cm alors que la brique creuse de mortier de ciment requiert une épaisseur de 25 cm. L'utilisation des cendres de charbon de bois et des déchets de verre comme matière première secondaire dans la fabrication de briques cuites constitue alors une alternative efficace de la préservation des terres et de l'environnement voire, une solution durable et économique pour le secteur du bâtiment. Ces matériaux constituent alors un grand atout pour l'amélioration du cadre de vie des béninois.

Mots clés : argile cuite, cendres de bois, verres broyés, propriétés, bâtiment.

# ABSTRACT

This study investigates the possibility of incorporating wood ashes or crushed glass into the formulation of fired bricks. The experimental study carried out on laboratory scale blocks focused on different formulations in order to obtain the dosage that yields optimal characteristics of the fired blocks. Three different clays were used: Xeuilley clay in France, Sèmè-Podji clay and Zogbodomey clay in Benin. Physical, mineralogical and chemical identification tests were performed on these soils in order to better understand their nature and classify them. Wood ashes obtained in France were mixed with Xeuilley clay, and similarly wood ashes obtained in Benin were mixed with Zogbodomey clay. The study of the influence of the type of wood ashes on the properties of the fired blocks was realized with Sèmè-Podji clay. The particle sizes of all the constituents of the samples tested were less than 400 µm. The dosage of wood ashes and crushed glass was varied from 0% to 50% relative to the total mass of the dry mixture. The study of the optimal water content necessary for the manufacture of the clay blocks was also done. The blocks of the three clays were made in France using a workshop hydraulic press equipped with a movable piston that applies the compaction load parallel to the largest dimension of the blocks. In addition, the study of the influence of compaction on the performance of Zogbodomey clay blocks was carried out. Thus, blocks of Zogbodomey clay were made in Benin using a Press Compressed Earth Block (CEB), the compaction load is applied parallel to the thickness of the block. While the thermal conductivity and the specific heat capacity of the Zogbodomey clay blocks studied in Benin were determined by the hot plate method with two temperature measurements, the thermal conductivity of the blocks manufactured in France was determined in steady state and in cylindrical geometry. The experimental study revealed that firing Xeuilley clay blocks was very difficult. These blocks showed significant deformations, and the addition of wood ashes or crushed glass greatly degraded their properties. The dosage of 5% of wood ashes was optimal for Sèmè-Podji clay. The addition of crushed glasses favored better firing of these blocks and the maximum mechanical strengths were recorded for the 20% dosage. The substitution of Zogbodomey clay with 5% of Benin's wood ashes or 20% of crushed glass enabled the obtention of fired blocks exhibiting an increase in tensile strength by three-point bending and compressive strength tests as compared to that of the blocks without addition. The mechanical strengths of the blocks having undergone vertical compaction were significantly improved as compared to those of the blocks having undergone horizontal compaction. In contrast to the recorded mechanical performances, the influence of the addition dosage would not have effect on the thermal conductivity and the specific heat capacity of the Zogbodomey fired clay blocks. Estimation of the dynamic thermal characteristics of a wall made of Zogbodomey fired clay blocks showed a thermal phase shift of 9 hours for a wall thickness of 20 cm whereas hollow cement mortar brick requires a thickness of 25 cm. The use of wood ashes and glass waste as a secondary raw material in the manufacture of fired bricks is an effective alternative to land and environmental conservation, and it can be a sustainable and cost-effective solution for the building industry. These materials are then a great asset for improving the living environment in Benin.

Keywords: fired clay, wood ashes, crushed glass, properties, building.

# TABLE DES MATIERES

DEDICACE ..... ii
AVANT-PROPOS ..... iii
REMERCIEMENTS ..... iv
RESUME ..... ix
ABSTRACT ..... x
TABLE DES MATIERES ..... xi
LISTE DES FIGURES ..... xv
LISTE DES TABLEAUX ..... xxii
COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES ..... xxiv
LISTE DES ABREVIATIONS ..... xxvi
NOMMENCLATURE ..... xxvii
INTRODUCTION GENERALE ..... 1
1. CHAPITRE 1 ▪ Étude Bibliographique. ..... 6
1.1. Introduction ..... 7
1.2. Interactions thermiques entre le bâtiment et son environnement ..... 8
1.2.1. Ambiance thermique au sein du bâtiment ..... 8
1.2.2. Échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement ..... 9
1.2.3. Déphasage thermique ..... 13
1.2.4. Amortissement thermique ..... 15
1.3. Matériaux de construction ..... 17
1.3.1. Classification des matériaux de construction ..... 17
1.3.2. Matériaux céramiques ..... 19
1.4. Fabrication des briques d'argile cuite ..... 21
1.4.1. Matières premières plastiques : les argiles ..... 21
1.4.2. Matières premières non plastiques : les inertes ..... 28
1.4.3. **Ajouts spéciaux dans la formulation des briques d'argile cuite** ..... 29
1.4.4. **Eau de confection des briques d'argile cuite** ..... 30
1.4.5. **Étapes de fabrication des briques d'argile cuite** ..... 30
1.4.6. Propriétés des produits cuits ..... 35
1.4.7. **Différents types de briques d'argile cuite** ..... 39
1.5. Valorisation des déchets en construction ..... 42
1.5.1. Généralités sur la gestion des déchets ..... 42
1.5.2. Valorisation des cendres ..... 43

1.5.3. Valorisation des déchets de verre ..... 47
1.6. Synthèse. ..... 53
2. CHAPITRE 2 ▪ Matériaux utilisés et Modes d'élaboration des blocs d'argile. ..... 54
2.1. Introduction ..... 55
2.2. Origines et préparation des matières premières ..... 56
2.2.1. Argiles ..... 56
2.2.2. Cendres de bois ..... 59
2.2.3. Verres broyés ..... 60
2.3. Propriétés des matières premières ..... 60
2.3.1. Paramètres d'état ..... 60
2.3.2. Granulométrie ..... 63
2.3.3. Argilosité ..... 65
2.3.4. Teneur en Matières Organiques (MO) ..... 69
2.3.5. Teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$ ..... 71
2.3.6. Composition chimique ..... 72
2.3.7. Analyse Thermogravimétrique ..... 72
2.3.8. Composition minéralogique des argiles ..... 74
2.3.9. Composition semi-quantitative ..... 75
2.4. Classification des sols étudiés ..... 76
2.4.1. Abaque triangulaire de Taylor ..... 76
2.4.2. LPC Nomenclature GTR (Norme NF P11 300) ..... 77
2.4.3. Diagramme de plasticité de Casagrande ..... 77
2.5. Méthodes d'élaboration des blocs d'argile cuits ..... 78
2.5.1. Formulation des mélanges ..... 78
2.5.2. Modes de façonnage ..... 78
2.5.3. Codification des blocs ..... 80
2.5.4. Teneur en eau de confection des différents blocs ..... 81
2.5.5. Séchage ..... 83
2.5.6. Cuisson ..... 83
2.6. Synthèse. ..... 84
3. CHAPITRE 3 ▪ Caractérisations Mécanique et physique des blocs d'argile. ..... 85
3.1. Introduction ..... 86
3.2. Méthodes de caractérisation mécanique et physique des blocs ..... 87
3.2.1. Mesures des propriétés physiques des blocs d'argile cuits ..... 87
3.2.2. Mesures des propriétés mécaniques des blocs ..... 88
3.3. Propriétés physico-mécaniques des blocs d'argile sans ajout ..... 93

3.3.1. Argile de Xeuilley ..... 93
3.3.2. Argile de Sèmè-Podji ..... 95
3.3.3. Argile de Zogbodomey..... 97
3.3.4. Comparaison des propriétés des blocs cuits à base des trois argiles111
3.4. Influence des cendres de bois sur les propriétés des blocs d'argile .....112
3.4.1. Argile de Xeuilley .....112
3.4.2. Argile de Sèmè-Podji .....121
3.4.3. Argile de Zogbodomey.....131
3.4.4. Comparaison de l'influence des cendres de bois sur les argiles....153
3.5. Influence des verres broyés sur les propriétés des blocs d'argile .....155
3.5.1. Argile de Xeuilley .....155
3.5.2. Argile de Sèmè-Podji .....155
3.5.3. Argile de Zogbodomey.....161
3.5.4. Influence du mode de compactage.....174
3.5.5. Comparaison de l'influence des verres broyés sur les argiles.....175
3.6. Synthèse. .....176
4. CHAPITRE 4 ▪ Étude Thermique.....178
4.1. Introduction .....179
4.2. Méthodes de caractérisation thermophysique des blocs d'argile cuits .....180
4.2.1. Méthode de mesure en régime variable .....180
4.2.2. Méthode de mesure en régime permanent .....188
4.3. Propriétés thermophysiques des blocs d'argile cuits sans ajout.....192
4.3.1. Argile de Zogbodomey.....192
4.3.2. Argile de Sèmè-Podji .....194
4.3.3. Argile de Xeuilley .....194
4.4. Influence des cendres de bois sur les propriétés des blocs d'argile cuits..195
4.4.1. Argile de Zogbodomey.....195
4.4.2. Argile de Xeuilley .....201
4.5. Influence des verres broyés sur les propriétés des blocs d'argile cuits ....202
4.5.1. Argile de Zogbodomey.....202
4.5.2. Argile de Sèmè-Podji .....208
4.5.3. Argile de Xeuilley .....208
4.6. Comportement thermique d'une paroi opaque verticale d'un bâtiment...209
4.6.1. Zone d'étude .....209
4.6.2. Hypothèses de base.....210
4.6.3. Calculs thermiques.....210

4.7. Synthèse. ..... 213
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES ..... 214
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 217

# LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Localisation de quelques réserves d'argile au Sud du Bénin ..... 2
Figure 1.1 : Interactions thermiques entre l'homme et son environnement [67] ..... 8
Figure 1.2 : Bâtiment vu comme un tonneau des Danaïdes. a) Bâtiment mal isolé, b) bâtiment correct [70], [71]. ..... 9
Figure 1.3 : Spectre du soleil [2] ..... 10
Figure 1.4 : Mur plan ..... 11
Figure 1.5 : Bilan d'énergie pour un mur plan [74] ..... 11
Figure 1.6 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple ..... 12
Figure 1.7 : Illustration de la notion de déphasage et d'amortissement thermique ..... 13
Figure 1.8 : Classes de matériaux : métaux, céramiques et polymères avec quelques combinaisons pour former des matériaux composites [85] ..... 18
Figure 1.9 : Céramiques usuelles ..... 20
Figure 1.10 : Différents niveaux structuraux d'une argile [91] ..... 22
Figure 1.11 : Couches T et O des argiles [90] ..... 22
Figure 1.12 : Structure des principales familles d'argile [87], [93], [95] ..... 24
Figure 1.13 : Étapes de fabrication de briques en terre cuite [112] ..... 30
Figure 1.14 : Séchage dans un hangar à Zogbodomey au Bénin (Source : Nature Brique) ..... 32
Figure 1.15 : Séchoir industriel ..... 32
Figure 1.16 : Relation contrainte déformation en compression de tessons en terre-cuite, de forme parallélépipédique pleine, extraits des briques à perforation verticale [121]. ..... 36
Figure 1.17 : Evolution of the thermal conductivity of the clay-based ceramic with the heat treatment temperature [125]. ..... 39
Figure 1.18 : Cycle de vie des matériaux [85] ..... 42
Figure 1.19 : Structure du quartz a) et du verre b) [155] ..... 48
Figure 1.20 : Représentation schématique de la structure du verre de silice [152] ..... 48
Figure 2.1 : Situation géographique de la carrière d'argile de Zogbodomey ..... 57
Figure 2.2 : Zone de prélèvement de l'argile de Sèmè-Podji ..... 57
Figure 2.3 : Argile naturelle de Zogbodomey ..... 57
Figure 2.4: Matériau obtenu après préparation ..... 57
Figure 2.5 : Zone de prélèvement de l'argile de Sèmè-Podji ..... 57
Figure 2.6 : Séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji ..... 57
Figure 2.7 : Matériau granulaire obtenu après préparation ..... 57
Figure 2.8: Localisation de la carrière d'argile de Xeuilley en France ..... 58
Figure 2.9 : Front de taille de la carrière de Xeuilley ..... 59
Figure 2.10 : Argile de Xeuilley après préparation ..... 59
Figure 2.11 : Tamisage des cendres du Bénin ..... 59
Figure 2.12 : Cendres du Bénin < 400 µm ..... 59
Figure 2.13 : Bouteilles de vins recyclées ..... 60
Figure 2.14 : Déchets de verres récupérés dans les buvettes ..... 60
Figure 2.15 : Poudre de verre ..... 60
Figure 2.16 : Diagramme des poids et volumes des constituants d'un sol [182] ..... 61
Figure 2.17 : Courbes granulométriques des sols étudiés ..... 64
Figure 2.18 : Courbe granulométrique des verres broyés ..... 65
Figure 2.19 : États de consistance d'un sol ..... 66
Figure 2.20 : Thermobalance (laboratoire LERMAB- Université de Lorraine) ..... 73
Figure 2.21 : Perte de masse des échantillons étudiés ..... 73

Figure 2.22 : Diffractogrammes juxtaposés des échantillons argileux par la méthode des poudres 74
Figure 2.23 : Triangle des textures des sols étudiés ..... 76
Figure 2.24 : Classification des sols étudiés suivant l'abaque de plasticité de Casagrande ..... 77
Figure 2.25 : Formulation en constituants secs des mélanges ..... 78
Figure 2.26 : Presse manuelle mécanique de compactage ..... 79
Figure 2.27 : Mode de compactage horizontal ..... 79
Figure 2.28 : Presse manuelle hydraulique de compactage ..... 79
Figure 2.29 : Mode de compactage vertical ..... 79
Figure 2.30 : Évolution de la masse volumique sèche des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois en fonction de la teneur en eau de confection ..... 82
Figure 2.31 : Évolution de la masse volumique sèche des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de verres broyés en fonction de la teneur en eau de confection ..... 82
Figure 2.32 : Programme de cuisson des blocs d'argile ..... 83
Figure 3.1 : Principe de l'essai de traction par flexion trois points ..... 89
Figure 3.2 : : Dispositif d'essai en traction par flexion trois points de la presse 3R, 10 kN utilisé à l'IUT de Nancy ..... 90
Figure 3.3 : Principe de l'essai de compression ..... 90
Figure 3.4 : Dispositif d'essai en compression de la presse 3R, 10 kN utilisé à l'IUT de Nancy ..... 91
Figure 3.5 : Courbe contrainte-déformation typique d'un matériau avec une zone élastique linéaire [215] ..... 92
Figure 3.6 : Aspect visuel des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout après cuisson ..... 93
Figure 3.7 : Mode de rupture des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout à la traction par flexion trois points ..... 95
Figure 3.8 : Aspect du cœur des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout ..... 95
Figure 3.9 : Aspect visuel des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout après cuisson ..... 95
Figure 3.10 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points, des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout ..... 96
Figure 3.11 : Aspect du cœur des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout ..... 96
Figure 3.12 : Aspect visuel d'un bloc cuit d'argile de Zogbodomey sans ajout, ayant subi le compactage horizontal ..... 98
Figure 3.13 : Aspect du cœur d'un bloc cuit d'argile de Zogbodomey sans ajout, ayant subi le compactage horizontal ..... 98
Figure 3.14 : Courbes contraintes- déformations bloc d'argile cuit de Zogbodomey sans ajout ..... 99
Figure 3.15 : Courbes contraintes- déformations compensée bloc d'argile cuit de Zogbodomey sans ajout ..... 100
Figure 3.16 : Aspect visuel des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey sans ajout ..... 101
Figure 3.17 : Aspect du cœur des blocs « B » d'argile de Zogbodomey sans ajout ..... 101
Figure 3.18 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « B » d'argile de Zogbodomey sans ajout sur la perte de masse de séchage ..... 102
Figure 3.19 : Étude du retrait de séchage en fonction de la teneur en eau des blocs « B » d'argile de Zogbodomey, sans ajout ..... 103
Figure 3.20 : Relation entre le retrait latéral et le retrait longitudinal de séchage des blocs « B » d'argile de Zogbodomey, sans ajout ..... 103
Figure 3.21 : Étude du retrait de cuisson des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey en fonction de la teneur en eau ..... 104
Figure 3.22 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « B » d'argile de Zogbodomey sans ajout sur leurs masses volumiques ..... 105
Figure 3.23: Influence de la masse volumique sèche des blocs « B » sans ajout sur leur masse volumique après cuisson ..... 105

Figure 3.24 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey sans ajout ..... 106
Figure 3.25 : Influence de la teneur en eau sur les résistances mécaniques des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout ..... 107
Figure 3.26 : Influence de la masse volumique sur les résistances mécaniques des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout ..... 107
Figure 3.27 : Relation entre les résistances à la compression et celles à la traction par flexion trois points des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout ..... 108
Figure 3.28 : Influence de la teneur en eau sur le module de Young des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey ..... 109
Figure 3.29 : Influence de la masse volumique sur le module de Young des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey ..... 109
Figure 3.30 : Influence de la résistance à la compression sur le module de Young des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey ..... 110
Figure 3.31 : Aspect visuel de blocs cuits d'argile de Xeuilley avec ajout de cendres de bois de la France ..... 112
Figure 3.32 : Aspect du cœur des blocs d'argile de Xeuilley avec ajout des cendres de bois de la France ..... 113
Figure 3.33 : Influence du dosage en cendres de bois et de la teneur en eau sur la perte de masse de séchage des blocs EC d'argile de Xeuilley ..... 114
Figure 3.34 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte au feu (PF) des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley ..... 115
Figure 3.35 : Influence du dosage en cendres de bois sur le retrait de séchage des blocs EC d'argile cuite de Xeuilley ..... 116
Figure 3.36 : Influence du dosage en cendres de bois sur le retrait de cuisson des blocs EC d'argile cuite de Xeuilley ..... 117
Figure 3.37 : Relation entre le retrait latéral et le retrait longitudinal de cuisson des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley avec ajout de cendres de bois de la France ..... 117
Figure 3.38 : Influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique apparente des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley ..... 118
Figure 3.39 : Mode de rupture des blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de 15% des cendres de bois de la France ..... 118
Figure 3.40 : Influence du dosage en cendres de bois de la France sur les résistances mécaniques des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley ..... 119
Figure 3.41 : Relation entre les résistances à la compression et celles à la traction par flexion trois points des blocs « EC « d'argile cuite de Xeuilley avec ajout de cendres de bois ..... 120
Figure 3.42 : Influence du dosage en cendres de bois sur le module de Young des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley ..... 120
Figure 3.43 : Aspect visuel de blocs cuits d'argile de Sèmè-Podji avec ajout des cendres de bois122
Figure 3.44 : Aspect du cœur des blocs cuits d'argile de Sèmè-Podji avec ajout des cendres de bois ..... 122
Figure 3.45 : Influence du dosage en cendres de bois et de la teneur en eau de confection sur la perte de masse de séchage des blocs « SPB » et « SPF » d'argile de Sèmè-Podji ..... 123
Figure 3.46 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte de masse de cuisson des blocs « SPB » et « SPF » d'argile de Sèmè-Podji ..... 124
Figure 3.47 : Influence du dosage en cendres de bois du Bénin sur le retrait de séchage des blocs « SPB » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 125
Figure 3.48 : Influence du dosage en cendres de bois de la France sur le retrait de séchage des blocs « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 125

Figure 3.49 : Influence du dosage en cendres de bois du Bénin sur le retrait de cuisson des blocs « SPB » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 126
Figure 3.50 : Influence du dosage en cendres de bois de la France sur le retrait de cuisson des blocs « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 126
Figure 3.51 : Influence de l'origine et du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 127
Figure 3.52 : Mode de rupture des blocs cuits d'argile de Sèmè-Podji avec ajout des cendres de bois ..... 128
Figure 3.53 : Influence du dosage en cendres de bois sur les résistances mécaniques des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 129
Figure 3.54 : Relation entre les résistances à la compression et celles à la traction par flexion trois points des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji, avec ajout de cendres de bois 130
Figure 3.55 : Influence du dosage en cendres de bois sur le module de Young des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji ..... 130
Figure 3.56 : Blocs « AC » avec ajout de différentes proportions de cendres de bois du Bénin .. 131
Figure 3.57 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte de masse de séchage des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 133
Figure 3.58 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte au feu des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 133
Figure 3.59 : Influence du retrait latéral en fonction du longitudinal de cuisson des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois ..... 134
Figure 3.60 : Influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 135
Figure 3.61 : Influence du dosage en cendres de bois sur la résistance à la traction par flexion trois points des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 136
Figure 3.62 : Influence du dosage en cendres de bois sur la résistance à la compression des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 136
Figure 3.63 : Influence de la masse volumique sur la résistance à la compression des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 137
Figure 3.64 : Influence de la perte au feu sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 137
Figure 3.65 : Module de Young des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey en fonction du dosage en cendres de bois du Bénin ..... 138
Figure 3.66 : Évolution du module de Young des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey en fonction de la résistance à la compression ..... 139
Figure 3.67 : Aspect visuel des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois du Bénin ..... 140
Figure 3.68 : Aspect du cœur des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois du Bénin ..... 140
Figure 3.69 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « BC » d'argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois sur la perte de masse de séchage ..... 141
Figure 3.70 : Influence de la teneur en eau de confection sur la perte au feu des blocs « BC » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% et 10% de cendres de bois ..... 142
Figure 3.71 : Étude du retrait de séchage des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois ..... 142
Figure 3.72 : Étude du retrait de séchage des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois ..... 143
Figure 3.73 : Étude du retrait de cuisson des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois ..... 144

Figure 3.74 : Étude du retrait de cuisson des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois ..... 144
Figure 3.75 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois sur leur masse volumique ..... 145
Figure 3.76 : Influence de la masse volumique sèche des blocs « BC05 » sur leur masse volumique après cuisson ..... 145
Figure 3.77 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois sur leur masse volumique..... 146
Figure 3.78 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois, ayant subi le compactage vertical..... 147
Figure 3.79 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois, ayant subi le compactage vertical ..... 148
Figure 3.80 : Influence de la teneur en eau sur les résistances mécaniques des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois..... 148
Figure 3.81 : Influence la masse volumique sur les résistances mécaniques des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois..... 149
Figure 3.82: Relation entre les résistances à la traction par flexion trois points et celles à la compression des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois .. 149
Figure 3.83 : Influence de la teneur en eau sur les résistances mécaniques des blocs « BC10 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois ..... 150
Figure 3.84 : Influence la masse volumique sur les résistances mécaniques des blocs « BC10 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois ..... 150
Figure 3.85 : Relation entre les résistances à la traction par flexion trois points et celles à la compression des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois. 151
Figure 3.86 : Influence des cendres de bois sur les résistances mécaniques des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey confectionnés à une teneur en eau de 23% ..... 152
Figure 3.87 : Aspect visuel des blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de verres broyés..... 155
Figure 3.88 : Aspect visuel des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji avec ajout de verres broyés ..... 155
Figure 3.89 : Aspect du cœur des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji avec ajout de verres broyés ..... 155
Figure 3.90 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « SPV » ..... 156
Figure 3.91 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu des blocs « SPV » ..... 157
Figure 3.92 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de séchage des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji..... 158
Figure 3.93 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de cuisson des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji..... 159
Figure 3.94 : Influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji..... 160
Figure 3.95 : Variation des résistances mécaniques des blocs « SPV » en fonction du dosage en verres broyés ..... 160
Figure 3.96 : Aspect visuel des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés ..... 162
Figure 3.97 : Aspect du cœur des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés ..... 162
Figure 3.98 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal ..... 163

Figure 3.99 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal ..... 164
Figure 3.100 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de séchage des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal ..... 164
Figure 3.101 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de cuisson des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal ..... 165
Figure 3.102 : Influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal ..... 166
Figure 3.103 : Influence du dosage en verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey (compactage horizontal) ..... 167
Figure 3.104 : Aspect visuel des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés ..... 167
Figure 3.105 : Aspect du cœur des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés ..... 168
Figure 3.106 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical ..... 168
Figure 3.107 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu (PF) des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical ..... 169
Figure 3.108 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de séchage des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical ..... 171
Figure 3.109 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de cuisson des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical ..... 171
Figure 3.110 : Influence du dosage en verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey (compactage vertical) ..... 173
Figure 4.1 : Dispositif du plan chaud asymétrique ..... 182
Figure 4.2 : Schéma équivalent du dispositif à plaque chauffante asymétrique en montage en face arrière isolée [79], [223]. ..... 182
Figure 4.3 : Évolution de la température des deux faces de l'échantillon, par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures ..... 184
Figure 4.4 : Évolution des températures expérimentales et théoriques et des résidus en fonction du temps, par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures ..... 185
Figure 4.5 : Principe de mesure des caractéristiques thermiques par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures ..... 187
Figure 4.6 : Schéma des transferts dans un cylindre creux ..... 188
Figure 4.7 : Dispositif expérimental de mesures en géométrie cylindrique ..... 190
Figure 4.8 : Influence du dosage en cendres de bois sur la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey ..... 195
Figure 4.9 : Influence de la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois, sur la capacité thermique massique ..... 196
Figure 4.10 : Influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey ..... 197
Figure 4.11 : Influence du dosage en cendres de bois sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey ..... 198
Figure 4.12 : Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey. 199
Figure 4.13 : Comparaison de la conductivité thermique des blocs « AC » et « BC » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois ..... 200

Figure 4.14 : Influence du dosage en verres broyés sur la capacité thermique massique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs d'argile cuits de Zogbodomey ..... 202
Figure 4.15 : Influence de la masse volumique sur la capacité thermique massique mesurée par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs d'argile cuits de Zogbodomey ..... 203
Figure 4.16 : Influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique, des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey ..... 204
Figure 4.17 : Influence du dosage en verres broyés sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AV » d'argile cuits de Zogbodomey ..... 205
Figure 4.18 : Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey 206
Figure 4.19 : Diagramme climatique Abomey-Calavi (Bénin) [229]..... 209

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Étapes d'élaboration des céramiques [88] ..... 19
Tableau 1.2 : Comparaison des propriétés de différentes argiles [87], [96] ..... 23
Tableau 1.3 : Principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile [90], [100] ..... 25
Tableau 1.4 : Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique [90], [101], [102] ..... 26
Tableau 1.5 : Défauts liés au séchage des briques d'argile [106] ..... 33
Tableau 1.6 : Propriétés thermiques de quelques matériaux de construction [72], [75]-[77], [122], [123] ..... 37
Tableau 1.7 : Conductivité thermique de la terre cuite utilisée dans les éléments de maçonnerie [124] ..... 38
Tableau 1.8 : Composition massique du verre moderne [155] ..... 48
Tableau 2.1 : Masse volumique des matériaux de base ..... 63
Tableau 2.2 : Indice des vides et porosités des matériaux du Bénin ..... 63
Tableau 2.3 : Seuils d'argilosité des sols fins ..... 67
Tableau 2.4: Classification des sols fins selon l'indice de plasticité ..... 67
Tableau 2.5 : Limites d'Atterberg des argiles ..... 68
Tableau 2.6 : Classification des sols selon la Valeur au Bleu de Méthylène ..... 69
Tableau 2.7 : Valeur au Bleu de Méthylène ..... 69
Tableau 2.8 : Désignation géotechnique des sols en fonction de la Teneur en Matières Organiques ..... 70
Tableau 2.9 : Teneur en Matières Organiques (MO) des matériaux de base ..... 70
Tableau 2.10 : Classification géotechnique des sols en fonction de la teneur en $CaCO_3$ [197] ..... 71
Tableau 2.11 : Composition chimique élémentaire des sols argileux de Zogbodomey [6] [186] ..... 72
Tableau 2.12 : Récapitulatif des pertes de masse associées aux différents phénomènes ..... 73
Tableau 2.13 : Composition semi-quantitative de l'argile de Zogbodomey [6] ..... 75
Tableau 2.14 : Composition semi-quantitative de l'argile de Xeuilley [177], [178], [187], [189] .. 75
Tableau 2.15 : Différentes formulations étudiées ..... 80
Tableau 3.1 : Propriétés physiques des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout ..... 93
Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout ..... 94
Tableau 3.3 : Propriétés physiques des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout ..... 96
Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout ..... 97
Tableau 3.5 : Propriétés physiques des blocs « A » d'argile de Zogbodomey, sans ajout ..... 98
Tableau 3.6 : Propriétés mécaniques des blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout .. 99
Tableau 3.7 : Comparaison des formulations optimales de blocs d'argile de Zogbodomey sans ajout en fonction du compactage ..... 110
Tableau 3.8 : Formulations optimales des blocs d'argile sans ajout : mode de compactage vertical ..... 111
Tableau 3.9 : Perte de masse de séchage des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey en fonction du dosage en cendres de bois ..... 132
Tableau 3.10 : Comparaison des formulations optimales de blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout des cendres de bois (Bénin) en fonction du compactage ..... 153
Tableau 3.11 : Formulations optimales des blocs d'argile avec ajout de cendres : mode de compactage vertical ..... 154
Tableau 3.12 : Masses volumiques des blocs « BV » en fonction de la teneur en eau et du dosage en verres broyés ..... 172
Tableau 3.13 : Comparaison des formulations optimales de blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de verres broyés en fonction du compactage ..... 174

Tableau 3.14 : Formulations optimales des blocs d'argile cuits avec ajout de verres broyés, mode de compactage vertical ..... 175
Tableau 4.1 : Caractéristiques des composants de l'appareil ..... 183
Tableau 4.2 : Valeurs moyennes des paramètres estimées et leurs écarts-types pour un échantillon de mortier sec par la méthode du plan chaud à une et deux températures (I = 0,33 A, $t_{max}$ = 250 s) [79] ..... 184
Tableau 4.3 : Paramètres d'initiation du programme de mesures théoriques ..... 185
Tableau 4.4 : Valeurs de conductivité thermique obtenues avec des échantillons de PVC ..... 191
Tableau 4.5 : Capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température ..... 192
Tableau 4.6 : Conductivité thermique des blocs « A » d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température ..... 193
Tableau 4.7 : Conductivité thermique des blocs « B » d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, obtenue par la méthode du flux radial ..... 193
Tableau 4.8 : Conductivité thermique des blocs « E » d'argile cuits de Xeuilley obtenue par la méthode du flux radial ..... 194
Tableau 4.9 : Conductivité thermique, en fonction du dosage en cendres de bois des blocs « BC » d'argile cuits de Zogbodomey, obtenue par la méthode du flux radial ..... 200
Tableau 4.10 : Conductivité thermique, en fonction du dosage en cendres de bois de la France des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley, obtenue par la méthode du flux radial ..... 201
Tableau 4.11 : Conductivité thermique, en fonction du dosage en verres broyés des blocs « BV » d'argile cuits de Zogbodomey, obtenue par la méthode du flux radial ..... 207
Tableau 4.12 : Propriétés thermophysiques des blocs d'argile cuits de Zogbodomey étudiés ..... 208
Tableau 4.13 : Déphasage thermique et amortissement thermique en fonction de l'épaisseur de la paroi et des propriétés des blocs d'argile cuits de Zogbodomey ..... 211
Tableau 4.14 : Évolution du déphasage thermique des briques creuses de mortier de ciment en fonction de l'épaisseur de la paroi ..... 212

# COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

## Publications

G. S. G. Milohin, V. S. Gbaguidi, A. Donnot, M. Anjorin, and Riad Benelmir, «Mechanical and thermal characterization of compact blocks made of clayey earth with wood ashes addition», MATEC Web Conf., (to be published 2019)

G. S. G. Milohin, A. Malahimi, V. S. Gbaguidi, A. Donnot, et R. Benelmir, « Valorisation des cendres issues de la combustion du charbon de bois dans la fabrication de briques d'argile cuite », Rev. Int. Sci. Appliquées ISSN-1840-8869 © 2018 EPAC-UAC, vol. 1, no 2, p. 03-10, 2018.

G. S. G. Milohin, M. Anjorin, V. S. Gbaguidi, S. C. Adissin, A. Donnot, et R. Benelmir, Effect of the addition of glass bottle particles on the mechanical strengths of compressed blocks of fired clay and stabilized earth, *Int. J. Adv. Res.*, vol. 5, nº 11, p. 860-870, nov. 2017.

## Posters

G. S. G. Milohin, V. S. Gbaguidi, M. Anjorin, A. Donnot, et R. Benelmir, Cendres ou verres broyés dans des briques cuites ; Doctoriales de l'Université de Lorraine, 19 au 24 Mai 2019, Saint-Dié La Bolle Cap France. https://www.adum.fr/script/formations.pl?mod=188718&site=lorraine

G. S. G. Milohin, A. Donnot, V. S. Gbaguidi, M. Anjorin, and Riad Benelmir, Comportement mécanique de bocs d'argile cuite avec ajout de poudre de verre ; Journée Scientifique de l'École Doctorale Sciences et Ingénieries des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie (SIMPPE), 12 Mars 2019, Amphithéâtre PARISOT-Présidence de l'Université de Lorraine 20 rue Lionnois à Nancy.

http://doctorat.univ-lorraine.fr/sites/default/files/user/ecoles-doctorales/SIMPPE/Webposters_seminaire_2019_V8-1.pdf

G. S. G. Milohin, A. Donnot, V. S. Gbaguidi, M. Anjorin, and Riad Benelmir, « Mechanical and thermal characterization of compact blocks made of clayey earth with wood ash addition » ; International Conference On Material & Energy ICOME 2018, du 30 avril au 04 mai 2018, Donostia - San Sebastián en Espagne. http://icome18.lmt.ens-cachan.fr/

G. S. G. Milohin, A. Donnot, V. S. Gbaguidi, M. Anjorin, and Riad Benelmir, « Influence du mélange cendres de bois-verres broyés sur les résistances mécaniques de blocs compactés d'argile cuite et de terre stabilisée au ciment » ; séminaire de l'Ecole Doctorale RP2E, 13 Février 2018, Faculté de Médecine - Amphithéâtre LEPOIS - 9 Avenue de la forêt de Haye - 54500 Vandœuvre-lès-Nancy en France.

http://rp2e.univ-lorraine.fr/fileadmin/user_upload/Webposters_seminaire_2018-V0902.pdf

MILOHIN G., Influence des verres broyés sur les caractéristiques mécaniques de blocs de terre comprimée stabilisée au ciment et de briques d'argile cuite ; 1er Colloque sur les Eco-Matériaux en Afrique- CEMA'2017, Université Houphouët-Boigny.

# Communications orales

G. S. G. Milohin. *et al*, « Effet dégraissant de la terre de barre et du sable siliceux du sud bénin dans la formulation de brique d'argile cuite », XVIIIème Journées Scientifiques Internationales de Lomé (JSIL-2018), Campus universitaire de Lomé, 08 -13 Octobre 2018 au Togo.

G. S. G. Milohin *et al*, « Etude de l'adsorption de bleu de méthylène par des matériaux argileux du sud Bénin : essai à la tache et dosage chimique », 19èmes Journées Scientifiques Annuelles de la SOACHIM, Campus universitaire de Lomé, 14 -17 Août 2018 au Togo.

G. S. G. Milohin *et al*, « Influence des verres broyés sur les caractéristiques mécaniques de blocs de terre comprimée stabilisée au ciment et de briques d'argile cuite », 1er Colloque sur les Eco-Matériaux en Afrique- CEMA'2017, Université Houphouët-Boigny d'Abidjan, 24 au 25 Mai 2017 en Côte-d'Ivoire.

G. S. G. Milohin *et al*, « Caractérisation mécanique et thermique de composites terre comprimée - cendres de bois pour usage dans le bâtiment », XVIIe Edition des Journées Scientifiques Internationales de Lomé (JSIL-2016), Campus universitaire de Lomé, 03-08 Octobre 2016 au Togo.

G. S. G. Milohin *et al*, « Etude de la performance des chaussées renforcées par géosynthétique sur sol gonflant : cas du tronçon de la route Pobè-Kétou au sud du Bénin », 8ème Edition des Journées Africaines de la Géotechnique (JAG-2016), SAWA Hôtel de Douala, 20 - 24 Juin 2016 au Cameroun.

G. S. G. Milohin *et al*, « Elaboration d'un nouveau matériau de construction par incorporation de cendres de bois dans des blocs d'argile cuite pour usage dans le bâtiment », 8ème Edition des Journées Africaines de la Géotechnique (JAG-2016), SAWA Hôtel de Douala, 20 - 24 Juin 2016 au Cameroun.

G. S. G. Milohin *et al*, « Caractérisation de blocs de terre comprimes dopés avec des cendres de bois pour l'habitat », Vème colloque de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC), Campus Universitaire d'Abomey-Calavi, 28 Septembre - 03 Octobre 2015 au Bénin.

# LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|---|---|
| BTC | Brique (Bloc) de Terre Comprimée (Compactée) |
| BTCS | BTC Stabilisée |
| ECCO-GC | Engineering Consulting and Construction Office Génie Civil |
| ED | École Doctorale |
| ED-SDI | École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur |
| ED-SIMPPE | École Doctorale Science et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés, et de l'énergie |
| EN | Norme Européenne |
| ENSET | École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique |
| ENSTP | École Nationale Supérieure des Travaux Publics |
| EPAC | École Polytechnique d'Abomey-Calavi |
| GC | Génie Civil |
| GME | Génie Mécanique et Énergétique |
| INSPEI | Institut National Supérieur des classes Préparatoires aux Études d'Ingénieurs |
| INSTI | Institut National Supérieur de Technologie Industrielle |
| LABO-CTMAE | Laboratoire de Caractérisation Thermophysique des Matériaux et d'Appropriation Énergétique |
| LEMA | Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées |
| LERMAB | Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois |
| LEM3 | Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux |
| LERGC | Laboratoire d'Essais et de Recherches en Génie Civil |
| MESRS | Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique |
| MO | Matières Organiques |
| NF | Norme Française |
| UAC | Université d'Abomey-Calavi |
| UNSTIM-Abomey | Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey |
| VBS | Valeur au Bleu de méthylène d'un Sol |

# NOMMENCLATURE

| Lettres minuscules | | |
|---|---|---|
| Notation | Unité | Signification |
| a | $m^2.s^{-1}$ | Diffusivité thermique |
| c | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ou $Wh.kg^{-1}.K^{-1}$ | Chaleur spécifique |
| e | m | Épaisseur |
| t | h ou s | Variable relative au temps |

| Lettres majuscules | | |
|---|---|---|
| Notation | Unité | Signification |
| E | $W.K^{-1}.m^{-2}.s^{1/2}$ ou $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$ | Effusivité thermique |
| E | GPa ou MPa | Module de Young |
| M | kg ou g | Masse |
| R | $m^2.K^{-1}.W^{-1}$ | Résistance thermique |
| S | $m^2$ | Surface |
| T | °C ou K | Variable relative à la température |
| T | h | Période du cycle des variations de températures |
| V | $m^3$ ou $cm^3$ | Volume |

| Lettres grecques | | |
|---|---|---|
| Notation | Unité | Signification |
| **ρ** | $kg.m^{-3}$ | Masse volumique |
| **λ** | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | Conductivité thermique |
| μ | - | Amortissement thermique |
| **η** | h | Déphasage thermique |
| **α** | - | coefficient |
| **β** | - | Coefficient |
| **σ** | MPa | Contrainte |
| **ε** | % | Déformation |

# INTRODUCTION GENERALE

Selon Maslow, l'être humain doit au préalable satisfaire les besoins primaires afin de pouvoir réaliser ceux qui sont au niveau supérieur. Parmi ces besoins primaires, se trouve le logement qui assure la protection de l'individu contre les intempéries (soleil, froid, orage, etc.) mais également contre les agressions. Le droit à un logement convenable a été reconnu comme faisant partie intégrante du droit à un niveau de vie suffisant dans la Déclaration Universelle des Droits de l'Homme de 1948 et dans le Pacte International Relatif aux Droits Économiques, Sociaux et Culturels de 1966 [1]. Le droit à un logement convenable concerne tous les États car, ayant tous au moins ratifié un instrument international y faisant référence, et s'étant engagés à le protéger, dans des déclarations, plans d'action ou documents finals de conférences internationales [1].

Les premières civilisations avaient compris tôt l'importance du besoin de logement. L'intuition et les réflexions de l'homme d'autrefois, l'amenèrent à exploiter les ressources facilement accessibles, disponibles dans son environnement immédiat, comme la pierre, les peaux d'animaux, le bois, les sols argileux, etc… pour créer un cadre sain bien adapté à sa vie. L'évolution de la population et la naissance de grandes civilisations ont entrainé différents échanges socioculturels entre les peuples du monde. Ainsi, l'homme a peu à peu intégré dans son habitat, des éléments venus d'autres horizons.

Face au modernisme aujourd'hui, de nouveaux matériaux de construction sont apparus et sont adoptés en grande masse par conformisme. Il s'agit notamment du ciment, du béton et de l'acier qui sont désormais reconnus comme des matériaux de construction classiques. Ces derniers se sont hissés au premier rang non seulement dans la construction des infrastructures urbaines, mais aussi dans la construction des habitations en zones rurales, ceci au détriment des matériaux de proximité, moins onéreux et capables d'assurer des fonctions minimales exigées pour la construction. Toujours est-il que les matériaux à matrice cimentaire ne sont pas souvent adaptés au climat chaud des pays du sud [2], [3], quand bien même leurs utilisations soient encadrées par des normes et des règlements de calcul. Les habitations ainsi érigées se révèlent souvent inconfortables pendant les périodes de forte occupation, ce qui fait généralement recourir aux systèmes mécaniques de rafraichissement, sources d'importantes dépenses énergétiques et financières pour des populations à revenus et moyens très limités comme celles du Bénin. Il semble naturel de se demander s'il existe un meilleur compromis pour le mieux-être des populations. Une solution envisagée consiste aux matériaux de proximité anciennement utilisés dans la construction, considérés aujourd'hui comme la panacée. C'est ce qui justifie l'utilisation de l'argile dans l'élaboration et la mise en œuvre de nouveaux matériaux de construction performants, à faible impact environnemental, et à moindre coûts énergétique et économique.

L'argile est une ressource naturelle, utilisée dans les constructions pour ses nombreuses propriétés : disponibilité, faible coût, inertie et confort thermique. Mais c'est une matière première à mettre en œuvre. Depuis l'antiquité, l'homme a cherché à corriger les défauts de construction dus à l'utilisation de l'argile tels que la pérennité des ouvrages ou leur sensibilité vis à de l'eau. Plusieurs moyens de stabilisation sont développés en vue d'améliorer la performance et la sensibilité de l'argile vis-à-vis de l'eau. La stabilisation peut être physique (correction de la granulométrie), mécanique (densification ou compactage), chimique (ciment, chaux) ou thermique (cuisson) [4]. De nombreux produits

sont alors obtenus : la bauge, l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée (BTC) ou stabilisée (BTS) [5]. L'argile stabilisée par cuisson est un matériau dont l'élaboration associe la stabilisation mécanique, thermique et parfois physique, afin d'obtenir des propriétés suffisantes des produits pour leurs fonctions comme éléments de structure ou d'enveloppe du bâtiment.

Au Bénin, des gisements d'argiles ont été identifiés dans le bassin sédimentaire côtier, telle que l'indique la Figure 0.1. Il s'agit des gisements de Massi évalués à 1,5 millions de tonnes, Gbédji-Kotovi à 5 millions de tonnes et Zogbodomey à 10 millions de tonnes [6]. Par ailleurs, les localités de Djrègbé, Sakété, la zone bordière du fleuve Ouémé et le nord du pays ont révélé des gisements d'argiles dont les réserves ne sont pas encore évaluées.




Figure 0.1 : Localisation de quelques réserves d'argile au Sud du Bénin

L'exploitation des gisements d'argile pour la production de briques et tuiles en terre cuite est fortement encouragée au Bénin. Mais l'industrie de la terre cuite demeure peu développée et les ressources minérales présentes dans le sous-sol du pays sont peu exploitées [7]. Ainsi, le Bénin importe une grande partie des matériaux de construction alors qu'il dispose d'un potentiel quantitatif important en matières premières argileuses, exploitables pour l'élaboration de matériaux spécifiques. Il faudra inverser la tendance. C'est bien l'une des raisons qui sous-tend la prise du décret N° 2005-482 du 04 Août 2005 portant prise en compte des matériaux locaux dans les constructions publiques au Bénin. L'article 2 de ce décret stipule : « la conception et la réalisation de toute infrastructure

sociocommunautaire, de tout logement social, de tout bâtiment des services, doivent justifier de l'utilisation, au moins à 25% de leur valeur, de matériaux locaux ou de matériaux produits sous licence béninoise »[8]. En outre, la volonté de rendre le logement accessible au plus grand nombre de béninois à revenus variables est affichée à travers le Projet de Développement de Programmes Immobiliers d'Habitat Social et Économique à l'horizon 2016-2021 contenu dans le Programme d'Action du Gouvernement du Bénin. De fait, la promotion et l'utilisation des matériaux localement disponibles dans la construction des bâtiments est au cœur des politiques actuelles du pays.

Par ailleurs, l'économie des matières premières ou de l'énergie est un enjeu majeur partagé au niveau mondial [9]. Ainsi, l'économie circulaire basée entre autres sur : l'utilisation modérée et la plus efficace possible des ressources non renouvelables, une exploitation des ressources renouvelables respectueuse de leurs conditions de renouvellement et la valorisation des déchets en tant que ressources, [9] est encouragée.

Relativement à la valorisation des résidus, les pays à économie développée se sont intéressés à la valorisation des cendres volantes en Génie Civil [10]–[14]. Les cendres volantes sont les résidus de la combustion du charbon dans les centrales thermiques utilisant ce combustible, en vue de produire de l'électricité [15], [16]. En règle générale, elles sont obtenues par une séparation électrostatique ou une précipitation mécanique des fumées de combustion [17]. En Europe, différentes voies de valorisation des cendres volantes sont alors développées. Elles sont appuyées par des études scientifiques qui justifient l'intérêt de la valorisation de ces résidus tant dans les travaux routiers [18] ou la stabilisation des sols [19], tant dans les liants et ciment [20]–[22], que dans le béton [10], [23], [24] ou dans la céramique [17], [25]–[29].

De façon similaire une grande quantité de cendres de bois est générée en Afrique subsaharienne où les besoins en énergie domestique sont couverts par la production forestière [30]. En effet, près de 80 % des populations utilisent le bois comme source d'énergie [31]. Au Bénin, on estime à 89% la prédominance de la biomasse dans le bilan énergétique national [7], [30], [32]. Dans les régions urbaines comme Cotonou et Porto-Novo, le charbon de bois est la principale source d'énergie pour la cuisson des aliments (70 à 72%) [33]. Son transport représente 99% de la totalité des flux de bois énergie transportés par an [34]. La combustion du charbon de bois génère des cendres comme résidus. Ces cendres de cuisson ayant des similitudes avec les cendres volantes, leur valorisation dans les produits de construction peut-être envisageable.

Un autre déchet qui mériterait d'être valorisé est le déchet de verre. En effet, le verre est un matériau inorganique composé majoritairement de trois constituants de base : l'oxyde de silicium ($SiO_2$) ou silice, l'oxyde de sodium ($Na_2O$) et l'oxyde de calcium (CaO) [35]. Il est présent à tous les stades de la vie de l'homme et cela depuis des siècles. Son usage sous des formes diverses et variées en fait l'un des matériaux le plus utilisé par l'homme. Le verre trouve sa place dans le bâtiment (baies vitrées,…), les transports (pare-brise, rétroviseurs, etc.), la santé (verre optique), les services (écran, photocopieuse, etc.), la maison (télévision, décoration, vaisselle, emballages, etc.), et bien d'autres lieux [36]. Le verre représente 11% du marché total de l'emballage [37] et occupe une place privilégiée au sein du secteur des industries agroalimentaires et des consommateurs en raison de son innocuité [38]. Sa neutralité, vis-à-vis du contenu, produit un effet rassurant auprès du consommateur. En effet, une enquête conduite, en 2009, par la Fédération européenne du verre, auprès de 6 200 familles, a démontré que les trois quarts des consommateurs européens privilégiaient le verre comme matériau d'emballage des

denrées alimentaires (aliments et boissons) [38]. L'enquête menée par la FEVE (fédération des fabricants européens de contenants en verre et d'articles de table en verre fabriqués à la machine) en 2010, démontre que 88 % des personnes interrogées optent pour les emballages en verre quand il est question « de prendre soin de la planète » [39]. Ainsi, le verre est principalement utilisé pour la fabrication d'emballages de type primaire [38]. Les objets en verre hors d'usage sont alors abandonnés et deviennent des déchets, or le verre se dégrade lentement. Il faut environ 4 000 ans pour sa décomposition naturelle [40].

Au Bénin, la gestion des déchets domestiques reste un problème crucial et les déchets d'emballage prennent une place prépondérante. Afin de réduire la quantité de déchets envoyés à la décharge pour une meilleure gestion et de permettre aux femmes de gagner un revenu leur permettant d'améliorer leurs conditions de vie ainsi que celles de leurs familles, le projet GDSM appuie les femmes récupératrices qui valorisent au quotidien des contenants réutilisables de verre [41]. En récupérant, les femmes détournent quotidiennement environ 7 tonnes de déchets des chemins de l'enfouissement [41].

Dans les pays industriels, le verre récupéré à partir de déchets ménagers et assimilés ou directement à partir de chutes de fabrication, peut être introduit avec les matières premières pour la fabrication de nouveaux verres. Ceci se traduit notamment par des recyclages en boucle : les bouteilles deviennent à nouveau des bouteilles [42]. Cependant, certains problèmes restent à résoudre notamment : les limites d'un recyclage en boucle en l'absence de tri par couleurs ; le devenir des fines de verre qu'il n'apparaît pas souhaitable de réenfourner ; la valorisation dans des contextes insulaires, ainsi que dans des pays peu industrialisés en l'absence de verrerie industrielle implantée localement [42]. L'enfouissement étant onéreux avec également les problèmes de la gestion de l'espace et de l'environnement, d'autres voies de valorisation se développent afin de trouver des débouchés au verre recyclé pollué et qui, même après traitement, ne peut satisfaire le cahier des charges des verriers. C'est le cas par exemple des lots de calcin ménager trop contaminés ou de granulométrie trop fine ou encore des lots de verre spéciaux dont la composition chimique est trop éloignée. Des opérations de broyage et de tamisage permettent d'obtenir une poudre de verre qui trouve de nombreuses applications comme additifs (peintures, matériaux plastiques, béton, carrelage, tuiles...) ou pour élaborer de nouveaux matériaux pour le bâtiment comme les mousses de verre isolantes ou les billes de verre expansé. Le verre, par son recyclage, constitue donc une source de matière première secondaire pour de nombreuses applications en génie civil notamment dans : les travaux routiers [43]–[47], le mortier (comme inhibiteur de la réaction alcali-silice) [48], [49], la formulation du béton [50]–[56] ou encore, la formulation de carreaux [57]. En outre, peu de travaux scientifiques traitent de l'incorporation des résidus de verre dans la formulation de briques d'argile cuite.

De ce qui précède, il est important de retenir que :

- l'argile disponible localement et à moindre coût au Bénin, doit être valorisée ;
- les cendres de bois, résidus de la combustion de la principale source d'énergie (charbon de bois) dans les ménages au Bénin, pourraient être valorisées en construction ;
- les rebuts de verre ou les verres d'emballage usagés doivent être valorisées pour une meilleure gestion des déchets au Bénin, voire du calcin pollué dans les pays industrialisés .

Dans le souci donc de valoriser les abondants gisements de matières premières sous exploités et d'intégrer le recyclage des déchets dans l'industrie du bâtiment, la substitution partielle de la matrice argileuse par des résidus de verre ou des cendres de bois, dans l'élaboration des briques cuites est envisagée. C'est ce qui justifie l'objet de la présente thèse dont le thème est : « Valorisation de rebuts de bouteilles en verres et des cendres de bois dans la fabrication de briques en argile cuite ».

Ce projet s'inscrit dans une démarche de développement durable et vise :

- sur le plan social, la valorisation dans l'habitat, des matériaux de construction de proximité disponibles à moindre coût et l'utilisation de la main d'œuvre locale.
- sur le plan environnemental, le recyclage des déchets ;
- sur le plan énergétique, la réduction des dépenses énergétiques pour le fonctionnement et le confort thermique dans les bâtiments d'habitation ;
- sur le plan économique, l'allègement des dépenses de construction des populations à revenus limités.

Les résultats attendus à l'issue de l'étude sont tels que :

- les sols argileux en étude sont connus.
- les propriétés physiques et mécaniques des blocs d'argile cuits, incorporant des résidus de verre ou des cendres de bois sont déterminées et la formulation des nouveaux matériaux est maitrisée.
- l'influence des matériaux de substitution (cendres de bois et verres broyés) de la matrice argileuse, sur les propriétés thermophysiques des blocs cuits est étudiée.

Le travail est abordé en quatre (04) chapitres.
Le premier chapitre portant sur l'étude bibliographique présente en premier lieu le bâtiment et les interactions avec son environnement et montre l'influence des propriétés de transfert de chaleur des matériaux de l'enveloppe du bâtiment sur l'ambiance thermique. Les matériaux de construction sont ensuite exposés en fonction de différents critères de classification et l'étude des matériaux céramiques du bâtiment justifié. Alors, le processus de fabrication des céramiques de bâtiment (briques d'argile cuite) est présenté de même que les propriétés des produits obtenus. Enfin, les possibilités de valorisation des déchets notamment les cendres et les verres, sont exposées.

Le deuxième chapitre présente l'origine et les étapes de préparation des constituants de base entrant dans la formulation des nouveaux matériaux. Il expose ensuite les différentes méthodes de caractérisation des matières premières argileuses et leurs propriétés physico-chimiques puis définit les méthodes adoptées pour l'élaboration des blocs d'argile cuits.

Le troisième chapitre décrit les méthodes utilisées pour les caractérisations physique et mécanique des blocs d'argile, puis il présente les résultats obtenus ainsi que les analyses et discussions qui en découlent.

Le dernier chapitre est consacré à la détermination des propriétés thermophysiques des matériaux élaborés. Les propriétés ainsi obtenues ont permis d'effectuer une étude paramétrique du déphasage thermique et de l'amortissement d'une paroi d'un bâtiment intégrant ces matériaux.

Enfin, la conclusion générale met en exergue les principaux résultats de l'étude ainsi que les perspectives.

# CHAPITRE 1 ▪ Étude Bibliographique.

## Sommaire

1.1. Introduction ..... 7
1.2. Interactions thermiques entre le bâtiment et son environnement ..... 8
1.3. Matériaux de construction ..... 17
1.4. Fabrication des briques d'argile cuite ..... 21
1.5. Valorisation des déchets en construction ..... 42
1.6. Synthèse. ..... 53

## 1.1. Introduction

Le domaine de la construction a un impact direct et important sur le développement durable, lorsqu'on sait que c'est le secteur qui consomme la plus grande quantité d'énergie dans le monde [2] et qui émet le deuxième plus grand taux de $CO_2$ après l'industrie [58]. En effet, le bâtiment consomme 50% des ressources naturelles, 40% d'énergie [59], [60] bien que la consommation d'énergie varie largement selon les régions, et est en outre, responsable à 19 % de la totalité des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2010 [61]. Il constitue donc une mine d'or pouvant permettre l'atténuation des effets néfastes des activités humaines sur l'environnement.

De ce fait, le secteur du bâtiment est au cœur des problématiques actuelles sur les changements climatiques, l'environnement et le développement durable. La révision des modes et pratiques de construction actuelles doit donc s'opérer.

Dans les pays en voie de développement comme le Bénin, le béton, le mortier, le ciment, et l'acier sont au cœur des constructions. Le coût élevé et sans cesse croissant desdits matériaux, parfois importés, engendre de fortes dépenses financières pour des populations déjà à revenus limités. De plus, la production de bon nombre de ces matériaux a pour conséquence une forte consommation énergétique et l'émission de $CO_2$, un gaz à effet de serre majeur. Une part importante d'énergie est également consommée pour les besoins en fonctionnement des bâtiments mais aussi et surtout pour assurer le confort thermique.

L'une des solutions aux problèmes d'économie d'énergie dans un grand nombre de pays chauds comme le Bénin est le défi de l'élaboration et de la mise en œuvre dans les constructions, de nouveaux matériaux performants, localement disponibles, à faible impact sur l'environnement et à moindre coût énergétique afin de limiter les recours aux appareils de climatisation. Les réflexions sont alors orientées vers la valorisation de matières premières argileuses localement disponibles [62]–[65], peu coûteuses mais également la réutilisation de matériaux en fin de vie afin d'initier une démarche éco circulaire. Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les matériaux de construction en général, et plus spécifiquement, sur la technologie de fabrication des produits de terre cuite et leurs propriétés, puis, la valorisation en construction, des bouteilles de verre d'emballage non réutilisées et des cendres.

## 1.2. Interactions thermiques entre le bâtiment et son environnement

### 1.2.1. Ambiance thermique au sein du bâtiment

La construction de maisons durables et confortables dans les pays en développement comme le Bénin, constitue un enjeu de taille en raison des conditions de vie souvent précaires et des conditions climatiques.

Pendant des milliers d'années, l'être humain a développé des concepts architecturaux pour obtenir le confort acceptable dans un environnement spécifique, tenant compte des conditions climatiques locales et des matériaux de construction disponibles. De la hutte primitive à la maison d'aujourd'hui, l'architecture reflète à travers son évolution, les différentes solutions trouvées par l'homme pour faire face aux aléas climatiques.

En outre, la conception thermique des bâtiments est possible de nos jours. Elle vise la protection des occupants d'une manière automatique et passive des facteurs climatiques pluies, vent, rayonnements et l'optimisation de la consommation énergétique. Le concepteur doit faire en sorte que cette consommation (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par la règlementation et les possibilités financières des occupants, tout en assurant un niveau de confort.

Tout bâtiment interagit et entretient un ensemble plus ou moins harmonieux de relations avec son environnement. De plus, Berger et Sari [66], ont montré qu'il existe une relation entre une personne et son environnement, la relation avec l'ambiance thermique y faisant partie (Figure 1.1). Le confort thermique traduit alors l'équilibre entre l'homme et l'ambiance.

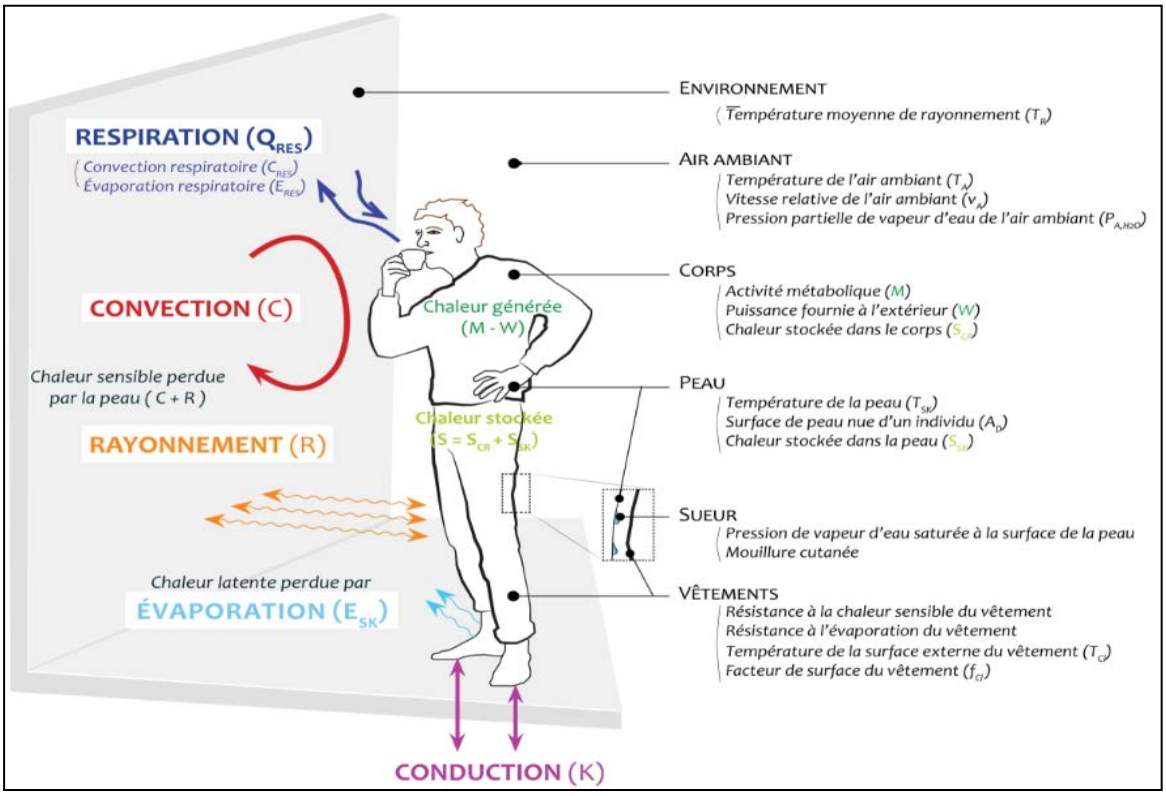



Figure 1.1 : Interactions thermiques entre l'homme et son environnement [67]

Pour qu'une personne ressente une situation de confort, les trois conditions suivantes doivent être réunies [68] :

- le corps doit maintenir une température interne stable (thermorégulation) ;
- la production de sueur ne doit pas être trop abondante et la température moyenne de la peau doit être confortable ;
- aucune partie du corps ne doit être trop chaude ou trop froide (inconfort local).

En conséquence, un individu est en situation de confort thermique lorsqu'il ne ressent de sensation ni de chaud ni de froid [69]. C'est une notion complexe dépendant de nombreux paramètres comme [60], [69] :

- les facteurs liés à l'individu tels que l'activité physique et le niveau d'habillement ;
- les facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse relative de l'air par rapport au sujet, le rayonnement solaire et la température des parois.

En outre, un bâtiment peut être comparé à un tonneau des Danaïdes dans lequel on maintient un niveau d'eau en le remplissant continuellement (Figure 1.2). Le niveau correspond au confort demandé et le débit d'eau aux flux d'énergie [70], [71]. Les parois du bâtiment constituent donc le lien entre le microclimat intérieur et les fluctuations des sollicitations climatiques [2].

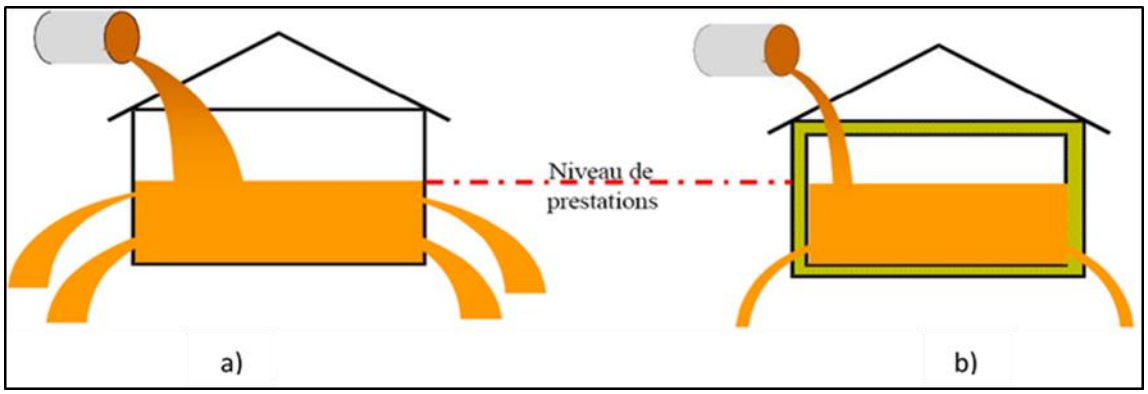



Figure 1.2 : Bâtiment vu comme un tonneau des Danaïdes. a) Bâtiment mal isolé, b) bâtiment correct [70], [71].

### 1.2.2. Échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement

Du point de vue physique, le bâtiment constitue une masse et un volume. La masse est définie par l'enveloppe du bâtiment que représentent les parois et la toiture. En outre, l'accumulation et la restitution de chaleur ne peut se faire que s'il y a une certaine masse à chauffer, donc une certaine quantité de matériau [70]. Or, le soleil constitue la principale source d'apport énergétique du bâtiment. Le flux solaire dépend : de la latitude, de la période dans l'année, de la transparence de l'atmosphère, de l'angle entre la direction incidente et la normale à la surface à l'instant considéré. La composante directe du flux solaire incident au niveau d'une paroi correspond au flux solaire qui atteint directement la paroi quand celle-ci est exposée au soleil. Le flux solaire incident sur une paroi est, à son tour, réfléchi, absorbé et transmis, suivant les caractéristiques de surface de la paroi (Figure 1.3) [2].

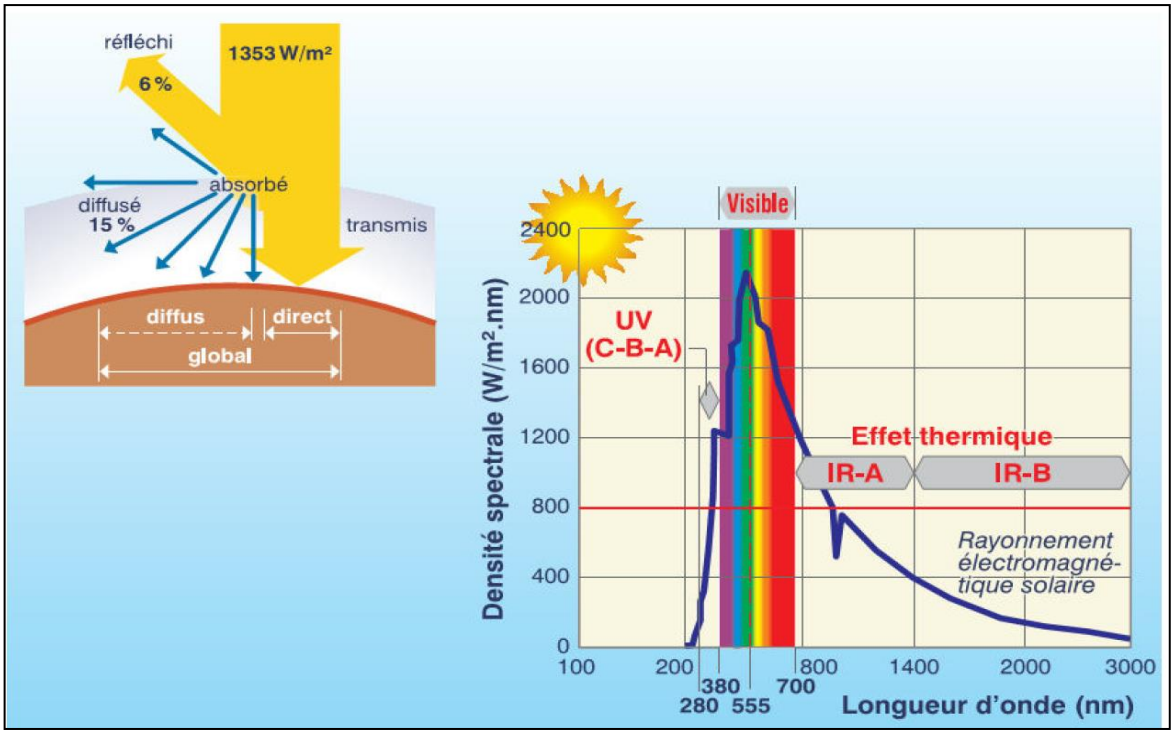



Figure 1.3 : Spectre du soleil [2]

Ainsi, le rayonnement solaire absorbé par la paroi se transforme en chaleur et élève la température de surface de la paroi. Lorsque Le rayonnement solaire est transmis directement au local, on observe une augmentation immédiate de la température ambiante interne [2].

En général, les transferts d'énergie thermique sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : **T = f(x, y, z, t)** [72]. La paroi échange la chaleur avec son environnement suivant les trois modes fondamentaux d'échanges : par convection avec l'air environnant, par rayonnement vers les parois voisines et par conduction à l'intérieur de la paroi [2]. Ces transferts résultent de la tendance naturelle de la chaleur à transiter des zones chaudes vers les zones froides, celle de l'air à se déplacer des zones de haute pression vers les zones de basse pression et celle de la vapeur d'eau à migrer des zones les plus humides vers les plus sèches.

La conduction est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière sous l'influence d'une différence de température. Ce transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [72], [73].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier selon laquelle, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}\, T \qquad 1.1$$

ou sous la forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \qquad 1.2$$

Avec **φ** : Flux de chaleur transmis par conduction en **W**.

**λ** : Conductivité thermique du milieu en $W.m^{-1}.K^{-1}$
S : Aire de la section de passage du flux de chaleur en $m^2$
T : Température en K
x : Variable d'espace dans la direction du flux en m
Dans sa forme monodimensionnelle, la diffusion de la chaleur décrit le transfert unidirectionnel au travers d'un mur plan.

Considérons une paroi (Figure 1.5) d'épaisseur dx dans sa direction x et de section **S** normale à la direction (**ox**).

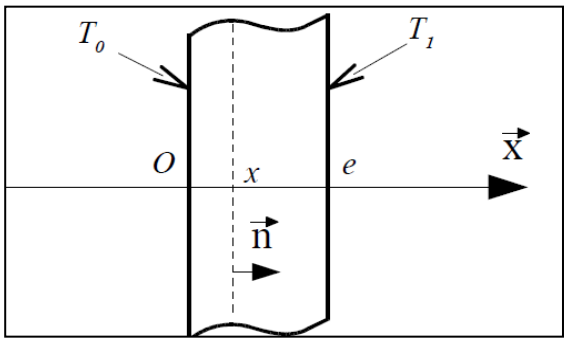



Figure 1.4 : Mur plan

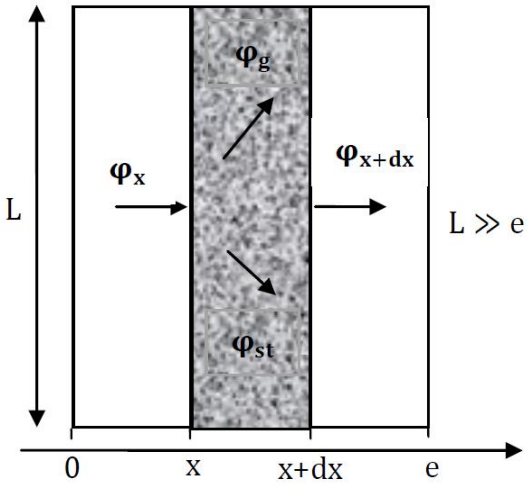



Figure 1.5 : Bilan d'énergie pour un mur plan [74]

Le bilan énergétique sur cette paroi s'écrit :

$$\varphi_x+\varphi_g=\varphi_{x+dx}+\varphi_{st} \qquad 1.3$$

avec

$\varphi_x$ : Flux thermique conductif entrant en x : $\varphi_x = -\left(\lambda S\frac{\partial T}{\partial x}\right)_x$

$\varphi_{x+dx}$ : Flux thermique conductif entrant en x + dx : $\varphi_{x+dx} = -\left(\lambda S\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}$

$\varphi_{st}$ : Flux de chaleur stockée par le corps (augmentation de son énergie interne au cours du temps) : $\varphi_{st} = \rho c S dx\frac{\partial T}{\partial t}$

$\varphi_g$ : Flux thermique généré : $\varphi_g = \dot{q}Sdx$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par **Sdx**, nous obtenons :

$$\frac{\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}-\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{dx}+\dot{q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 1.4$$

Soit

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\dot{q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 1.5$$

Et dans le cas tridimensionnel, on obtient l'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 1.6$$

(a) Si le milieu est isotrope : $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$.
(b) S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $\dot{q} = 0$.
(c) Si de plus le milieu est homogène, **λ** n'est fonction que de la température.

Les hypothèses (a) + (b) + (c) permettent d'écrire :

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{d\lambda}{dT}\left[\left(\frac{dT}{dx}\right)^2+\left(\frac{dT}{dy}\right)^2+\left(\frac{dT}{dz}\right)^2\right]=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 1.7$$

(d) Si de plus $\lambda$ est constant (écart modéré de température), nous obtenons l'équation de Poisson :

$$a\nabla^2 T=\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 1.8$$

(e) En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 T=0 \qquad 1.9$$

En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur $\mathbf{e\ (m)}$ et de températures uniformes $\mathbf{T_0}$ et $\mathbf{T_1}$ (Figure 1.5), ce flux de chaleur $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{W})$ s'exprime sous la forme [75], [76] :

$$\varphi=\frac{\lambda S}{e}(T_0-T_1) \qquad 1.10$$

Où $\mathbf{S}$ est l'aire des faces latérales en $\mathbf{m^2}$

Cette relation peut également se mettre sous la forme :

$$\varphi=\frac{T_0-T_1}{\frac{e}{\lambda S}} \qquad 1.11$$

Elle est analogue à la loi d'Ohm en électricité qui définit l'intensité du courant comme le rapport de la différence de potentiel électrique sur la résistance électrique.

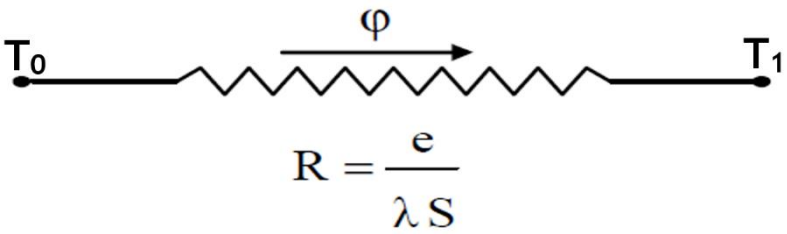



Figure 1.6 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple

La température apparaît ainsi comme un potentiel thermique et le terme $\frac{\mathbf{e}}{\boldsymbol{\lambda S}}$ apparaît comme la résistance thermique $\mathbf{R}$ d'un mur plan d'épaisseur e, de conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda}$ et de surface latérale $\mathbf{S}$. On se ramène donc au schéma équivalent représenté sur la Figure 1.6.

Les méthodes permettant d'accéder à la conductivité thermique des matériaux font intervenir les équations de transfert de chaleur en régime permanent [72] et sont basées sur la détermination de la résistance thermique du matériau. La connaissance de la résistance thermique du matériau permet d'en déduire sa conductivité thermique suivant le type de mesure (géométrie plane ou cylindrique).

Les méthodes de mesure de la conductivité thermique en régime permanent se distinguent alors en deux grandes classes selon le matériau :

- pour les conducteurs : la méthode de la barre objet de plusieurs études [63], [75], [77], [78] ;
- pour les isolants : la plaque chaude présentée dans différents travaux [74], [75], [77], [79].

La conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda}$ d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Elle exprime donc la facilité avec laquelle la chaleur traverse une épaisseur du matériau [70]. Pour les milieux multiconstituants, il faut bien savoir que la conductivité thermique n'est pas une grandeur additive [72]. La résistance thermique $\mathbf{R}$ d'un matériau est

sa capacité à s'opposer aux échanges thermiques [80]. Elle est exprimée en $\mathbf{m^2.K.W^{-1}}$. Contrairement à la conductivité thermique, la résistance thermique totale d'une paroi est égale à la somme des résistances thermiques de chacune des couches de matériaux qui la constitue. La résistance thermique est significative pour les parois, car elle tient compte de leurs géométries. Elle est d'autant plus élevée que l'isolation est plus efficace.

Dans les pays tropicaux, les bâtiments sont soumis à des températures externes relativement importantes. Ces hausses de température extérieure peuvent mener à des hausses de température intérieure qui peuvent être désagréables pour les occupants du bâtiment et donc source d'inconfort [69]. En conséquence, il est nécessaire de penser au refroidissement du local dès sa conception. Le paramètre sur lequel il faut agir prioritairement est la température de l'air : il faut donc limiter les apports de chaleur à travers les murs et le toit des habitations. De ce fait, l'inertie thermique est utilisée en particulier dans le bâtiment, dans le cadre de la conception des parois opaques extérieures qui subissent les impacts thermiques du rayonnement solaire (les températures intérieures et surtout extérieures varient fréquemment) et dont les matériaux constitutifs participent à la stabilité de la température intérieure.

L'inertie thermique d'un corps est sa capacité à stocker de la chaleur et à la restituer de façon diffuse. Elle exprime une "résistance" propre à un changement d'état ou de régime, donc à des phénomènes dynamiques qui peuvent être provoqué soit par des variations de la température extérieure, ou par des variations de flux dissipées à l'intérieur du bâtiment. Schématiquement, sur des temps d'observation donnés (journaliers, saisonniers), les variations de température extérieure mais surtout les impacts thermiques du rayonnement solaire sur les parois sont périodiques.

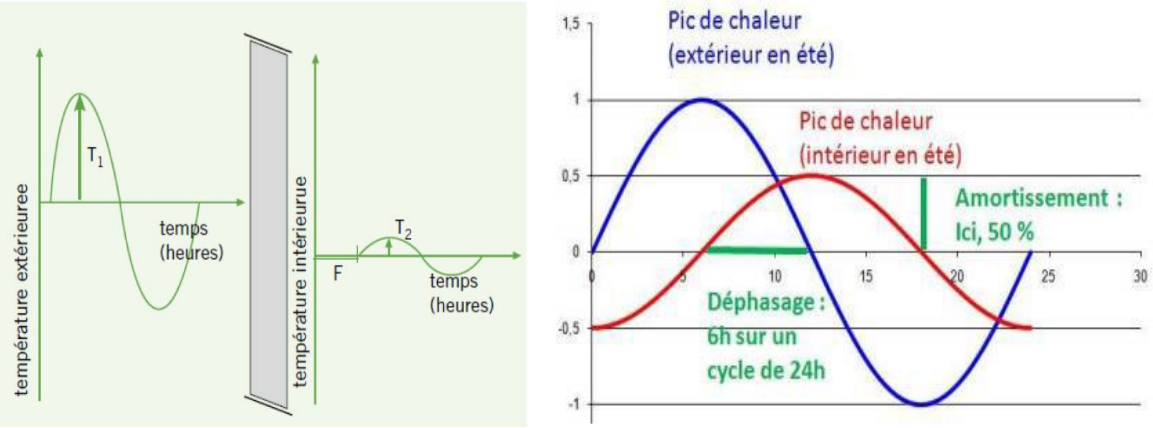



Figure 1.7 : Illustration de la notion de déphasage et d'amortissement thermique

Grâce à l'inertie thermique du bâti, la température à l'intérieur du bâtiment suit nécessairement ces variations, mais avec :

- un amortissement qui permet d'atténuer les effets des canicules ou des grands froids ;
- un déphasage thermique qui permet de retarder les effets.

### 1.2.3. Déphasage thermique

Le déphasage thermique est inhérent au régime instationnaire que génère le cycle solaire. C'est le temps horaire nécessaire pour que la température intérieure atteigne son maximum

à partir du moment où a lieu le pic de température extérieure (Figure 1.7) [81]. Cette grandeur caractérise donc la capacité d'un matériau à retarder la transmission de la chaleur au travers d'une paroi.

Pour la paroi extérieure d'un bâtiment par exemple, le déphasage thermique sera égal à l'intervalle de temps entre le moment où la température à l'extérieur atteint son maximum et le moment où la température à l'intérieur du bâtiment atteint son maximum [82]. Il s'exprime par la formule :

$$\eta = \frac{T}{2\pi} \times e \times \sqrt{\frac{\pi \rho c}{\lambda T}} \qquad 1.12$$

En considérant que la période du cycle de variation de température T correspond à 24 heures, le déphasage devient :

$$\eta = 1{,}38 \times e \times \sqrt{\frac{\rho c}{\lambda}} \qquad 1.13$$

Plus le déphasage est proche de la demi-période de calcul, plus la paroi est performante et elle diffusera la chaleur à la demi-période la plus fraîche de la journée (la nuit). Ainsi une simple ventilation naturelle ou non, pendant quelques heures, permettrait de rétablir le confort.

Ainsi, le déphasage thermique d'un matériau exprimé en heures, dépend de son épaisseur $\mathbf{e}$ et de ses propriétés notamment :

- la conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda}$ ;
- la masse volumique apparente $\boldsymbol{\rho}$ ;
- la chaleur spécifique $\mathbf{c}$.

La masse volumique apparente d'un matériau représente le rapport de sa masse $\mathbf{M}$ par rapport à son volume $\mathbf{V}$ soit $\boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{V}}$. Elle se détermine par simple pesées et mesures et s'exprime en $\mathbf{kg.m^{-3}}$ ou $\mathbf{g.cm^{-3}}$ .

La chaleur spécifique **$\mathbf{c}$ d'un matériau** est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une unité de masse de ce matériau pour élever sa température d'un degré [75]. Elle s'exprime dans le système international en $\mathbf{J.kg^{-1}.K^{-1}}$ mais l'unité $\mathbf{Wh.kg^{-1}.K^{-1}}$ est également utilisée. La chaleur spécifique d'un matériau se mesure par les méthodes calorimétriques [83].

Dans les équations de transfert de chaleur, ce paramètre apparaît plutôt sous la forme $\boldsymbol{\rho c}$. C'est la capacité thermique volumique qui représente la capacité du matériau à stocker de la chaleur par unité de volume et s'exprime en $\mathbf{J.m^{-3}.K^{-1}}$ [79].

Plus la capacité thermique volumique est élevée, plus le matériau pourra stocker une quantité de chaleur importante. Les isolants ont généralement une capacité thermique volumique assez faible. Cette grandeur est additive pour les matériaux multiconstituants en absence de réactivité thermique ou de changement de phase :

$$\rho c = \sum_{i=1}^{N} e_i \rho_i c_i \qquad 1.14$$

Par ailleurs, un matériau à grand déphasage permettra de conserver naturellement une température acceptable en journée, et de n'atteindre les maximas de température qu'une fois la nuit venue, lorsqu'une simple aération du bâtiment permet de faire redescendre la température.

En revanche, lorsque le déphasage est faible, la température maximale dans le bâtiment sera atteinte en pleine journée lorsque les températures extérieures sont encore

hautes. Ainsi, une climatisation sera parfois nécessaire afin de conserver une certaine fraicheur durant la journée.

Dans la région tropicale où se situe le Bénin en Afrique subsaharienne, le déphasage thermique serait alors l'un des paramètres essentiels dans le choix des matériaux de l'enveloppe du bâti. Ceci permettrait de garantir un confort thermique acceptable à l'intérieur du bâtiment sans le recours à des sources mécaniques de rafraichissement, sources d'importantes dépenses énergétiques et financières.
Toutefois, un déphasage important ne suffit plus pour garantir le confort à l'intérieur du bâtiment la nuit, dans les régions où la température extérieure redescend peu ou presque pas la nuit. De ce fait, la température extérieure restant élevée, la ventilation naturelle ne suffit pas pour rafraîchir l'intérieur du bâtiment.
En effet, le déphasage thermique permet de retarder le moment où l'onde de chaleur à l'intérieur du bâtiment atteindra son maximum. Mais, il est aussi important de se pencher sur l'amplitude du flux transmis à l'intérieur du bâtiment. Plus ce flux sera faible, meilleur sera le confort au sein du bâtiment, indépendamment du déphasage thermique.

Ainsi, l'amortissement thermique se révèle comme un paramètre complémentaire au déphasage thermique.

### 1.2.4. Amortissement thermique

Le facteur d'amortissement $\mu$ est le rapport des amplitudes de la température intérieure $T_2$ et de la température extérieure $T_1$ (Figure 1.7) [81] :

$$\mu = \frac{T_2}{T_1} \qquad 1.15$$

L'amortissement est obtenu par la formule :

$$\mu = 2\times e^{-\sqrt{\frac{\pi e^2}{T\lambda}\times\rho c}} \qquad 1.16$$

Plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties. Ces propriétés de l'enveloppe du bâtiment sont intéressantes car d'une part elles peuvent être évaluées en fonction de la température intérieure et fournissent des informations sur le comportement de celle-ci. D'autre part, elles peuvent aussi être calculées à partir des propriétés thermophysiques des matériaux constituant l'enveloppe [81].
En outre, on définit par $\tau$ la grandeur :

$$\tau = \frac{e^2}{\lambda}\rho c \qquad 1.17$$

$\tau$ est une constante de temps : c'est le temps mis pour atteindre un régime permanent, lorsqu'il existe. En transfert thermique, la notion de régime est très importante.

On distingue [84] :

- le régime transitoire défini par le domaine temporel où les températures dépendent du temps ;
- le régime permanent correspondant au domaine où les températures ne dépendent plus du temps mais seulement de l'espace.

En résumé, le confort thermique d'un bâtiment est dépendant du comportement des parois du bâti par rapport aux échanges de chaleur. Le déphasage et l'amortissement thermiques sont les grandeurs qui traduisent le comportement des parois face aux variations de températures entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment. Le déphasage et l'amortissement sont donc essentiels pour la respiration de la paroi conférant ainsi aux bâtiments, de jour comme de nuit, des conditions intérieures plus confortables. Plus le facteur d'amortissement est élevé, plus la paroi est performante pour maintenir le confort en période caniculaire (le jour), ce qui convient évidemment à notre pays le BENIN. Ainsi, un matériau présentant un amortissement élevé maintiendra le confort à l'intérieur du bâtiment quel que soit le déphasage. Un bon amortissement thermique du mur, ainsi qu'un déphasage important vont alors permettre de diminuer, à l'intérieur d'une construction, l'influence de la hausse de température extérieure. Ces grandeurs sont déterminées à partir des propriétés thermophysiques de la paroi que sont : la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique. Ces différentes propriétés sont liées entre elles par la relation :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \qquad 1.18$$

L'effusivité thermique noté $\mathbf{E}$ caractérise la variation transitoire de l'élévation de la température d'une surface soumise à un flux de chaleur [72]. L'effusivité traduit en effet, la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau augmente. Elle s'exprime en $\mathbf{J.m^{-2}.K^{-1}.s^{\frac{-1}{2}}}$ ou $\mathbf{W\ m^{-2}.K^{-1}.s^{\frac{1}{2}}}$.

Plus sa valeur est grande, plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur interne ou externe sans que sa température intérieure n'augmente notablement [74]. Les valeurs d'effusivité les plus élevées sont rencontrées pour les métaux. Les valeurs d'effusivité les plus faibles sont rencontrées pour les matériaux organiques tels que les polymères, le bois, la peau humaine, et les matériaux d'isolation tels que les matériaux fibreux ou alvéolaires. Ainsi, la paroi sera définie par rapport à son épaisseur et aux matériaux qui la constitue. De ce fait, les propriétés des matériaux de construction utilisés pour l'enveloppe du bâtiment, seront déterminantes dans la conception de maisons confortables et durables.

Dans le contexte ainsi défini, une bonne connaissance des matériaux de construction est alors fondamentale pour leur mise en œuvre efficiente dans le bâtiment.

## 1.3. Matériaux de construction

Les matériaux de construction figurent, à côté de l'énergie et de l'eau, parmi les ressources les plus demandées dans le monde : des millions de tonnes sont en jeu et immobilisées chaque année dans les infrastructures et les bâtiments. Une gamme très importante et diversifiée de matériaux existe et est exploitée en construction.

### 1.3.1. Classification des matériaux de construction

Les matériaux sont classés suivant différents critères comme par exemple leur composition, leur structure ou leurs propriétés.
En pratique dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon le domaine d'emploi et selon leurs propriétés principales (résistance, compacité) : les matériaux de protection et les matériaux de construction ou de résistance [85].

- Les matériaux de protection sont des matériaux qui ont la propriété d'enrober et de protéger les matériaux de construction principaux. Il s'agit des revêtements : enduits, peintures, bitumes, etc.
- Les matériaux de construction (ou de résistance) sont des matériaux qui ont la propriété de résister contre des sollicitations (forces) importantes (poids propre, surcharge, séisme, chaleur.) : pierre, bois, béton, métaux, brique de terre cuite, etc. Ces matériaux peuvent être classés en deux grandes catégories notamment les matériaux traditionnels d'origine naturelle ou matières premières et les matériaux modernes, produits et composites [78], [85].
    - Les matériaux traditionnels d'origine naturelle ou matières premières comprennent la pierre, le bois, les sols argileux. La pierre est d'utilisation très ancienne, s'expliquant par sa disponibilité, sa grande résistance et sa durabilité. Cependant, elle est difficile à façonner et à mettre en œuvre. Aujourd'hui, la construction en pierre se limite à des travaux de rénovation de constructions anciennes. Le bois est toujours apprécié en construction au regard de sa mise en œuvre aisée, ses propriétés mécaniques (résistance en traction), son pouvoir isolant. Aussi, le bois peut être employé au niveau de la structure porteuse des bâtiments. Il présente néanmoins, des qualités variables selon l'âge, l'essence, l'origine géographique, les conditions de séchage [78]. L'utilisation de la terre crue (sols argileux) dans le passé se justifiait, par sa disponibilité, sa mise en œuvre aisée et peu couteuse (techniques de construction en pisé ou torchis et briques de terre crue). Cependant, les constructions en terre sont souvent confrontées aux problèmes de durabilité liés à l'instabilité des sols argileux vis-à-vis de l'humidité, d'où la naissance de différentes techniques de stabilisation.

      Ces différents problèmes révélés par les matériaux traditionnels sous-tendent la naissance et le développement des matériaux modernes de construction basés sur la transformation des matières premières en d'autres produits plus performants mais impliquant de grandes dépenses économiques et énergétiques avec pour corollaire un impact négatif sur l'environnement.
    - Les matériaux modernes, produits et composites regroupent essentiellement le ciment, les alliages, le béton, l'argile cuite.

De façon générale en sciences des matériaux, selon la composition et la structure, il est possible de classer les matériaux en trois catégories comme l'indique la Figure 1.8 : les métaux et alliages, les polymères et les céramiques. Cette classification est basée sur la nature des liaisons et sur les structures atomiques. Les trois catégories de matériaux peuvent être combinés pour former des matériaux composites. Un matériau composite est formé de deux ou de plusieurs matériaux différents qui combinent de manière synergique leurs propriétés spécifiques [85].

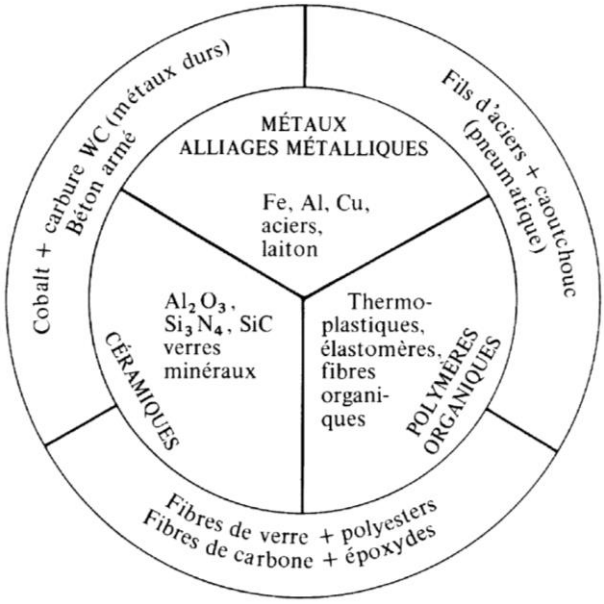



Figure 1.8 : Classes de matériaux : métaux, céramiques et polymères avec quelques combinaisons pour former des matériaux composites [85]

Le choix d'un matériau devant servir dans la construction tient compte de ses propriétés et de sa destination dans l'ouvrage. Ainsi, les critères de choix d'un matériau de construction doivent prendre en compte les facteurs suivants :

- les fonctions principales du matériau dans la structure (modes de mise en charge, températures et conditions générales d'utilisation) ;
- le comportement du matériau (résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité, etc.) ;
- le comportement du matériau durant les étapes de fabrication et de transformation ;
- le comportement vis-à-vis de l'environnement ;
- le prix de revient ;
- les possibilités de recyclage ou d'élimination par incinération avec récupération d'énergie.

Par ailleurs, l'argile est une ressource minérale écologique et abondante que l'on trouve localement et dont l'extraction n'abîme pas l'environnement naturel. De plus, l'argile possède de grandes propriétés économiques et son état réversible (mou/humide à dur/sec) la rend apte à la réutilisation. Sa dégradation n'est pas problématique pour l'environnement. Tous ces avantages justifient l'intérêt porté à l'utilisation de cette matière première pour l'élaboration des matériaux céramiques.

### 1.3.2. Matériaux céramiques

Les céramiques sont parmi les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme mais aussi les plus récents [85]. Leur nom provient du grec ancien « Keramos » qui signifie « terre cuite » ou « terre à potier » [86], [87]. Le terme « céramique » ne s'applique donc pas lorsque seule l'opération de séchage, même très prolongée, est mise en œuvre [85].

La diversité des matériaux céramiques est particulièrement grande. Ceci est dû, d'une part, à la multiplicité de leurs composés et, d'autre part, au grand nombre d'utilisations possibles de ces matériaux. L'élaboration des différentes familles de céramiques met en jeu les mêmes opérations mais dans un ordre différent (Tableau 1.1). Ainsi, les matériaux céramiques se distinguent par leur mode d'élaboration [86], [88]. Elle peut se faire soit par frittage, soit par fusion (à relativement haute température) ou soit par prise (à température ambiante pour les liants minéraux). Lorsqu'un des composants reste à l'état solide lors de la cuisson, le procédé est appelé frittage : il y a ou non formation de phases vitreuses selon qu'il y a fusion ou non d'un ou plusieurs composants. C'est ce qui se produit au cours de l'élaboration des céramiques traditionnelles et des céramiques techniques. En revanche, quand il y a fusion de tous les composants, le procédé est appelé fusion. C'est le cas des verres, des vitrocéramiques et des réfractaires électro-fondus [87].

Tableau 1.1 : Étapes d'élaboration des céramiques [88]

| Famille de céramiques | 1ère étape | 2ème étape | 3ème étape |
|---|---|---|---|
| Céramiques traditionnelles ou techniques | Poudre | Mise en forme | Traitement thermique |
| Verres | Poudre | Traitement thermique | Mise en forme |
| Liants minéraux | Traitement thermique | Poudre | Mise en forme |

Les différentes céramiques sont classifiées selon leur utilisation. On distingue [89] :

- les céramiques d'art qui caractérisent d'un point de vue historique, les plus anciennes (environ 30 000 ans av. J.C.) céramiques, généralement constituées des objets à vocation probablement votive, artistique et utilitaire (poterie pour la table).
- les céramiques techniques qui forment une nouvelle génération de céramiques, largement utilisées par les technologies avancées. Elles constituent un pôle extrêmement important de développement technologique [85]. Il s'agit des types suivants :
  - des biocéramiques : prothèses dentaires et prothèses osseuses.
  - des céramiques en relation avec l'électricité : les céramiques pour l'électronique et la microélectronique, les capteurs céramiques, les piles à combustible, les céramiques supraconductrices.
  - des céramiques thermomécaniques : les réfractaires et barrières thermiques, les abrasifs et outils de coupe, les produits en devenir, les revêtements céramiques.
  - des autres céramiques à usages spécifiques : les céramiques à usage optique, les céramiques pour l'industrie nucléaire.

- les produits blancs qui sont utilisés dans le bâtiment ou à la cuisine :
  - les céramiques pour le sanitaire,
  - la porcelaine de table.

- les produits rouges qui se composent :
  - des tuiles,
  - des briques ;
  - des carrelages ;
  - des tuyaux d'assainissement de moyens ou forts diamètres en grès produits et utilisés principalement en Europe du nord.

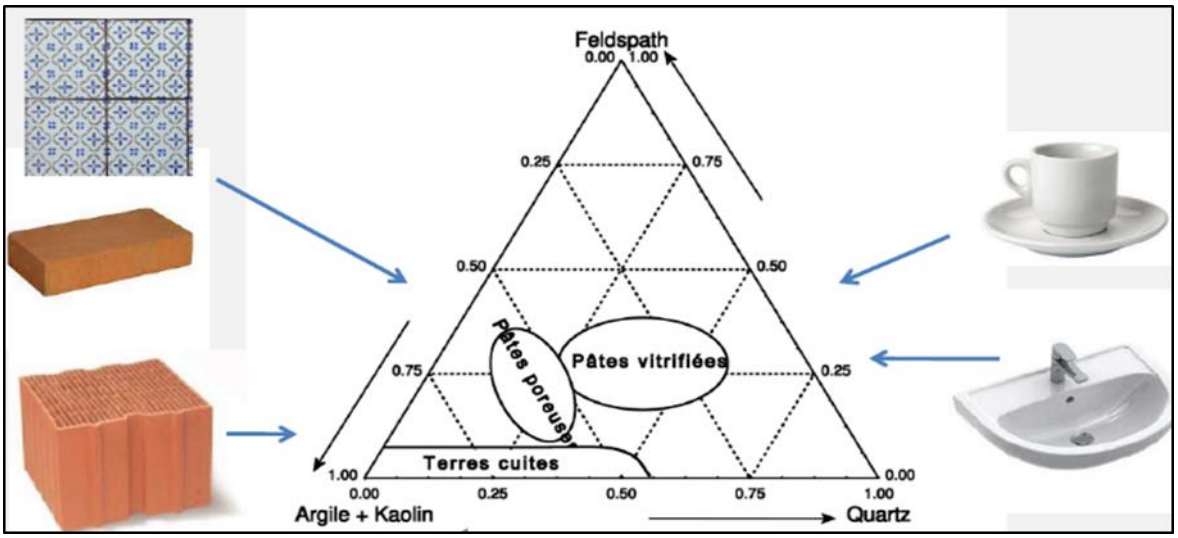



Figure 1.9 : Céramiques usuelles

Les « produits rouges » sont identifiés souvent comme « céramiques pour le bâtiment ». Mais, la qualité et les performances de ces produits dépendent du soin apporté au procédé de fabrication qui met en œuvre différentes étapes essentielles et importantes.

## 1.4. Fabrication des briques d'argile cuite

La composition, les conditions de cuisson et les porosités des céramiques pour le bâtiment sont sensiblement les mêmes. Ainsi, les matières premières les plus couramment utilisées dans la fabrication des briques cuites sont d'une part, les matières premières plastiques et d'autre part, les éléments dégraissants. L'eau est également utilisée pour adapter la plasticité de la pâte [90].

### 1.4.1. Matières premières plastiques : les argiles

La matière première naturelle de la brique de terre cuite est l'argile. Il faut entendre « argile » au sens large et considérer également les terres limoneuses et schisteuses : matières premières de même composition minéralogique que l'argile ; contenant une forte proportion d'argile, qui leur donne leur aptitude au façonnage et leurs propriétés mécaniques après cuisson.

#### 1.4.1.1. Différentes familles et structures des argiles

De façon générale, on distingue les argiles grasses ou maigres suivant qu'elles sont très ou peu plastiques, les argiles grésantes ou réfractaires selon leur comportement à la cuisson, les argiles smectiques (absorbantes et dégraissantes).

La phase solide des sols argileux est structurée suivant une organisation spatiale particulière : le feuillet, la particule et l'agrégat [91].

- Le feuillet est défini comme une superposition de plans ioniques organisés suivant deux types de couches. Il représente l'élément de base constitutif d'une argile et joue par conséquent un rôle très important dans la connaissance des caractéristiques de celle-ci et de son comportement hydromécanique.
- La particule (appelée aussi cristallite ou tactoïde) est un empilement (superposition) de feuillets argileux suivant différentes configurations, qui peut atteindre une taille maximale de 2 µm. La position des feuillets les uns par rapport aux autres et le nombre de feuillets par particule, sont variables suivant le type d'argile considéré et sont également fonction de son état hydrique. L'espace entre deux feuillets est appelé espace interfoliaire (interstice) dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs nanomètres.
- L'agrégat (appelé aussi grain) est un assemblage désordonné entre les particules d'argile dont la forme et les dimensions peuvent varier. À l'échelle de l'agrégat, trois niveaux structuraux peuvent alors être distingués : l'infrastructure qui correspond à la particule argileuse, la microstructure qui correspond aux agrégats formés par l'assemblage des particules argileuses et des autres éléments du sol et la macrostructure qui correspond à l'assemblage macroscopique des agrégats.

L'approche microstructurale de base qui permet d'expliquer le comportement réel des argiles gonflantes doit tenir compte de ces différents niveaux structuraux. Ceci n'est pas du tout évident dans la pratique, car il est difficile d'établir une relation entre ces différents niveaux. Pour simplifier, le nombre de niveaux structuraux est limité à deux : le niveau microstructural où sont réunis l'infrastructure et la microstructure et le niveau macrostructural. C'est ce que les auteurs qualifient de double structure.

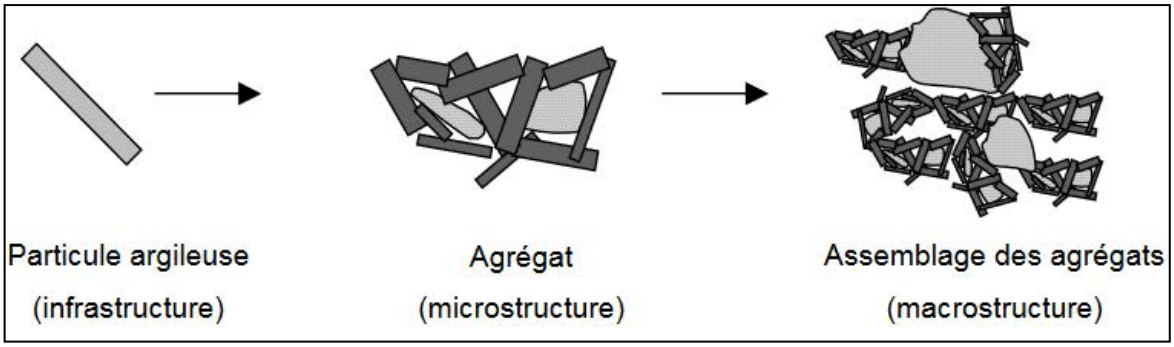



Figure 1.10 : Différents niveaux structuraux d'une argile [91]

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium, mais parfois de silicates de magnésium), dont la structure feuilletée permet de les ranger dans la famille des phyllosilicates. Ils sont issus de la désagrégation lente (pendant des millions d'années) des roches granites et pegmatites. Ces roches contiennent environ 60% de feldspath, qui engendre la kaolinite, le minéral mère des argiles, 30% de quartz, 5% de mica. Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles.

Les argiles se présentent sous forme de très petits feuillets [92] dont la structure est caractérisée par la superposition de deux couches : couches octaédriques [$Al(OH)_6$] et tétraédriques [$SiO_4$] reliées par les atomes O et OH mis en commun. Ces deux couches peuvent s'associer de différentes façons. D'après la structure du feuillet, on distingue principalement deux grandes familles de phyllosilicates : les phyllosilicates TOT (2 :1), composés de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique et les TO (1:1) dont le feuillet élémentaire est constitué d'une couche tétraédrique associée à une couche octaédrique. La liaison entre les feuillets élémentaires des phyllosilicates est assurée par des forces de valence secondaire, ce qui explique le clivage aisé de ces minéraux et leur structure lamellaire. L'espace inter-réticulaire sépare deux feuillets successifs. Des couches d'eau viennent souvent s'intercaler entre les feuillets, ce qui est à l'origine des propriétés « plastiques » des argiles. Cette caractéristique est notamment exploitée lors du moulage des céramiques traditionnelles au départ d'une pâte aqueuse (barbotine).

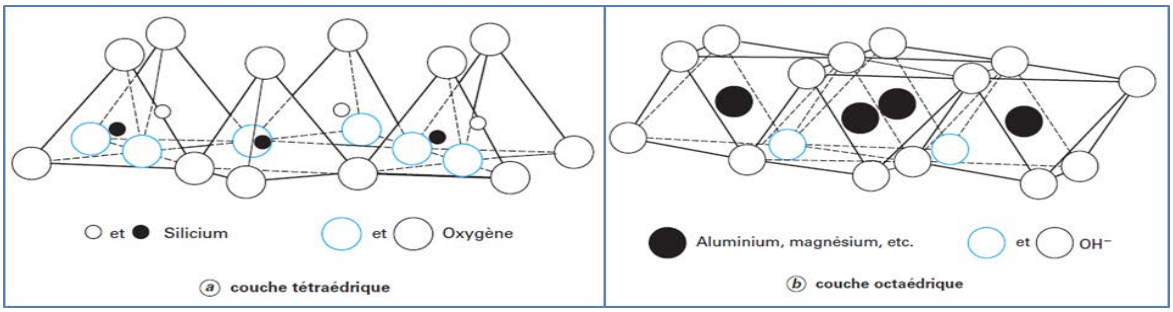



Figure 1.11 : Couches T et O des argiles [90]

Les principaux critères de classification des argiles sont basés sur les paramètres que sont : la combinaison de feuillets, le type de cations dans l'octaèdre, la charge de la couche, la nature des espaces dans l'espace interfoliaire (cations, molécules d'eau...). Quelques critères secondaires sont le mode d'empilement, la composition chimique et le type d'espèces

argileuses [93]. Suivant l'arrangement des couches dans le feuillet et les substitutions ioniques, on obtient les nombreuses argiles dont les principales sont :

- la kaolinite $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ [93],[94] ;
- l'illite $KAl_2(OH)_2$, $(AlSi_3(O, OH)_{10})$ [87], [93] ;
- les smectites [95] et
- les chlorites $Mg_5(Al,Fe)(OH_8)(Al,Si)_4O_{10}$.

Le Tableau 1.2 présente les caractéristiques fondamentales des principales familles d'argiles. Les smectites sont des argiles qui présentent une forte expansion à l'humidité. La kaolinite présente une faible activité électrochimique et montre de faible retrait au séchage et à la cuisson. Elle demande des températures de cuisson élevées et elle est assez réfractaire après cuisson. L'illite apporte de la plasticité : c'est le type d'argile le plus utilisé dans la terre cuite.

Tableau 1.2 : Comparaison des propriétés de différentes argiles [87], [96]

| Minéraux | Kaolinites | Illites | Smectites | Chlorites |
|---|---|---|---|---|
| Type de feuillet | TO | TOT | TOT | TOT |
| Épaisseur du feuillet (Å) | 7 | 10 | 10-20 | 14,1 |
| Taille d'une particule (µm) | 0,1-10 | 0,1-1 | 0,1 | |
| Nombre de feuillets par particule | 10-150 | 5-20 | 1-10 (montmorillonite sodique)<br>10-40 (montmorillonite calcique) | Une centaine |
| Surface spécifique ($m^2/g$) | 5-20 | 100-200 | 700-800 | 5-20 |
| Capacité d'échange cationique en centimoles/kg (CEC) | 3-15 | 10-40 | 80-150 | 10-40 |
| Charge (méq/100g) | 5-15 | 20-40 | 80-100 | |
| Charge des couches/formule | Neutre | Négative faible charge (0,2 à 0,6) | Négative forte charge (0,8 à 0,9) | Positive |
| Cations absorbés en compensation | Sans | $K^+$ secs entre feuillets et externes | $Na^+$, $Ca^{2+}$ hydratés entre feuillets et externes | $Mg^{2+}$ externe |
| Expansion à l'humidité | Faible | Faible | Élevée | Faible |

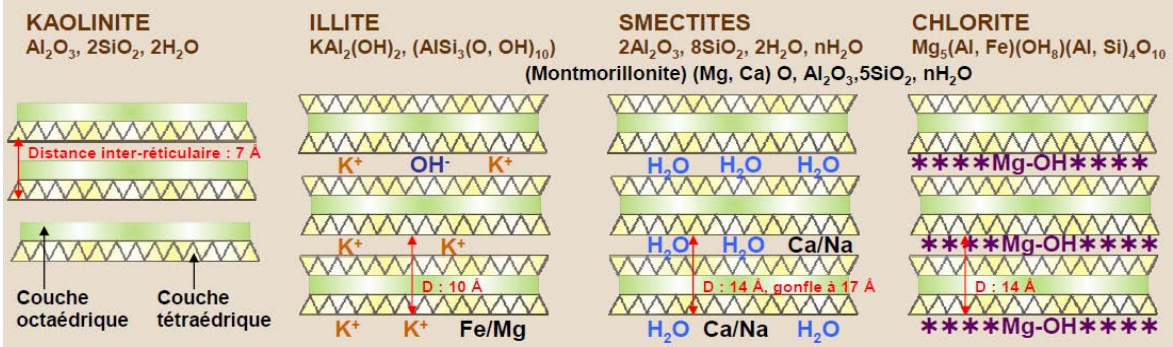



Figure 1.12 : Structure des principales familles d'argile [87], [93], [95]

### 1.4.1.2. Minéraux accessoires des argiles

Les matériaux argileux sont associés à des quantités considérables d'impuretés sous forme d'autres minéraux, qui peuvent jouer des rôles non négligeables au cours de la cuisson. Aussi, les impuretés rendent les matériaux cuits moins résistants à la corrosion chimique [97]. Certains composés minoritaires sont principalement associés aux phyllosilicates dominants dans les argiles [98].

- La silice libre : elle existe dans presque toutes les argiles de terre cuite sous forme de grains de quartz. Elle joue un rôle de dégraissant en diminuant la plasticité des argiles très grasses et en réduisant considérablement le retrait à la cuisson.
- La calcédoine et l'opale sont des formes peu cristallisées et hydratées de la silice souvent sous la forme de silex.
- Les oxydes et hydroxydes de fer (goethite- FeOOH, hématite $Fe_2O_3$) sont finement répartis dans la masse argileuse et sont responsables le plus souvent de la coloration des argiles crues. Ce sont des fondants énergétiques et brutaux.
- Le sulfure de fer : le fer peut exister sous forme de pyrite ou marcassite ($FeS_2$) pouvant colorer les argiles en vert lorsqu'ils sont finement répartis. Les sulfures de fer peuvent être nuisibles lorsqu'ils sont en quantité notable ou en grains, c'est le phénomène d'efflorescences de séchage, apparition de taches de rouille, éclatement des produits cuits.
- Les alcalins ($Na_2O$ et $K_2O$) : proviennent quelquefois des feldspaths non décomposés.
- Les alcalino-terreux : le plus souvent rencontrés sous forme de carbonate (calcite $CaCO_3$, magnésite $MgCO_3$, dolomite $MgCa(CO_3)_2$).
- Les oxydes de titane qui se présentent dans les argiles sous forme de Rutile ($TiO_2$) ou d'ilménite ($FeO$, $TiO_2$). Ils accentuent la coloration due aux sels de fer.
- D'autres constituants peuvent être également trouvés en faible proportion, tels que les minéraux de métaux lourds (plomb, zirconium…), les sels solubles comme les sulfates alcalins ou alcalino-terreux (gypse $CaSO_4.2H_2O$).
- Les matières organiques proviennent de la décomposition des végétaux et sont présentes à l'état colloïdal (humus): pollens, spores, débris ligneux et matières amorphes. Celles-ci sont généralement responsables de la coloration grise, brune, noire, violette etc. des argiles. À l'état colloïdal, elles améliorent la plasticité des argiles. En tant qu'agents réducteurs, elles favorisent la solubilisation et l'élimination des sels de fer. C'est la raison pour laquelle certaines argiles organiques très foncées cuisent cependant clair voire blanc. Le pourcentage de perte au feu qui représente la perte en masse après

calcination, mentionné dans les analyses chimiques, renseigne sur la présence des matières organiques dans l'argile [87].

La teneur en fer, titane et manganèse détermine la couleur de l'argile cuite. Quand la concentration en fer est supérieure à 5 %, la couleur après cuisson en atmosphère oxydante est rouge, couleur de l'hématite. En revanche, si la concentration en calcium est supérieure à 7 %, la couleur tourne au jaune car le fer est maintenant sous la forme de ferrite de calcium. Un autre facteur important est le rapport entre oxydes de fer et alumine. Il est donc possible de modifier la couleur d'une terre cuite en modifiant sa composition, d'abord en jouant sur le rapport fer/calcium par ajout de calcaire, de dioxyde de manganèse (1 à 4 %) ou d'oxyde de titane [99].

La composition minéralogique de l'argile peut avoir certaines conséquences sur les propriétés du produit final et sur le procédé de fabrication. Le Tableau 1.3 présente les principales conséquences de la minéralogie des argiles sur le processus d'élaboration des produits.

Tableau 1.3 : Principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile [90], [100]

| Minéral | Plasticité, cohésion, susceptibilité aux feuilletages | Difficulté de séchage | Cuisson |
|---|---|---|---|
| Kaolinite | Augmente la plasticité | Difficulté limitée | Rend plus réfractaire, élargit la zone de vitrification |
| Illite | Possède une bonne plasticité | Difficulté moyenne | Agit comme flux grésant/fondant |
| Smectite Montmorillonite | Possède une très grande plasticité et grande cohésion | Grande difficulté, retrait important et rétention capillaire | Améliore la compacité |
| Mica (muscovite) | Réduit la plasticité, favorise les feuilletages, effet dégraissant | Limitée | - |
| Quartz | Réduit la plasticité et la cohésion, effet dégraissant et favorise les feuilletages | Limitée | Rend plus réfractaire, apporte sensibilité au refroidissement (point de quartz) |
| Feldspath | Réduit la plasticité, effet dégraissant | Limitée | Agit comme flux grésant au-dessus de 1000°C |
| Carbonates | Effet dégraissant | Limitée | Action sur la couleur, augmente la porosité |
| Oxyde de fer | Limitée | Limitée | Action sur la couleur, agit comme flux grésant |

Selon les auteurs [90], [101], [102], les limites admissibles d'utilisation des matières premières argileuses en céramique sont classées et regroupées dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique [90], [101], [102]

| Nature des éléments | Formulation | Tolérance (%) | Effets sur produits finis |
|---|---|---|---|
| Silice | $SiO_2$ | 35-85 | Réfractarité, contraction de la masse, … |
| Alumine | $Al_2O_3$ | 9-45 | Réfractarité, résistance mécanique, couleur blanche |
| Magnésie | MgO | 0-5 | Porosité |
| Chaux | Ca0 | 0-25 | Porosité |
| Oxyde de Manganèse | MnO | ? | Couleur noire |
| Oxyde de fer (oxyde ferrique III) | $Fe_2O_3$ | 0-9 | Couleur rougeâtre ; fondant |
| Oxyde de Titane | $TiO_2$ | 0,3-2 | Couleur jaune |
| Oxydes alcalins | $Na_2O+K_2O$ | 1-5 | Fondants |
| Gaz carbonique | $CO_2$ | 0-13 | Volume |
| Anhydride sulfurique | $SO_3$ | 0-3 | Volume/Toxicité |
| Eau de combinaison | $H_2O$ | 5-11 | Volume/Poids |

1.4.1.3. Constituants des argiles préjudiciables à la fabrication des briques cuites

La composition chimique et les proportions des éléments chimiques des argiles jouent également un rôle primordial dans la qualité des produits finis. Parmi les éléments à éviter dans la matière première, surtout si celle-ci est destinée à la production des briques et tuiles, on peut citer notamment :

- la craie en gros grains qui se transforme au cours de la cuisson en chaux vive ; ces nodules font éclater le produit en présence de l'humidité. Mais il faut noter que la chaux entraîne la plupart du temps les colorations claires, confère un bon palier de cuisson mais une fusion brutale, augmente la porosité des produits ;
- les sels solubles (sulfates, etc.), qui cristallisent en surface, diminuent de volume à la cuisson et déforment la surface des produits finis suite à l'échappement du gaz sulfurique [103] ;
- les pyrites présentent le même effet que les nodules de chaux ; des teneurs en soufre sont nuisibles car cet élément est susceptible d'être évacué dans les fumées lors de la cuisson (problème environnemental) ;

- les impuretés organiques (racines, débris végétaux et matières organiques) qui brûlent à la cuisson, laissant des vides dans la masse et créant des produits poreux et des taches sombres.
- les pierrailles en gros grains éclatent à la cuisson ; une quantité de sodium ou de potassium supérieure à 2% empêche la stabilisation et un sol ayant un pH >10 ou pH<4,5 est à éviter.

#### 1.4.1.4. **Différents types d'eau dans les argiles**

L'eau joue un rôle important dans le comportement des argiles, puisqu'elle détermine leurs propriétés rhéologiques et mécaniques (telles que la plasticité, le compactage et la cohésion). L'eau peut être présente dans l'argile sous différente formes ; de la plus stable à la moins stable, on distingue [91] :

- ***L'eau de constitution*** encore appelée *eau combinée* est liée chimiquement aux molécules d'argile et figure dans la formule chimique décrivant la matière. Elle ne peut être extraite qu'en portant la matière à haute température pour détruire les liaisons chimiques [91],[96].
- ***L'eau d'hydratation*** aussi appelée eau zéolitique, eau liée ou encore eau adsorbée est physiquement liée à la surface de la matière solide, essentiellement sur les parois des capillaires. Par des phénomènes électriques, elle forme une fine pellicule sur la surface libre des particules et représente 6 à 7 % de la teneur en eau totale. L'origine de ce phénomène est due à l'existence d'un déficit de charge et à la présence de sites hydrophiles sur les particules argileuses. La jonction de ces sites hydrophiles hydratés forme un film d'eau continu, constitué des couches mono moléculaires, sur lesquelles apparaît le phénomène d'adsorption. Les molécules d'eau adsorbées peuvent facilement se mouvoir le long de la surface du minéral et difficilement dans le sens perpendiculaire. Pour une argile donnée, la rétention d'eau dépend essentiellement de la taille des particules et de celles des agrégats, du type de porosité et de l'énergie d'hydratation des cations compensateurs [104]. La couche d'eau adsorbée s'évapore facilement à relativement basse température, lorsque le taux d'humidité relative descend en dessous de 50% ; elle se condense si le taux d'humidité relative dépasse 50% ; son évaporation provoque un retrait de la matière [96].
- ***l'eau absorbée*** est l'eau hygroscopique qui se fixe dans les premières couches autour des feuillets d'argile. La chaleur d'adsorption est de l'ordre de 2 650 kJ/$kg_{eau}$.
- ***l'eau d'interposition*** est l'eau qui reste entre les particules quand il n'y a plus de retrait. Elle part dans la deuxième partie du séchage. Elle est en équilibre avec l'humidité de l'air extérieur.
- ***l'eau colloïdale*** représente l'eau autour des particules, entre la limite de retrait et la limite de liquidité. Elle intervient dans la plasticité et le séchage se fait avec retrait.
- ***l'eau libre*** est celle qui peut occuper les macropores entre les agrégats lorsque la matière est mouillée, ou subit la condensation de la vapeur contenue dans l'air ambiant. Cette eau est libre de circuler facilement dans le milieu. Son évaporation est facile et ne provoque aucun retrait. Elle s'évapore complètement lorsqu'un échantillon de sol est placé en étuve à une température constante de 105°C.
- ***l'eau interstitielle*** est constituée de l'eau capillaire et de l'eau libre ; elle n'est pas liée chimiquement, mais est retenue entre les feuillets, dans les plans « interfeuillets », par des liens « hydrogène » ; son évaporation provoque un important retrait.

Elle se présente sous forme d'eau libre lorsque le sol est saturé et baigne dans une nappe phréatique. Dans le cas des argiles non saturées, l'eau capillaire occupe les micropores sous forme de ménisques au contact entre les grains et l'eau, créant ainsi entre ces derniers des forces d'attraction. Son écoulement est produit par un gradient de succion à l'échelle des pores et traduit la loi de Darcy [96].

### 1.4.2. Matières premières non plastiques : les inertes

Vu leur forte plasticité, les argiles naturelles peuvent entrainer des difficultés de fabrication (une forte humidité de façonnage, un séchage lent et un retrait de séchage important). Pour réduire la plasticité de l'argile, il est donc nécessaire d'utiliser des éléments de nature non plastique qui donnent aux produits une texture moins compacte. Ces matières peuvent être considérées comme inertes du point de vue physico-chimique dans les conditions de leur emploi en tant qu'ajout [101].

Les inertes, aussi appelés matières dégraissantes, ont pour objectif de diminuer un excès de plasticité qui se traduit par des fissurations et déformations des produits lors du séchage. L'absence de retrait des inertes permet de limiter le retrait global de la pâte d'argile. Cela facilite l'évacuation d'eau pendant le séchage et les dégagements gazeux pendant la cuisson et permet une meilleure oxydation à cœur des produits en limitant ainsi l'apparition de cœur noir [101].

La granulométrie des inertes joue un rôle majeur dans la structure du produit cuit. Une granulométrie grossière permettra de limiter fortement le retrait ce qui facilitera le séchage. Dans le cas d'une granulométrie fine, le dégraissant diminue moins la plasticité du mélange, ce qui rend le séchage plus difficile : l'extraction de l'eau est plus difficile. Les produits cuits seront plus denses et plus rigide.

Contrairement au facteur de forme (géométrie, granulométrie), la nature chimique des inertes n'influence pas le comportement mécanique de la pâte avant cuisson. C'est au cours de la phase de cuisson que les inertes jouent des rôles différents en fonction de leur nature. On distingue deux familles de dégraissants : les dégraissants combustibles et les dégraissants stables.

- Les dégraissants combustibles, qu'ils soient végétaux (débris de paille, pulpe de papier) ou minéraux (poussière de charbon, coke, …) se consument au cours de la cuisson et créent ainsi des porosités.
- Les dégraissants stables restent au cours de la cuisson comme par exemple les chamottes qui sont des compositions argileuses calcinées. Lorsque la cuisson de la chamotte a été effectuée à des températures inférieures à la température de cuisson de la pièce, les chamottes subiront un peu de retrait lors de la cuisson de la pièce d'argile. En revanche, elles auront strictement un rôle de dégraissant si leur température de cuisson est supérieure ou égale à la température de cuisson de la pièce d'argile.

Certains dégraissants (les fondants) sont utilisés pour diminuer la température de fusion des argiles. C'est le cas des silicates naturels (feldspaths, micas, …) et des oxydes de fer. Les fondants ne jouent leurs rôles que lorsque la température de cuisson dépasse la température à laquelle ils se combinent. Pour des températures plus faibles, ils se comportent comme une matière dégraissante classique [105].

En revanche, l'utilisation des dégraissants diminue la plasticité du mélange, réduit la compacité et les propriétés mécaniques après cuisson. Parmi les éléments dégraissants les plus couramment utilisés, on peut citer :

- Le sable de granulométrie 0,2 à 1mm, à des doses pouvant atteindre 30%. Le sable est généralement constitué de silice, de feldspaths et de mica. Le quartz est stable thermiquement, mais il subit des transformations allotropiques à 573°C [106].
- La chamotte : il s'agit de l'argile déjà cuite. Elle est fréquemment utilisée pour la production de boisseaux de terre cuite. L'ajout de la chamotte donne une texture grossière et engendre une baisse de la dilatation thermique et donc une amélioration de la résistance au choc thermique. Elle diminue le grésage et favorise la production de produits poreux [106].
- Les cendres volantes de centrales thermiques alimentées au charbon pulvérisé. Ce matériau est utilisé dans différents pays comme l'Allemagne, l'Angleterre et la chine, à des doses variant entre 10 et 50% [107],[25].
- Les roches broyées (basaltes, micaschistes, granite). L'utilisation des roches dures provoque, suivant la température de fusion de la roche, un effet comparable à celui de la chamotte ou un grésage [108], [109].
- Les laitiers granulés de hauts fourneaux ;
- Des éléments combustibles tels que le mâchefer, le fraisil, les schlamms (résidus de lavage des charbons) ou des débris végétaux divers (sciure de bois, etc.) [100].

### 1.4.3. Ajouts spéciaux dans la formulation des briques d'argile cuite

Outre les argiles et les dégraissants, il est souvent nécessaire d'ajouter aux mélanges de fabrication des constituants spéciaux, soit pour corriger un défaut propre à la nature de certaines matières premières, soit pour réaliser des produits présentant des caractéristiques particulières. Les principaux ajouts utilisés sont [100] :

- le bioxyde de manganèse : dans des argiles ferrugineuses, des doses de 2 à 3% par rapport au poids sec permettent l'obtention de produits présentant une belle couleur brune ;
- l'oxyde de titane permet d'obtenir avec certaines argiles à des doses de 1,5 à 2% des produits de couleur orangée ;
- le carbonate de baryum, le carbonate de calcium finement broyé, le carbonate de sodium, la chaux vive ou éteinte, le chlorure de sodium, à des doses de quelques pour-mille, permettent de résoudre certains problèmes de fabrication.

Dans le but de diminuer la conductivité thermique de la brique pour obtenir des résistances thermiques élevées des murs, les fabricants utilisent des ajouts dits porosants, qui augmentent la porosité du produit final. Il existe plusieurs types d'ajout qui augmentent la porosité comme :

- le calcaire/carbonates qui ont un effet porosant et créent des microporosités à haute température [110] ;
- les composés inertes et stables thermiquement : argile poreuse, vermiculite (phyllosilicates), verre poreux ;
- les composés organiques : déchets végétaux, poudre de charbon, etc... vont se décomposer, brûler et dégager du $CO_2$, ce qui engendre une augmentation de porosité [111]. La quantité maximale d'additions porosant est limitée par la baisse associée des propriétés mécaniques de la brique.

### 1.4.4. Eau de confection des briques d'argile cuite

La capacité d'une galette d'argile à être formée et à garder sa géométrie est fortement liée à sa teneur en eau. Si l'on considère une poudre d'argile sèche à laquelle on rajoute de l'eau petit à petit, on atteint une première concentration d'eau où l'argile devient « plastique ». La pâte peut alors être mise en forme sans fissurer. En continuant l'ajout d'eau, on atteint une deuxième concentration d'eau limite où le mélange devient liquide. La pâte ne conserve plus la forme qui lui est donnée. Il est nécessaire de positionner le mélange entre ces deux limites lors de la mise en forme. En règle générale, les argiles demandent d'autant plus d'eau pour leur façonnage qu'elles sont plus plastiques. La plasticité d'une argile dépend de sa nature minéralogique, du pourcentage d'éléments inertes qu'elle contient (sable, etc.) et de sa finesse (plus elle est fine, plus elle est plastique). Les produits sont façonnés avec une teneur en eau de 15 à 30% (chiffres exprimés en % par rapport à la masse sèche).

### 1.4.5. Étapes de fabrication des briques d'argile cuite

La fabrication des briques de terre cuite comprend différentes étapes, comme montré à la Figure 1.13. Les plus importantes sont : l'extraction des matières premières, la préparation de la pâte, le façonnage, le séchage, la cuisson, le conditionnement et l'expédition [112].

#### 1.4.5.1. Extraction de l'argile

La première étape consiste en l'extraction de la matière première dans une carrière située à proximité de l'usine. L'argile est par la suite acheminée par camions jusqu'à l'usine puis entreposée dans une aire de stockage où on la laisse reposer.

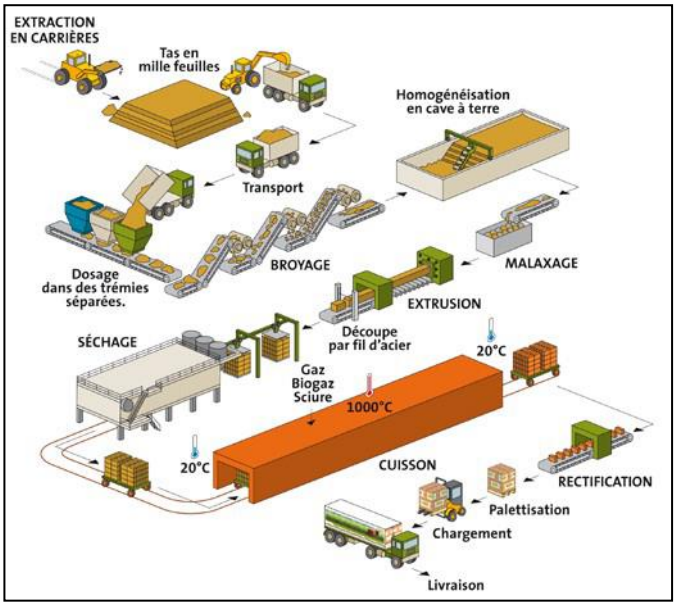



Figure 1.13 : Étapes de fabrication de briques en terre cuite [112]

#### 1.4.5.2. Préparation de la pâte

L'argile provenant de l'aire de stockage est ensuite acheminée vers le concasseur pour subir un premier broyage, ensuite vers le laminoir primaire qui à son tour le réduit en fines

paillettes. Ces opérations ont pour but de réduire les inclusions solides telles que les inclusions de chaux qui peuvent éventuellement être présentes dans l'argile et qui risquent d'affecter négativement l'aspect du produit. La matière passe par la suite dans le mouilleur mélangeur pour être humidifiée et homogénéisée avant d'être stockée dans l'excavateur : il s'agit du « pourrissage » de la pâte d'argile. En effet, l'argile contient des débris organiques qui peuvent altérer la qualité de la brique. Ces débris ne peuvent être éliminés que par l'action bactériologique. À cette fin, l'argile est entreposée pendant au moins deux semaines dans un silo humide et sombre (l'excavateur) favorisant le développement de ces bactéries. Toujours par l'intermédiaire de tapis roulants, l'argile provenant de l'excavateur, passe par un mouilleur mélangeur puis par la trémie de repos avant d'aboutir au laminoir finisseur pour subir un broyage et une friction supplémentaires. L'argile est ainsi réduite en fines paillettes. Du laminoir finisseur, l'argile est acheminée vers le malaxeur pour ajuster la teneur en eau et garantir une bonne plasticité de la pâte. C'est également à cette phase que, les additifs et dégraissants éventuels qui auront une influence sur la plasticité, la couleur, le retrait au séchage, le comportement à la cuisson des produits, sont ajoutés à la pâte. Le malaxage est donc effectué afin de rendre le mélange homogène. La pâte ainsi préparée sera mise en forme.

#### 1.4.5.3. Façonnage des briques

Le façonnage du bloc permet de resserrer les grains par compression. Le procédé de mise en forme le plus couramment appliqué aux pâtes plastiques dans l'industrie céramique est l'extrusion. Elle permet d'obtenir un produit de forme définitive.

Du malaxeur, la pâte d'argile passe alors dans l'étireuse pour l'extrusion sous vide. Elle est pressée à travers la filière de l'extrudeuse pour former un long boudin. La géométrie de la filière définit l'aspect de la brique et détermine ainsi la gamme du produit à fabriquer. À la sortie de l'extrudeuse, les pièces et notamment les briques sont découpées transversalement [98]. En effet, le boudin étiré passe sous un coupeur qui détermine les pièces dans leur dimension quasi finale à l'aide d'un fil d'acier.

Toutefois, l'argile peut également être moulée par le biais de presses qui peuvent être manuelles ou motorisées. Le façonnage par pressage nécessite moins d'eau que l'extrusion [113]. Dans le cas des presses manuelles, le compactage se fait à l'aide d'un système de levier activé par une ou plusieurs personnes. Il existe trois types de presses manuelles, ayant toutes un mode de compression statique. Le premier type est celui des presses manuelles mécaniques du type Cinva-Ram qui fournissent une très basse pression théorique de compactage de l'ordre de 1 à 2 MPa. Le deuxième type est celui des presses manuelles hydrauliques. Ce qui les différencie des presses précédentes est l'amélioration du système de rotule et bielle par l'ajout d'un piston hydraulique qui permet d'obtenir des pressions théoriques variant entre 10 et 20 MPa. Le troisième type correspond aux presses manuelles mécanisées. Très solides, elles comprennent un couvercle rabattable fournissant un pré-compactage. La pression de compression appliquée théoriquement au niveau de ces presses varie entre 2 et 4 MPa [114].

Après le façonnage, les briques sont acheminées automatiquement au séchoir où elles subissent un cycle de séchage bien défini.

1.4.5.4. **Séchage des briques d'**argile

Le séchage a pour but d'éliminer la presque totalité de l'eau (utilisée pour rendre la pâte plastique et permettre la mise en forme) avant de soumettre les produits à la cuisson. Il est influencé par deux paramètres : la température et l'humidité de l'air.

L'empilement des produits façonnés doit être adaptée à leur forme afin d'optimiser la circulation de l'air au cours du séchage [98]. Deux possibilités existent : le séchage naturel ou le séchage artificiel.
Pour le séchage naturel (Figure 1.14) les produits entreposés soit à ciel ouvert soit dans un hangar, sont soumis à la température ambiante et à l'humidité ambiante qui fluctuent en fonction des conditions climatiques du milieu. En revanche, le séchage artificiel permet de maîtriser et de contrôler la température et l'humidité de l'air mais sa consommation énergétique est élevée (Figure 1.15). Toutefois, elle peut être réduite en récupérant l'air chaud venant de la zone de refroidissement du four [98]. Le type de séchage effectué aura donc une influence sur la résistance et la qualité finale de la pièce après cuisson.



Figure 1.14 : Séchage dans un hangar à Zogbodomey au Bénin (Source : Nature Brique)

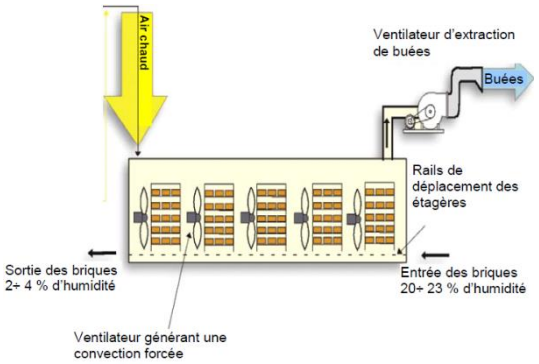



Figure 1.15 : Séchoir industriel

Par ailleurs, lorsqu'une composition argileuse est soumise à dessiccation, les particules élémentaires, primitivement dispersées dans l'eau, tendent à se rapprocher et à s'imbriquer, ce qui entraîne d'une part un retrait, et d'autre part une consolidation ou prise de cohésion due à cette imbrication. Lorsque les particules sont au contact les unes des autres, il reste, entre elles, de l'eau qui s'évacue alors qu'il ne se produit plus de retrait dans la pièce [100]. Un mélange argileux présente un retrait compris entre la limite de liquidité et la limite de retrait et le séchage s'effectue en deux phases :

- la première phase correspond au début du séchage où le départ d'eau s'accompagne d'un retrait linéaire en volume égale à la perte d'eau colloïdale [100]. Ce retrait s'annule à la limite de retrait.
- la seconde phase correspond à la période du séchage où les interstices entre les grains sont vidés et l'« eau d'interposition » [100] s'échappe. À cette étape, on est au-delà de la limite de retrait et le séchage se poursuit sans retrait.

Kneule [115] distingue le retrait libre, durant lequel le matériau peut se contracter librement, du retrait contrarié durant lequel cette contraction est entravée par des forces extérieures. Il fait également mention de l'anisotropie du retrait propre aux matériaux à fibres ou à directions privilégiées. Il qualifie enfin le retrait d'idéal lorsque la diminution du volume subie

par le produit humide correspond exactement au volume de liquide extrait. Ce phénomène peut avoir une grande influence sur les propriétés du matériau séché.

Les principaux problèmes technologiques posés par le séchage sont présentés dans le Tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Défauts liés au séchage des briques d'argile [106]

| Manifestations | Causes probables | Remèdes |
|---|---|---|
| Déformation du produit à l'entrée par absorption d'humidité | Condensation de l'air humide sur les produits entrant | Filage à chaux, changement des paramètres de l'air d'entrée |
| Microfissures | Vitesse de séchage non adaptée | Diminution de la vitesse de séchage. Augmentation de la longueur du séchoir. |
| Baisse des performances mécaniques du produit cuit | Séchage trop rapide. Microfissures | Diminution de la vitesse de séchage. Augmentation de la longueur du séchoir. Amélioration du mélange |
| Efflorescence : taches blanches en sortie de séchoir | Présence de sels solubles comme $CaSO_4$ dans la matière première, drainés en surface au séchage. | Ajout de carbonate de baryum $BaCO_3$ |
| Fentes en long ouvertes d'épaisseur croissante, apparaissant n'importe où à partir de la périphérie | Vitesse de séchage trop importante. Prise de retrait trop rapide en première phase | Diminution de la vitesse de séchage. Augmentation de la longueur du séchoir. Amélioration du mélange |
| Fentes diverses obliques et transverses sur toute la périphérie | Trop fort gradient d'humidité dans le produit. Superposition des zones de séchage | Retarder la zone de séchage rapide. Améliorer l'homogénéité |
| Produits sortant trop sec, formation de microfissures sur certaines argiles | Reprise d'humidité créant des variations dimensionnelles | Diminution de la température et du pouvoir séchant en fin de séchage |

Le séchage doit être minutieusement contrôlé si l'on veut obtenir des produits de qualité et éviter des fissurations, des retraits différentiels importants ou des distorsions. Les fissurations dans les céramiques sont dues à un séchage agressif produisant un retrait maximal en surface alors que le cœur du produit, encore humide, garde ses dimensions. On conçoit que les variations de dimensions, qui ont lieu lors de la première phase de séchage, risquent, si elles ne se produisent pas de façon homogène dans toute la pièce, de provoquer l'apparition de contraintes qui sont préjudiciables à la qualité des produits : déformations, fissures, perte de résistance mécanique. L'air qui est en contact avec les faces des produits doit donc avoir une capacité d'évaporation qui correspond à la vitesse optimale à tous les stades, ce qui nécessite un séchage en atmosphère contrôlée. Il faudrait évacuer l'eau assez lentement pour que les faces externes ne sèchent pas trop rapidement avant que l'eau interne ne soit évacuée. C'est la raison pour laquelle, le séchage débute de façon assez lente en industrie, avec un air humide (humidité relative de 75% à 90%) à une température de 35°C à 50°C. Lorsque la

première phase du départ d'eau est achevée, on sèche avec un air de plus en plus sec à une température de 70°C à 130°C, avec une faible humidité relative [100].

Après leur passage dans le séchoir, les produits ne contiennent plus que 1% à 2 % d'eau résiduelle (quelquefois moins) [100], mais ils n'ont pas encore leurs véritables qualités. Il est nécessaire, pour leur permettre d'acquérir leur résistance mécanique, leur stabilité, leur résistance aux intempéries, etc., de les soumettre à la cuisson à des températures élevées.

1.4.5.5. **Cuisson des briques d'argile**

La cuisson doit être conduite de façon à obtenir des produits de caractéristiques fonctionnelles satisfaisantes et aussi régulières que possible. Elle peut être effectuée dans un four électrique, à fluides ou à combustibles ligneux. Quel que soit le système de chauffage utilisé, il est recommandé que le début de cuisson commence par une faible vitesse de montée en température, jusqu'à ce que toute l'eau résiduelle de façonnage soit éliminée. Il est également important de soumettre tous les produits de l'empilage aux mêmes effets thermiques. La cuisson des produits de terre cuite se fait en trois phases : le préchauffage, la cuisson proprement dite et le refroidissement. Un cycle de cuisson dure de 12 à 48 h. Plus généralement, la cuisson des tuiles et des briques nécessite une température entre 900°C et 1150°C [98].

Différentes réactions chimiques et physiques complexes se produisent dans le mélange avec la montée de température pendant la cuisson, ce qui provoque des modifications de porosité, de masse volumique, de dimensions et de propriétés mécaniques du produit final [106]. Quatre grandes phases sont observées [87].

- De la température ambiante jusqu'à 400°C se produisent :
  - une déshydratation : départ de l'eau résiduelle de séchage et de l'eau d'hydratation jusqu'à 200°C environ ;
  - une dégradation de la matière organique entre 200°C et 400°C par suite de l'oxydation par l'air circulant dans les pores. Si le milieu n'est pas oxydant, des résidus carbonés se décomposent et forment des hydrocarbures et du carbone persiste à l'intérieur de la céramique, ce qui peut faciliter la présence du cœur noir. Les hydroxydes de fer [goethite : FeO(OH)] se transforment selon la possibilité d'oxydation soit en hématite ($Fe_2O_3$) avec la coloration rouge, soit en magnétite ($Fe_3O_4$) avec une coloration bleu noire.

- De 400°C à 750°C, certains minéraux argileux (kaolinite, illite à 550°C, smectite par exemple) subissent une déshydroxylation (départ d'eau de structure ou de constitution) [116]. Dès lors, des phases déshydroxylées très fines et désordonnées (métakaolin) se forment. Un début de retrait de cuisson est généralement observé à ce stade. Le quartz (phase minérale couramment associé aux minéraux argileux) subit une transformation allotropique (change de forme cristallographique) du quartz α au quartz β à 573°C (point de quartz).
- De 750°C à 850°C, les phases carbonatées se décomposent, notamment le carbonate de calcium ($CaCO_3$) se transforme en chaux vive (CaO) avec un dégagement de $CO_2$ [116], [117]. Cette réaction est un équilibre dont les températures exactes dépendent de l'atmosphère gazeuse.
- Au-delà de 850°C, deux phénomènes sont observés selon la minéralogie du mélange :

- Les argiles non-calcaires développent un frittage liquide donnant aux produits finaux une structure liée par une phase vitreuse [118].
- En revanche, les argiles calcaires [teneur élevée en calcite $CaCO_3$, et dolomite $CaMg(CO_3)_2$] ne développent pratiquement pas de phase vitreuse et la cristallisation des produits céramiques s'effectue en phase solide [117], [119]. Le CaO disparait et de nouvelles phases commencent à se former comme : les silicates de calcium (wollastonite : $CaSiO_3$), les aluminosilicates de calcium (anorthite : $CaO.Al_2O_3.2SiO_2$ ; gehlénite : $2CaO.Al_2O_3.SiO_2$) [116], [119]. La dolomie entraine la formation de silicates de calcium/magnésium (diopside). Le fer n'apparait plus comme hématite, mais se combine aux aluminosilicates.
- La réorganisation structurale s'observe vers 950°C et la densification du matériau se poursuit.

À la sortie du four, les matériaux ont atteint leurs propriétés de résistance mécanique, thermique, porosité, absorption d'eau, couleur et aspect de surface [98]. Ils sont donc prêts à l'emploi. Des essais de caractérisation sont alors effectués sur les produits ainsi obtenus afin de contrôler la production et de définir les propriétés des produits.

## 1.4.6. Propriétés des produits cuits

### 1.4.6.1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des terres cuites est directement liée à leur porosité [99]. De ce fait, elle influence les propriétés aussi bien mécaniques que thermiques des produits élaborés. La normalisation distingue les briques selon que leur masse volumique apparente est inférieure (briques LD) ou supérieure (briques HD) à 1000 $kg.m^{-3}$. Les premières (LD) sont des produits protégés par un enduit ou non exposés. Il s'agit pour l'essentiel de briques de structures à forte perforation et à tesson allégé. Les secondes (HD) sont des briques apparentes (exposées), non exposées ou protégées. En fonction de leur utilisation, elles doivent répondre à des critères communs avec des spécifications parfois différentes ou à des critères spécifiques [88].

### 1.4.6.2. Résistances mécaniques

Parmi toutes les céramiques traditionnelles, les produits de terre cuite présentent la plus faible résistance mécanique. Ceci s'explique par leur porosité globale élevée (de l'ordre de 20% pour les briques apparentes et 40% pour les briques de structure) et leur forte teneur en grains de quartz (générateurs de décohésions au refroidissement lors de la transition du quartz ß en quartz α) [88].

- Résistance à la traction : La résistance mécanique de la terre cuite peut varier de façon importante. En flexion, l'étendue de la variation peut être de 5 à 25 MPa pour des productions courantes [99]. Une augmentation de la température de cuisson et une réduction de la taille des grains initiaux (quartz notamment) permettent d'améliorer la résistance en flexion [88].

- Résistance à la compression : Une brique surtout si elle est incluse dans une structure porteuse, peut être soumise à une compression significative (environ 1 MPa par étage). Les propriétés mécaniques des produits de terre cuite permettent d'atteindre ce niveau

de performance sans difficultés. Les terres cuites sont des matériaux fragiles dont la résistance en compression, favorisée par la présence de minéraux calciques dans le mélange initial, peut atteindre 80 MPa [88]. Il existe aujourd'hui des briques de structure de faible densité avec des perforations verticales dont la contrainte à la rupture en compression excède 50 MPa [88]. Le comportement de la terre cuite, enregistré par plusieurs essais, est fragile. La relation contrainte-déformation est quasi linéaire jusqu'à la rupture (Figure 1.16).

- Module élastique : En 2016, Nigal *et al* [120] ont étudié une céramique à base d'argile formulée à partir de 12 kg de matières sèches dans des proportions en poids de 70% d'argile, 30% de sable additionnées de 17% d'eau. Le mélange a été ensuite extrudé avec une pression de 8 bars pour former un bloc de dimensions 180 x 80 x 18 $mm^3$. La céramique à base d'argile a subi un séchage à des températures de 25°C, 65°C et 105°C pendant 24 heures à chaque fois. Le module de Young a ensuite été mesuré de manière continue de 30°C à 1050°C [120]. Une augmentation de 110% du module de Young est enregistrée à des températures comprises entre 850°C et 1050°C. Ainsi, la céramique à base d'argile présente un module de Young de 27900 GPa à la température de traitement thermique la plus élevée. Mais une diminution de 41% du module de Young est enregistrée au cours de la phase de refroidissement. La diminution du module de Young peut être liée à l'inversion du quartz ß à α autour de 600°C. Après le refroidissement, la céramique à base d'argile présente un module de Young de 16400 GPa [120].
  En revanche, les travaux [121] ont abouti à un module E=2700 MPa (Figure 1.16). En effet, le module élastique de la terre cuite comme la plupart de ses propriétés dépend de sa porosité [99]. C'est ce qui explique la grande variabilité desdites propriétés dépendamment du procédé d'élaboration (composition et granulométrie des matières premières, façonnage, cuisson).

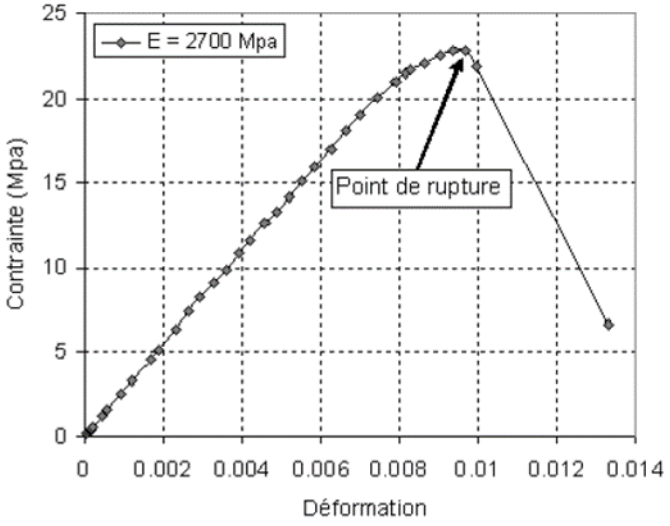



Figure 1.16 : Relation contrainte déformation en compression de tessons en terre-cuite, de forme parallélépipédique pleine, extraits des briques à perforation verticale [121].

### 1.4.6.3. Propriétés thermiques

Le Tableau 1.6 présente les valeurs issues de la littérature, de la capacité thermique massique et la de conductivité thermique de la brique de terre cuite et de quelques autres matériaux de construction.

Tableau 1.6 : Propriétés thermiques de quelques matériaux de construction [72], [75]-[77], [122], [123]

| Matériau | | Masse volumique sèche ρ (kg/m$^3$) | Conductivité thermique utile λ (W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) | Capacité thermique massique c (J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| Brique de terre cuite | | | 0,30 - 0,96 | |
| | | 1700-2100 | 1,0 - 1,35 | |
| | | 1800-2000 | 1,15 | |
| | | 1900 | 1,15 | 864 |
| Mortier | | 1950 | 1,15 | 846 |
| Maçonneries en briques | | | 0,30 - 0,96 | |
| Bétons | | | | |
| | Béton ordinaire | | 1,60 - 2,10 | |
| | Béton de granulats plein | 1600 - 2400 | 0,8 - 1,75 | |
| | | 2300 | 1,75 | 936 |
| | Béton de granulats caverneux | 1000 - 2000 | 0,35 - 0,70 | |
| | | 1650 | 1,15 | 864 |
| | | 2100 | 1,40 | 864 |
| | Béton de laitier plein | 2300 | 1,40 | 882 |
| | Béton de laitier caverneux | 1800 | 0,70 | 882 |
| | Béton de pouzzolane | 1000 | 0,35 | 864 |
| | | 1650 | 0,52 | 864 |
| | Béton cellulaire | | 0,14 - 0,23 | |
| | | 400 | 0,16 | 882 |
| | | 800 | 0,33 | 882 |
| | Béton de perlite | 400 - 800 | 0,24 - 0,31 | |
| | Béton de bois | 250-650 | 0,10 - 0,16 | |

Tableau 1.7 : Conductivité thermique de la terre cuite utilisée dans les éléments de maçonnerie [124]

| Masse volumique sèche ρ (kg/m$^3$) | Conductivité thermique utile λ (W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) |
|---|---|
| ρ≤1000 | 0,34 |
| 1000<ρ≤1100 | 0,38 |
| 1100<ρ≤1200 | 0,41 |
| 1200<ρ≤1300 | 0,46 |
| 1300<ρ≤1400 | 0,50 |
| 1400<ρ≤1500 | 0,55 |
| 1500<ρ≤1600 | 0,60 |
| 1600<ρ≤1700 | 0,64 |
| 1700<ρ≤1800 | 0,69 |
| 1800<ρ≤1900 | 0,74 |
| 1900<ρ≤2000 | 0,79 |
| 2000<ρ≤2100 | 0,85 |
| 2100<ρ≤2200 | 0,92 |
| 2200<ρ≤2300 | 0,98 |
| 2300<ρ≤2400 | 1,04 |

Les valeurs du Tableau 1.7 montrent que la capacité thermique des matériaux de construction est relativement constante et est en moyenne de 850 ± 100 J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$. Ainsi, la terre cuite a une capacité thermique massique de 864 J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$, lorsque sa masse volumique vaut 1900 kg/m$^3$. Par ailleurs, Pompeo et Gueret [124] montrent que, pour une masse volumique ρ telle que : 1000 kg/m$^3$ < ρ ≤ 2400 kg/m$^3$ , la capacité thermique de la terre cuite est égale à 1000 J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$.

En revanche, il existe une grande plage de variation de la conductivité thermique de la terre cuite comme celle des autres matériaux de construction, en fonction de la masse volumique. On observe que la conductivité thermique de la terre cuite varie de 0,30 W.m$^{-1}$.°C$^{-1}$ à 1,35 W.m$^{-1}$.°C$^{-1}$ pour une masse volumique comprise entre 1000 kg/m$^3$ et 2100 kg/m$^3$. En effet, la conductivité thermique apparente des milieux poreux décroit lorsque la porosité augmente. Cela est dû à l'intervention de l'air qui représente un milieu isolant pour le passage de la chaleur entre particules [74]. Ainsi pour la terre cuite, la conductivité apparente varie de 0,30 W.m$^{-1}$.°C$^{-1}$ à 1,10 W.m$^{-1}$.°C$^{-1}$ voire 1,50 W.m$^{-1}$ .°C$^{-1}$ dans des cas exceptionnels [121]. Cette grande variation de la conductivité thermique des blocs cuits pourrait s'expliquer par les différentes transformations physico-chimiques qui se produisent au sein du matériau pendant la cuisson. On observe en effet sur la Figure 1.17, que la conductivité thermique de la céramique varie au cours des différentes phases de la cuisson.

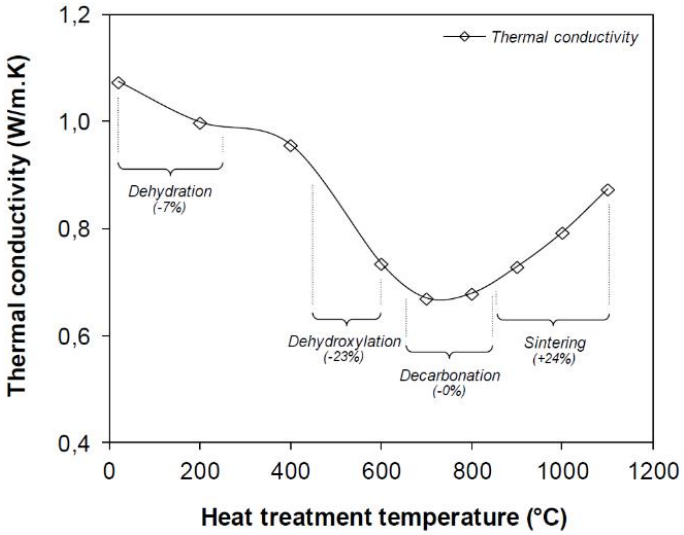



Figure 1.17 : Evolution of the thermal conductivity of the clay-based ceramic with the heat treatment temperature [125].

En outre, les réactions qui ont lieu au cours de la cuisson varient en fonction des phases minérales présentent dans l'argile. En conséquence, la conductivité thermique de la terre cuite serait influencée par sa composition minéralogique, sa masse volumique et sa porosité. Kornmann et Lafaurie montrent également que la conductivité thermique présente jusqu'à 30% de variation entre des terres cuites de mêmes densité et porosité mais ayant des compositions différentes [90].

### 1.4.7. **Différents types de briques d'argile cuite**

De manière générale, deux grandes familles de briques sont produites compte tenu de leur usage dans le bâtiment : les briques de structure et les briques apparentes [88].

#### 1.4.7.1. Briques de structure

Elles comprennent :

- Les briques de mur : elles sont utilisées pour la réalisation de murs porteurs (épaisseurs supérieures à 15 cm). Il s'agit aujourd'hui essentiellement de briques dites « de 20 » par référence à leur épaisseur (20 cm) et de briques « monomur ». Traditionnellement, les perforations de ces briques sont horizontales (parallèles au support de pose). L'amélioration des procédés d'extrusion a permis de diminuer l'épaisseur des parois internes et d'en augmenter le nombre. Ceci a rendu possible le développement de briques de 20 à perforations verticales, possédant des surfaces perforées sur lesquelles il est possible de maintenir un mortier. Les briques monomur sont conçues pour ne pas nécessiter d'isolation complémentaire. Dans leur cas, on parle d'isolation répartie. D'épaisseur standard, entre 30 et 37,5 cm, ces briques se caractérisent par de très nombreuses perforations verticales séparées par des parois d'épaisseur inférieure à 5 mm et distribuées de façon à optimiser leur aptitude à l'isolation thermique. Leur longueur et leur hauteur varient entre 20 et 30 cm. Ces briques ont leurs deux faces de pose rectifiées afin d'obtenir un parallélisme suffisant pour permettre une pose dite à joints minces (application d'une couche de mortier colle d'épaisseur inférieure à 1 mm). Ce

mode d'assemblage, qui minimise les ponts thermiques, contribue à améliorer le caractère isolant du mur.

- Les éléments pour planchers : les entrevous sont des briques alvéolaires munies d'épaulements permettant leur appui sur des poutrelles généralement en béton armé. L'ensemble est ensuite solidarisé par une dalle en béton armé afin de former le plancher.

- Les briques de cloison : elles sont utilisées pour réaliser des murs de séparation intérieure non porteurs. Leur faible épaisseur (de 3,5 à 15 cm) permet de fabriquer des briques de grandes dimensions (entre 40 et 60 cm de longueur et entre 20 et 50 cm de hauteur) aisément manipulables. Ces grands formats contribuent à diminuer le temps d'installation des cloisons. On distingue les briques plâtrières, recouvertes après pose d'un enduit en plâtre, et les briques sèches, utilisées sans enduit pour des pièces humides comme les salles de bains.

#### 1.4.7.2. Briques apparentes

Les briques apparentes sont généralement les briques de parement communément appelée brique de façade : elles sont utilisées aussi bien en extérieur (pour sa touche décorative) qu'en intérieur pour réaliser des murs éventuellement porteurs et sont assez épaisses. Ces briques étant apparentes, une attention particulière est portée à leur esthétique, notamment à leur coloris et à la texture de leur surface. Elles existent sous différents formats :

- Les briques pleines se présentent sous la forme de parallélépipèdes, généralement de 6 x 10,5 x 22 $cm^3$, pesant entre 1,8 et 2,5 kg ;

- Les briques avec renforcement se différencient des précédentes par l'existence d'un évidement sur la face supérieure de la brique. Cet évidemment, qui facilite le démoulage après mise en forme par pressage, sert de poche à mortier lors de la mise en œuvre ;

- Les briques perforées sont de mêmes tailles que les briques pleines. Elles s'en différencient par la présence de perforations verticales. Ces perforations permettent d'alléger la brique, d'en faciliter le séchage et la cuisson et d'en améliorer les propriétés thermiques.

La capacité de production des matériaux est étroitement liée aux ressources naturelles et aux possibilités de recyclage des déchets. Après extraction, la matière première subit des transformations physiques et chimiques diverses qui aboutissent à l'obtention des matériaux. Les briques d'argile cuite sont des produits poreux et très durs, qui présentent des résistances mécanique et thermique élevées. Cependant, ils ne sont généralement pas ductiles et ont une faible résistance au choc. Ces deux défauts majeurs limitent fortement leurs applications. En outre, ces produits représentent un important potentiel d'incorporation de déchets [126]. Certaines des raisons sont : un volume de production énorme qui implique un grand volume de matières premières, une longue durée de vie, une capacité d'encapsulation des résidus incorporés, l'inertage des résidus non polluants et la tolérance des produits céramiques rouges et de leur traitement aux variations de composition de leurs matières premières. Ils ont également les plus faibles prix unitaires comparés aux autres céramiques. Cela permet d'incorporer des quantités raisonnables de déchets dans la composition des masses utilisées dans la fabrication de produits céramiques pour la construction civile.

Un ensemble de recherches se poursuit actuellement pour augmenter la ductilité et la résistance de ces céramiques [89] en incorporant des ajouts à la pâte d'argile. Dans ce cadre des matériaux considérés comme déchets peuvent être valorisés comme matières premières dans la fabrication des blocs cuits en vue non seulement de permettre une meilleure gestion des déchets mais aussi d'améliorer les propriétés des produits cuits qui se révèlent être le meilleur compromis pour le confort thermique au sein du bâti.

Après avoir passé en revue le processus de fabrication des céramiques pour le bâtiment et leurs propriétés, nous nous intéressons à présent aux différentes possibilités de recyclage des déchets de verres et des cendres broyés en construction de façon générale et plus spécifiquement dans la formulation des céramiques pour le bâtiment.

## 1.5. Valorisation des déchets en construction

### 1.5.1. Généralités sur la gestion des déchets

L'accumulation des équipements et des biens de consommation s'accompagne d'un surplus localisé de matériaux usagés. Ceci pose le problème du réemploi des matériaux. La Figure 1.18 décrit le cycle de vie des matériaux. Une gestion optimale de ce cycle reste très difficile à réaliser en pratique. Cependant, sa maîtrise devient de plus en plus importante pour la sauvegarde de l'environnement.

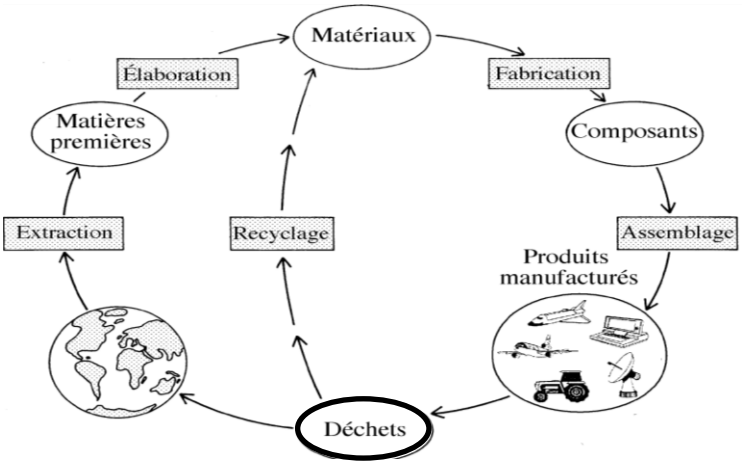



Figure 1.18 : Cycle de vie des matériaux [85]

Selon l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), la réutilisation est toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau [127]. La valorisation des déchets notamment leur réutilisation en construction permet en fonction du type de déchet et de sa destination :

- une économie de la ressource naturelle ;
- une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- une réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Ainsi, le recyclage des déchets constitue depuis plusieurs années, une tradition dans les pays du Nord ; en témoigne le développement de plusieurs politiques de tri de certains Déchets Solides Ménagers (DSM) (cartons, plastiques, verre) mais aussi la recherche des débouchés pour les déchets industriels notamment les cendres volantes. Les déchets triés peuvent être réutilisés après purification. Dans le cas échant, d'autres voies de valorisation minutieusement étudiées permettent de recycler ces matières. Cependant, les pays peu industrialisés restent en marge de ces techniques de récupération garantissant une bonne gestion des DSM et par conséquent, un cadre de vie sain.

Ces travaux s'intéressent au devenir des cendres et du verre d'emballage usagé, des déchets qui pourraient constituer des matières premières dans le domaine de la construction et plus spécifiquement dans la fabrication des céramiques pour le bâtiment.

## 1.5.2. Valorisation des cendres

### 1.5.2.1. Composition des cendres

Les cendres sont des résidus principalement basiques de la combustion de diverses matières organiques et minérales, et par extension de produits tels que le charbon, le lignite, le coke ou de divers déchets brûlés dans les incinérateurs, en plein air ou dans les cheminées ou fours [128]. Ce sont des résidus solides de combustion ne comportant plus aucune part combustible [129]. Les cendres sont principalement composées de silice $SiO_2$, de chaux CaO et dans une moindre proportion de phosphates $P_2O_5$, d'alumine $Al_2O_3$, de magnésie MgO et de sels alcalins et sont caractérisées par un pH basique et une teneur en azote faible [130]. Les compositions chimiques des cendres sont beaucoup plus influencées par le type de combustion du produit brûlé que par l'essence du bois. La différence dans les teneurs en imbrûlés provient de la qualité de la combustion [130].

### 1.5.2.2. Différents types de cendres

Les cendres se distinguent généralement en fonction du produit brûlé et du type de combustion. On peut distinguer :

- les cendres de biomasse ;
- les cendres ou résidus charbonneux issues des installations de gazéification ;
- les mâchefers ;
- les scories ;
- les cendres sous foyer ;
- les cendres des boues d'épuration ;
- les cendres volantes ;
- les cendres issues du chauffage au bois domestique ;
- les cendres de charbon de bois.

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de houille sont désignés sous le nom de « mâchefer ». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Les particules sont appelées « cendres volantes ». Certaines particules de cendres forment des « scories » qui tombent au fond du four.

Au Bénin, le secteur de l'énergie est caractérisé par une forte utilisation de la biomasse-énergie. En 1982, la Banque Africaine de Développement (BAD) a estimé, que la population béninoise utilisait le bois pour assurer 77 % de ses besoins en combustible. Deux ans plus tard, la Banque Mondiale a estimé cette utilisation à 86 % [131]. En 2010, la biomasse-énergie représentait 49,5% de l'énergie finale totale utilisée, suivie par les produits pétroliers (48,2%) et par l'électricité (2,2%) [131]. Aucune prospective réaliste de l'évolution de la consommation de la biomasse-énergie ne conclut à sa disparition dans le bilan énergétique du pays à l'horizon 2030. Même dans les zones urbaines, l'utilisation des sources modernes d'énergie pour la cuisson (gaz, électricité) est encore faible ; le pourcentage de ménages utilisant la biomasse-énergie varie entre 60 et 85 % [131]. La fabrication du charbon de bois est connue depuis longtemps dans le monde. Avec l'évolution technologique, l'utilisation du charbon de bois comme source d'énergie a été délaissé au profit du gaz domestique ou de l'énergie électrique dans les pays à haut développement. Mais la production du charbon de

bois perdure dans de nombreux pays non industrialisés comme le Bénin, qui utilisent ce charbon pour la cuisson des aliments. Au Bénin, la proportion de la population urbaine qui utilise le charbon de bois comme moyen de cuisson est évaluée à 46,9% dont 66,1% dans le littoral (Cotonou) (RGPH-4, 2013). Les résidus issus de la combustion du charbon de bois sont les cendres, souvent considérés comme des déchets.

En France, la production primaire d'énergie renouvelable en 2012 représentait 16,4 % de la consommation totale. Sur cette production d'énergie renouvelable, 45 % était produite par la filière bois-énergie, ce qui correspond à 3,9 % de la consommation primaire totale d'énergie en France. Ainsi, 1,3 % de l'électricité consommée en France en 2012 provenait du bois énergie, tandis qu'il couvrait 11 % des besoins en chaleur tous secteurs confondus. Aujourd'hui le bois énergie est principalement valorisé en chauffage domestique, à hauteur de 72 % du bois énergie total consommé [130].

Ainsi, l'utilisation du bois comme combustible, permet la production d'énergie renouvelable et conduit à la production des cendres de bois comme déchets [130]. En outre, il n'existe pas actuellement, en France, de filière de valorisation clairement définie pour ces cendres qui sont évacuées en décharge ou valorisées en agriculture sans études de faisabilité préalables pour la majorité des cas. Ainsi, les voies de valorisation des cendres de combustion du bois énergie, restent également à approfondir en France.

#### 1.5.2.3. Possibilités de valorisation des cendres en construction

Les cendres issues du chauffage au bois domestique dans plusieurs contrées et plus particulièrement en France, sont généralement évacuées avec les ordures ménagères ou valorisées comme amendement et fertilisants dans les jardins des particuliers. Il en est de même des cendres de charbon de bois issues de la cuisson des repas au Bénin. Mais de nos jours, différentes possibilités de valorisation des cendres, notamment celles volantes, dans le domaine de la construction, sont de plus en plus étudiées : industrie de la brique ( en remplacement du sable), formulation de bétons et de ciments composés dans certains pays européens en fonction de l'expérience et de la tradition nationale [128], travaux publics et céramiques.

Dans les travaux publics : Les cendres de biomasse peuvent être employées en terrassement pour la création de remblais ; la réalisation de couches de formes ou de couches de chaussées (fondations et bases), comme correcteur en vue de compléter la granulométrie d'un matériau pauvre en fraction fine (inférieure à 500 µm) ; la fabrication de liants hydrauliques routiers. Des applications en traitement de sol sont aussi possibles, les cendres permettent la formulation de coulis d'injection destinés à la stabilisation des sols. Dans certains pays, les cendres sont utilisées pour l'étanchéité de mines ou comme filler et charge dans les bitumes ou les bétons, mais ces valorisations sont encore marginales.

En cimenterie : Les cendres volantes sont utilisées pour la préparation de la matière première (le cru). Elles apportent essentiellement la silice, l'alumine et le fer. Elles peuvent être ajoutées lors du broyage final (avec le clinker, le gypse et les éventuels autres constituants secondaires). Leur passage dans le broyeur augmente le rendement de ce dernier (grâce aux imbrûlés) [128]. Les travaux de SAVADOGO N. [20]–[22] ont montré

que les cendres volantes de mâchefer peuvent bien être incorporées comme additif dans l'élaboration de ciments composés de type CEM II/A avec une classe de résistance de 42,5 MPa lorsque le taux de substitution est de 10% et une classe de résistance de 32,5 MPa lorsque le taux de substitution est de 15% et 20%. Les caractéristiques mécaniques à long terme (90 jours) et la durabilité des mortiers confectionnés à partir de ces ciments sont conservées lorsque le taux de substitution n'excède pas 10% [20]. La poudre de mâchefer obtenu par broyage peut substituer partiellement le ciment Portland à un taux de 15% permettant d'élaborer un ciment composé de type CEM II A selon la norme EN 197-1 [21].

Dans la formulation du béton : Sur le béton frais, les cendres issues de la combustion de biomasse contribuent à améliorer l'ouvrabilité, augmentent la compacité, améliorent l'aspect de surface après décoffrage et allègent les produits préfabriqués (pour un taux de cendres supérieur à 7 %) [128]. Sur le béton durci, elles augmentent la résistance mécanique finale (en raison de leur pouvoir pouzzolanique), diminuent la fissuration (en relation avec la diminution de la chaleur d'hydratation), accroissent la résistance aux eaux pures et aux eaux sulfatées, assurent une meilleure résistance au feu et aux chocs thermiques et minorent la réaction alcali-silice [128]. Les cendres volantes, matériaux pouzzolaniques contribuent à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons grâce au développement de l'activité pouzzolanique [11], [132]. H. Kurama *et al.* montrent que le mâchefer produit en Turquie utilisé en substitution partielle au ciment avec un taux de substitution de 10% permet d'augmenter la résistance à la compression d'environ 6% par rapport au ciment ordinaire [132]. D. Bajare *et a*l. montrent que le mâchefer broyé peut substituer jusqu'à 20% un ciment sans effet sur la classe de résistance de ce ciment. En outre l'utilisation du mâchefer broyé permet de baisser de 9,3% le coût du béton [23]. Dans ses travaux de thèse en 2012, Chen Maozhe [133] montre que la résistance du mortier diminue quand le taux de substitution en cendres de boues d'épuration augmente à cause de la faible teneur en CaO dans les cendres et de l'apport supplémentaire d'eau nécessaire. Pour le béton avec un taux de substitution de 10 %, la résistance est comparable à celle du béton témoin.

Dans la fabrication de céramiques : Plusieurs travaux [134]–[139] portant sur l'incorporation de cendres dans des céramiques traditionnelles ont révélé des propriétés physiques et mécaniques satisfaisantes des produits élaborés [140]. De plus, les travaux de Dana *et al.* [26] ont montré que la substitution du quartz par des cendres volantes dans la formulation d'une porcelaine augmente le retrait linéaire, la densité apparente et diminue la porosité apparente pour des températures de cuisson comprises entre 1150 et 1300°C. Aussi, la teneur en mullite augmente avec l'incorporation des cendres volantes en substitution du quartz et par conséquent, la résistance à la flexion est significativement améliorée. Effectivement, la teneur en quartz résiduel diminue avec les cendres volantes en addition.

En effet, selon leur composition, les cendres volantes ou résiduelles peuvent contenir des substances qui forment des phases liquides à des températures de cuisson relativement basses et contribuent ainsi à la consolidation par frittage de la structure céramique [140]. Des études [128] révèlent également que les cendres peuvent se substituer aux feldspaths, utilisés en céramique. Les cendres de biomasse contiennent des fondants alcalins (Na, K, Phosphates) favorisant la fusion avec la silice à 1100°C. Une grande quantité de cendres produites dans des installations industrielles ne contient qu'une

quantité négligeable de composés alcalins et n'agit donc pas comme un fondant lorsqu'elle est ajoutée à des corps d'argile. Cependant, ces cendres non fondantes affectent toujours les propriétés du produit céramique rouge final [140].

L'incorporation de cendres non fondantes dans des matériaux céramiques argileux a été largement étudiée [135], [138], [140]–[147]. Les cendres volantes provenant de centrales thermiques au charbon sont parmi les plus étudiées. En raison de l'extrême variabilité de ses caractéristiques physico-chimiques, l'incorporation de ce type de cendres volantes dans le processus céramique peut entraîner une qualité très variable pour le produit céramique [140].

Dans les travaux de Lingling *et al*. [25], les cendres volantes de qualité médiocre à l'état humide ont été utilisées comme matière première pour remplacer partiellement l'argile afin de fabriquer des briques cuites. Les résultats indiquent que l'indice de plasticité du mélange de cendres volantes et d'argile diminue considérablement avec l'augmentation du taux de remplacement des cendres volantes. La température de frittage des briques incorporant 60% en volume de cendres volantes était d'environ 1050°C, soit 50°C à 100°C de plus que celle des briques d'argile. Les propriétés des briques cuites ont été améliorées en utilisant des cendres volantes pulvérisées. Les briques cuites présentant un rapport volumique de 60% en cendres volantes étaient d'une résistance à la compression élevée, d'une faible absorption d'eau, et ne présentaient aucune fissuration due à la chaux. L'utilisation des cendres volantes comme matière première en remplacement partiel de l'argile pour la fabrication de briques cuites constitue une mesure efficace de la préservation des terres et de la réduction de la pollution.

Dans un travail, Aineto *et al.* [148] ont étudié le rôle d'un nouveau type de cendres volantes, issues de la gazéification du charbon, en tant qu'addition aux corps argileux. Les auteurs ont constaté que les cendres de gazéification du charbon sont principalement composées d'un matériau vitreux avec une teneur en $K_2O$ et $Na_2O$ de 4,5% en poids. Différents ajouts ont été effectués dans deux argiles distinctes qui ont ensuite été cuites à 900°C. La principale conclusion du travail était que les cendres volantes favorisaient le processus de frittage avec pour conséquence une réduction de l'absorption d'eau et une augmentation de la résistance mécanique du produit céramique final.

Le développement de la filière bois-énergie en France, s'est traduit par une croissance importante du nombre de chaufferies, conduisant à la production de cendres encore difficilement valorisables. Les travaux de recherche [149] initié dès 2012 par la Société Française de Céramique (SFC) visant à vérifier la pertinence de l'utilisation de cette ressource en tant que matière première pour l'industrie de la céramique, ont permis de montrer un réel potentiel dans l'utilisation des cendres de bois sous foyer qui, par leurs natures physico-chimiques, permettent d'augmenter la résistance mécanique des encours de productions et de favoriser la densification des céramiques durant le frittage, permettant ainsi d'abaisser les températures de cuisson. Les résultats montrent que la valorisation de cendres de bois est effectivement envisageable dans le secteur céramique mais nécessite des analyses approfondies de chaque cendre à valoriser, au cas par cas.

Skrifvars et al. [150] ont rapporté la composition chimique d'une grande variété de cendres de biomasse obtenues par la combustion de plusieurs types d'herbe, de pailles, de bagasses et de restes de bois. La quantité de $K_2O$ et de $Na_2O$ dans ces cendres variait de 4,9 à 24,8% en poids, ce qui indique qu'elles auraient le potentiel d'être utilisées comme fondant dans les céramiques traditionnelles.

Dans une étude, Borlini et al. [147] ont étudié l'utilisation de cendres de biomasse provenant de la bagasse de canne à sucre brûlée dans des chaudières, par incorporation dans un corps en céramique rouge. L'enquête a été réalisée en évaluant les propriétés

technologiques de mélanges d'argiles contenant 0, 5, 10, 15 et 20% en poids de cendres cuits à 970°C. Les résultats ont montré que ces cendres sont principalement composées de quartz. Cependant, l'incorporation de cendres a eu un effet néfaste sur la résistance en flexion [140], [151], ce qui a été attribuée à la grande taille des particules du quartz. D'autre part, l'étude de l'influence de la température de cuisson sur les propriétés de la céramique rouge incorporant des cendres de bagasse de canne à sucre (0, 10 et 20% en poids de cendres de granulométrie inférieure à 44 µm) [147] a révélé une diminution de la résistance à la compression avec la quantité de cendres incorporées, pour toutes les températures étudiées. Les phases identifiées sur les diagrammes de diffraction des rayons X de céramiques incorporant 0%, 10% et 20% des cendres non fondantes de bagasse, puis cuites séparément à 1050°C et 1200°C montrent une participation prédominante de quartz. L'incorporation de cendres n'a pas modifié les phases cristallines principales. À 1050°C cependant, une phase de silicate d'Al et de Ca s'est formée.

L'étude [28] a montré la faisabilité de l'utilisation de cendres résiduelles de biomasse (reste de bois, pin-olive, pierre d'olive marc d'olive) comme substitut partiel de l'argile dans la fabrication de briques cuites. L'argile a été concassée puis broyée afin d'obtenir une poudre dont les particules passent au travers des mailles de 500 µm de diamètre. Une proportion des différentes cendres, représentant 20% en masse d'argile, a permis la formulation de chaque mélange. La quantité d'eau nécessaire (10% en poids d'humidité) a été ajoutée aux mélanges pour obtenir une plasticité adéquate au cours de la phase de moulage par compression sous semi-séchage à une pression de 54,5 MPa, à l'aide d'une presse hydraulique uniaxiale de type 30 Ton Mega KCK-30. À des fins de comparaison, 10 échantillons ont été préparés par série pour les tests. Sur la base des résultats expérimentaux, les conclusions suivantes ressortent :

- la masse volumique apparente des produits cuits incorporant 20% de cendres de biomasse sont toutes inférieures à celle des blocs de référence à 0% de cendres, ce qui indique que les cendres de biomasse peuvent non seulement agir comme agents fondants, mais également comme générateurs de pores en raison de leur teneur en matières organiques et en carbonates.
- Les cendres de bois présentant une masse volumique apparente de 1,56 g/m$^3$ ont entrainé une légère augmentation de la porosité ouverte tout en maintenant des valeurs de résistance à la compression similaires à celles des briques de contrôle.
- La conductivité thermique des briques d'argile cuite **$\lambda$ = 1,05 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$** décroit d'environ 15% avec l'incorporation de 20% des cendres de bois, soit une conductivité **$\lambda$ = 0,89 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$**.
- L'incorporation de cendres résiduelles de biomasse dans des briques d'argile céramique peut être une solution durable et économique pour le secteur de la construction.

### 1.5.3. Valorisation des déchets de verre

#### 1.5.3.1. Composition du verre

Le nom de verre est généralement réservé aux solides obtenus par refroidissement d'un liquide et qui, lors de ce refroidissement, ont acquis les propriétés d'un solide sans pour autant présenter un ordre cristallin [152]. La définition la plus commune du verre est celle de Zarzycki : « un verre est un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse » [153], [154]. À l'école de soufflage du verre à Paris, le verre est considéré comme une solution solide en état de surfusion provenant de la fonte d'un mélange homogène comprenant principalement de la silice, de la soude et de la chaux [154]. Ainsi, un verre

courant est une silice modifiée [155]. La Erreur ! Source du renvoi introuvable. montre de f açon schématique la structure d'un matériau qui, suivant le cycle de refroidissement, peut se trouver dans l'un ou l'autre des états solides. Il s'agit de la silice de formule $SiO_2$ [155] :

- sur la Figure 1.19 a) est schématisée la structure de la silice cristalline, le quartz. Les atomes de silicium et d'oxygène sont parfaitement ordonnés ;
- sur la Figure 1.19 b) est représentée la structure de la silice amorphe. On voit que les atomes sont bien liés entre eux, mais dans une structure désordonnée. C'est un verre.

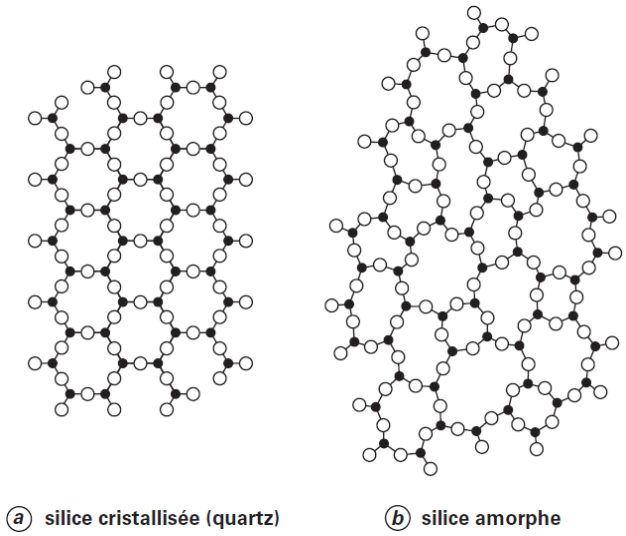



Figure 1.19 : Structure du quartz a) et du verre b) [155]

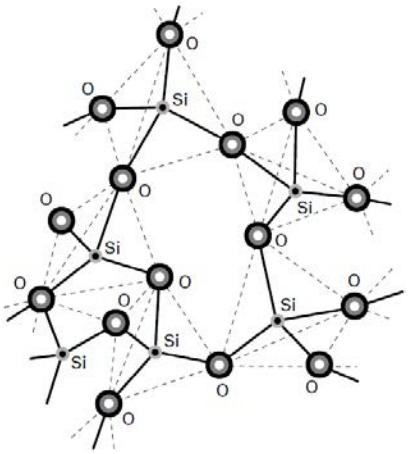



Figure 1.20 : Représentation schématique de la structure du verre de silice [152]

L'industrie du verre dispose de nombreuses matières premières, la plupart d'origine naturelle, et certaines d'origine synthétique.

Le Tableau 1.8 présente la composition massique du verre moderne.

Tableau 1.8 : Composition massique du verre moderne [155]

| Composé | $SiO_2$ | $Na_2O$ | CaO | MgO | $Al_2O_3$ | $K_2O$ | $Fe_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Proportion | 72,5% | 13% | 9,3% | 3,0% | 1,5% | 0,3% | 0,1% |

Il s'agit de verres dits silico-sodo-calcique car leurs trois principaux constituants sont la silice, la soude et la chaux [155].

Les principaux minéraux constitutifs du verre se retrouve également dans les argiles. Toutefois, le procédé de fabrication du verre diffère de celui des céramiques, du fait de l'enchainement des différentes étapes. L'élaboration du verre permet d'aboutir à différents types de produits.

### 1.5.3.2. Différents types de verre

Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède des qualités thermomécaniques remarquables. Sa mise en forme (verre creux, verre plat, fibre ou microbille) est aisée [156] ; il peut donc prendre de nombreuses formes : bouteilles, pots, flacons ; verre optique ;

ampoules, tubes cathodiques ; fenêtres et pare-brise ; briques de verre, etc. Par sa transparence ou sa couleur, le verre a fait ses preuves en tant que matériau de construction de l'architecture moderne. Ainsi, il est utilisé comme isolant sous forme de laine de verre (isolant léger et ininflammable) ou comme verres autonettoyants (grandes baie vitrées). L'émergence des verres métalliques a permis d'introduire des verres comme matériaux de structure, du fait de leurs extraordinaires propriétés mécaniques, en particulier sous forme de fibres ou de rubans de renfort pour des bétons hautes performances [154], [157]. Le verre est également un matériau étanche avec une bonne durabilité chimique et donc largement utilisé pour le conditionnement des liquides [156], et plus généralement dans le secteur de l'emballage. Ces produits ont une durée de vie limitée et doivent être recyclés afin d'éviter des problèmes environnementaux liés à leur stockage ou la mise en décharge.

#### 1.5.3.3. Possibilités de valorisation des déchets de verre en construction

Ahmed [45] a démontré que la quantité de débris de verre a doublé de 1960 à 1980 passant de 6,7 à 15 millions de tonnes. Le débris de verre est un matériau en constante progression dans les déchets domestiques [46]. Les produits en verre sont en principe entièrement réutilisables, soit par leur réutilisation dans les flux d'emballages, soit par leur recyclage pour la fabrication de nouveaux produits en verre. Cette dernière opération est généralement possible lorsque le verre est récupéré par couleur afin de fabriquer du verre de cette même couleur. Le cas échéant, ces déchets (verre non trié comme le calcin pollué à granulométrie fine) sont inutilisables pour la production de bouteilles de couleur spécifique. Par conséquent, d'énormes quantités de verre sont éliminées dans des décharges sans être réutilisées. Pour cette raison, il est nécessaire de trouver des alternatives technologiques viables permettant le recyclage de ces verres de manière économique et écologique. Le besoin de conserver les ressources et de protéger la nature incite aussi à utiliser les débris de verre provenant des déchets domestiques et industriels dans la construction [158]. Des utilisations secondaires du verre recyclé ont été développées tels que son utilisation sous forme de poudres fines [48] dans l'élaboration des matériaux de construction. Malgré les connaissances encore limitées sur l'utilisation des débris de verre dans la construction, on les retrouve dans les enrobés bitumineux, le béton de ciment, comme granulat de chaussée, etc.

Dans les travaux publics : Dans une étude de Su et Chen en 2002 [159], de la poudre de verre était incorporée au béton bitumineux. Les résultats des tests ont révélé que les déchets de verre sont un matériau viable pour le béton bitumineux. Le béton bitumineux fabriqué à partir de verre recyclé produit une réflexion adéquate de la lumière et améliore la visibilité nocturne. L'enquête conclut que le verre correctement pulvérisé peut être utilisé comme substitut pour les mélanges de béton bitumineux. Dans l'ensemble, les études ont démontré que l'on peut utiliser des résidus de verre dans l'enrobé bitumineux et que le pourcentage de résidus ne devrait pas dépasser 15% [46]. Le béton bitumineux fabriqué à partir de verre recyclé offre donc une solution très pratique à la gestion des déchets de verre, ce qui s'avère particulièrement intéressant pour les pays industrialisés du monde entier.

L'étude [43] qui s'est intéressée à l'évolution de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale des granulats routiers naturels en fonction de la teneur en verre de classe granulaire 0/5 mm a révélé que les teneurs en eau optimale diminuent en fonction de la teneur en verre. D'autre part, la densité sèche et les portances des mélanges s'améliorent de plus en plus avec l'ajout de verre, jusqu'à atteindre une valeur

optimale à 20% de verre. Au-delà de cette proportion, les mélanges commencent à perdre de leurs densités et de leurs portances qui restent toutefois supérieures aux portances développées par les granulats naturels sans verre. Le dosage optimal en verre est de 20%.

De plus, l'étude [44] portant sur la valorisation de la marne et des débris de verre de classe granulométrique 0/20 mm dans la construction routière a également montré que les mélanges à 20% de verre ont présenté une très bonne aptitude au compactage, avec de caractéristiques mécaniques très intéressantes sous les différentes sollicitations appliquées. En effet, le verre est reconnu comme insensible à l'eau, or il occupe une proportion importante dans les mélanges d'où la réduction de la sensibilité des mélanges à l'eau. Ainsi, l'ajout du verre influe sur le comportement au compactage des mélanges.

En cimenterie : D'après les études de T.D. Dyer et R.K. Dhir [160], les résidus de verre réduits en particules fines (poudre passant le tamis de 600 µm) pourraient être utilisés, en combinaison avec le ciment Portland, comme liant.

Dans la fabrication du mortier : L'utilisation de fines de verre ayant des surfaces spécifiques allant de 180 à 540 $m^2/kg$ a permis de réduire l'expansion du mortier soumis à une réaction alcalin-silice, due aux particules grossières de verre (agrégats de verre de diamètre supérieur à 1 mm) ; de plus, les particules fines augmentaient la résistance à la compression des mortiers. La finesse des poudres de verre influence alors les performances développées par les produits obtenus [48]. Par ailleurs, de la poudre de verre dont plus de 60% des particules présentent un diamètre inférieur à 100 µm, a été utilisée en substitution du ciment CPA. La résistance à la flexion trois points a été déterminée sur des éprouvettes de dimensions $4\times4\times16$ $cm^3$. Les résultats révèlent que l'ajout de 10 % ou 20 % de poudre de verre améliore la résistance à la flexion à la fois à 28 jours et à 90 jours de prise. La poudre de verre exerce donc un effet physique et chimique (réaction pouzzolanique et alcali-silice) qui pourrait s'expliquer par une adhérence entre les grains de ciment et de sable accrue en présence de poudre de verre. De plus, l'effet de la poudre de verre dépend de la classe de ciment auquel elle est substituée [49].

Dans la formulation du béton : En fonction de la taille des particules de verre utilisées dans le béton, deux comportements antagonistes peuvent être observés : la réaction alcalin-silice, qui entraîne des effets négatifs, et la réaction pouzzolanique, améliorant les propriétés du béton [48], [50], [51], [54]. Ainsi, il a été démontré que les résistances à la compression, à la traction et à la flexion du béton diminuent lorsque la teneur en verre usé, de diamètre inférieur à 5 mm, augmente. En outre, les propriétés mécaniques des bétons ne présentaient pas de différences notables en fonction de la couleur des granulats de verre [52]. De plus, l'augmentation de la proportion de granulats de verre recyclés de classe granulaire 0/25 mm dans le béton se fait avec la chute de résistance en compression ; ceci serait lié au défaut d'adhérence avec la matrice du béton [56]. Également, aux températures ambiante et élevée, les bétons fabriqués avec des agrégats de verre fins avaient des résistances à la compression plus élevées que ceux fabriqués avec des agrégats grossiers [53]. Par ailleurs, une étude [161] sur l'effet de l'incorporation de la poudre de verre broyée sur le béton a permis de vérifier que si la poudre de verre était fine, elle pourrait remplacer jusqu'à 30% de ciment dans certains

mélanges de béton présentant un développement de résistance satisfaisant, sans nuire aux propriétés. Aussi, le retrait au séchage du béton contenant des fines de verre était acceptable. De plus, les résultats portant sur la valorisation du verre à bouteille sous forme de poudre en remplacement du filler calcaire traditionnellement utilisé comme addition dans les bétons autoplaçants (BAP), ont montré un comportement bénéfique de la poudre de verre dans les mêmes proportions de 30 à 60 % par rapport à la masse du ciment, induisant des intérêts techniques et des avantages environnementaux potentiels [55]. La substitution de 20 % de ciment par de la poudre de verre réduit de 18 % les émissions de $CO_2$ [162].

Dans la fabrication de céramiques : Depuis plus de 50 ans, des travaux ont été consacrés à l'incorporation du verre dans les céramiques argileuses [140]. Everhart [163] a rapporté que l'incorporation de plus de 2,5% en poids de verre améliorait la résistance et l'absorption d'eau d'une céramique argileuse.

Shutt et al.[164] ont développé des briques à teneur en verre variable. Des résidus vitreux s'incorporent à la terre cuite en grande quantité avec une action bien spécifique. Le verre pilé de bouteilles ou autres miroirs n'engendre aucune interaction avec le minéral argileux mais s'écoule en revanche et comble les pores au cours de la cuisson des produits. Sa solidification durant le refroidissement entraine alors, en accord avec les valeurs expérimentales obtenues, une amélioration notable des propriétés mécaniques des produits dans des proportions en masse de 50 à 60% [165]. Cependant, l'augmentation de la contrainte à la rupture engendrée par une incorporation de résidus inorganiques s'effectue au détriment du caractère isolant des produits de terre cuite [125].

Les travaux de Youssef et al. [166] ont révélé que l'ajout de 33% de verre de soude moulu à une céramique à base de kaolin, cuit durant 1 heure à 1100 °C, s'est avéré intéressant. En effet, des échantillons ont été moulés sous une pression de 20,70 MPa et cuits à des températures comprises entre 950°C et 1100°C, pendant 3 h, 2h et 1 h de temps. La composition contenant 23% de verre de soude moulu (calcin) et cuite rapidement à 1100°C pendant 3 h avait la meilleure résistance mécanique. La composition contenant 33,3% de calcin pour une cuisson rapide pendant 1 h à 1100°C a été recommandée pour les carreaux non émaillés. Les résultats des tests standards effectués sur cette composition mise en forme sous forme de carreaux étaient compatibles avec les valeurs standard. L'utilisation de verre de soude moulu est recommandée en tant qu'additif pour son potentiel économique.

Matteucci et al. [167] ont observé que l'incorporation de résidus de verre à base de carbonate de calcium dans une masse céramique pour la fabrication de carreaux n'entraînait pas de modifications significatives sur les produits semi-finis (séchage) mais influence notablement le comportement au feu, le retrait, la densité apparente et la baisse des performances mécaniques. Ces différences sont limitées et tolérables avec l'ajout de 5% de verre. Les déchets de verre favorisent une fusion plus efficace du quartz et une dissolution partielle de la mullite, conduisant à une phase liquide plus abondante et moins visqueuse, ce qui accélère la cinétique de frittage. En conclusion, le verre sodocalcique peut être utilisé en petites quantités (5% ou moins) avec des modifications tolérables du comportement technologique et des performances des carreaux en grès cérame.

Morelli et Baldo [168] ont constaté que l'introduction d'un résidu vitreux tend à diminuer la température de cuisson requise pour la consolidation du corps en argile. De plus, la résistance finale de la céramique et l'absorption d'eau ont été améliorées.

Bragança et Bergmann [169] ont remplacé le feldspath traditionnel (25% ), en tant que fondant, par du verre à bouteille classique pour la fabrication de la céramique en porcelaine. L'utilisation de la poudre de verre a permis d'abaisser la température de cuisson de 100°C et le retrait linéaire. La réduction de la température de cuisson et l'utilisation d'un substitut moins cher que le feldspath font du verre d'emballage une alternative économique attrayante.

Godinho et al. [170] ont étudié l'incorporation de la poudre de verre à une formulation argileuse utilisée pour la production de tuiles. Ils ont indiqué qu'en plus d'une diminution de la plasticité du corps en argile, le verre améliorait les conditions de frittage de la céramique rouge. Les ajouts de verre augmentent la résistance à la flexion et le retrait linéaire dû à la cuisson tandis que l'absorption d'eau diminuait avec la quantité de verre ajoutée. Plus la quantité de verre ajoutée à la formulation est grande, plus cet effet est intense. L'incorporation de résidus de verre dans des produits à base d'argile est une alternative considérée comme naturelle et viable en raison de la bonne compatibilité entre la composition chimique de ces produits et celle des structures de verre sodo-calcique communes.

Des travaux de Pontikes et de ses coauteurs [171], [172] ont signalé que 30% en poids de verre, en remplacement des mélanges de corps de tuile de toiture, donnaient lieu à une céramique à absorption d'eau et à résistance améliorées.

La résistance à la compression de la brique fabriquée en remplaçant 25% à 45% d'argile par de la poudre de verre donne une charge supérieure à celle de la brique normale. Mais lorsque le taux de substitution est plus élevé, la résistance à la compression diminue. Avec un taux de 40%, la résistance à la compression est constante et vaut 4,1 $N/mm^2$ et la résistance ainsi obtenu est supérieure de 20,24 % à celle de la brique sans ajout de verre [173].

En somme, la possibilité de valorisation des déchets de verre et des cendres de bois au sein des matériaux de construction existent. De plus, les différentes études présentées quant à l'incorporation de cendres ou de verres dans les produits rouges ont montré la faisabilité de cette approche. Toutefois, elles révèlent la variabilité des performances enregistrées au niveau des produits compte tenu des différents paramètres de formulation mise en jeu notamment : la nature des constituants, le dosage, la granulométrie, le façonnage, la teneur en eau, le séchage, la cuisson.

Ainsi, les briques d'argiles cuites constituent des matériaux de construction très intéressants dont l'élaboration suscite encore de nombreuses questions de recherches. La maîtrise des propriétés physiques, mécaniques et thermiques desdits matériaux en fonction de leur formulation et des propriétés des matériaux constitutifs sera d'un grand atout pour leur mise en œuvre efficiente dans le bâtiment.

## 1.6. Synthèse.

Dans ce premier chapitre nous avons présenté en premier lieu, les interactions entre le bâtiment et son environnement et les paramètres de l'enveloppe du bâti qui influent sur le confort thermique au sein de l'habitat. Les propriétés des matériaux constitutifs de l'enveloppe du bâtiment se révèlent comme déterminants dans l'atteinte du confort thermique pour une facture énergétique minimale.

Les matériaux de construction sont alors présentés selon les différents critères de classification et les critères de choix d'un matériau de construction sont ensuite exposés ; puis nous nous sommes penchés plus particulièrement sur les matériaux céramiques.

Les matières premières et le processus d'élaboration des céramiques pour le bâtiment ont donc été exposé de même que les différents types de briques d'argile cuite utilisés dans le bâtiment et leurs propriétés.

Enfin, les possibilités de recyclage et de valorisation en construction de certains déchets, notamment les cendres et les verres, sont discutées. Plus spécifiquement, l'intérêt de ces matériaux « considérés comme des déchets » dans les céramiques du bâtiment est analysé.

En définitive, il est loisible de dire que la terre cuite est un matériau de construction noble qui offre des possibilités d'incorporation de certains déchets en son sein. Toutefois, il est important d'optimiser son processus d'élaboration afin que ces matériaux d'ajout « les déchets » n'affectent pas négativement les propriétés du matériau original.

La maîtrise de l'élaboration des briques d'argile cuite incorporant des déchets de verre ou de cendres de bois répondra à plusieurs problématiques notamment la gestion et la valorisation des déchets et la valorisation de matériaux locaux (argiles) en construction. Mais au-delà de l'aspect valorisation, l'utilisation des briques d'argile cuite au Bénin, pourrait aussi contribuer à l'amélioration du confort thermique dans les bâtiments d'habitation et par ricochet à la réduction de la consommation énergétique. Tout ceci permettra d'assurer un cadre de vie sain, durable et à moindre coût à des populations vulnérables.

Les matières premières sont déterminantes dans le processus de fabrication des briques cuites. Il est alors important de se les approprier à travers la détermination de leurs propriétés d'état, leur plasticité et granulométrie mais également leurs compositions minéralogique et chimique, afin de les classifier.

# CHAPITRE 2 ▪ **Matériaux utilisés et** Modes **d'élaboration des blocs d'argile**.

## Sommaire


2.1. Introduction ..... 55
2.2. Origines et préparation des matières premières ..... 56
2.3. Propriétés des matières premières ..... 60
2.4. Classification des sols étudiés ..... 76
2.5. Méthodes d'élaboration des blocs d'argile cuits ..... 78
2.6. Synthèse ..... 84

## 2.1. Introduction

Les argiles se répartissent en différentes familles compte tenu de leurs composition et organisation structurale. Celles-ci confèrent aux argiles des propriétés spécifiques qui définissent en outre, leurs diverses applications.

Ainsi, les argiles utilisées dans la fabrication des briques cuites doivent contenir des minéraux argileux assurant la plasticité et la cohésion de la pâte avant cuisson, puis le collage céramique à haute température. À cet effet, un mélange kaolinite-illite avec un peu de smectite est des plus favorables, avec du quartz pour réduire les pertes de séchage et de cuisson et faciliter le flux d'eau de mise en forme, puis des éléments colorants tels que $Fe_2O_3$, $TiO_2$, $MnO_2$ qui servent également à la fusion [6]. La présence de certaines impuretés notamment les matières organiques pourrait entrainer des défauts au niveau des produits cuits ou l'éclatement de la pâte au cours de la cuisson. Les propriétés des briques d'argile cuites seront donc déterminées par celles des matériaux de base entrant dans leur fabrication.

De plus, le procédé d'élaboration des briques cuites est très délicat et comprend plusieurs phases aussi importantes les unes que les autres.
Une bonne connaissance des matières premières entrant dans la formulation et la maîtrise du procédé de fabrication des briques cuites, sont donc primordiales pour analyser leurs performances aussi bien physiques, mécaniques que thermiques.

Ce chapitre présente dans un premier temps, les matières premières utilisées dans la formulation des blocs d'argile cuits à travers leurs origines et les techniques de préparation adoptées.
Les caractéristiques de ces matériaux de base (compositions et propriétés) sont ensuite déterminées par différentes méthodes qui ont permis leur identification. Il s'est agi de la détermination : des paramètres d'état (teneur en eau, masse volumique), de l'argilosité (limites d'Atterberg, Valeur au Bleu de Méthylène), des matières organiques, de la granulométrie, de la composition minéralogique et chimique, puis de l'identification des sols argileux selon différents systèmes de classification.
Enfin, les différentes techniques d'élaboration des blocs cuits sont abordées avec un intérêt particulier pour les techniques de compactage utilisées.

## 2.2. Origines et préparation des matières premières

Les travaux de recherches s'effectuent entre la France et le Bénin. Ainsi, certains matériaux utilisés dans l'élaboration des blocs d'argile cuits proviennent du Bénin et d'autres de la France. Cette étude a donc permis d'apprécier le comportement à la cuisson de deux sols argileux du Sud Bénin prélevés dans les communes de Zogbodomey et Sèmè-Podji et d'un sol argileux prélevé dans la commune de Xeuilley dans l'Est de la France. Des cendres de bois du Bénin et de la France sont également utilisées de même que de la poudre de verre (bouteilles en verre broyés).

### 2.2.1. Argiles

De forme allongée, la république du Bénin est un pays d'Afrique de l'Ouest, qui couvre une superficie de 114 763 km² [174] et s'étend sur 700 km du fleuve Niger au nord à la côte atlantique au sud. Le pays est situé dans la zone intertropicale entre les parallèles 6° 10' et 12° 25' de latitude Nord et 0° 45' et 3° 55' de longitude Est. Avec une population de 10 008 749 habitants pour une densité de 87,2 habitants au kilomètre carré (hab./km²) en 2013 [174], le Bénin est découpé en 77 communes réparties dans douze (12) départements : Alibori, Atacora, Atlantique, Borgou, Collines, Couffo, Donga, Littoral, Mono, Ouémé, Plateau, Zou.

Les recherches géologiques et minières ont révélé des gisements d'argile à Zogbodomey (le plus important gisement évalué) mais également à Sèmè-Podji (gisement non encore évalué). Ces zones d'étude ont donc été retenues pour le prélèvement des argiles au Bénin du fait de la disponibilité des matériaux, de la proximité relative des sites par rapport aux villes à statut dortoirs où les populations érigent leurs habitats, mais aussi compte tenu de la proximité de ces sites par rapport au laboratoire de recherche à l'Université d'Abomey-Calavi.

La commune de Zogbodomey est située dans la partie méridionale du plateau d'Abomey dans le Département du Zou à 117 km de Cotonou, la capitale économique du Bénin. Du point de vue géologique, la commune se situe dans sa partie Nord sur du grès de crétacé (que recouvre plus au nord le continental terminal) et dans sa partie sud dans une dépression sur des sédiments argileux [175]. Les sols étudiés de couleur jaune avec des passages blancs (Figure 2.3), ont été prélevés dans la carrière exploitée par l'usine de production de Brique d'argile cuite Nature Brique (NB) située entre 7° 2' 41.1828" de latitude Nord et 2° 11' 3.5802" de longitude Est (Figure 2.1).

La commune de Sèmé-Podji est située dans le département de l'Ouémé au Sud-Est du Bénin à 20 km de Cotonou, sur la côte Atlantique. Elle fait partie du bassin sédimentaire côtier du Benin où l'on retrouve les sols de plateau, les sols de bordures de plateau, les sols de la dépression de la Lama et les sols de la vallée de la zone littorale. Son relief très bas varie entre 0 et 6 m d'altitude et est majoritairement composé de marécages et de sables fins. Ces sols sont pour la plupart hydromorphes et riches en dioxyde de silicium $SiO_2$ avec quelques éléments de sol ferrugineux de type tropical [176]. Les sols étudiés de couleur gris-noir (Figure 2.6), ont été prélevés dans un marécage (Figure 2.5), située entre 6° 25' 20.9202" de latitude Nord, 2° 35' 56.7018" de longitude Est (Figure 2.2).




Figure 2.1 : Situation géographique de la carrière d'argile de Zogbodomey




Figure 2.2 : Zone de prélèvement de l'argile de Sèmè-Podji



Figure 2.3 : Argile naturelle de Zogbodomey



Figure 2.4: Matériau obtenu après préparation



Figure 2.5 : Zone de prélèvement de l'argile de Sèmè-Podji



Figure 2.6 : Séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji



Figure 2.7 : Matériau granulaire obtenu après préparation

Nous avons également identifié une carrière à proximité de notre laboratoire de recherche en France, pour le prélèvement et l'étude de sols argileux. Il s'agit de la carrière de Xeuilley qui est située à 20 km au sud-ouest de Nancy [177] entre 48° 35' 40.5276" de latitude Nord et 6° 3' 35.2368" de longitude Est (Figure 2.8). Xeuilley est une commune française d'une superficie de 737 ha, située dans le département de Meurthe et Moselle et la région Lorraine. La carrière de 350 ha exploitée par une cimenterie appartenant au groupe VICAT, troisième cimentier en France avec 6 millions de tonnes produites par an, fournit un des matériaux nécessaires à la fabrication du ciment artificiel : la marne riche en argile.

L'intérêt de l'étude de ce matériau réside dans la possibilité de s'approvisionner facilement et en quantité illimitée, afin de tester la mise au point de la fabrication des blocs d'argile cuits.

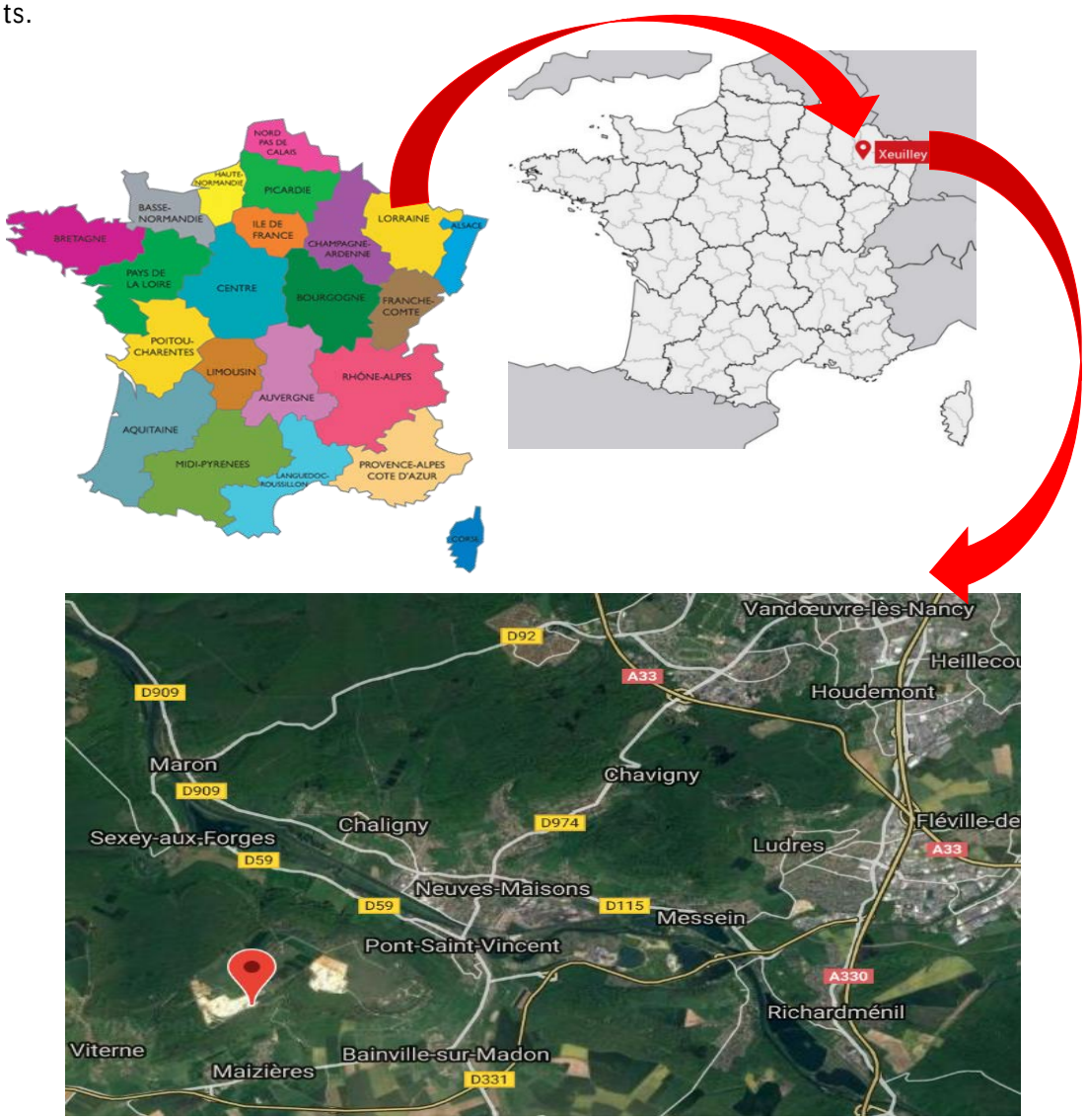



Figure 2.8: Localisation de la carrière d'argile de Xeuilley en France

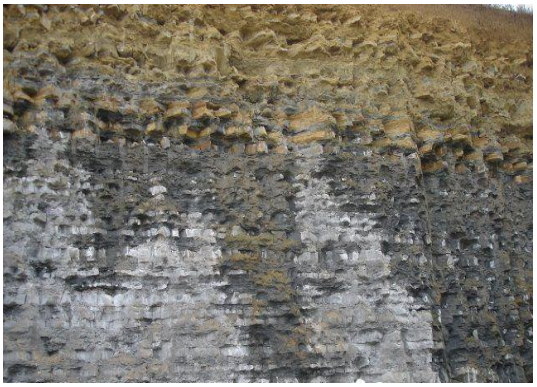


Figure 2.9 : Front de taille de la carrière de Xeuilley



Figure 2.10 : Argile de Xeuilley après préparation

Le matériau prélevé à Xeuilley de couleur brune et beige argile (Figure 2.10), est un limon argileux très plastique qui a fait l'objet de nombreuses études [95], [177]-[180]. Ainsi, nous rappelons dans ce travail les principales caractéristiques minéralogiques et géotechniques de ce sol.

La préparation des argiles a consisté dans un premier temps en l'extraction à ciel ouvert sur une hauteur variant de 3 à 10 m après l'enlèvement de la découverte (encore appelée stérile). Après l'extraction, l'on procède au prélèvement des matières premières dans des contenants préparés à cet effet puis à leur acheminement au laboratoire. Ensuite l'argile naturelle et humide prélevée est débarrassée des impuretés puis séchée à l'étuve à une température de 50°C jusqu'à masse constante. Les matériaux secs sont ensuite broyés puis tamisés au tamis d'ouverture de maille de 400 µm afin d'obtenir la matière de base pour la formulation des différentes éprouvettes.

### 2.2.2. Cendres de bois

Les cendres issues de la cuisson des repas à partir des foyers sont récupérées au niveau des restaurateurs et des ménages dans la ville d'Abomey-Calavi au Bénin. Ces cendres sont ensuite tamisées afin de les débarrassés des résidus de charbons et autres impuretés apparentes. Puis, elles sont tamisées au tamis d'ouverture de maille de 400 µm afin d'obtenir la matière de base pour la formulation des différentes éprouvettes.



Figure 2.11 : Tamisage des cendres du Bénin



Figure 2.12 : Cendres du Bénin < 400 µm

### 2.2.3. Verres broyés

Les bouteilles d'emballage en verre sont collectées, débarrassées de toutes impuretés, lavées puis séchées. Elles sont ensuite concassées puis broyées avant d'être tamisées au tamis d'ouverture de maille de 400 µm afin d'obtenir la matière de base pour la formulation des différentes éprouvettes.



Figure 2.13 : Bouteilles de vins recyclées



Figure 2.14 : Déchets de verres récupérés dans les buvettes



Figure 2.15 : Poudre de verre

## 2.3. Propriétés des matières premières

Bien que des normes d'utilisation des argiles dans les divers secteurs de la céramique varient d'un pays à un autre, les exigences technologiques reposent souvent sur la granulométrie, la composition chimique et/ou minéralogique [96], [102], [118], [181], la plasticité, la masse volumique des grains solides, etc…

L'étude de la formulation des matériaux de construction repose en première approche sur la maîtrise des matières premières du mélange. La connaissance des sols se fait à travers les essais d'identification. « Identifier » un sol en géotechnique consiste classiquement à déterminer :

- la teneur en eau,
- le poids volumique apparent et spécifique des grains,
- la granulométrie avec ou sans analyse des fines par sédimentométrie ;
- l'argilosité : les limites d'Atterberg (limite de liquidité $W_L$, limite de plasticité Wp), la valeur au bleu (de méthylène) du sol (VBS) ;
- la propreté : teneur en matières organiques (MO).

### 2.3.1. **Paramètres d'état**

Les paramètres d'état caractérisent le comportement des sols. Ils présentent les proportions des différentes phases (solide, liquide et gaz) des échantillons de sols, comme le montre la Figure 2.16 Ils ne sont pas indépendants. La caractérisation de l'état de ces échantillons nécessite la détermination des trois paramètres indépendants tels que le poids volumique total, le poids volumique des grains solides et la teneur en eau.

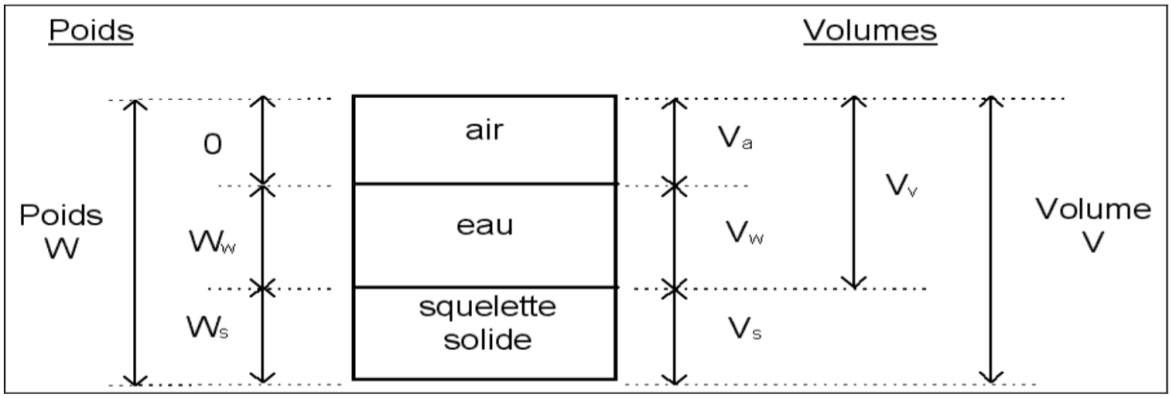



Figure 2.16 : Diagramme des poids et volumes des constituants d'un sol [182]

2.3.1.1. Teneur en eau naturelle NFP 94-050 [183]

La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin. C'est le rapport de la masse de l'eau $\mathbf{w_w}$ contenue dans ce matériau sur la masse du matériau sec $\mathbf{w_s}$.

$$\mathbf{w(\%)=\frac{W_w}{W_s}\times 100} \qquad 2.1$$

Le matériel nécessaire pour cet essai est constitué d'une balance, deux tares et une étuve. Une masse de matériau humide est introduite dans une tare propre et sèche de masse connue. L'ensemble (tare + matériau) est ensuite pesé puis introduit dans une étuve maintenue à une température de 105°C.

Deux (02) pesées séparées par un intervalle de temps *t* sont effectuées après des passages à l'étuve.
Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse sèche de l'ensemble (tare + matériau) n'a pas variée de plus de 2/1000 entre les deux pesées.
L'argile de Sèmè-Podji a été prélevée à l'état humide saturée. Sa teneur en eau après préparation : prélèvement, séchage, concassage, broyage et tamisage à 2 mm est de 8%. Tandis que le sol de Xeuilley présente une teneur en eau naturelle de 23% [177]. En outre, la teneur en eau naturelle de l'argile prélevée à Zogbodomey vaut 9%.
Les cendres de bois du Bénin présentent une teneur en eau de 6% et les verres broyés ne renferment pas d'eau.

2.3.1.2. Masse volumique **ρ (g/cm$^3$)**

La masse volumique apparente ρ se mesure à l'aide d'un récipient-mesure selon la norme NF EN 1097-3 [184] par la relation :

$$\mathbf{\rho=\frac{M}{V}} \qquad 2.2$$

Le résultat exprimé en kg.m$^{-3}$ ou en g.cm$^{-3}$ varie de manière conséquente en fonction du taux de tassement, de la granulométrie et de l'humidité de la matière.
Par conséquent, il est indispensable d'associer la mesure de la masse volumique apparente à l'humidité de la matière au moment où la masse volumique a été déterminée.

La masse des particules solides est obtenue par pesage et le volume mesuré à l'aide d'un pycnomètre à eau selon la norme NF P 94-054 [185]. Une petite quantité d'échantillon sec est introduite dans le pycnomètre. On y ajoute de l'eau jusqu'au trait de jauge. Après 72 heures de repos, temps requis pour que l'eau soit complètement absorbée, les masses en grammes suivantes sont prises au cours de l'essai :

- $M_1$ : Masse du pycnomètre et du bouchon ;
- $M_2$ : Masse du pycnomètre, du bouchon et de la prise d'essai ;
- $M_3$ : Masse du pycnomètre, du bouchon, de la prise d'essai et de l'eau ;
- $M_4$ : Masse du pycnomètre, du bouchon et de l'eau.

La masse volumique des particules solides $\rho_s$ est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \times \frac{M_2 - M_1}{M_4 + M_2 - M_1 - M_3} \qquad 2.3$$

Par convention, la masse volumique de l'eau $\rho_w$ est égale à 1000 kg/m$^3$. L'essai est réalisé à deux reprises. Le résultat constitue la moyenne des deux valeurs.

Le Tableau 2.1 présente les valeurs moyennes des résultats obtenus.

L'évolution des masses volumiques en vrac des matériaux étudiés est similaire à celui des masses volumiques des particules solides desdits matériaux.

La masse volumique en vrac des cendres est inférieure à celle de l'argile de Sèmè-Podji qui quant à elle, est inférieure à celle de l'argile de Zogbodomey, également inférieur à celui des verres broyés.

Au regard des résultats obtenus par les différentes études antérieures sur le sol de Xeuilley, il présente une masse volumique des particules solides moyenne de 2,66 ± 0,01 g/cm$^3$.

La masse volumique des particules solides du sol de Zogbodomey vaut 2,62 ± 0,01 g/cm$^3$. Cette valeur est peu différente de la valeur 2,61 g/cm$^3$ obtenue par Sagbo *et al*. en 2015 [6]. Ce paramètre donne une idée de la forme minéralogique dominante dans l'échantillon.

Ainsi, les sols de Zogbodomey et de Xeuilley seraient kaolinitique (2,40 g/cm$^3$ à 2,68 g/cm$^3$) et /ou composé de quartz (2,65 g/cm$^3$) en comparaison aux masses volumiques des particules solides de ces minéraux [186].

Le sol de Sèmè-Podji a une masse volumique des particules solides de 2,50 ± 0,02 g/cm$^3$. Cette valeur est inférieure à celle du sol de Zogbodomey dont la valeur est également inférieure à celle du sol de Xeuilley. Mais au vu de sa masse volumique, elle pourrait être kaolinitique en comparaison au sol de Zogbodomey.

La masse volumique des particules solides des verres broyés est la plus élevée : 2,90 g/cm$^3$, tandis que les cendres de bois du Bénin présentent la plus faible masse volumique des particules solides, soit 2,29 g/cm$^3$.

La connaissance de la masse volumique apparente et de celle des particules solides des matières premières permet d'exprimer leur porosité **n** et leur indice de vides **e**.

$$n = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \qquad 2.4$$

$$e = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_a} = \frac{n}{1-e} \qquad 2.5$$

Tableau 2.1 : Masse volumique des matériaux de base

| Matériaux | Masse Volumique des particules Solides (g/cm$^3$) | Masse Volumique en vrac (g/cm$^3$) |
|---|---|---|
| Argile de Zogbodomey | 2,62 ± 0,01 | 1,15 ± 0,02 |
| Argile de Sèmè-Podji | 2,50 ± 0,02 | 1,13 ± 0,00 |
| Argile de Xeuilley | | |
| Troalen, 1998 [187] | 2,65 | |
| Rolland, 2002 [177] | 2,69 ± 0,01 | |
| Alonso, 2005 [188] | 2,67 | |
| Ltifi et Tisot, 2007 [189] | 2,64 | |
| Auvray *et al*, 2013 [190] | 2,65 | |
| Verres broyés | 2,90 ± 0,00 | 1,20 ± 0,01 |
| Cendres de bois du Bénin | 2,29 ± 0,07 | 0,51 ± 0,00 |

Tableau 2.2 : Indice des vides et porosités des matériaux du Bénin

| Matériau | Cendres de bois du Bénin | Verres broyés | Argile Zogbodomey | Argile Sèmè-Podji |
|---|---|---|---|---|
| Porosité de lit n (%) | 78 | 59 | 56 | 55 |
| Indice des vides e (%) | 349 | 142 | 128 | 121 |

Les données du Tableau 2.2 confirment le caractère volant des cendres de bois qui présentent la plus forte proportion de vides et la plus grande porosité.

Les autres matériaux ont pratiquement la même porosité et les argiles du Bénin ont sensiblement le même indice de vide. L'indice des vides des verres broyés est plus important que celui des argiles du Bénin.

La substitution de l'argile par les cendres de bois permettrait donc d'alléger les blocs cuits par rapport (plus faible masse volumique) aux blocs d'argile sans ajout, contrairement aux blocs incorporant des verres broyés.

Les blocs incorporant des cendres de bois devraient donc s'avérer plus isolants que les autres blocs.

### 2.3.2. Granulométrie

L'étude granulométrique d'un matériau naturel, devant servir dans le secteur de la céramique est d'une importance capitale car c'est d'elle que dépendent les caractéristiques des produits finis qui en dérivent. La composition granulométrique des argiles intervient donc pour une part importante dans leurs aptitudes au façonnage, au séchage et à la cuisson.

La composition granulaire des sols argileux est déterminée successivement à travers deux essais: l'analyse granulométrique effectuée par tamisage à sec après lavage de la prise d'essai sur un tamis de 80 µm de diamètre, selon la norme NF P94-056 [191] et la sédimentométrie sur la fraction inférieure à 80 µm par densimétrie suivant la norme NF P94-057 [192].

Le tamisage consiste à faire passer un échantillon représentatif de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures vont en décroissant du haut vers le bas : 2 mm ; 1,25 mm ; 1 mm ; 0,63 mm ; 0,5 mm ; 0,4 mm ; 0,2 mm ; 0,1 mm et 0,08 mm. Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis les plus hauts (refus ou retenus), tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inferieurs (tamisât ou passants). Lorsque les masses retenues sur chaque tamis deviennent constantes, le tamisage est terminé et tous les refus sont pesés. La masse de chaque refus est ensuite comparée à la masse totale de l'échantillon, ce qui permet de calculer les pourcentages de refus cumulés et de passants. Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique permettant d'obtenir une courbe granulométrique.

La sédimentométrie consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules solides des sols fins. En assimilant les grains à des sphères, on peut appliquer la loi de Stokes :

$$v=\frac{9,8D^2(D_{rs}-D_{rl})}{3\eta} \Rightarrow D=\sqrt{\frac{3\eta}{9,8(D_{rs}-D_{rl})}} \qquad 2.6$$

Où : D, v, $D_{rs}$, $D_{rl}$ et $\eta$ désignent respectivement le diamètre de la sphère (mm), la vitesse de chute de la sphère (cm/min), la densité relative de la sphère, la densité relative du liquide et la viscosité dynamique du liquide (Pa.s).
Les proportions correspondant aux particules de diamètres inférieurs à 2 mm, 80 µm et 2 µm renseignent sur la nature des sols.

La Figure 2.17 présente la distribution granulométrique obtenue par sédimentométrie des sols de Sèmè-Podji et de Zogbodomey. Le refus sec issu du lavage au tamis de 80 µm de ces sols n'est pas représentatif pour une analyse granulométrique par tamisage à sec.

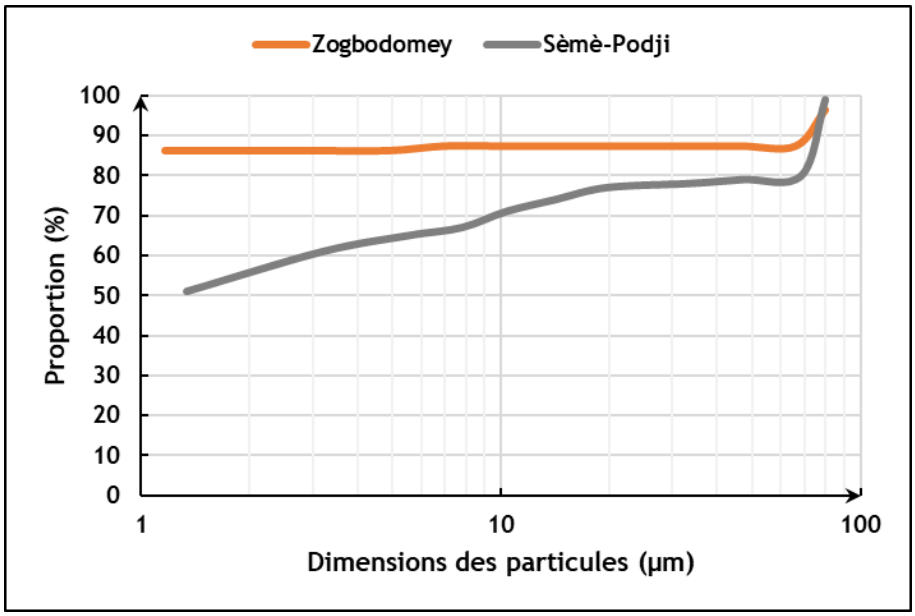



Figure 2.17 : Courbes granulométriques des sols étudiés

Les sols de Zogbodomey et de Sèmè-Podji présentent un pourcentage de passants au tamis 80 µm respectif de 96% et 99%. La proportion de passants au tamis 2 µm du sol de Sèmè-Podji est en revanche très inférieure à celui de Zogbodomey. Les deux échantillons présentent une forte proportion d'éléments fins et sont donc exempts d'éléments grossiers. On observe

également que la courbe de l'argile de Zogbodomey tend vers l'horizontale, ce qui signifie que les dimensions des particules ne varient presque pas.

La distribution granulométrique des verres broyés est obtenue à l'aide d'un granulomètre laser MASTERSIZER 2000 MALVERN. Cette technique permet la quantification de la distribution des tailles des particules par le calcul des rayons et de la fréquence statistique en classes de taille.
Le principe de l'analyse granulométrique par diffraction laser est basé sur les théories de diffraction de Fraunhofer et de Mie, ainsi que sur la théorie de la sphère équivalente qui stipulent que l'angle de diffraction du rayon laser émis par une source de lumière intense et cohérente est inversement proportionnel à la taille de la particule [5], [193], [194].

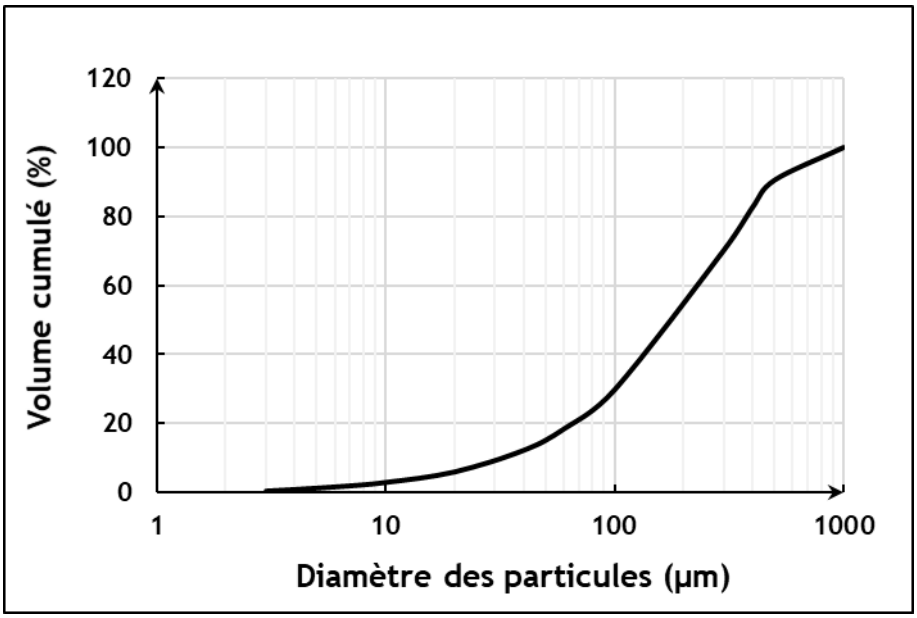



Figure 2.18 : Courbe granulométrique des verres broyés

La Figure 2.18 présente la distribution granulométrie des particules de verres utilisées. Elles présentent un volume moyen de 230 µm.
La détermination de la composition minéralogique puis chimique des sols est effectuée en complément des essais d'identification pour une connaissance plus affinée des matières premières d'étude.

## 2.3.3. Argilosité

Les limites d'Atterberg et la valeur au Bleu de Méthylène d'un Sol (VBS) sont des paramètres qui renseignent sur sa teneur en argile.

### 2.3.3.1. **Limites d'Atterberg**

Dans la nature, un sol peut se trouver sous différents états de consistance (Figure 2.19). La consistance est un état de fermeté qui est liée aux forces de cohésion entre les particules. Elle ne concerne que les sols fins ou cohérents et a une influence sur la résistance aux déformations.

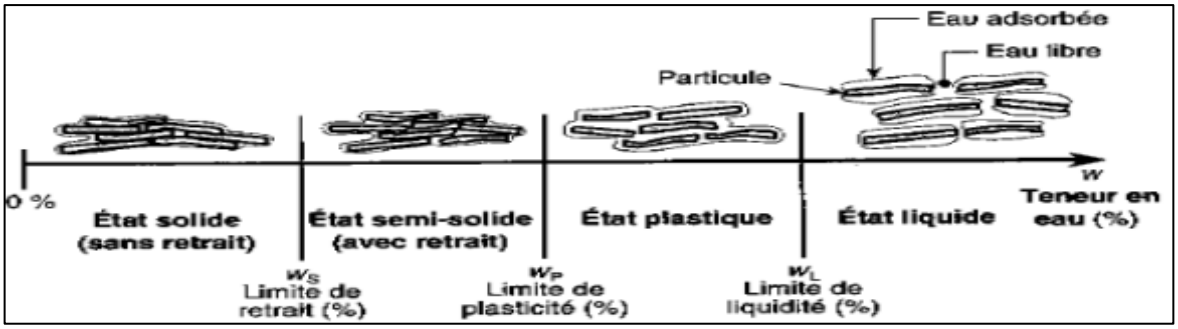



Figure 2.19 : États de consistance d'un sol

- Lorsque le sol est à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbée sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il n'y ait rupture. En génie civil, on parle de sol ayant un comportement fragile, similaire à celui de la brique.
- Un sol à l'état semi-solide, a une faible teneur en eau et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoiqu'encore minces, séparent légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures.

- Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus épais mais ils se touchent encore ; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide. Sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. C'est un sol qu'on peut façonner à la main.
- Lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre. Le sol peut alors se comporter comme un liquide visqueux d'une consistance variant de celle d'un gel à celle de la pâte à modeler.

Les teneurs en eau qui délimitent les quatre (04) états de consistance sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg. Ces limites, qui s'expriment en pourcentages (%), sont les suivantes :

- La limite de retrait WS (%) : cette limite beaucoup moins utilisée, est la teneur en eau à partir de laquelle le volume de l'échantillon cesse de diminuer quand sa teneur en eau décroit. Elle est importante au niveau du séchage des briques d'argile.
- La limite de plasticité WP (%) : c'est la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Elle varie de 0 % à 100 %, mais elle demeure généralement inférieure à 40 %.
- La limite de liquidité WL (%) : c'est la teneur en eau en-dessous de laquelle le sol cesse d'avoir la consistance d'un liquide très visqueux. Elle peut atteindre 1000 % dans le cas de certaines argiles, mais dans la plupart des cas elle ne dépasse pas 100 %.

Les limites de plasticité et de liquidité servent à identifier et à classifier les sols à grains fins. Quant à la limite de retrait, elle sert à l'étude de certains sols dont le volume varie fortement à cause des changements de teneur en eau.
Un paramètre important déduit de la connaissance de $W_L$ et $W_P$ est l'indice de plasticité.

- **L'indice de plasticité I**P (%) correspond à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Il permet d'avoir une indication assez précise sur la nature d'un sol fin : sa plasticité et son argilosité.

$$\mathbf{I_P(\%)=W_L-W_P} \qquad 2.7$$

Un $I_P$ élevé correspond à un sol argileux, dont les propriétés seront très sensibles à la teneur en eau ; un $I_P$ faible correspond à un sol peu argileux, moins sensible aux variations en teneur en eau.

- **L'indice de liquidité ($I_L$)** peu utilisé permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi-solide ou solide.
Pour établir cet indice, on compare la teneur en eau naturelle in situ (w) d'un sol à ses limites de plasticité et de liquidité.

$$\mathbf{I_L=\frac{W-W_P}{W_L-W_P}=\frac{W-W_P}{I_P}} \qquad 2.8$$

Les essais permettant la détermination des limites d'Atterberg sont effectués sur la fraction de sol inférieure à 400 µm conformément à la norme NF P 94-051[195].
La classification des sols fins selon l'indice de plasticité est présentée au Tableau 2.3 et au Tableau 2.4.

Tableau 2.3 : Seuils d'argilosité des sols fins

| Indice de Plasticité | Degré d'argilosité |
|---|---|
| $I_P < 12$ | Sol faiblement argileux |
| $12 \leq I_P < 25$ | Sol moyennement argileux |
| $25 \leq I_P < 40$ | Sol argileux |
| $I_P \geq 40$ | Sol très argileux |

Tableau 2.4: Classification des sols fins selon l'indice de plasticité

| Indice de Plasticité | Degré de Plasticité |
|---|---|
| 0 < IP < 5 | Sol non plastique |
| 5 < IP < 15 | Sol peu plastique |
| 15 < IP < 40 | Sol plastique |
| IP > 40 | Sol très plastique |

Le Tableau 2.5 présente les limites d'Atterberg des argiles étudiés.

Tableau 2.5 : Limites d'Atterberg des argiles

| Matériaux | Limite de Liquidité $W_L$ (%) | Limite de Plasticité Wp (%) | Indice de plasticité $I_P$ (%) |
|---|---|---|---|
| Argile de Zogbodomey | 81 | 31 | 50 |
| Argile de Sèmè-Podji | 85 | 32 | 53 |
| Argile de Xeuilley | | | |
| Troalen, 1998 [187] | 50,1 - 53,1 | 33,0 - 33,9 % | 17,1 - 19,2 |
| Rolland, 2002 [177] | 53 | 30 | 23 |
| Alonso, 2005 [188] | 53 | 30 | 23 |
| Ltifi et Tisot, 2007 [189] | 55 | 30 | 25 |

Les argiles de Zogbodomey et de Sèmè-Podji (sols du Bénin) ont pratiquement le même indice de plasticité $I_P$, valeur supérieure à 40%. Il s'agit donc de sols très argileux et très plastiques au regard des Tableau 2.5 et Tableau 2.4.

Les résultats des essais réalisés par différents auteurs [187]–[189] conformément à la norme NF P 94-051[195] révèlent que l'indice de plasticité du matériau prélevé à Xeuilley est compris entre 15% et 40%, il s'agit donc d'un sol plastique moyennement argileux.

Tous les sols étudiés sont donc argileux mais présentent différents niveau d'argilosité.

#### 2.3.3.2. V**aleur au bleu d'un sol VBS (g/100 g) NF P94**-068

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau, dosage par une solution de bleu dosée à 10 g/l. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol.
Des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre. Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par gramme de la fraction granulaire testée. Le test est dit positif si, dans la zone humide, apparaît autour du dépôt central l'auréole bleu clair persistante. Dans ce cas, laisser s'opérer l'adsorption du bleu, qui n'est pas instantanée en effectuant des tests de minute en minute sans ajout de solution. Il est dit négatif si l'auréole bleu clair disparaît à la cinquième minute, procéder à de nouvelles injections de solution de bleu de 2 ml. Chaque addition est suivie de tests effectués de minute en minute. L'opération est renouvelée jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives, le dosage est terminé. Pour les matériaux dont le diamètre maximal ($D_{max}$) est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$\mathbf{VBS = 100 \times \frac{B}{m_0}} \qquad 2.9$$

Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de matériau sec où B représente la masse de bleu introduite en grammes et $m_0$ la masse de la prise d'essai en grammes.

D'après la norme NFP11-300 [196], six catégories de sols sont définies selon la valeur de VBS (Tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Classification des sols selon la Valeur au Bleu de Méthylène

| Valeur au bleu de méthylène (VBS) | Catégorie de sol |
|---|---|
| VBS < 0,1 | Sol insensible à l'eau |
| 0,2 ≤ VBS <1,5 | sol sablo limoneux, sensible à l'eau |
| 0,2 ≤ VBS <1,5 | sols sablo-argileux, peu plastiques |
| 2,5 ≤ VBS <6 | sols limoneux de plasticité moyenne |
| 6 ≤ VBS < 8 | sols argileux |
| VBS > 8 | sol très argileux |

Le Tableau 2.7 présente la valeur au Bleu de Méthylène des argiles et des cendres de bois du Bénin.

Tableau 2.7 : Valeur au Bleu de Méthylène

| Matériaux | Valeur au Bleu de méthylène (g/100g) |
|---|---|
| Argile de Zogbodomey | 6,68 |
| Argile de Sèmè-Podji | 4,44 |
| Argile de Xeuilley | 5,06-5,40 (Troalen, 1998 [187]) |
| Argile de Xeuilley | 4,40 (Nowamooz, 2007 [178]) |

La valeur au bleu de méthylène (VBS) de l'argile de Zogbodomey est de 6,68 g de bleu pour 100 g de cette argile à l'état sec, ce qui est au-delà du seuil de 6. Conformément au Tableau 2.6, il s'agit donc d'un sol argileux. Les travaux de Sagbo *et al* en 2015 [6] ont permis de déterminer certaines caractéristiques des sols argileux de Zogbodomey telles que la capacité d'échange cationique qui vaut 4,16 meq/100g, la surface spécifique égale à 69,2 $m^2/g$.

La valeur au bleu des argiles de Sèmè-Podji et de Xeuilley est comprise dans l'intervalle 2,5 < VBS < 6. Conformément donc au Tableau 2.6, il s'agit de sols limoneux de plasticité moyenne.

### 2.3.4. Teneur en Matières Organiques (MO)

La pollution d'un sol par les débris végétaux entraine souvent des conséquences dommageables si celui-ci doit être utilisé pour la construction d'infrastructures importantes. La méthode d'eau oxygénée est couramment utilisée pour la détermination du dosage en matières organiques. L'eau oxygénée a une action limitée sur les restes de végétaux non décomposés tels que les racines et les fibres. Elle est souvent utilisée dans le prétraitement des sols avant l'analyse granulométrique par sédimentation en vue d'éliminer les matières organiques colloïdales. La teneur en matières organiques d'un sol permet d'identifier ce sol. Les seuils retenus sont présentés au Tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Désignation géotechnique des sols en fonction de la Teneur en Matières Organiques

| Teneur en Matières Organiques (%) | Désignation Géotechnique | | |
|---|---|---|---|
| 0 – 3 | Sol inorganique | | |
| 3 – 10 | Sol faiblement organique | fO | Vase |
| 10 – 30 | Sol moyennement organique | mO | Sol tourbeux |
| > 30 | Sol très organique | tO | Tourbe |

Le Tableau 2.9 présente les résultats de l'essai de propreté réalisé sur les cendres de bois et les argiles du Bénin.

Tableau 2.9 : Teneur en Matières Organiques (MO) des matériaux de base

| Matériaux | Teneur en Matières Organiques (%) |
|---|---|
| Argile de Zogbodomey | 10 |
| Argile de Sèmè-Podji | 25 |
| Cendres de bois du Bénin | 14 |

On constate que la teneur en matières organiques du sol de Sèmè-Podji est de 25% et vaut 2,5 fois la teneur en matières organiques du sol de Zogbodomey.
Ce taux élevé d'éléments organiques contenu dans l'argile de Sèmè-Podji pourrait s'expliquer par la zone de prélèvement de ce matériau, un marécage comme présenté à la Figure 2.5. Ainsi, en se référant à la classification des sols selon la teneur en matières organiques présentée au Tableau 2.8, il s'agit d'un sol moyennement organique.

L'argile de Zogbodomey quant à elle, a été extraite en profondeur, à partir de 3 m jusqu'à 6 m du terrain naturel. Étant enfouie dans le sol, elle n'a pas été contaminée par des débris organiques extérieurs. La classification des sols selon la matière organique, indique donc que le sol de Zogbodomey est un sol faiblement organique.

L'argile de Zogbodomey pourrait donc se révéler plus intéressante que celle de Sèmè-Podji à la cuisson, du fait des matières organiques qui, lors de la cuisson peuvent provoquer des fissurations ou l'éclatement du bloc.

Les cendres de bois soumises à la détermination de la teneur en matières organiques sont constituées de particules de diamètres inférieur à 2 mm. On observe qu'elles renferment 14% d'éléments organiques ; ce qui serait dû à la présence de particules fines de charbon imbrûlées.

Le tamisage des cendres avec un tamis d'ouvertures de maille de 400 µm est donc adopté pour le matériau entrant dans la formulation des briques cuites afin d'éliminer les particules résiduelles de charbon.

La teneur en matières organiques du sol de Xeuilley n'a pas été déterminée.

### 2.3.5. Teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$

Cette analyse a été réalisé suivant la norme NF P 94-048 [197]. L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone ($CO_2$) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai. L'acide étant en excès dans la réaction, le volume de gaz carbonique ($CO_2$) dégagé est proportionnel à la quantité de $CaCO_3$ contenu dans l'échantillon.

$$2HCl+CaCO_3 \rightarrow CaCl_2+H_2O+CO_2 \qquad 2.10$$

La teneur pondérale en carbonate (%) est le rapport entre la masse de carbonate contenue dans ce sol à sa masse sèche totale. C'est la moyenne arithmétique, arrondie au pour cent, des valeurs obtenues sur deux prises d'essai.

Dans l'hypothèse où les essais soient faits à la même pression atmosphérique, elle s'exprime par la formule :

$$\%\ CaCO_3 = 100 \times \frac{m_t}{m}\frac{V_b}{V_t}\frac{(\theta_t+273)}{(\theta_b+273)} \qquad 2.11$$

Avec :

| | | |
|---|---|---|
| $m_t$ | (g) | masse sèche de l'échantillon de référence ; |
| m | (g) | masse du sol sec ; |
| $V_t$ | ($cm^3$) | volume de $CO_2$ dégagé au cours de la réaction avec l'échantillon de référence ; |
| $V_b$ | ($cm^3$) | volume de $CO_2$ dégagé au cours de la réaction avec le sol ; |
| $\theta_t$ | (°C) | température de la salle d'essai au cours de la réaction avec l'échantillon de référence ; |
| $\theta_b$ | (°C) | Température de la salle d'essai au cours de la réaction avec le sol. |

Tableau 2.10 : Classification géotechnique des sols en fonction de la teneur en $CaCO_3$ [197]

| Teneur en $CaCO_3$ (%) | Désignation géotechnique |
|---|---|
| 0-10 | Argile |
| 10-30 | Argile marneuse |
| 30-70 | Marne |

Ce test a servi de mesure de contrôle compte tenu du comportement des blocs de d'argile de Xeuilley à la cuisson. Les résultats obtenus confirment la présence de carbonate dans le sol de Xeuilley. En effet, le taux de carbonate dans le sol de Xeuilley est évalué à 6,5%. En outre, la mesure du pourcentage en carbonate $CaCO_3$ du sol de Xeuilley effectuée par Troalen a révélé que : 1,35% < % $CaCO_3$ < 2,10% [187]. Le carbonate de calcium est donc présent dans ce sol et au regard de la classification des sols suivant la teneur en $CaCO_3$ présenté au Tableau 2.10, le sol de Xeuilley est une argile. La présence des carbonates pourrait donc induire des défauts au cours de la cuisson de cette argile. Par ailleurs, les argiles du Bénin n'ont pas réagi en présence de l'acide chlorhydrique. Elles ne renfermeraient donc pas de carbone de calcium et pourraient se révéler meilleures à la cuisson.

### 2.3.6. Composition chimique

Les données du Tableau 2.11 extraites de la littérature [6] [186], indiquent que quantitativement, le sol de Zogbodomey renferme principalement de la silice $SiO_2$, de l'alumine $Al_2O_3$ et des oxydes de fer $Fe_2O_3$. Il contient également de petites proportions de titane $TiO_2$, de magnésie MgO et d'oxyde de potassium $K_2O$.

Tableau 2.11 : Composition chimique élémentaire des sols argileux de Zogbodomey [6] [186]

| Éléments chimiques | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | MgO | $K_2O$ | CaO | $P_2O_5$ | $Na_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Proportion moyenne (%) | 59,61 ± 3,98 | 19,20 ± 2,31 | 8,62 ± 1,22 | 1,41 ± 0,06 | 0,35 ± 0,07 | 0,25 ± 0,07 | 0,18 ± 0,06 | 0,09 ± 0,02 | 0,02 ± 0,02 |

### 2.3.7. Analyse Thermogravimétrique

L'ATG ou thermogravimétrie a pour objectif la caractérisation des matériaux par mesure de la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est exposé à un régime de température dans une atmosphère contrôlée [198]. Elle apporte une contribution à la détermination de la composition minéralogique des matériaux et est complémentaire à l'analyse par diffraction de rayons X.

Différentes réactions chimiques et transformations minéralogiques interviennent au cours de la cuisson d'un minéral argileux et se traduisent par un dégagement de chaleur (réaction exothermique) ou une absorption de la chaleur (réaction endothermique) [5]. Elles s'accompagnent de départ d'eau physiquement liée (déshydratation) et chimiquement liée (déshydroxylation), de $CO_2$ et/ou de matières organiques [199].

D'une manière générale, aux réactions endothermiques (DT<0) correspondent successivement le départ de l'eau adsorbée, de l'eau interfoliaire et de l'eau de cristallisation.

Aux réactions exothermiques (DT>0) correspond la formation de nouveaux minéraux (néocristallisation) ou une combustion de matière organique [199].

Sur la base de plusieurs études [200]–[202], les intervalles suivants de température peuvent être retenues :

- 0-250°C pour l'eau liée aux cations ;
- 250-400°C pour les hydroxydes ;
- 400-750°C pour les silicates ;
- 750-850°C pour les carbonates.

Les résultats des mesures effectuées sur les passants aux tamis d'ouvertures de mailles 400 µm des trois échantillons de sol argileux sans ajout, à l'aide de la thermobalance (Figure 2.20) sont présentés à la Figure 2.21.



Figure 2.20 : Thermobalance (laboratoire LERMAB- Université de Lorraine)

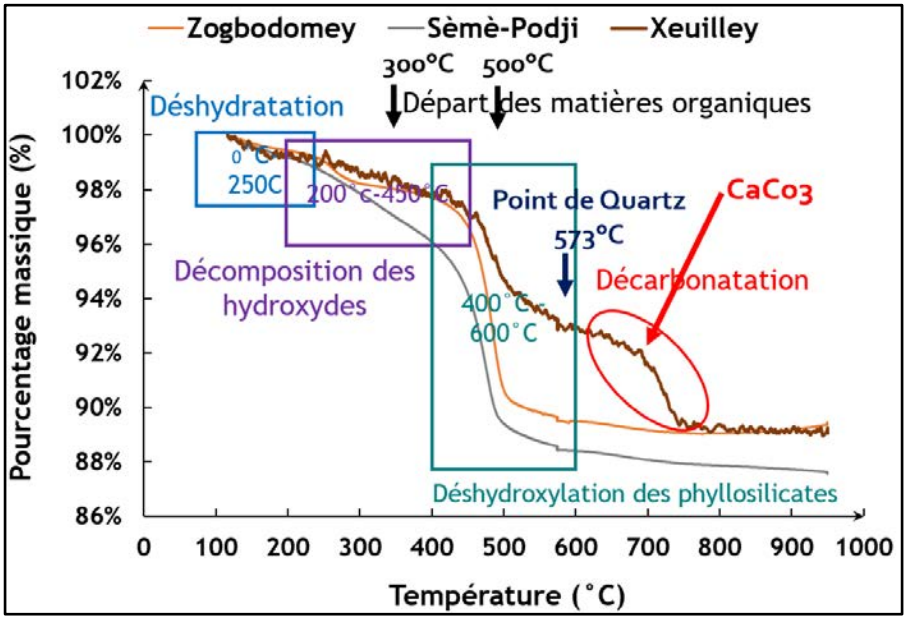



Figure 2.21 : Perte de masse des échantillons étudiés

Le Tableau 2.12 présente les pertes de masse par échantillon dans différentes fourchettes de température.

Tableau 2.12 : Récapitulatif des pertes de masse associées aux différents phénomènes

| | Perte de masse (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Échantillon | entre 0 et 250°C (déshydratation) | entre 200 et 450°C (décomposition des hydroxydes) | entre 400-600°C (déshydroxylation des phyllosilicates) | entre 600 et 750°C (décarbonatation) | entre 750 et 950°C | Total |
| Zogbodomey | 0,96 | 1,32 | 8,63 | - | - | 10,91 |
| Sèmè-Podji | 1,35 | 2,56 | 8,14 | - | 0,24 | 12,29 |
| Xeuilley | 0,73 | 1,58 | 8,18 | 0,32 | - | 10,81 |

Les trois argiles ont relativement la même perte de masse due à la déshydroxylation des phyllosilicates. Toutefois, au niveau de l'échantillon de Zogbodomey la valeur est légèrement supérieure à celles des deux autres échantillons. L'échantillon de Sèmè-Podji est celui qui subit la perte de masse la plus importante, la plus grande partie s'étant produite avant 600°C. De même, cet échantillon présente la perte la plus importante attribuée à la décomposition des hydroxydes ( 2,56%) et celle liée au départ de l'eau adsorbée (1,35%). A l'instar de l'échantillon de Sèmè-Podji, la majeur partie de la perte de masse de l'échantillon de Zogbodomey se produit avant 600°C. En revanche, il faut avoisiner 750°C pour enregistrer la plus importante perte de masse de l'échantillon de Xeuilley.

Globalement, la calcination des argiles étudiées conduit à une perte de masse de 12 ± 2 % à 950 °C.

### 2.3.8. Composition minéralogique des argiles

Les analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées dans le Laboratoire de Recherche en Science des Matériaux de l'Institut Institut Jean Lamour (IJL) à l'Université de Lorraine en France. Le diffractomètre D8 Advance, équipé d'un monochromateur Ge (111) de longueur d'onde Cu $Ka_1$ a été utilisé.
Les sols argileux de Xeuilley, Sèmè-Podji et Zogbodomey de diamètre inférieure à 400 µm sont séchés puis réduite en poudre avant d'être soumis aux essais de diffraction de rayons X (DRX) sur poudre. À partir des diffractogrammes obtenus une recherche des principales phases minérales a été menée avec le logiciel EVA (BRUKER-AXS®) qui utilise la base de données JCPDS-ICDD (Joint Committee on Powder Diffraction Standards - International Centre for Diffraction Data).

La Figure 2.22 présente les diagrammes obtenus.

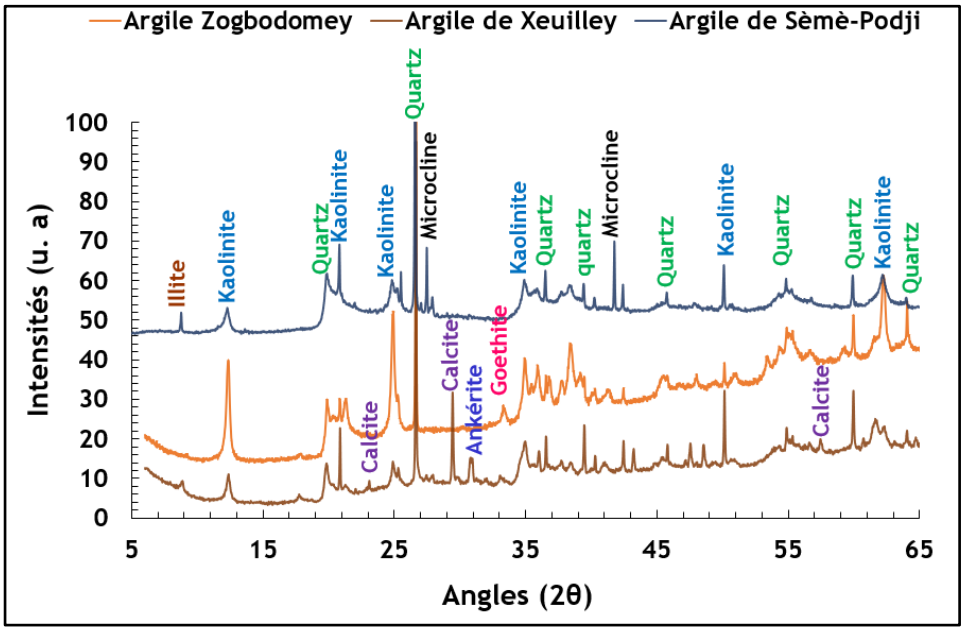



Figure 2.22 : Diffractogrammes juxtaposés des échantillons argileux par la méthode des poudres

L'analyse par diffraction des rayons X de l'argile de Zogbodomey nous a permis d'identifier

les phases minérales suivantes : la kaolinite, le quartz, l'anatase, la goethite et la montroseite. Ces résultats épousent les conclusion des études antérieures sur cette argile [6] où les phases cristallines principales identifiées dans le sol de Zogbodomey sont : la kaolinite, le quartz, quelques traces d'anatase et de goethite. Ceci montre l'homogénéité du sol argileux de Zogbodomey, indépendamment du lieu de prélèvement.

L'analyse par diffraction des rayons X de l'argile de Sèmè-Podji nous a permis d'identifier les phases minérales telles que les silicates (la kaolinite, le quartz, l'illite et la microcline) et hydroxyles (la goethite).

L'analyse par diffraction des rayons X de l'argile de Xeuilley nous a permis d'identifier les phases minérales telles que les silicates (quartz, kaolinite), les hydroxyles (goethite) et les carbonates (la calcite et l'ankérite).

Ces trois argiles ont donc en commun le quartz, la kaolinite et la goethite. Mais leur composition diffèrent par la présence d'autres silicates comme la microcline et l'illite au sein du sol de Sèmè-Podji et des carbonates au sein du sol de Xeuilley. La présence des carbonates pourrait provoquer l'éclatement de la pâte au cours de la cuisson des blocs de Xeuilley.

Les résultats obtenus par DRX seront donc complétés par les analyses chimiques élémentaires.

### 2.3.9. Composition semi-quantitative

La composition semi-quantitative du sol de Zogbodomey présenté au Tableau 2.13 a été déterminée par Sagbo *et al.* [6]. La méthode combine les résultats de l'analyse avec les rayons X, de l'analyse chimique et de la Capacité d'Échange Cationique (CEC = 4,16 meq/100g) obtenue par la méthode QuantArg216.

Tableau 2.13 : Composition semi-quantitative de l'argile de Zogbodomey [6]

| Kaolinite | Quartz | Goethite | Smectite | Illite | Anatase |
|---|---|---|---|---|---|
| 40% | 39% | 10% | 5% | 4% | 2% |

Les données du Tableau 2.13 montrent que le sol de Zogbodomey est composé majoritairement de kaolinite et de quartz. Ce mélange minéralogique naturel est favorable à la production de briques cuites à partir de l'argile de Zogbodomey [6].

Tableau 2.14 : Composition semi-quantitative de l'argile de Xeuilley [177], [178], [187], [189]

| Quartz | Smectites | Feldspath | Kaolinite | Mica | Calcite | Carbonate de calcium |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60% | 20% | 11% | 4-5% | 3% | 2% | 1,35 < CaC03 % < 2,1 |

En outre, le Tableau 2.14 montre que la composition minéralogique des argiles de Xeuilley soit 20% de smectites et 5% de kaolinite n'est pas favorable à l'élaboration de briques cuites.

## 2.4. Classification des sols étudiés

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables. Ainsi, les systèmes de classification des sols permettent de combiner plusieurs propriétés afin de classifier le matériau dans une famille spécifique. Les critères de classification des différents systèmes sont principalement la granulométrie et l'argilosité.

### 2.4.1. Abaque triangulaire de Taylor

L'abaque de classification de Taylor est basé sur la distribution granulométrie des particules solides des sols. Dans le cas des sols fins, ces particules se répartissent en trois familles principales : les argiles, les limons et les sables.

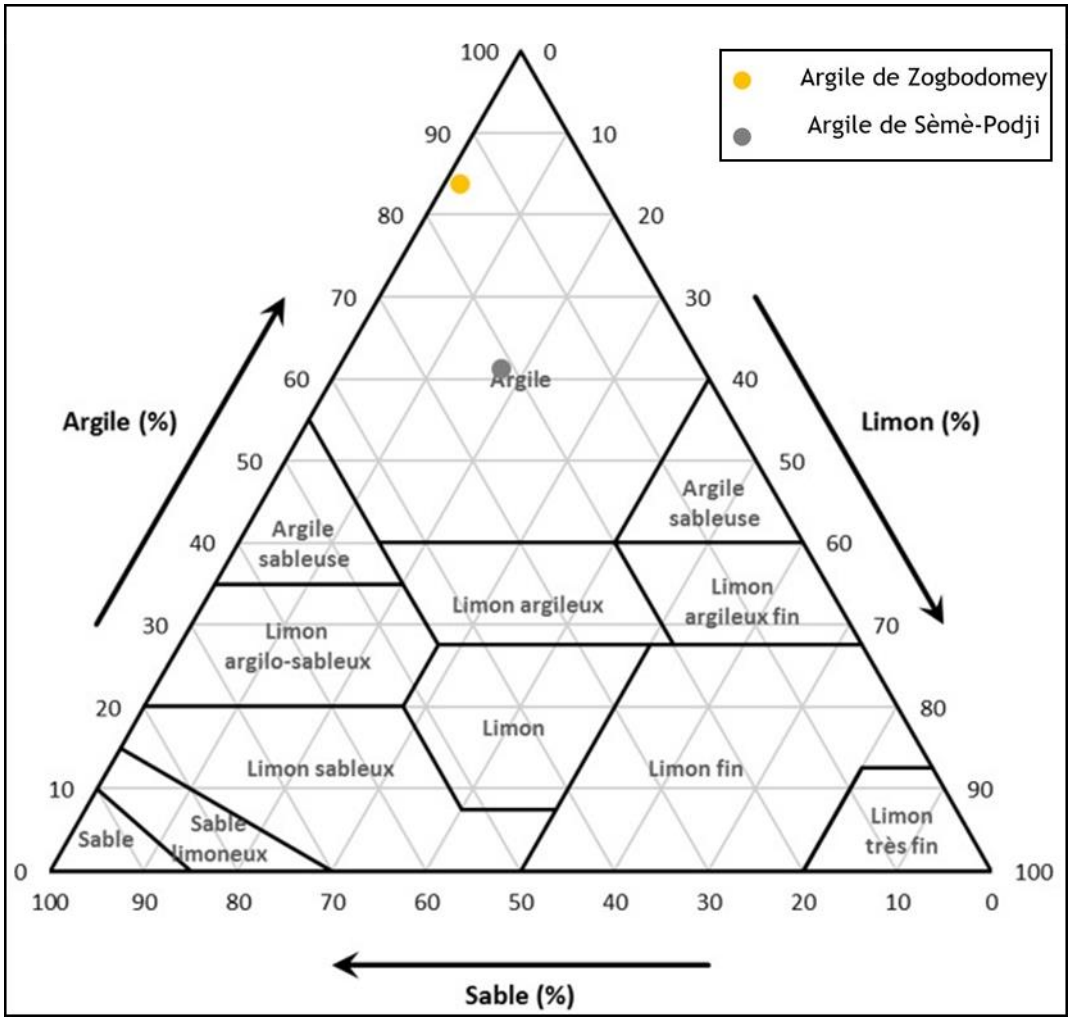



Figure 2.23 : Triangle des textures des sols étudiés

La classification selon le triangle des textures de la Figure 2.23 indique que les sols du Bénin sont argileux.

### 2.4.2. LPC Nomenclature GTR (Norme NF P11 300)

La classification des Laboratoires des Ponts et Chaussées (L.P.C.) utilisée en France s'appuie essentiellement sur l'analyse granulométrique ($D_{max}$ et le tamisât à 80 µm), l'indice de plasticité (IP) et la teneur en Matières Organiques (MO) ou la valeur au Bleu de Méthylène du Sol (VBS) [196]. Les sols sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

En combinant les paramètres de granulométrie, d'argilosité et de propreté des sols étudiés tout en se référant à la norme NF P11 300, ces trois matériaux sont des sols fins A4, argiles et marnes très plastiques.

### 2.4.3. Diagramme de plasticité de Casagrande

La classification basée sur le diagramme de plasticité de Casagrande utilise les critères liés aux limites d'Atterberg. Le sol est matérialisé dans le diagramme par un point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité. La position du sol permet de retrouver sa famille.

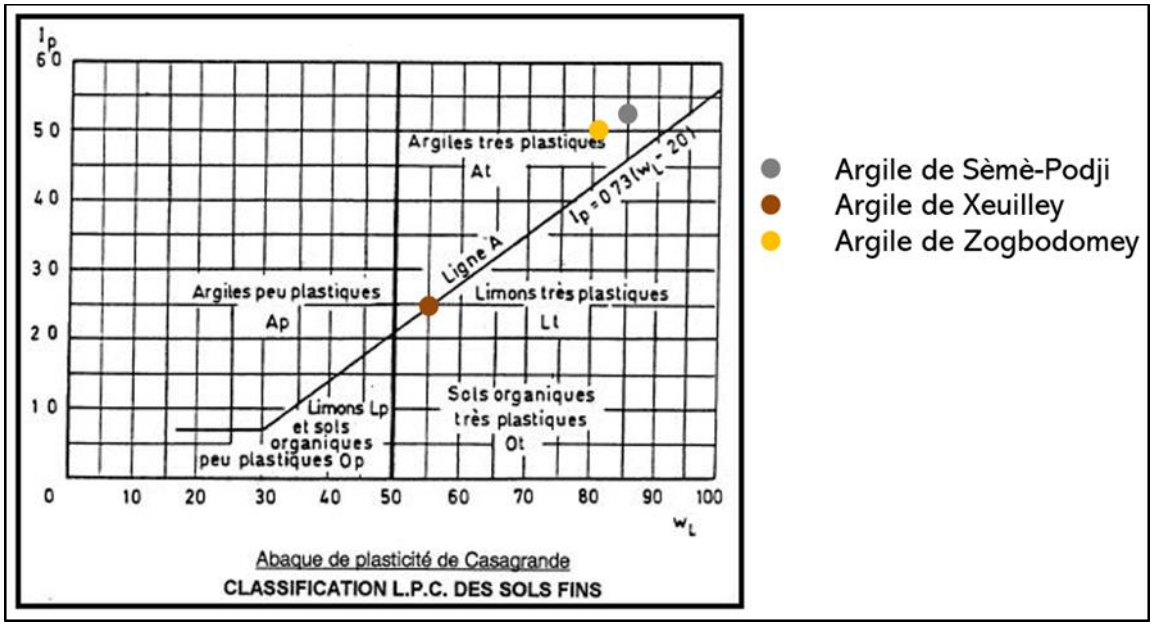



Figure 2.24 : Classification des sols étudiés suivant l'abaque de plasticité de Casagrande

Au regard de la Figure 2.24, le diagramme de plasticité de Casagrande permet de classer les sols du Bénin dans la famille des argiles très plastiques et le sol de Xeuilley dans la famille des limons très plastiques.

## 2.5. Méthodes **d'élaboration des blocs d'argile cuits**

### 2.5.1. Formulation des mélanges

Une élimination insuffisante de certaines impuretés risque de favoriser des amorces de fissures ou l'apparition d'éclatements sur les produits cuits (éclatements de grains de chaux) [100]. La préparation est donc une étape aussi importante que le séchage et la cuisson.
Les matériaux préparés et tamisés à 400 µm sont séchés à 105°C dans une étuve jusqu'à masse constante. Après leur refroidissement, on procède au dosage des différents constituants des mélanges conformément à la Figure 2.25.

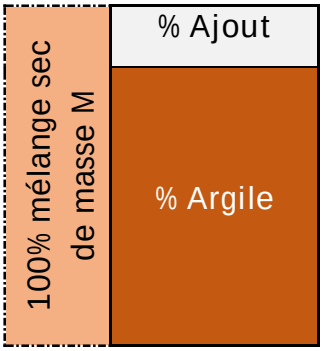



Figure 2.25 : Formulation en constituants secs des mélanges

Les proportions de chaque constituant du mélange (argile, ajout, eau) sont prises par rapport à une masse totale sèche et constante de mélange. Les cendres de Bois du Bénin, de la France ou les verres broyés constituent l'ajout. Les blocs de référence sont des blocs à 100% d'argile.

On procède ensuite au malaxage du mélange sec. Le but est d'obtenir un mélange de couleur homogène. Puis l'on apporte la quantité d'eau définie par pulvérisation au mélange et l'on procède de nouveau au malaxage jusqu'à l'homogénéisation complète de la pâte d'argile dans tout son volume. Une mauvaise homogénéisation de la pâte peut provoquer des fissures au cours du séchage [100].

La pâte d'argile ainsi préparée est introduite dans le moule pour un compactage suivi du démoulage permettant d'obtenir les éprouvettes à caractériser. Cette opération est appelée le façonnage.

### 2.5.2. Modes de façonnage

Deux types de presses manuelles, ayant toutes un mode de compression statique, ont été utilisées pour la confection des différentes éprouvettes.

Ainsi, la presse mécanique de la Figure 2.26, basée sur le principe des presses de type Cinva-Ram dont la pression théorique de compression varie entre 1 et 2 MPa, a été utilisée. Cette presse est munie d'un système de levier activé par une personne et porte un moule permettant d'obtenir des éprouvettes d'étude à l'échelle du laboratoire.



Figure 2.26 : Presse manuelle mécanique de compactage

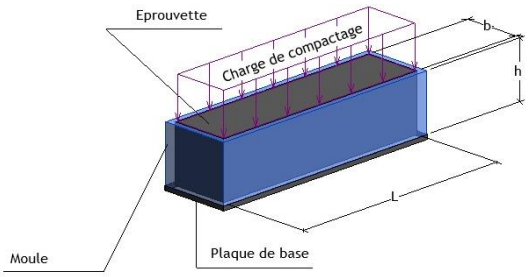



Figure 2.27 : Mode de compactage horizontal

Dans ce cas, la charge de compactage est appliquée perpendiculairement à la plus grande section du bloc, tel que l'indique la Figure 2.27. Dans la suite des travaux, ce mode de compactage est donc appelé « compactage horizontal ». Le compactage horizontal a été effectué au Bénin, uniquement avec l'argile de Zogbodomey.

En France, un autre mode de compactage a été adopté et les trois argiles (Zogbodomey, Sèmè-Podji et Xeuilley) sont étudiées. Ce système de compactage est celui des presses manuelles hydrauliques. Conformément à la Figure 2.28, le dispositif de compactage se compose de :

- une plate-forme inférieure mobile,
- un moule en acier trempé, de volume de 40 x 40 x 20 $cm^3$,
- une traverse supérieure fixe munie d'un piston mobile et d'un manomètre de précision qui permet de maitriser la charge de compactage appliquée.

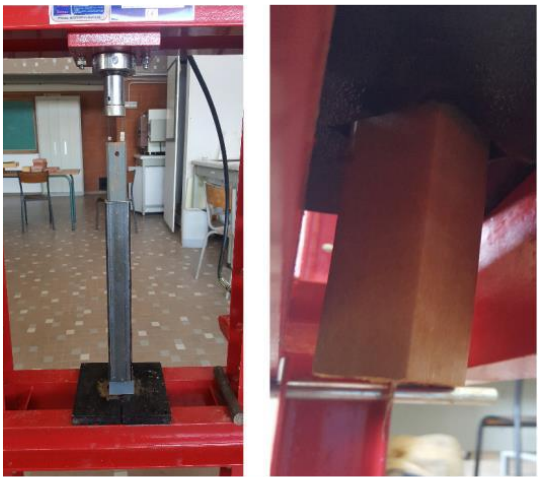


Figure 2.28 : Presse manuelle hydraulique de compactage

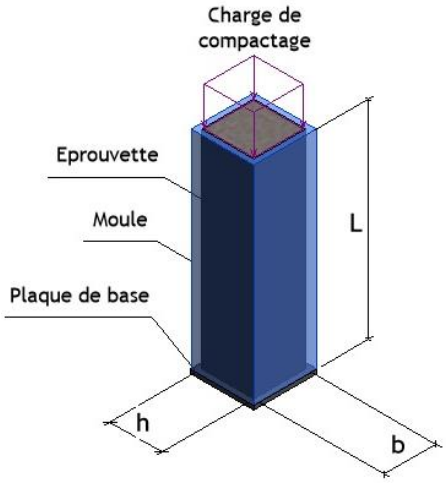



Figure 2.29 : Mode de compactage vertical

Dans ce cas, la charge de compactage est appliquée sur la plus petite section de l'éprouvette, tel que l'indique la Figure 2.29. Ce mode de compactage est appelé « compactage vertical » dans la suite des travaux.

### 2.5.3. Codification des blocs

Les différentes éprouvettes élaborées au cours de ce travail ont été codifiés pour permettre leurs identification et étude.

Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules désignant le type d'argile ou le mode de compactage (A, B, E ou SP). Une autre lettre vient à la suite des précédentes pour désigner le type d'ajout. Les cendres sont désignées par la lettre « C » et les verres broyés par la lettre « V ».

Les blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji ont été formulés d'une part avec des cendres de bois collectées au Bénin et d'autre part avec des cendres de bois obtenues en France. Afin de différencier ces deux types de cendres, la lettre « C » désignant les cendres dans le cas des argiles de Zogbodomey et de Xeuilley, est remplacée par la lettre « B » pour désigner les cendres du Bénin et la lettre « F » pour désigner les cendres de France.

La codification des formulations (à l'état sec) de confection des blocs étudiés est présentée au Tableau 2.15.

Tableau 2.15 : Différentes formulations étudiées

| Mode de compactage | Type d'argile | Matériaux de substitution | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Cendres de Bois Bénin | Bouteilles de verre broyés | Cendres de Bois France |
| Compactage horizontal | Argile Zogbodomey | AC | AV | - |
| Compactage vertical | Argile Zogbodomey | BC | BV | - |
| Compactage vertical | Argile Sèmè-Podji | SPB | SPV | SPF |
| Compactage vertical | Argile Xeuilley | - | - | EC |

Ces groupes de lettres sont suivies de deux chiffres arabes qui indiquent la proportion d'ajout substitué à l'argile. Cette proportion varie de 0% à 50%.

À la suite des deux chiffres, vient un tiret de séparation « - » suivi de deux chiffres arabes indiquant la teneur en eau du mélange puis entre parenthèses un chiffre désignant le numéro du bloc. En moyenne, six (06) blocs sont confectionnés pour une formulation.

À titre d'exemples :

- AC05-20(6) désigne l'éprouvette N°6 du mélange à 20% d'eau, incorporant 5% de cendres de bois du Bénin et 95% d'argile de Zogbodomey, ayant subi le compactage horizontal.
- EC30-20(6) désigne l'éprouvette N°6 du mélange à 20% d'eau, incorporant 30% de cendres de bois de la France et 70% d'argile de Xeuilley, ayant subi le compactage vertical.

### 2.5.4. Teneur en eau de confection des différents blocs

La demande en eau de confection des différents blocs varie en fonction du type d'ajout et du mode de mise œuvre. Ainsi, l'étude de la proportion optimale d'eau de confection des blocs ayant subis le compactage horizontal a été effectuée. Par ailleurs, l'influence de la teneur en eau de confection sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs ayant subis le compactage vertical, a été étudiée.

#### 2.5.4.1. Détermination de la teneur en eau optimale de confection des blocs A ayant subis le compactage horizontal (Bénin)

L'optimisation de la proportion d'eau de moulage est déterminante dans le processus d'élaboration des briques cuites compressées.

En géotechnique routière, la recherche de la Teneur en Eau Optimale (TEO) de compactage des sols est obtenue à l'aide des essais Proctor, qui appliquent au sol pulvérulent un compactage dynamique via des coups successifs de la dame Proctor [203].

En conséquence, cet essai ne serait pas conseillé pour les sols argileux, car il entraine une saturation localisée de l'éprouvette au droit de la dame de compactage. Il en résulte une éprouvette hétérogène en termes de densité [204].

D'autre part, les argiles présentent une courbe Proctor très pointue avec un $y_{dOPM}$ assez bas (< 1,5) et une teneur en eau optimale assez importante (> 20 %) [205].

Des études montrent qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux [49]. Le compactage statique consiste à imprimer un effort croissant sur un matériau, de façon à le comprimer dans un moule [206]–[208]. Ceci permet la fabrication d'éprouvettes homogènes qui serviront pour l'étude du comportement en service des blocs [209]. Ceci justifie la démarche d'optimisation de la teneur en eau de formulation des blocs « A », confectionnés à l'aide d'une presse manuelle mécanique, adoptée dans cette étude.

La démarche a consisté à déterminer la teneur en eau optimale de confection des blocs d'argile directement à l'aide de la presse à BTC réalisée. Pour chaque formulation, la variation de la masse volumique sèche en fonction de la proportion d'eau de moulage des mélanges traduit une courbe présentant un extrémum correspondant à la teneur en eau optimale pour une densité sèche maximale. Ainsi, la proportion d'eau de confection des blocs est variée pour chaque dosage en ajout (cendres de bois du Bénin et verres broyés). La teneur en eau optimale de confection des blocs de cette formulation correspond alors à la densité sèche maximale.

La Figure 2.30 présente la variation de la masse volumique sèche des blocs « AC » incorporant différentes proportion de cendres de bois en fonction de la teneur en eau de confection. On observe que la masse volumique sèche maximale de ces blocs est comprise entre 1,60 g/cm$^3$ et 1,70 g/cm$^3$ pour une teneur en eau comprise entre 14% et 20%.

Conformément à la Figure 2.31, la masse volumique sèche maximale des blocs « AV » incorporant différentes proportions de verres broyés, est comprise entre 1,65 g/cm$^3$ et 1,85 g/cm$^3$ pour une teneur en eau comprise entre 6% et 12%.

Dans la suite des travaux, les différents blocs d'argile de Zogbodomey « AC » et « AV », sont élaborés à la teneur en eau optimale ainsi déterminée.

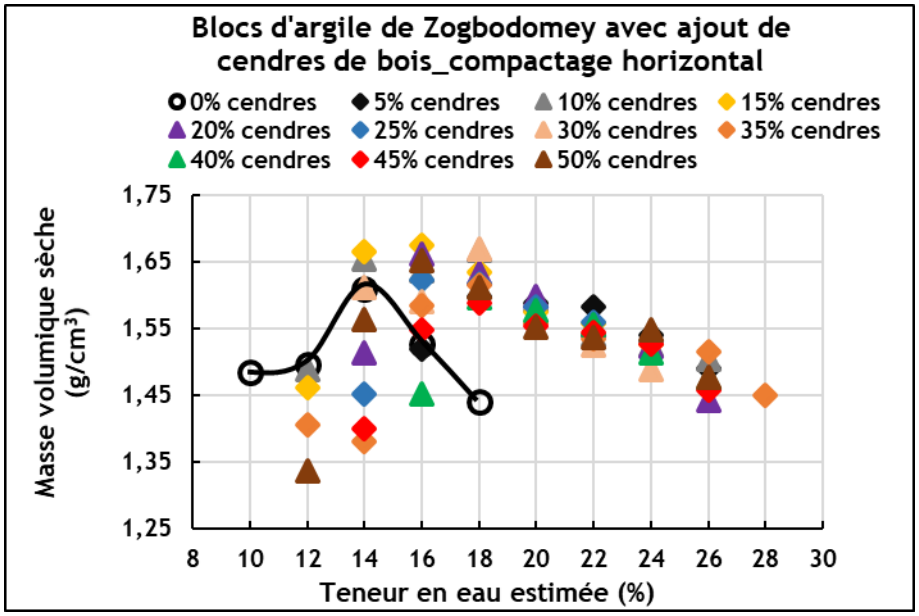



Figure 2.30 : Évolution de la masse volumique sèche des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois en fonction de la teneur en eau de confection

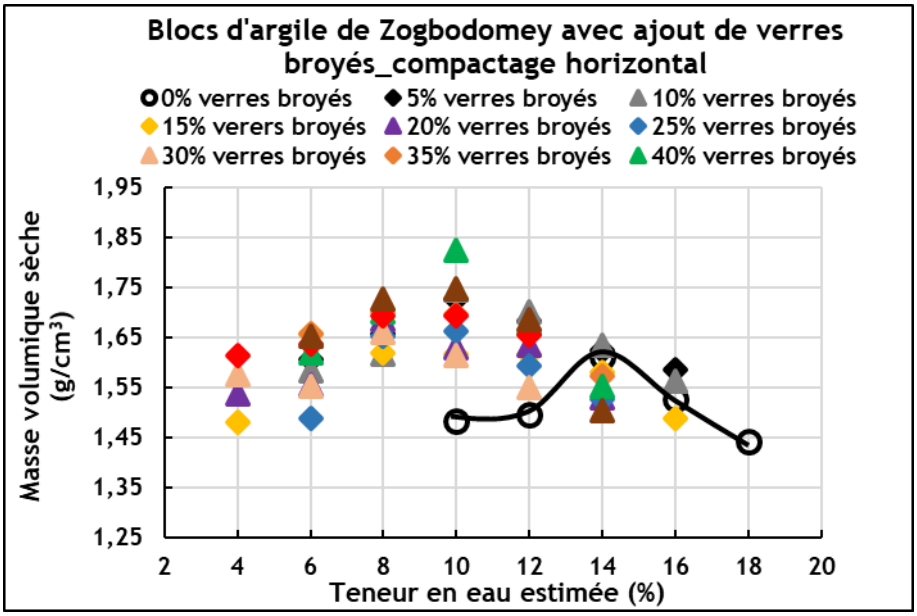



Figure 2.31 : Évolution de la masse volumique sèche des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de verres broyés en fonction de la teneur en eau de confection

2.5.4.2. **Étude de l'influence de la teneur en eau de confection** des blocs ayant subis le compactage vertical (France)

La teneur en eau de confection des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey a été variée afin d'apprécier l'influence du mode de compactage vertical sur la demande en eau des blocs et sur leurs résistances mécaniques. Globalement, la teneur en eau estimée est variée entre 10% et 30%. Des difficultés de pressage ont été enregistrées pour certaines formulations présentant un excès d'eau ou une proportion d'eau de moulage insuffisante : fuite du matériau, difficultés de démoulage, cassure du bloc. Ainsi, le compactage vertical admet un

intervalle de variation de la teneur en eau de confection des blocs qui varie en fonction de la formulation étudiée. Les blocs « E » d'argile de Xeuilley et « SP » d'argile de Sèmè-Podji ont été étudiés à une teneur en eau moyenne de confection, obtenue à partir d'une teneur en eau estimée égale à 20%.

### 2.5.5. Séchage

Au Bénin, les blocs « A » ont été confectionnés pendant la saison sèche au cours des mois de Novembre à Janvier. Ils ont été séchés à l'air libre au laboratoire de Génie Civil de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi à une température moyenne de 30°C +/- 3°C et une humidité relative de 75% +/- 3%. Les blocs étudiés en France ont été confectionnés pendant les mois d'avril-mai (printemps) au LERMAB/FST/Nancy en France. Les blocs sont séchés à l'air libre au laboratoire à une température moyenne de 20°C +/- 2°C et une humidité relative de 65% +/- 5%. La fin de l'étape de séchage correspond au palier de la courbe de séchage après 14 jours environ.

### 2.5.6. Cuisson

La Figure 2.32 présente les programmes adoptés pour la cuisson des blocs en France et au Bénin. Quel que soit le matériel utilisé, la température maximale de cuisson des blocs d'argile est de 950°C. Cette température a été retenue à l'issue des tests préliminaires de cuisson des blocs effectués à des températures de 1080°C, 1000°C et 950°C.

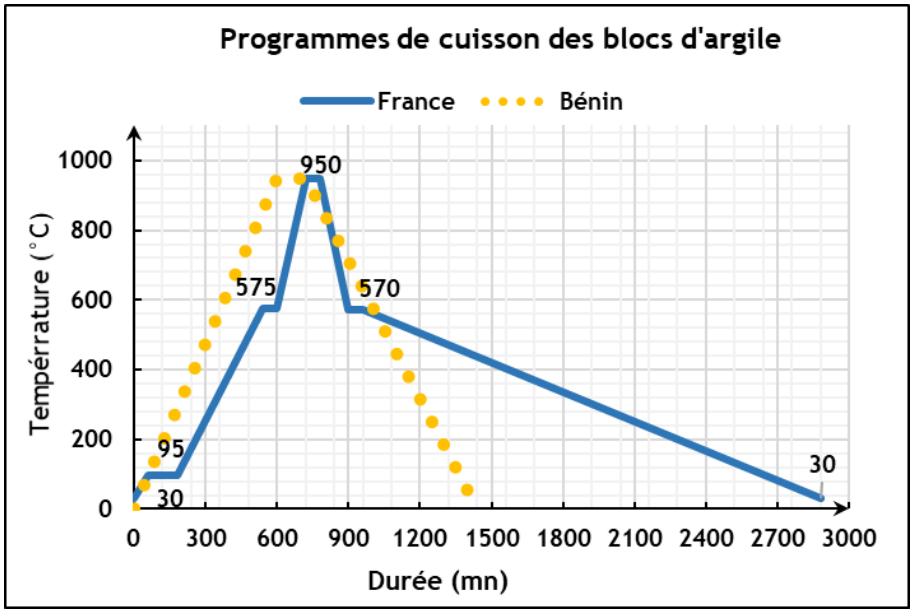



Figure 2.32 : Programme de cuisson des blocs d'argile

Au Bénin, la cuisson des blocs s'effectue à l'aide d'un four « keramikos-economy-baby » de volume 25 litres et de température maximale 1260°C. Les blocs « A » passent de 0°C à 950°C en 10 heures puis sont maintenus à 950°C pendant 2 heures de temps. En France, la cuisson des blocs d'argile s'effectue dans un four Nabertherm P330 Pyrox à chambre de moufle de volume 20 litres. Le programme adopté en France diffère de celui du Bénin du fait de la vitesse de montée et de descente en température et des paliers de repos effectués autour du point de quartz. En effet, les caractéristiques du four disponible au Bénin ne permet pas d'effectuer cette programmation. À la fin du refroidissement, on procède au défournement, au stockage puis à la réalisation des essais de caractérisation des blocs cuits.

## 2.6. Synthèse

Ce chapitre s'est intéressé chronologiquement à la présentation, la préparation, la caractérisation et la classification des matières premières notamment les sols argileux devant servir à l'élaboration des briques d'argile cuite.

Les différents essais de caractérisation effectués ont permis d'avoir une meilleure connaissance des sols étudiés.

Il ressort donc de cette étude que les trois sols étudiés présentent différents niveaux d'argilosité. En outre,

- le sol de Zogbodomey est très argileux et renferme majoritairement 40% de kaolinite et 39% de quartz ;
- le sol de Sèmè-Podji est une argile très plastique à l'instar du matériau de Zogbodomey ;
- bien que le sol de Xeuilley se retrouve dans la classe des argiles peu plastiques ou limons très plastiques ; sa composition minéralogique dont 20% de smectites pour 5% de kaolinite, et la présence de la calcite et de la dolomite ne serait pas favorable à l'élaboration de briques cuites.

Faisant suite à la caractérisation des matières premières, l'exposé de la méthode d'élaboration des blocs d'argile cuits en vue de leur caractérisation a été fait.

Ainsi, nous pouvons distinguer deux modes de confections des blocs d'argile de Zogbodomey :

- les blocs « A » confectionnés au Bénin avec une presse à BTC adaptée aux dimensions 4 x 4 x 16 $cm^3$ des éprouvettes d'études au laboratoire pour lesquels la teneur en eau optimale de confection est d'abord déterminée en se référant à la masse volumique sèche maximale moyenne des blocs d'une même formulation ;
- les blocs « B » confectionnés en France avec une presse munie d'un piston mobile permettant de compacter le bloc. Ces blocs sont confectionnés à différentes teneurs en eau ; ainsi, la teneur en eau constitue un paramètre d'étude de ces formulations. En outre l'intervalle de variation du dosage en ajout (cendres de bois ou verres broyés) des blocs « B » est réduit, tenant compte des formulations intéressantes des blocs « A ».

Les blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji « SP » et de Xeuilley « E » confectionnés en France à l'aide de la presse munie d'un piston mobile, sont élaborés à une teneur en eau moyenne de formulation.

À l'issu de cette étape, la caractérisation physico-mécanique des différentes éprouvettes d'argile élaborées sera réalisée afin de ressortir les formulations intéressantes pour une application dans le bâtiment.

# CHAPITRE 3 ▪ **Caractérisations M**écanique et **physique des blocs d'argile**.

## Sommaire


3.1. Introduction ..... 86
3.2. Méthodes de caractérisation mécanique et physique des blocs ..... 87
3.3. Propriétés physico-mécaniques des blocs d'argile sans ajout ..... 93
3.4. Influence des cendres de bois sur les propriétés des blocs d'argile ..... 112
3.5. Influence des verres broyés sur les propriétés des blocs d'argile ..... 155
3.6. Synthèse ..... 176

## 3.1. Introduction

Ce chapitre expose dans un premier temps les différentes méthodes de caractérisation physiques et mécaniques des blocs d'argile cuits étudiés.

L'étude a porté sur soixante (60) formulations de blocs d'argile cuits qui diffèrent selon :

- l'origine de l'argile utilisée : Xeuilley, Sèmè-Podji ou Zogbodomey ;
- le type d'ajout : cendres de bois, verres broyés ;
- le dosage en ajout : 0% à 50% par rapport à la masse constante du mélange sec total ;
- le mode de compactage qui est varié uniquement pour l'argile de Zogbodomey tel que le montrent les Figure 2.27 et Figure 2.29.

En outre, la teneur en eau de confection des blocs a été étudiée.

D'autre part, les résultats issus de la caractérisation physique et mécanique des différentes formulations de blocs d'argile cuits, sont présentés et analysés en vue de ressortir les meilleures formulations.

En conséquence, nous déduisons l'influence du type d'argile, du dosage en cendres de bois, du dosage en verres broyés, du mode de compactage et de la proportion d'eau de confection des blocs d'argile cuits sur leurs propriétés mécaniques et physiques.

## 3.2. Méthodes de caractérisation mécanique et physique des blocs

### 3.2.1. Mesures des propriétés physiques des blocs **d'argile cuits**

Dans cette étude, les propriétés physiques des blocs d'argile cuits que sont : la perte au feu, le retrait linéaire et la masse volumique, sont étudiées.

#### 3.2.1.1. Étude de la perte de masse

Les variations de masse des blocs entre l'étape de confection, de séchage et de cuisson sont enregistrées. Elles permettent d'apprécier le comportement des matériaux au cours du processus de fabrication, et plus spécifiquement l'influence des matériaux d'ajout.

La variation de masse entre l'étape de confection et la fin du séchage est appelée « perte de masse de séchage (PS) » et se détermine selon la formule :

$$PS = 100 \times \frac{M_{humide} - M_{sec}}{M_{sec}} \qquad 3.1$$

La variation de masse d'un bloc d'argile entre les étapes de séchage et de cuisson est appelée « perte au feu (PF) » et se détermine selon la formule :

$$PF = 100 \times \frac{M_{sec} - M_{cuit}}{M_{sec}} \qquad 3.2$$

Avec :

$M_{humide}$ , la masse de l'échantillon à la confection (g) ;

$M_{sec}$ , la masse de l'échantillon après l'étape de séchage (g) et

$M_{cuit}$ , la masse de l'échantillon après l'étape de cuisson (g).

Afin de conserver une résistance mécanique satisfaisante, il est préconisé de maintenir la perte au feu inférieure à 15% [210], [211].

#### 3.2.1.2. Étude du retrait linéaire

Au cours du séchage du bloc d'argile formé, l'évaporation de l'eau d'hydratation et celle de l'eau colloïdale contenues dans la matrice provoquent une diminution des dimensions du bloc. De plus, les particules céramiques fusionnent lors de la cuisson (frittage) pour ainsi se rapprocher, ce qui va entrainer un retrait linéaire au niveau de l'échantillon [210], [212].

Le retrait linéaire (RL) est donc déterminé en mesurant la longueur de l'échantillon soit avant et après l'étape de séchage, soit avant et après l'étape de cuisson, soit entre le début et la fin du procédé complet en utilisant un pied à coulisse suivant la norme ASTM C210 – 95 [210]. Ainsi, deux types de retraits ont été mesurés : le retrait dû au séchage du bloc et le retrait consécutif à la cuisson du bloc.

Nous avons également étudié le retrait suivant les axes du bloc. Il s'est agi du retrait latéral et du retrait axial suivant que la mesure soit faite par rapport à la largeur et l'épaisseur du bloc ou par rapport à sa longueur.

Les retraits mesurés entre les étapes de confection et de séchage se déterminent en pourcentage par la formule :

$$RL_S = 100 \times \frac{L_{humide} - L_{sec}}{L_{sec}} \quad 3.3$$

Dans la littérature, les retraits mesurés entre les étapes de séchage et de cuisson sont les plus étudiés. Ils sont exprimés en pourcentage par la formule :

$$RL_C = 100 \times \frac{L_{sec} - L_{cuit}}{L_{sec}} \quad 3.4$$

Avec :

$L_{humide}$, la longueur de l'échantillon à la confection (mm)

$L_{sec}$ , la longueur de l'échantillon après l'étape de séchage (mm) et

$L_{cuit}$ , la longueur de l'échantillon après l'étape de cuisson (mm).

Un retrait trop important peut fragiliser le matériau en créant des tensions ou des ruptures dans sa structure [213]. Pour conserver des propriétés mécaniques intéressantes, le retrait linéaire doit être au maximum de 8% [99], [211]. Plus le retrait est faible, plus les propriétés mécaniques du produit fini seront intéressantes [210].

L'étude des variations dimensionnelles des blocs d'argile formés permettra d'appréhender le rôle des matériaux d'ajout et de maitriser le procédé de façonnage en vue d'obtenir des produits finis de dimensions bien définis.

#### 3.2.1.3. Étude de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un bloc d'argile cuit est déterminée en calculant le ratio entre la masse M du bloc cuit et son volume V : $\rho = \frac{M}{V}$.

Cette propriété physique doit être prise en considération et être corrélée aux performances mécaniques du produit fini. En effet, la caractéristique essentielle des matériaux de construction est la résistance mécanique, le but étant d'éviter l'effondrement des bâtiments qui seront construits avec ces produits [210].

Il est recommandé pour une brique sans additif incorporé, que sa masse volumique apparente soit comprise entre 1,8 g/cm$^3$ et 2,0 g/cm$^3$ [210], [211].

Dans cette étude, l'influence de la formulation des blocs d'argile cuits sur leur masse volumique a été étudiée de même que l'influence de la masse volumique des blocs cuits sur leurs propriétés mécaniques.

La masse volumique est également un paramètre important qui intervient dans l'étude thermique des matériaux.

### 3.2.2. Mesures des propriétés mécaniques des blocs

Afin de s'assurer de la qualité et de la performance des matériaux développés, notamment pour une utilisation dans le secteur du bâtiment, il est essentiel de considérer l'impact des additifs sur les propriétés mécaniques du produit [210].

Ainsi, les propriétés mécaniques des blocs d'argile cuits formulés avec ajout de cendres de bois ou de verres broyés seront comparées à celles des blocs d'argile pure (sans ajout).

L'influence du type d'ajout et du dosage en ajout en fonction de l'argile étudiée sera déduite.

Les propriétés mécaniques des blocs d'argile cuits étudiées sont :

- la résistance à la traction par flexion trois points ($\sigma_{tf}$) ;
- la résistance à la compression axiale ($\sigma_{rc}$) et
- le module de Young tangent (E) en compression axiale.

### 3.2.2.1. Détermination de la résistance à la traction par flexion trois points

Les éprouvettes prismatiques obtenues après cuisson, ont été soumises à la traction par flexion trois points selon la norme EN 196-1 [214] tel qu'indiqué à la Figure 3.1.

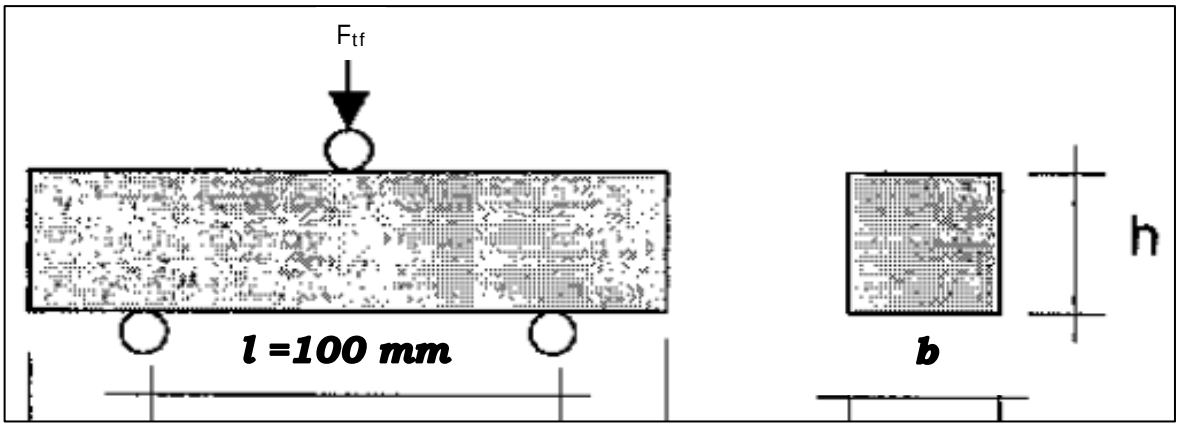



Figure 3.1 : Principe de l'essai de traction par flexion trois points

Une charge de flexion $F_{tf}$ est appliquée progressivement au centre de l'éprouvette et parallèlement à sa hauteur, jusqu'à la rupture conformément à la Figure 3.1.

La dimension « l » représente la distance entre appuis du bloc et est plutôt fixée par rapport au dispositif d'essai tandis que la largeur « b » et l'épaisseur « h » sont mesurées sur chaque échantillon. La résistance du bloc est ensuite déduite à partir de la charge maximale :

$$\sigma_{tf} = \frac{3}{2} \times \frac{F_{tfmax}}{bh^2} \qquad 3.5$$

Au Bénin, les blocs « A » qui ont subi le compactage horizontal, ont été rompus sur une presse universelle électronique à double vérin (référence 109 250), équipée d'un capteur de force de 250 kN ayant une résolution de 20 N à un taux de charge de 0,05 kN/s.

En France, les différents blocs sont testés sur une presse de type 3R, 10 kN avec un taux de charge de 0,1 kN/s (Figure 3.2).

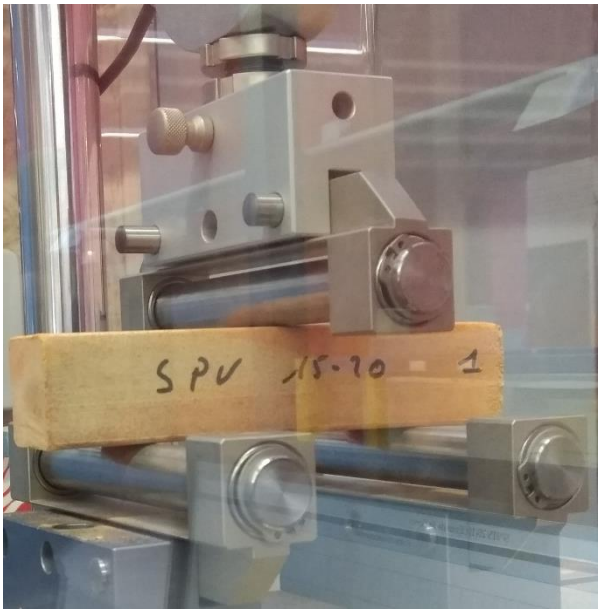



Figure 3.2 : : Dispositif d'essai en traction par flexion trois points de la presse 3R, 10 kN utilisé à l'IUT de Nancy

3.2.2.2. Détermination de la résistance en compression

Les essais de détermination des résistances mécaniques en compression ont été réalisées conformément à la norme EN 196-1 [214] sur chaque demi-bloc issu de la rupture à la traction par flexion trois points.

Une charge de compression $F_C$ est exercée progressivement sur une section S jusqu'à la rupture.

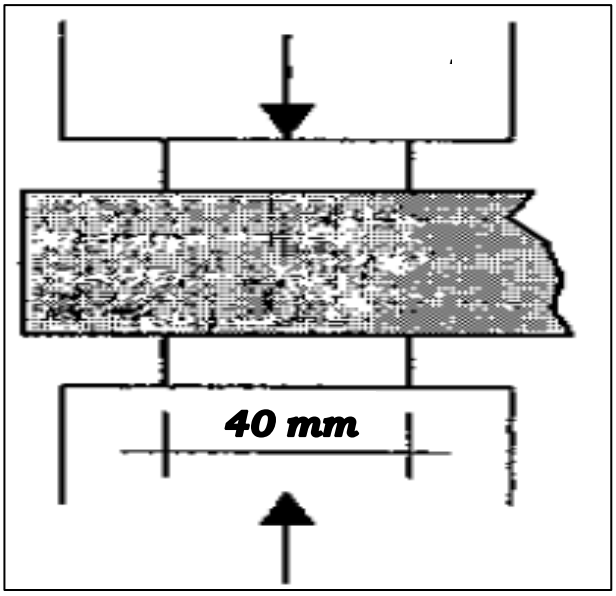



Figure 3.3 : Principe de l'essai de compression

La contrainte à la rupture $\sigma_{rc}$(MPa) correspond au rapport de la charge maximale $F_{Cmax}$ provoquant la rupture de l'éprouvette par la section S d'application de cette charge.

$$\sigma_{rc} = \frac{F_{Cmax}}{S} \qquad 3.6$$

Le bloc ayant subi un retrait au cours du séchage puis de la cuisson, ses dimensions (b × l × h) diffèrent légèrement de 4 x 4 x 16 ($cm^3$). « b » désigne la largeur de l'éprouvette, « h » la hauteur et « l » la longueur.

Compte tenu du dispositif d'essai, la section S sur laquelle est exercée la charge de compression $F_C$, a une longueur constante égale à 4 cm, d'où $S = 4 \times b\ (cm^2)$.

Au Bénin, la presse universelle utilisée pour l'essai de traction par flexion est montée avec le dispositif d'essai de compression pour la réalisation des essais avec un taux de charge de 2,5 kN/s. Le déplacement correspondant à la force appliquée à un instant t est enregistré au cours de l'essai, ceci permet d'obtenir la courbe contrainte-déplacement du matériau.

En France, dans un premier temps, la presse de type 3R d'une capacité de 10 kN est utilisée sous un asservissement en force de 0,1 kN/s (Figure 3.4). Elle permet d'enregistrer le déplacement correspondant à la force appliquée à un instant t pendant toute la durée de l'essai, et ainsi de tracer la courbe contrainte-déplacement du matériau à partir des données recueillies.

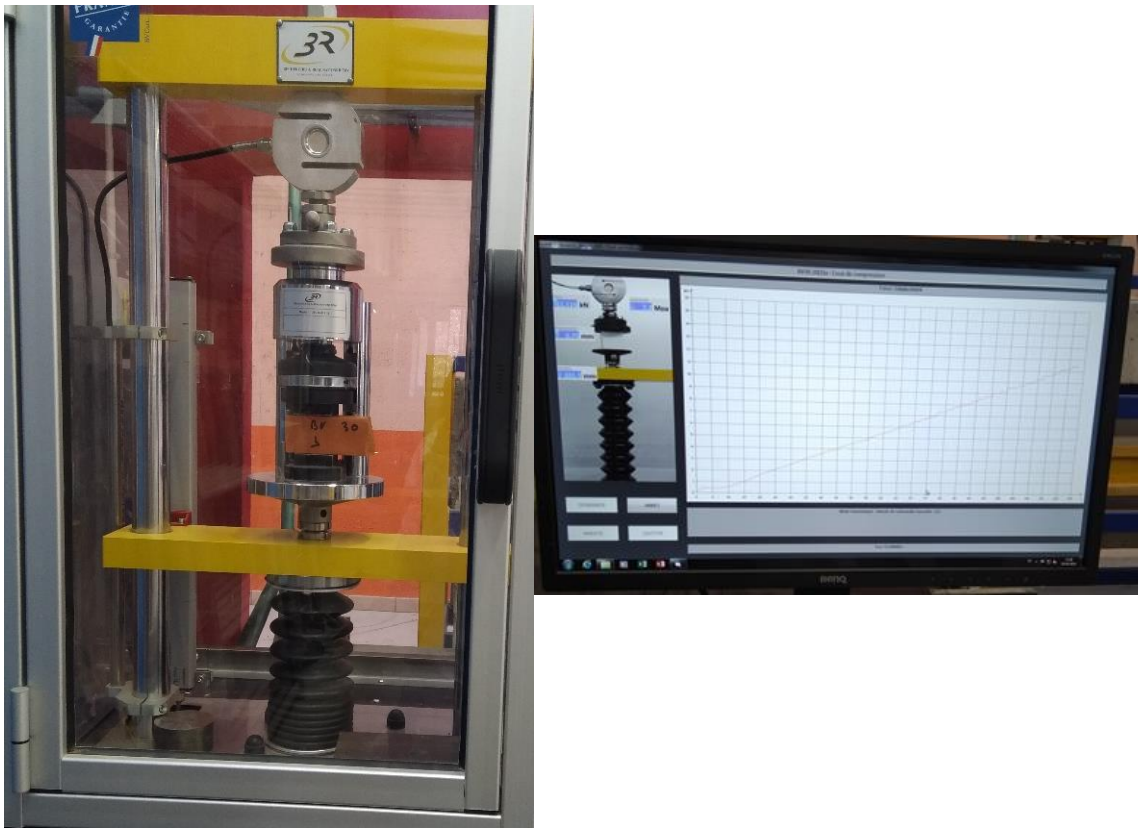



Figure 3.4 : Dispositif d'essai en compression de la presse 3R, 10 kN utilisé à l'IUT de Nancy

À l'issu de ces essais, les éprouvettes n'ayant pas rompu sont ensuite testées sur une presse Cimentier 3R d'une capacité de 250 kN qui affiche uniquement la force à la rupture et la contrainte correspondante.

Selon les normes industrielles, une brique classique sans additif doit avoir une résistance en compression au minimum égale à 10 MPa [210], [211].

### 3.2.2.3. **Détermination du module d'élasticité ou module de Young**

Représenté par la lettre E, le module d'élasticité ou module d'Young, du nom du physicien britannique Thomas Young qui avait remarqué au début du 19ème siècle sa constance, est le rapport entre la contrainte axiale et la déformation axiale [215].

Si le comportement du matériau est élastique linéaire, le module est la pente de la courbe « contrainte-déformation ».

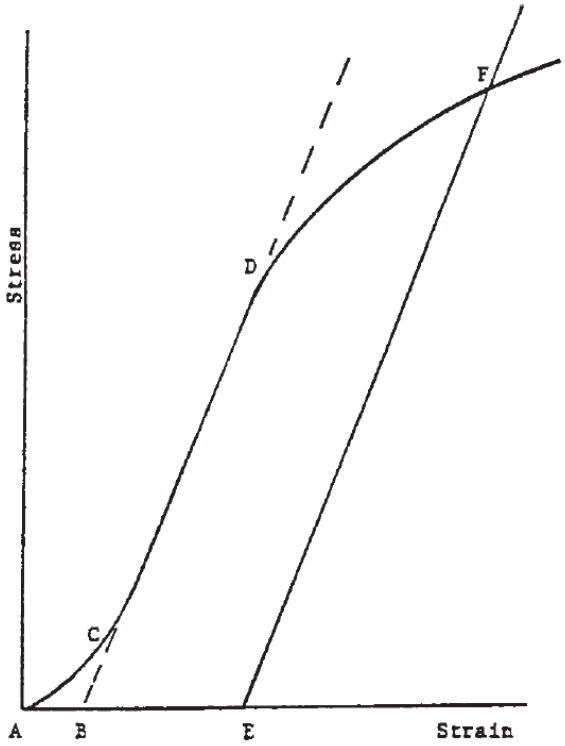



Figure 3.5 : Courbe contrainte-déformation typique d'un matériau avec une zone élastique linéaire [215]

Dans une courbe contrainte-déformation typique, il existe une région de pointe, AC (Figure 3.5), qui ne représente pas une propriété du matériau. C'est un artefact causé par un rattrapage de mou, un alignement ou une assise du spécimen. Afin d'obtenir des valeurs correctes pour des paramètres tels que le module, la déformation et le seuil d'élasticité décalé, cet artefact doit être compensé pour obtenir le point zéro corrigé (B) sur l'axe de déformation ou d'extension.
Dans le cas d'un matériau présentant une région de comportement linéaire (Figure 3.5), un prolongement de la région linéaire (CD) de la courbe est construite par l'axe de contrainte nulle. Cette intersection (B) est le point zéro-contrainte corrigé à partir duquel toutes les extensions ou déformations doivent être mesurées.
Le module d'élasticité peut être déterminé en divisant la contrainte en un point quelconque de la ligne CD (ou de son extension) par la déformation au même point (mesurée à partir du point B, défini comme une déformation nulle). En outre, le module tangent est égal à la pente de la partie linéaire de la courbe en un point quelconque.

Le module de Young des différents blocs d'argile cuits est déterminé sous charge de compression.

## 3.3. Propriétés physico-**mécaniques des blocs d'argile sans ajout**

### 3.3.1. Argile de Xeuilley

Les blocs « E » d'argile cuite de Xeuilley étudiés en France, sont façonnés par compactage vertical. C'est-à-dire que la force de compactage est exercée parallèlement à leur plus grande dimension (l).

#### 3.3.1.1. Propriétés physiques

L'observation visuelle des blocs d'argile cuits de Xeuilley sans ajout montre un flambement consécutif à d'importantes déformations de gonflement. Nous relevons également de profondes fissures et l'éclatement des blocs, tel que présenté à la Figure 3.6. Les déformations enregistrées seraient liées à la présence de carbonates et des minéraux comme la dolomite dans l'argile de Xeuilley.




Figure 3.6 : Aspect visuel des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout après cuisson

Les propriétés physiques de ces blocs d'argile cuits sont présentées au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Propriétés physiques des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout

| Blocs « E » d'argile de Xeuilley : compactage vertical | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teneur en eau w(%) | Masse volumique ρ (g/cm$^3$) | Perte de masse de Séchage (%) | Perte de masse de cuisson PF (%) | Retrait de séchage (%) | | | Retrait de cuisson RL (%) | | |
| | | | | l | b | h | l | b | h |
| 16 | 1,62 | 13 | 16 | 4 | 5 | 4 | 1 | -3 | -1 |
| ± 0 | ± 0,03 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 1 | ± 0 | ± 0 | ± 1 | ± 1 |

On note une anisotropie du retrait de cuisson, les retraits dans les directions latérales (b et h) étant négatifs. Le retrait de cuisson négatif est la quantification physique du phénomène de gonflement qui a eu lieu. Ceci peut être expliqué par la forte teneur en quartz de l'argile utilisée qui est inerte dans les plages de températures étudiées, réduisant ainsi la contraction du produit [216]. Cependant, le retrait linéaire de cuisson (RL) est inférieur à la valeur maximale de 8% préconisée [99], [211]. En outre, les blocs présentent en moyenne un retrait linéaire de séchage de 4%, quelle que soit la direction considérée. Le séchage des blocs se fait donc de manière uniforme dans la salle de séchage.
La perte au feu (PF) des blocs de Xeuilley est évaluée à 16%. Cette valeur est légèrement au-dessus du seuil de 15% préconisé [210], [211]. Toutefois, lorsqu'on prend en compte la teneur

en eau résiduelle de séchage de 3%, la valeur de la PF se situe bien dans les limites admissibles.

En comparant la teneur en eau moyenne de confection de ces blocs soit 16%, à leur perte de masse moyenne de séchage soit 13%, on observe qu'il subsiste environ 3% d'eau résiduelle à la fin du séchage. Les blocs étant séchés à la température ambiante, ils atteignent donc une teneur en eau d'équilibre avec l'humidité de l'air. Ainsi, cette teneur en eau correspond à environ 3% de la masse sèche.

On observe également que la masse volumique des blocs d'argile cuits de Xeuilley vaut 1,62 g/cm$^3$, cette valeur est inférieure à la limite inférieure (1,80 g/cm$^3$) recommandée pour la masse volumique des blocs d'argile pure (sans ajout) [211].

Au regard des nombreuses déformations observées au niveau des blocs d'argile cuits de Xeuilley, il serait difficile d'envisager pour ces produits une utilisation dans le bâtiment, sans l'amélioration de leur aspect visuel.

Malgré les déformations enregistrées au niveau de ces blocs d'argile cuits de Xeuilley, nous avons déterminé leurs propriétés mécaniques.

### 3.3.1.2. Propriétés mécaniques

Le Tableau 3.2 présente les propriétés mécaniques des blocs d'argile cuits de Xeuilley.
Le module de Young a été déterminé de deux manières telles qu'il a été présenté au paragraphe 3.2.2.3.
$E_c$ désigne le module de Young calculé en divisant la contrainte en un point quelconque de la partie linéaire de la courbe par la déformation au même point.
$E_p$ désigne le module tangent qui correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe.

Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout

| Blocs « E » d'argile de Xeuilley : compactage vertical | | | |
|---|---|---|---|
| Résistance à la traction par flexion trois points | Résistance à la compression | Module de Young | Pente |
| $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | $E_C$(MPa) | $E_p$(MPa) |
| 14,4 ± 1,1 | 21,7 ± 4,5 | 1002 ± 76 | 1045 ± 92 |

Nous observons une très grande valeur de résistance à la traction par flexion trois points de ces blocs comparés aux valeurs de résistances à la compression. En effet, on a :

$$\sigma_{tf} \sim \frac{2}{3}\sigma_{rc} \qquad 3.7$$

D'autre part, la Figure 3.7 montre une rupture brusque du bloc cuit à la traction par flexion trois points. Ce comportement serait lié à la structure complexe des céramiques : le matériau résiste élastiquement à l'effort, mais la rupture de la liaison atomique est catastrophique. Elle se propage de manière pratiquement instantanée au sein du matériau [217]. La présence de défauts microstructuraux constitue également des points de faiblesse du bloc et influencerait la rupture.




Figure 3.7 : Mode de rupture des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout à la traction par flexion trois points



Figure 3.8 : Aspect du cœur des blocs d'argile de Xeuilley sans ajout

En outre, l'observation du cœur des blocs après la rupture à la traction par flexion trois points (Figure 3.8) révèle la présente d'un cœur noir qui pourrait traduire une cuisson incomplète des blocs.

Toutefois, le module de Young de ces blocs d'argile cuits est en moyenne égale à 1000 MPa. Ces blocs présentent donc d'excellentes propriétés mécaniques pour des briques d'argile cuite. Cependant, la maitrise de la formulation des blocs d'argile cuits de Xeuilley en vue de limiter les déformations consécutives à la cuisson est indispensable avant d'envisager une application dans le bâtiment.

### 3.3.2. Argile de Sèmè-Podji

Les blocs « SP » d'argile de Sèmè-Podji étudiés en France, sont façonnés par compactage vertical. C'est-à-dire que la force de compactage est exercée parallèlement à leur plus grande dimension (l).

#### 3.3.2.1. Propriétés physiques

La Figure 3.9 présente l'aspect visuel des blocs « SP » d'argile cuite (sans ajout) de Sèmè-Podji. On observe que ces blocs ne présentent pas une couleur uniforme. L'aspect visuel de ces blocs traduit un défaut de cuisson.



Figure 3.9 : Aspect visuel des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout après cuisson

Le Tableau 3.3 présente les propriétés physiques des blocs d'argile pure (sans ajout) de Sèmè-Podji.

Tableau 3.3 : Propriétés physiques des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout

| Blocs « SP » d'argile de Sèmè-Podji : compactage vertical | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teneur en eau w(%) | Masse volumique ρ(g/cm³) | Perte de masse de Séchage (%) | Perte de masse de cuisson PF (%) | Retrait de séchage (%) | | | Retrait de cuisson RL (%) | | |
| | | | | l | b | h | l | b | h |
| 14 | 1,78 | 12 | 19 | 3 | 3 | 3 | 8 | 10 | 9 |
| ± 0 | ± 0,01 | ± 0 | ± 1 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 | ± 0 |

Les données du Tableau 3.3 montrent qu'il subsiste une teneur en eau résiduelle d'environ 2% à la fin du séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji.
En outre, la perte au feu (PF) de 19 % enregistrée à l'issue de la cuisson de ces blocs est au-dessus du seuil de 15% préconisé [210], [211]. Cette valeur élevée de la perte au feu de cette argile se justifie du fait de sa forte teneur en matières organiques, soit 25% conformément aux données du Tableau 2.9. De plus, les résultats de la Figure 2.21 et du Tableau 2.12 montrent que l'échantillon de Sèmè-Podji est celui qui subit la perte de masse la plus importante à la thermobalance, la plus grande partie (11,23%) s'étant produite avant 550°C.




Figure 3.10 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points, des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout




Figure 3.11 : Aspect du cœur des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout

En outre, l'observation du cœur des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji après la rupture à la traction par flexion trois points révèle la présence d'un petit cœur noir et des fissurations au cœur des blocs (Figure 3.11).
Or, la perte au feu de ces blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji est de 19% (Tableau 3.3) et l'argile de Sèmè-Podji renfermait au départ 25% de matières organiques (Tableau 2.9). Ainsi, la présence du cœur noir traduit encore la présence des matières organiques et donc une cuisson incomplète de ces blocs d'argile.
Les fissurations enregistrées au cœur du bloc seraient donc liées à la pression que le $CO_2$ dégagé au cours de la combustion, exerce sur la matrice lorsqu'il cherche à s'échapper.
L'aspect noir du cœur des blocs cuits influencerait leur mode de rupture à la traction par flexion trois points, du fait de la résistance et de la dureté des formes structurales présentes au niveau du cœur. En effet, la Figure 3.10 montre que la rupture du bloc à la traction par flexion trois points a lieu en partie centrale et part de la fibre inférieure la plus tendue vers la fibre supérieure la plus comprimée. La fissure se propage alors en bielle de la face inférieure à la face supérieure.

Toutefois, le retrait linéaire de cuisson est à la limite de la valeur maximale de 8% préconisée [99], [211]. En revanche, le séchage de ces blocs est uniforme et le retrait est de 3%.
Par ailleurs, on observe que la masse volumique des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji correspond à la limite inférieure recommandée pour la masse volumique des blocs d'argile pure (sans ajout) [211].

Du fait donc de l'influence de cette caractéristique fondamentale sur les résistances mécaniques, les blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji pourraient alors présenter des résistances mécaniques acceptables en dépit des défauts de cuisson, de la perte au feu ou du retrait de cuisson peu intéressants enregistrés.

#### 3.3.2.2. Propriétés mécaniques

Le Tableau 3.4 présente les caractéristiques mécaniques obtenues pour les blocs « SP » d'argile cuite de Sèmè-Podji.

Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques des blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout

| Blocs « SP » d'argile de Sèmè-Podji : compactage vertical | | | |
|---|---|---|---|
| Résistance à la traction par flexion trois points | Résistance à la compression | Module de Young | Pente |
| $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | $E_C$(MPa) | $E_p$(MPa) |
| 8,6 ± 3,1 | 36,9 ± 7,2 | 1022 ± 54 | 1089 ± 65 |

Nous remarquons des résistances mécaniques très intéressantes des blocs « SP ». En effet, la valeur de la résistance en compression $\sigma_{rc}$ vaut plus du triple du seuil de résistance minimale, 10 MPa préconisé. De plus, on note une bonne valeur de résistance à la traction par flexion trois points $\sigma_{tf}$ telle que :

$$\frac{1}{5}\sigma_{rc} < \sigma_{tf} < \frac{1}{4}\sigma_{rc} \qquad 3.8$$

Au regard des performances mécaniques enregistrées pour les blocs « SP » d'argile cuite de Sèmè-Podji, il serait intéressant de pallier les défauts à la cuisson de ces produits, afin de garantir des propriétés physiques et mécaniques suffisantes pour des applications dans le bâtiment.

### 3.3.3. Argile de Zogbodomey

#### 3.3.3.1. Compactage horizontal : blocs étudiés au Bénin

Les blocs « A » d'argile de Zogbodomey étudiés au Bénin, sont façonnés par compactage horizontal. C'est-à-dire que la force de compactage est exercée parallèlement à leur épaisseur (h).

Propriétés physiques

Ces blocs d'argile pure de Zogbodomey (sans ajout), ayant subi un compactage horizontal présentent une couleur rouge brique claire uniforme tant en surface (Figure 3.12) qu'au cœur (Figure 3.13).
Toutefois, on relève un défaut de surface au niveau des faces du bloc (Figure 3.12) qui semblent s'effriter.

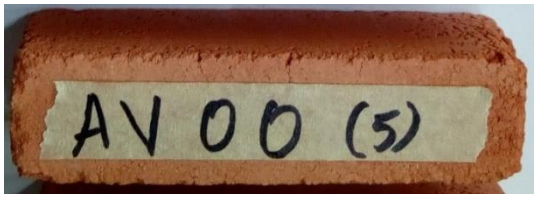



Figure 3.12 : Aspect visuel d'un bloc cuit d'argile de Zogbodomey sans ajout, ayant subi le compactage horizontal



Figure 3.13 : Aspect du cœur d'un bloc cuit d'argile de Zogbodomey sans ajout, ayant subi le compactage horizontal

Les propriétés technologiques de ces échantillons sont présentées dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Propriétés physiques des blocs « A » d'argile de Zogbodomey, sans ajout

| Blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey : compactage horizontal | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teneur en eau w(%) | Masse volumique ρ (g/cm³) | Perte de masse de Séchage (%) | Perte au feu PF (%) | Retrait de séchage (%) | | | Retrait de cuisson RL (%) | | |
| | | | | l | b | h | l | b | h |
| 12 | 1,60 | 10 | 17 | 1 | 2 | 1 | 5 | 4 | 6 |
| ± 0 | ± 0,06 | ± 0 | ± 1 | ± 0 | ± 0 | ± 1 | ± 2 | ± 1 | ± 1 |

Les blocs d'argile de Zogbodomey façonnés à une teneur en eau de 12 % présentent une masse volumique moyenne de 1,60 g/cm³.
A l'instar des blocs confectionnés en France, on remarque que la perte de masse de séchage des blocs d'argile diffère légèrement de leur teneur en eau de confection. Il subsiste une proportion d'eau résiduelle d'environ 2% pour ces blocs d'argile confectionnés au Bénin. D'autre part, la perte au feu de ces produits est légèrement en hausse par rapport au seuil de 15% recommandé, quand bien même le retrait linéaire soit de l'ordre de grandeur souhaité.

Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des blocs A d'argile de Zogbodomey sont présentées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Propriétés mécaniques des blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout

| Blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey : compactage horizontal | | | |
|---|---|---|---|
| Résistance à la traction par flexion trois points | Résistance à la compression | Module de Young | Pente |
| $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | $E_C$(MPa) | $E_p$(MPa) |
| 1,8 ± 0,2 | 11,8 ± 1,5 | 1086 ± 92 | 1253 ± 92 |

La résistance moyenne de ces blocs vaut 1,8 MPa à la traction par flexion trois points et 11,8 MPa en compression. La valeur de résistance en compression $\sigma_{rc}$ est à la limite du seuil 10 MPa préconisé. De plus, on note une bonne valeur de résistance à la traction par flexion trois points $\sigma_{tf}$ telle que :

$$\frac{1}{7}\sigma_{rc} < \sigma_{tf} < \frac{1}{6}\sigma_{rc} \qquad 3.9$$

Pour toutes les formulations étudiées dans ce travail, les données enregistrées au cours des essais de compression par le biais de la presse universelle électronique nous ont permis de tracer l'évolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation puis d'en déduire le module de Young tangent de l'éprouvette considérée.

A la Figure 3.14 est présentée la courbe contraintes-déformations pour une éprouvette d'argile pure de Zogbodomey ayant subi le compactage horizontal.

Le comportement enregistré peut être divisé en quatre phases distinctes : A, B, C et D.

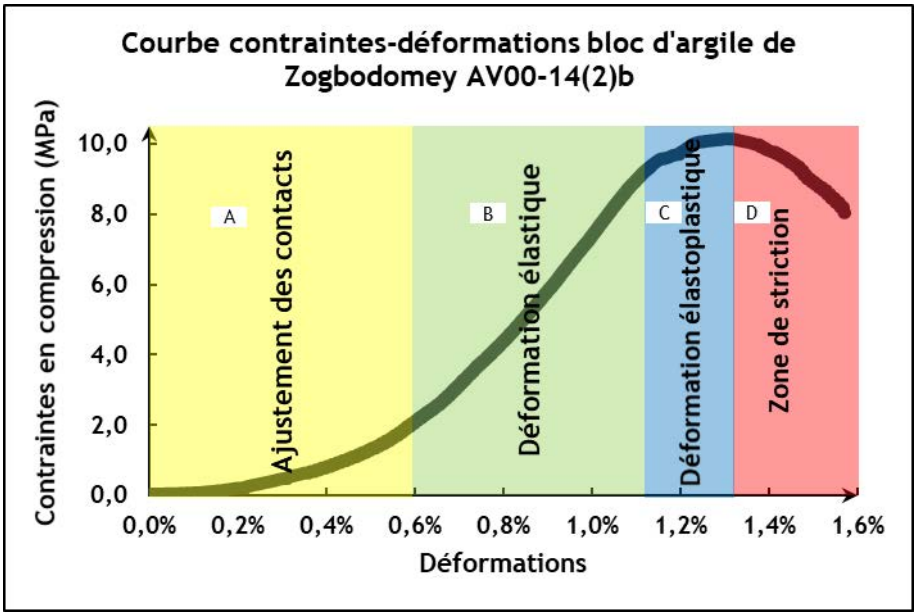



Figure 3.14 : Courbes contraintes- déformations bloc d'argile cuit de Zogbodomey sans ajout

- la phase A : ajustement des contacts, correspond à un écrasement des aspérités de surface [218], [219]. Elle n'est donc pas caractéristique du matériau et est compensée afin d'extraire le module de Young tel qu'indiqué à la Figure 3.5. La courbe compensée ainsi obtenue est présentée à la Figure 3.15.

- la phase B (Figure 3.14) se caractérise alors par une variation linéaire des contraintes pour de faibles déformations (partie en rouge sur la Figure 3.15). On est dans le domaine élastique linéaire où la loi de Hooke est applicable. La pente de la droite linéaire correspond au module de Young tangent $E_p$ du matériau. Le rapport de la contrainte en un point quelconque de la parte linéaire de la courbe à la déformation correspondante donne le module de Young $E_c$.
  Par ailleurs, il est recommandé d'effectuer des cycles de décharge – recharge et de mesurer le module tangent à la mise en charge de chaque cycle. Ce module reste constant quelle que soit la charge de pré consolidation, et est égal à la première pente de la courbe [82].
- la phase C, très réduite sur la courbe de la Figure 3.15 est parfois inexistante au niveau de certains blocs étudiés. À cette phase, il n'existe plus un rapport de proportionnalité entre les contraintes et les déformations. Le comportement du matériau est dit élastoplastique ; le matériau est déformé de façon permanente jusqu'à sa capacité maximale.
- La phase D est traduite par la rupture du bloc après le dépassement de sa résistance maximale. L'on enregistre la diminution de la contrainte avec l'accroissement des déformations. Les déformations apparaissent sous forme de micro et macro-fissurations et de flambement dans certains cas ; d'autre part la dislocation de l'échantillon est parfois observée.

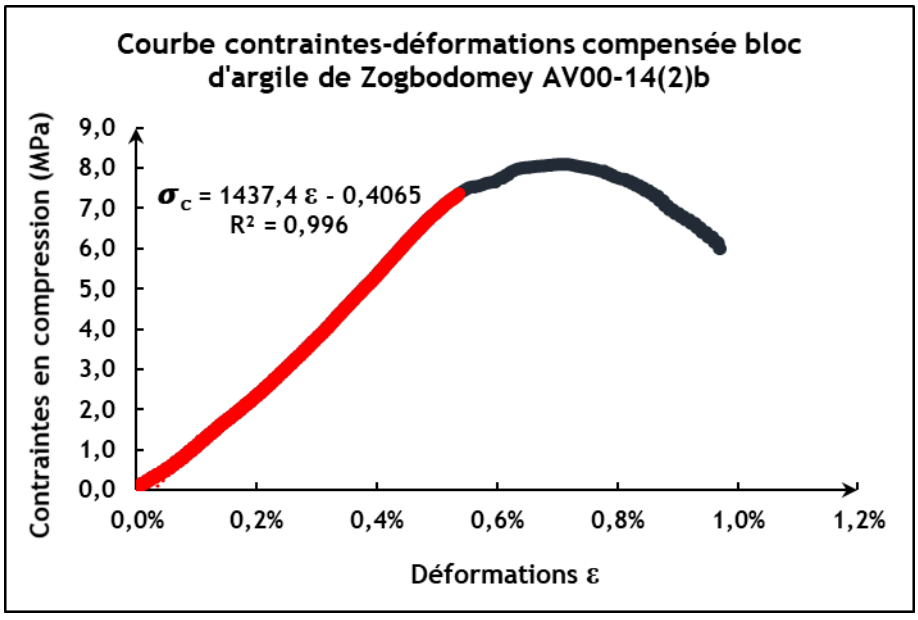



Figure 3.15 : Courbes contraintes- déformations compensée bloc d'argile cuit de Zogbodomey sans ajout

Au regard de la Figure 3.15, le module de Young $E_p$ déterminé parallèlement au sens du compactage du demi-bloc b de l'éprouvette N°2 d'argile pure de Zogbodomey (sans ajout), ayant subi un compactage horizontal est égale à 1437 MPa. Les blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey ont en moyenne un module de Young de 1000 MPa.

3.3.3.2. Compactage vertical : blocs étudiés en France

Les blocs « B » d'argile de Zogbodomey étudiés en France, sont façonnés par compactage vertical. C'est-à-dire que la force de compactage est exercée parallèlement à leur longueur.

Propriétés physiques

Les blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey (sans ajout), ayant subi un compactage vertical présentent une couleur rouge brique claire uniforme tant en surface (Figure 3.16) qu'au cœur (Figure 3.17). De plus, ces blocs présentent des surfaces lisses (Figure 3.16) contrairement aux blocs A (Figure 3.12) dont les faces sont plus rugueuses.

Toutefois, aussi bien les blocs « A » que les blocs « B » d'argile de Zogbodomey présentent une cuisson à cœur. Ceci confirme que la température maximale de cuisson de 950°C adoptée est bien adaptée pour ces produits.




Figure 3.16 : Aspect visuel des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey sans ajout



Figure 3.17 : Aspect du cœur des blocs « B » d'argile de Zogbodomey sans ajout

- Perte de masse

La Figure 3.18 présente l'évolution de la perte de masse de séchage et de la perte au feu (PF) des blocs en fonction de la teneur en eau de confection.
Nous observons une relation linéaire croissante de la perte de masse de séchage (PS) des blocs en fonction de la teneur en eau de confection (w), avec une pente égale à 0,80 aux erreurs expérimentales près et un coefficient de corrélation linéaire R qui vaut 0,9729 à un millième près. Ainsi, la perte de masse de séchage de ces blocs d'agile cuite, serait donc fortement corrélée à leur teneur en eau de confection. Nos blocs étant séchés à l'air libre, il subsiste donc en leur sein une certaine proportion d'eau d'interposition en équilibre du fait de l'humidité relative de la salle de séchage. Tout ceci est mis en évidence par la pente de la courbe qui est différente de 1. En effet, l'opération de séchage a pour but d'éliminer la plus grande partie de la proportion d'eau de façonnage. Quelle que soit donc la teneur en eau de confection des blocs, la fin du séchage est marquée par l'atteinte d'une limite d'évaporation de l'eau du bloc.

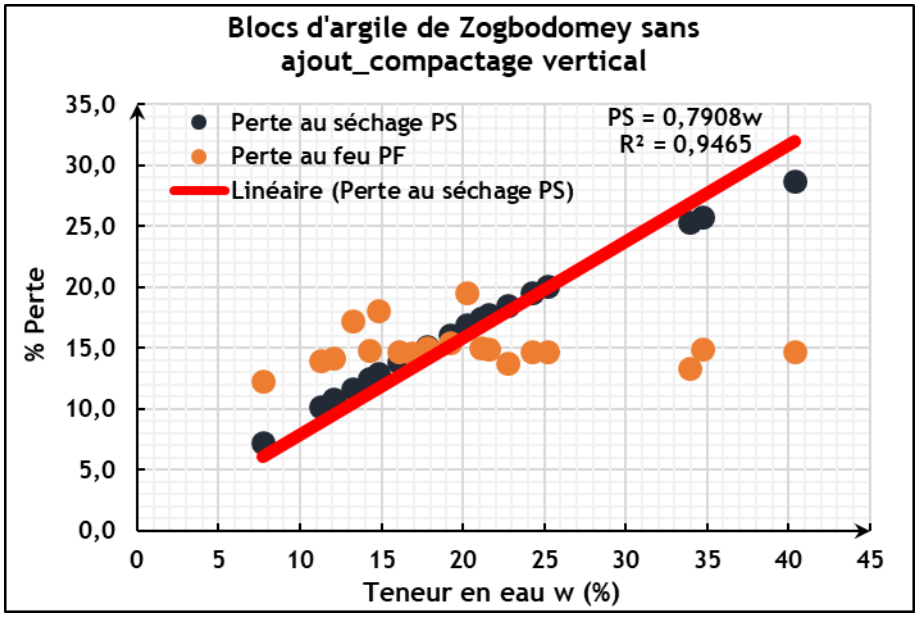



Figure 3.18 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « B » d'argile de Zogbodomey sans ajout sur la perte de masse de séchage

La perte au feu des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey est en moyenne de 15 ± 1% et est légèrement inférieure à celle des blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey qui vaut 17 ± 1%. Les deux types de blocs ont été cuits à la même température maximale de 950°C, mais au niveau des blocs « B », des paliers sont effectués aux alentours du points de quartz (573°C). Le passage brusque de cette Zone par les blocs « A » pourrait expliquer que les propriétés, notamment la perte au feu desdits blocs en soit affectée.

- Retrait

La Figure 3.19 présente la variation des retraits linéaires de séchage des blocs « B » en fonction de la teneur en eau de confection.
Le retrait de séchage varie peu en fonction de la direction du bloc et croit avec la teneur en eau entre 10% et 25% d'eau. Le séchage des blocs s'effectue donc de manière uniforme dans cet intervalle de variation de la teneur en eau.

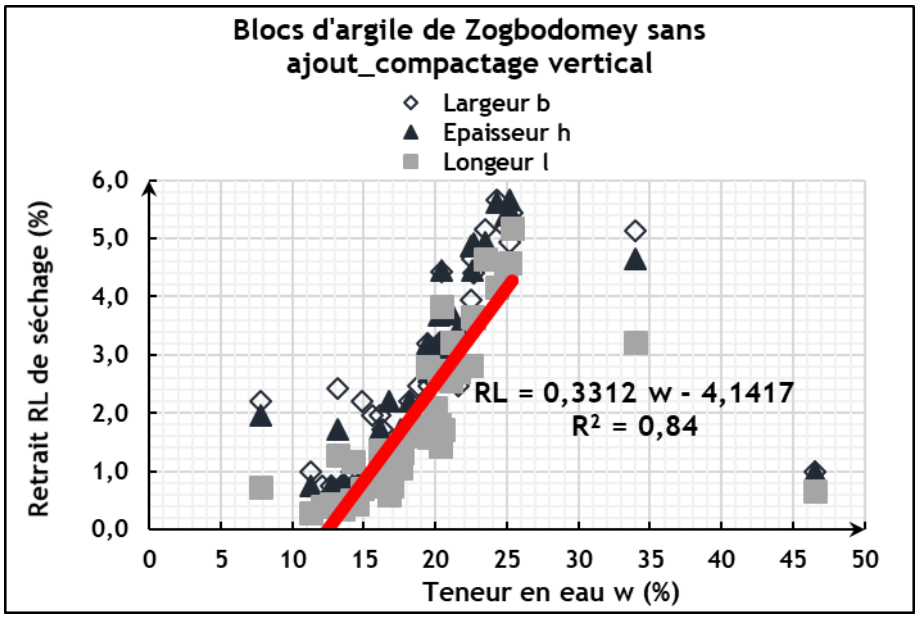



Figure 3.19 : Étude du retrait de séchage en fonction de la teneur en eau des blocs « B » d'argile de Zogbodomey, sans ajout

Conformément à la Figure 3.20, l'étude du retrait des blocs selon la direction considérée est traduite par une relation linéaire qui dénote de la proportionnalité du retrait.

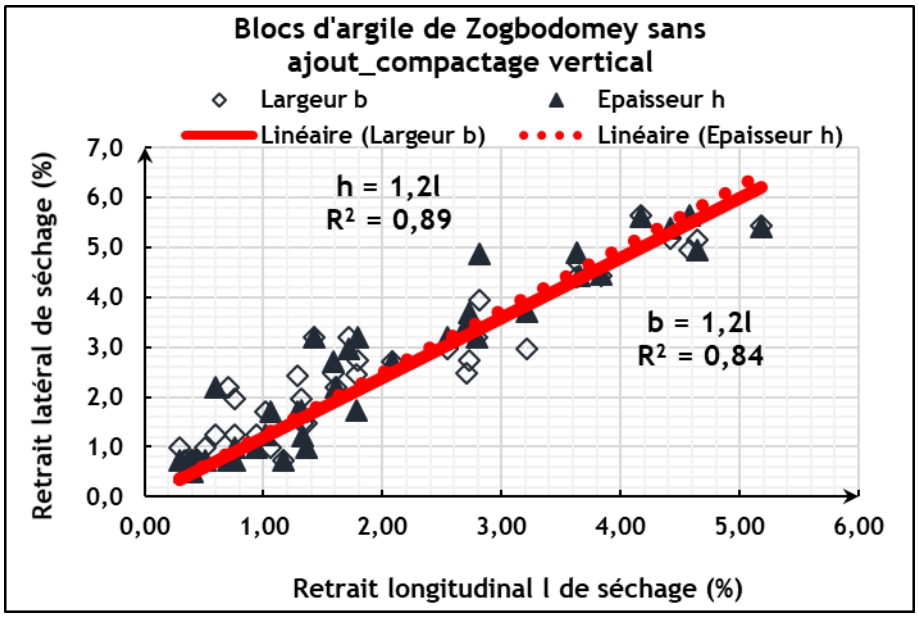



Figure 3.20 : Relation entre le retrait latéral et le retrait longitudinal de séchage des blocs « B » d'argile de Zogbodomey, sans ajout

Elle montre que ce soit pour l'épaisseur ou la largeur, ces deux valeurs sont corrélées linéairement au retrait longitudinal. Les courbes largeur et épaisseur ayant les mêmes équations aux erreurs expérimentales près, la seule connaissance du retrait longitudinal permet de déterminer le retrait total. Les coefficients directeurs n'étant pas de 1, ceci montre que mécaniquement la compression qui se fait suivant la longueur de l'échantillon fixe un axe de propriétés particulières vis-à-vis du séchage.

Ces conclusions sont en accord avec le fait que l'échantillon est homogène perpendiculairement à son axe de compression mais que la direction de la compression modifie l'arrangement des particules entre elles.

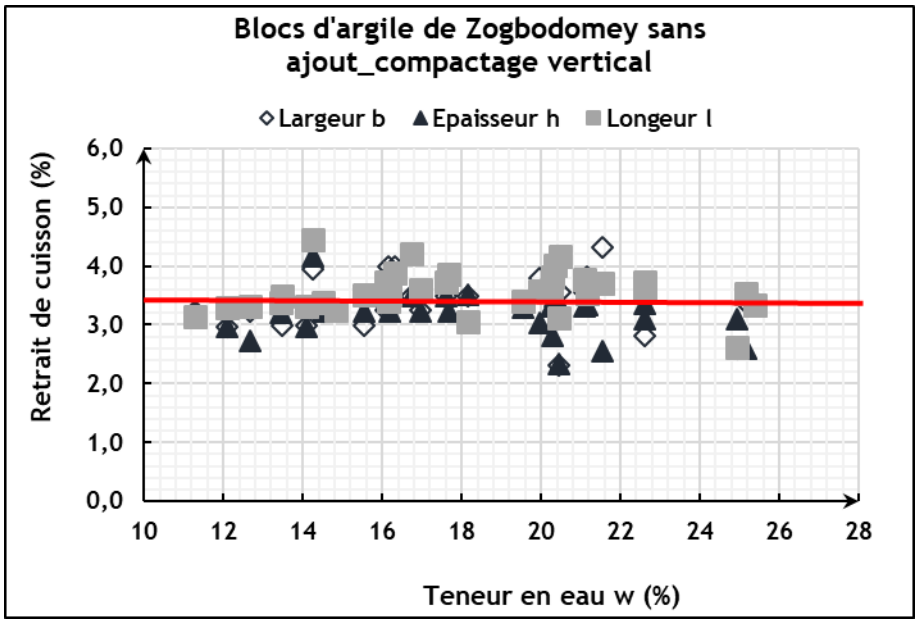



Figure 3.21 : Étude du retrait de cuisson des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey en fonction de la teneur en eau

Conformément à la Figure 3.21, on observe que le retrait de cuisson est indépendant de la proportion d'eau et de la direction considérée. Une valeur moyenne du retrait de cuisson égale à 3,4 ± 0,3 % (trait continu en rouge sur la Figure 3.21) est enregistrée et cette valeur est inférieure au seuil de 8% recommandé.

- Masse volumique

La Figure 3.22 présente l'influence de la teneur en eau w (%) de confection des blocs, sur la masse volumique sèche $\rho_s$ des blocs à la fin du séchage et sur la masse volumique $\rho$ des blocs cuits. L'évolution des masses volumiques (séchage et cuisson) en fonction de l'augmentation de la teneur en eau est similaire et présente l'allure d'une courbe parabolique concave à l'instar de la courbe Proctor [203]. Ainsi, pour les faibles teneurs en eau, la masse volumique croit en fonction de l'augmentation de la proportion d'eau puis elle atteint une valeur optimale au-delà de laquelle elle chute avec l'augmentation de la teneur en eau.

On peut déduire des résultats expérimentaux obtenus que la teneur en eau optimale de 23 ± 0% correspond aux masses volumiques maximales soient : 1,79 ± 0,01 g/cm$^3$ pour la masse volumique des blocs secs et 1,69 ± 0,01 g/cm$^3$ pour la masse volumique des blocs cuits.

La même valeur de teneur en eau optimale obtenue quelle que soit la masse volumique considérée (séchage et cuisson) traduit une corrélation entre la masse volumique $\rho_s$ des blocs secs et la masse volumique $\rho$ des blocs d'argile cuits de Zogbodomey.

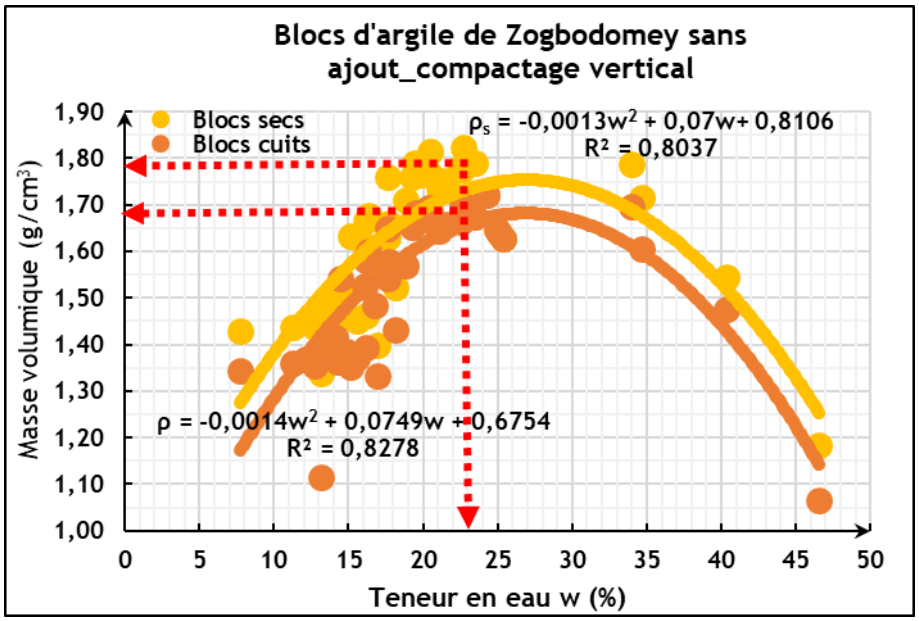



Figure 3.22 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « B » d'argile de Zogbodomey sans ajout sur leurs masses volumiques

La Figure 3.23 montre l'évolution de la masse volumique $\rho$ des blocs d'argile cuits de Zogbodomey (B sans ajout) en fonction de la masse volumique sèche $\rho_s$ de ces mêmes blocs.

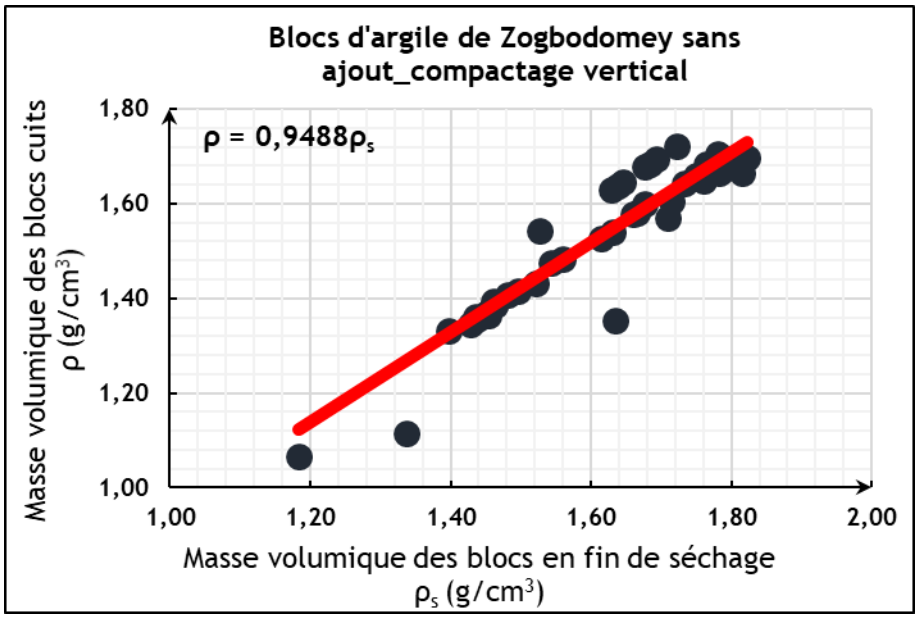



Figure 3.23: Influence de la masse volumique sèche des blocs « B » sans ajout sur leur masse volumique après cuisson

On observe que ces deux paramètres ρ et $\rho_s$ sont liés par une relation affine de pente 0,9488 et d'ordonnée à l'origine nulle, avec un coefficient de corrélation linéaire R qui vaut 0,9432 et qui est significatif à une valeur contre 0 de 1/1000.
Ainsi, une diminution constante de 10% de la masse volumique sèche est enregistrée au cours de la cuisson des blocs d'argile de Zogbodomey sans ajout.

Ces résultats valident la démarche expérimentale adoptée pour l'élaboration des blocs au Bénin. En effet, il est important de rappeler que les blocs « A » d'argile de Zogbodomey caractérisés, ont été confectionnés à leur teneur en eau optimale. La teneur en eau optimale a été déterminée en se référant à la masse volumique sèche maximale des blocs conformément aux résultats présentés au Chapitre 2.

Propriétés mécaniques

- Résistances mécaniques

Au regard de la Figure 3.24, on observe que les blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey ont rompu au droit de la section d'application de la charge de traction par flexion trois points. La fissuration de rupture part des fibres les plus tendues vers les plus comprimées et est relativement brusque.




Figure 3.24 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey sans ajout

La

Figure 3.25 présente l'influence de la proportion d'eau de confection sur les propriétés mécaniques des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout.
On observe l'accroissement des résistances avec l'augmentation de la proportion d'eau jusqu'à un seuil maximal au-delà duquel, les résistances décroissent.
Les blocs confectionnés à une teneur en eau moyenne de 23% présentent les performances optimales soit une résistance moyenne de 44,1 ± 3,6 MPa à la compression et 3,9 ± 0,6 MPa à la traction par flexion trois points.
L'évolution des résistances mécaniques en fonction de la masse volumique (Figure 3.26) est identique à celle en fonction de la teneur en eau (

Figure 3.25). Ce qui traduit la corrélation entre la teneur en eau de confection et la masse volumique des blocs.

Ainsi, les blocs ayant une masse volumique inférieure à 1,50 g/cm$^3$ présentent les plus faibles valeurs de résistances mécaniques.

En outre, une teneur en eau comprise entre 18% et 35% permet d'obtenir des masses volumiques supérieures à 1,50 g/cm$^3$.

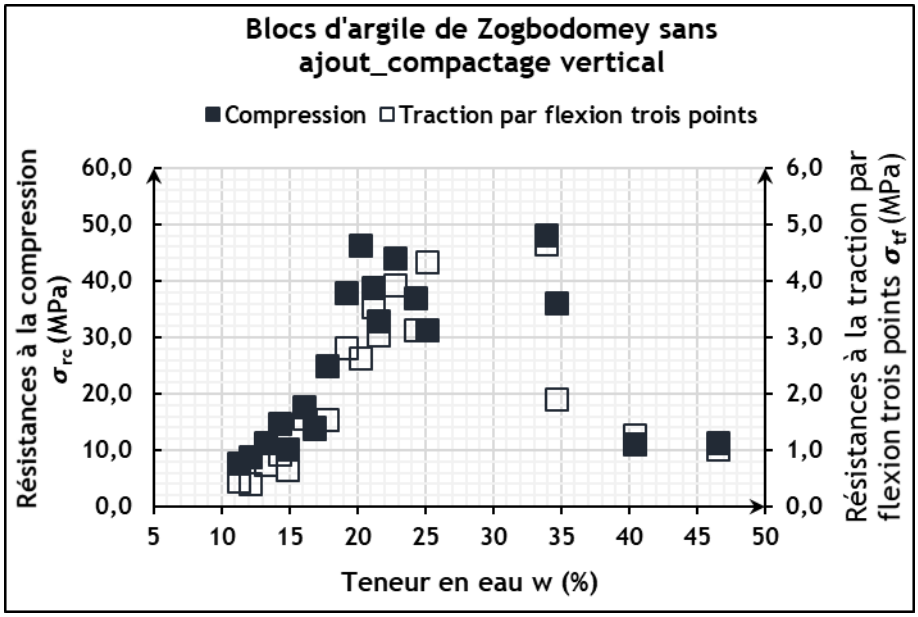



Figure 3.25 : Influence de la teneur en eau sur les résistances mécaniques des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout

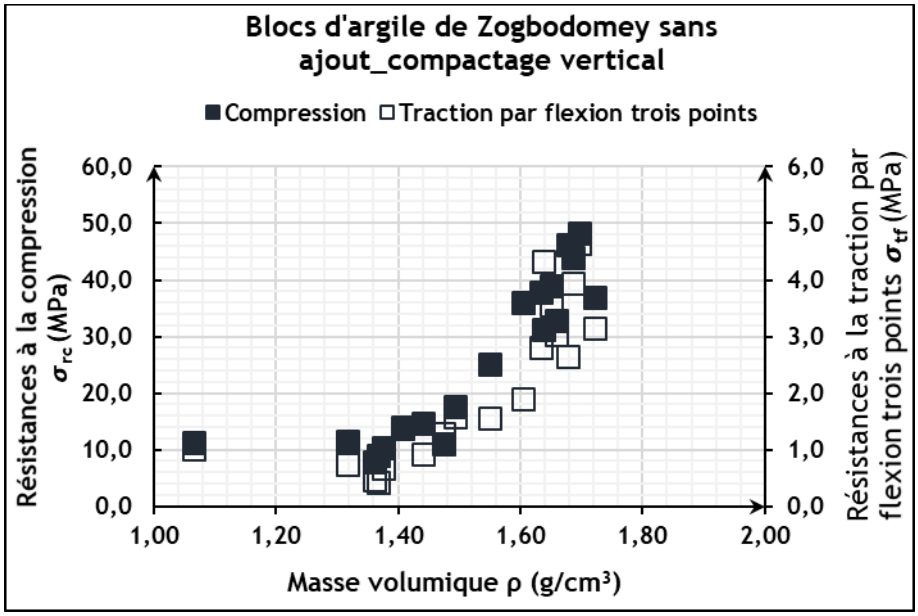



Figure 3.26 : Influence de la masse volumique sur les résistances mécaniques des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout

Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des résistances à la compression en fonction de celles à la traction.

Au regard de la Figure 3.27, on déduit une relation linéaire croissante entre les résistances mécaniques à la compression et celles à la traction par flexion trois points. Cette relation est traduite par une droite affine de pente égale à 11,316 avec un coefficient de corrélation R = 0,8559. Ce coefficient est significatif à une erreur contre

0 de 1/1000 (la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 99,999%), il traduit donc une relation probable entre les résistances mécaniques à la compression et celles à la traction par flexion trois points.

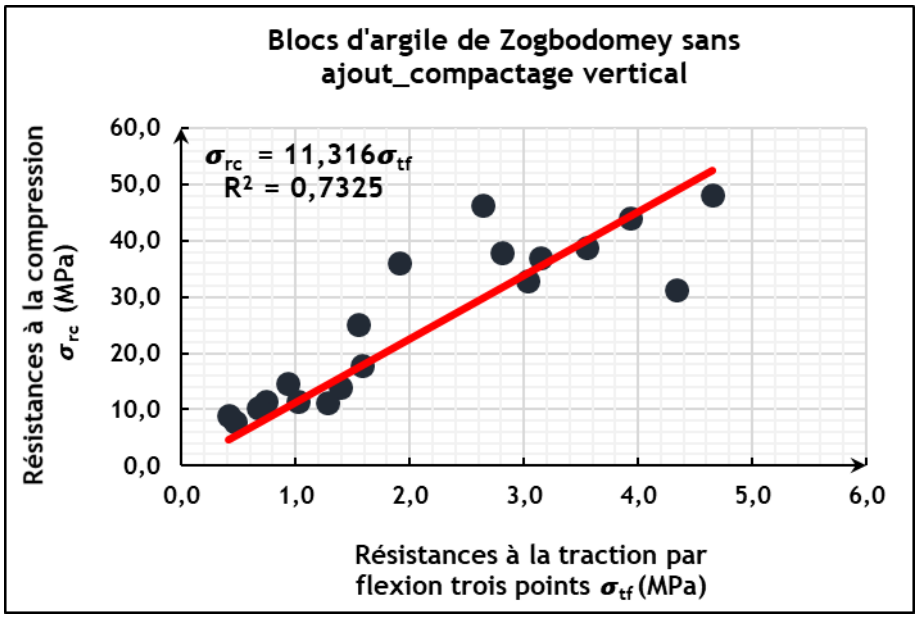



Figure 3.27 : Relation entre les résistances à la compression et celles à la traction par flexion trois points des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout

Ainsi, la résistance à la traction par flexion trois points $\sigma_{tf}$ des blocs B d'argile cuite de Zogbodomey vaut environ le douzième de sa résistance $\sigma_{rc}$ à la compression.
On a :

$$\frac{1}{12}\sigma_{rc} < \sigma_{tf} < \frac{1}{11}\sigma_{rc} \qquad 3.10$$

- Module de Young

La Figure 3.28 présente l'influence de la proportion d'eau de confection sur le module de Young des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey, sans ajout.
On observe que les différents blocs étudiés présentent une valeur moyenne du module de Young qui est de 1100 ± 100 MPa, quelle que soit la proportion d'eau de confection. Ainsi, le module de Young des blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, serait peu sensible à la proportion d'eau de confection des blocs d'argile cuits.

La Figure 3.29 montre également que l'influence de la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, sur leur module de Young n'est pas avérée. En effet, ces différents blocs d'argile cuits présentent une valeur constante de 1100 ± 100 MPa, quelle que soit la masse volumique.

En outre, la Figure 3.30 montre que les blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, admettent en moyenne un module de Young de 1100 ± 100 MPa, quelle que soit la résistance en compression.

Nous observons également sur les figures que, quelle que soit la méthode de détermination du module de Young adoptée, les valeurs obtenues sont dans le même ordre de grandeur.

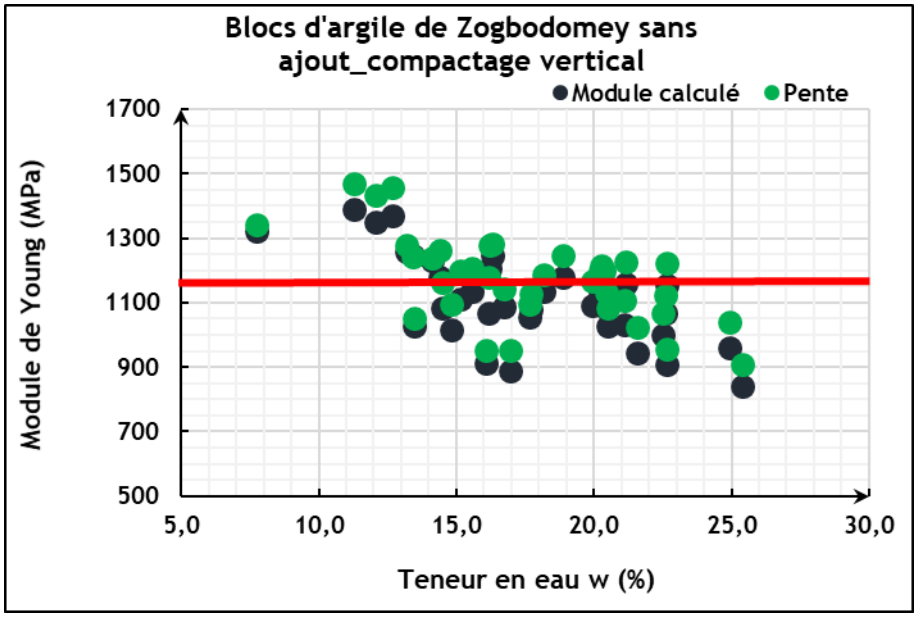



Figure 3.28 : Influence de la teneur en eau sur le module de Young des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey

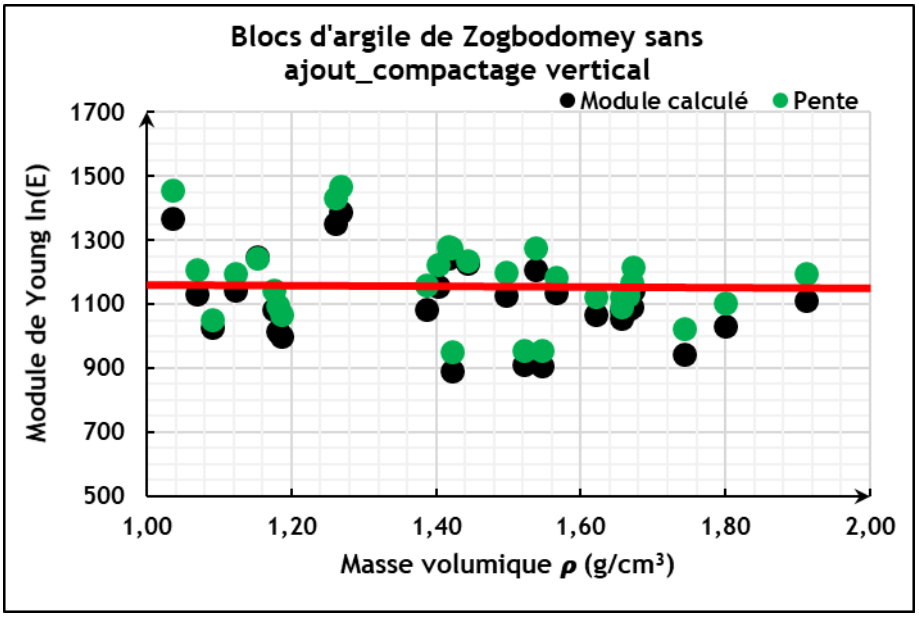



Figure 3.29 : Influence de la masse volumique sur le module de Young des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey

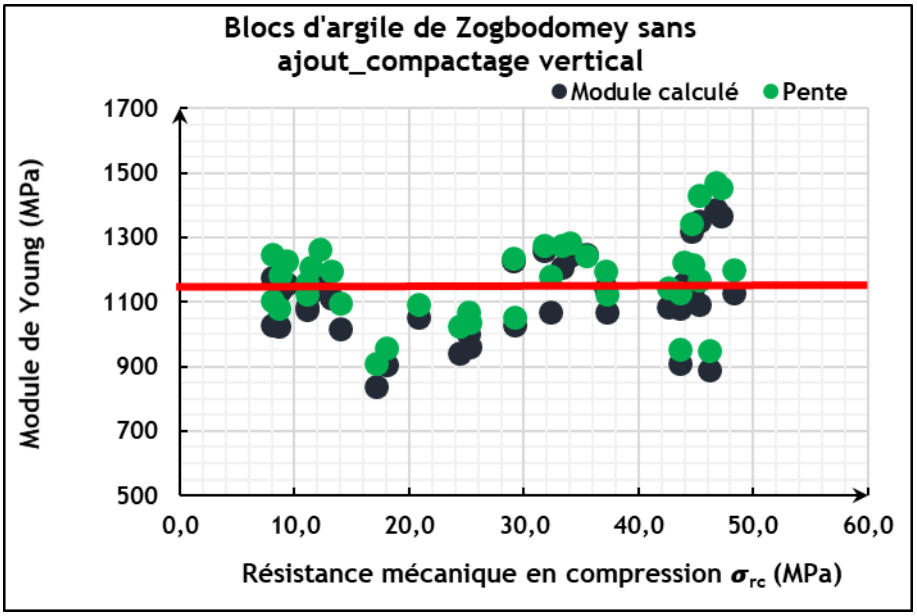



Figure 3.30 : Influence de la résistance à la compression sur le module de Young des blocs « B » d'argile pure de Zogbodomey

Ainsi, le module de Young des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey ne serait ni influencé par la teneur en eau de confection, ni par la masse volumique, ni par la résistance mécanique à la compression. Sa valeur moyenne vaut 1100 ± 100 MPa.

### 3.3.3.3. **Comparaison des deux modes de compactage des blocs d'argile de Zogbodomey sans ajout**

Les caractéristiques obtenues pour les blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, sont synthétisées dans le Tableau 3.7 en fonction de chaque mode de façonnage (compactage horizontal et compactage vertical) étudié.

Tableau 3.7 : Comparaison des formulations optimales de blocs d'argile de Zogbodomey sans ajout en fonction du compactage

| Compactage horizontal : Blocs A | | | | Compactage vertical : Blocs B | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| w (%) | ρ (g/cm³) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | w (%) | ρ (g/cm³) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) |
| 12 | 1,60 ± 0,06 | 1,8 ± 0,2 | 11,8 ± 0,9 | 23 | 1,69 ± 0,01 | 3,9 ± 0,6 | 44,1 ± 3,6 |

Nous observons que le compactage des blocs d'argile par le biais de la presse hydraulique d'atelier (compactage vertical) exige une proportion d'eau relativement plus importante que le compactage à l'aide de la presse à BTC (compactage horizontal).
Les valeurs de la masse volumique et du module de Young des deux types de blocs cuits (« A » et « B »), sont peu différentes.
En outre, les résistances mécaniques aussi bien à la traction par flexion trois points qu'à la compression des blocs « B » (compactage vertical) sont toutes supérieures à celles des blocs « A » (compactage horizontal). L'accroissement de 70% de la résistance à la compression et de plus de 50% à la traction par flexion trois points, quand on passe du

compactage horizontal (blocs « A ») au compactage vertical (blocs « B »), serait donc lié à l'énergie de compactage qui est améliorée dans le cas des blocs « B ».
Il serait donc judicieux de maitriser l'énergie de compactage en fonction du dispositif adopté pour le pressage des blocs puis d'étudier l'influence de la variation de cette énergie, sur les propriétés physiques et mécaniques de ces blocs d'argile cuits.

### 3.3.4. Comparaison des propriétés des blocs cuits à base des trois argiles

L'observation visuelle des blocs d'argile cuits de Xeuilley, Sèmè-Podji et Zogbodomey révèle un défaut de cuisson au niveau des deux premières argiles. Le programme de cuisson adopté ne serait donc pas adapté à ces deux argiles. De plus, les formations minéralogiques et les matières organiques contenues dans les argiles de Xeuilley et Sèmè-Podji justifient les problèmes de cuisson observés.
Quel que soit le mode de façonnage des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, les propriétés physiques enregistrées témoignent de la bonne tenue physique de ces produits de l'étape de façonnage à celle de la caractérisation mécanique.
Les propriétés physico-mécaniques des blocs d'argile cuits sans ajout (0%) sont présentées au Tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Formulations optimales des blocs d'argile sans ajout : mode de compactage vertical

| Observations | w (%) | ρ (g/cm$^3$) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | E (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| Argile de Xeuilley | 16 | 1,62 ± 0,03 | 14,4 ± 1,1 | 21,7 ± 4,5 | 1002 ± 76 |
| Argile de Sèmè-Podji | 14 | 1,78 ± 0,01 | 8,6 ± 3,1 | 36,9 ± 7,2 | 1022 ± 54 |
| Argile de Zogbodomey | 23 | 1,69 ± 0,01 | 3,9 ± 0,6 | 44,1 ± 3,6 | 1075 ± 69 |

Au regard du Tableau 3.8, on constate que les argiles du Bénin (Zogbodomey et Sèmè-Podji) présentent une meilleure tenue mécanique en compression, comparées à l'argile de Xeuilley en France. En revanche, cette dernière argile présente les meilleures résistances à la traction par flexion trois points, là où l'argile de Zogbodomey est un peu limitée. Toutefois, les trois argiles étudiées offrent une résistance en compression supérieure à 10 MPa, valeur minimale exigée par les normes industrielles [210], [211].
Les trois argiles pourraient donc être valorisées dans le bâtiment si on arrive à pallier les différents défauts physiques observés. En outre, ces différents blocs d'argile cuits présentent un module de Young en moyenne de 1000 MPa quand bien même, une variation est observée au niveau des autres paramètres tels que la teneur en eau, la masse volumique et les résistances mécaniques.
Les résistances mécaniques ainsi que la masse volumique des blocs cuits seraient alors influencées par la composition minéralogique des argiles et le procédé d'élaboration. Quant au module de Young, il serait peu influencé ; ce qui confirme que c'est une caractéristique intrinsèque du matériau.

## 3.4. Influence des cendres de bois sur les propriétés des blocs d'argile

### 3.4.1. Argile de Xeuilley

#### 3.4.1.1. Comportement à la cuisson des blocs « EC » avec ajout de cendres de bois

Les blocs d'argile cuits de Xeuilley incorporant des proportions variables en cendres de bois présentent de nombreuses déformations au défournement (Figure 3.31). Les déformations ont pour conséquence de rendre difficile des mesures sur ces blocs. On peut évaluer cette erreur à ± 2 mm dans les meilleurs des cas et 4 à 5 mm pour les plus déformés.



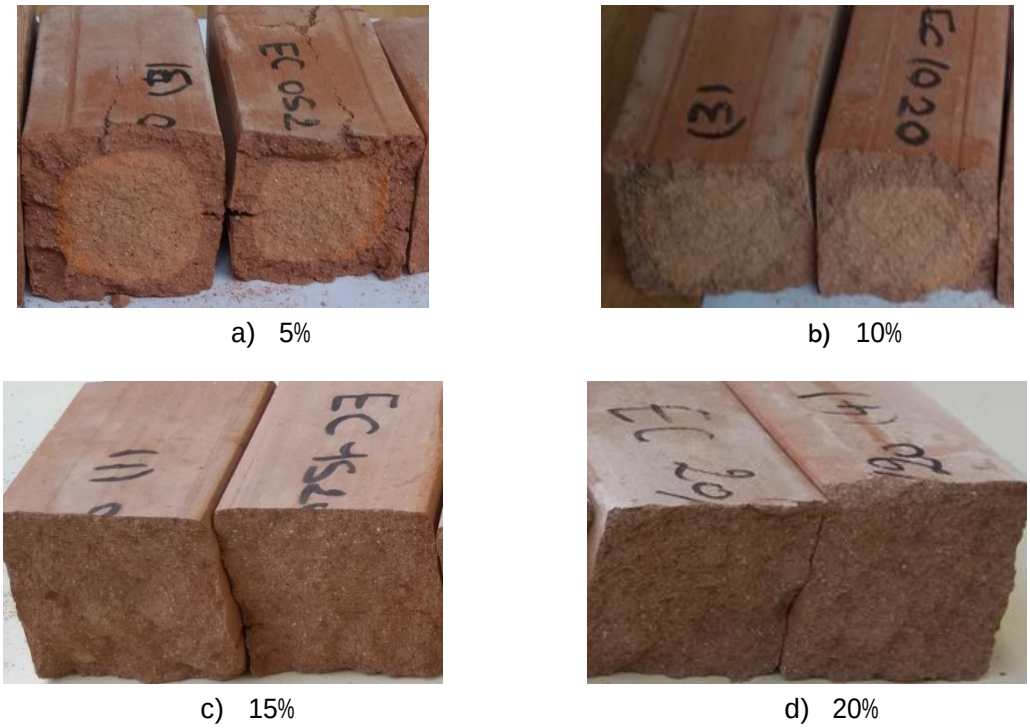

Figure 3.31 : Aspect visuel de blocs cuits d'argile de Xeuilley avec ajout de cendres de bois de la France

Ces déformations pourraient s'expliquer par la combustion des matières organiques qui libère du $CO_2$ ; le gaz devant s'échapper, provoque l'éclatement du bloc au cours de la cuisson.
En outre, l'observation visuelle des blocs d'argile cuits de Xeuilley révèle une meilleure tenue des blocs incorporant 15% de cendres de bois comparés aux autres blocs.
En effet, seule une légère fissure est enregistrée à un bout de ces blocs. Cette déformation pourrait être due au façonnage des blocs, du fait de sa position singulièrement marquée.

De plus, les blocs EC15 (ajout de 15% de cendres de bois) n'ont pas présenté de déformations de flambement consécutives à la dilatation thermique comme les blocs EC5 et EC10 incorporant 5% et 10% de cendres de bois, ni de faïençage ou de perte de résistances mécaniques observés au niveau des blocs EC25 et EC30 (avec ajout respectifs de 25% et 30% de cendres de bois.

On remarque également une déformation localisée au niveau des blocs EC20 avec ajout de 20% de cendres de bois de la France qui présenteraient une meilleure tenue en dépit de cette déformation.

En comparaison au cœur des blocs d'argile cuits de Xeuilley sans ajout (blocs « E »), l'observation du cœur des blocs incorporant des cendres de bois (blocs « EC »), montre que la couleur noire du cœur des blocs « E » (Figure 3.8) s'atténue avec l'augmentation du dosage en cendres de bois.



a) 5% b) 10%

c) 15% d) 20%

Figure 3.32 : Aspect du cœur des blocs d'argile de Xeuilley avec ajout des cendres de bois de la France

Ainsi, les blocs incorporant 20% de cendres de bois présentent un cœur uniforme avec le corps du bloc. Ceci rend compte de la cuisson à cœur de ces blocs. Les blocs incorporant 25% et 30% de cendres ne présentaient pas une bonne tenue mécanique après cuisson. Ces blocs ont cédé sous l'effet de la manutention entre les étapes de défournement et de stockage. Nous n'avons donc pas pu observer le cœur de ces blocs.

Au regard des performances visuelles enregistrées au niveau des blocs d'argile cuits de Xeuilley, nous observons que :

- la cuisson de cette argile est très difficile avec le programme de cuisson adopté et d'importantes déformations sont enregistrées ;
- des proportions allant jusqu'à 20% de cendres de bois, permettent une meilleure oxydation au cœur des produits, en limitant ainsi l'apparition de cœur noir. Tel est le

rôle des matières dégraissantes inertes que sont les fondants [101]. En effet, les études de Vieira et Monteiro [140] révèlent que les cendres de biomasse contiennent des fondants alcalins (Na, K, Phosphates) favorisant la fusion avec la silice. Les cendres de bois de la France joueraient alors un rôle de fondant dans la formulation des blocs d'argile cuits de Xeuilley. En outre, l'absence du cœur noir traduit une meilleure cuisson des blocs.

- Au-delà de 20% de cendres de bois, les blocs ne présentent plus une bonne tenue mécanique.

### 3.4.1.2. Action des cendres de bois sur les pertes de masse des blocs « EC »

- Perte de masse de séchage

La Figure 3.33 présente la perte de masse de séchage des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley avec ajout de cendres de bois (France).

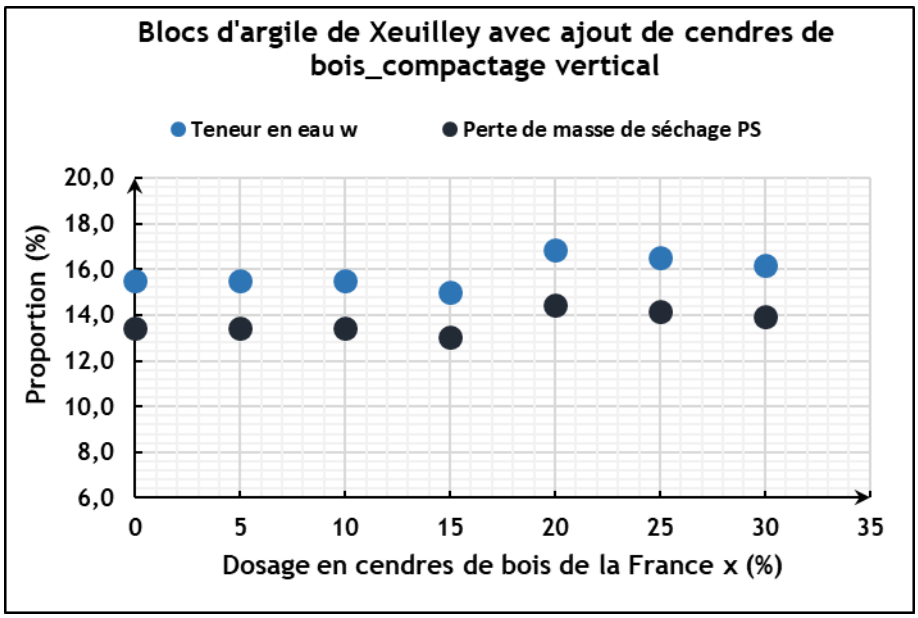



Figure 3.33 : Influence du dosage en cendres de bois et de la teneur en eau sur la perte de masse de séchage des blocs EC d'argile de Xeuilley

Les blocs d'argile cuits de Xeuilley incorporant des proportions variables en cendres de bois de 0% à 30%, ont été confectionnés à une teneur en eau moyenne de 16 ± 1%, quel que soit le dosage en cendres de bois.
On observe que l'évolution de la perte de masse de séchage des blocs est similaire à celle de la teneur en eau de confection.
Quel que soit le dosage en cendres de bois étudié, la fin du séchage est marquée par une teneur en eau d'équilibre moyenne de 2%. Ainsi, le comportement au séchage des blocs d'argile cuits avec ajout de cendres de bois est similaire à celui des blocs sans ajout, dans la gamme de teneur en cendres étudiée. Nous ne constatons donc pas de rétention d'eau due à la présence des cendres.

- Perte de masse de cuisson

La Figure 3.34 présente l'influence du dosage en cendres de bois (France) sur la perte au feu des blocs EC d'argile cuite de Xeuilley.

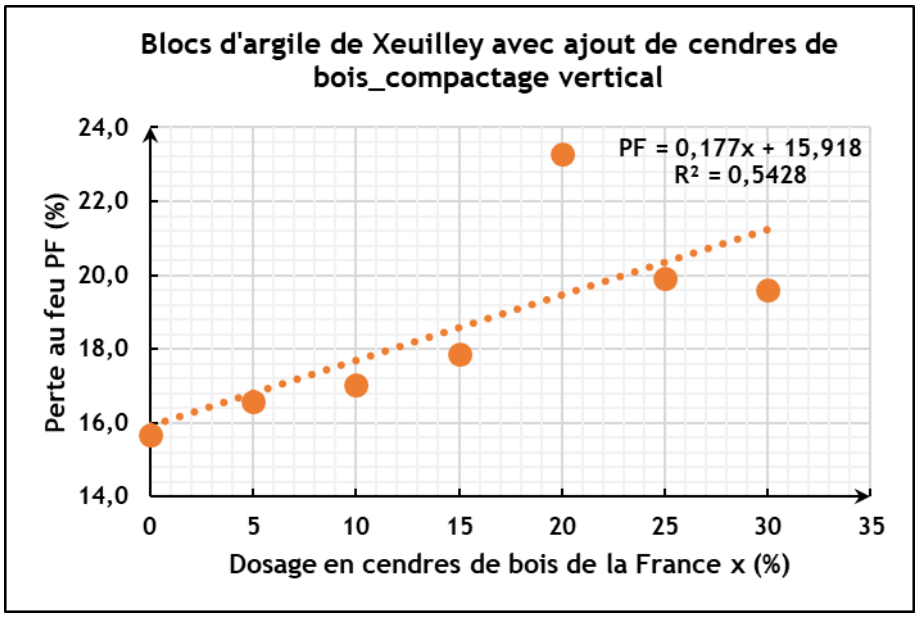



Figure 3.34 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte au feu (PF) des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley

On observe que la perte au feu PF des blocs croit avec l'augmentation du dosage en cendres de bois. Elle évolue suivant une droite linéaire d'équation : **PF=0,177x+15,918** 3.11

avec un coefficient de corrélation R égale à 0,7367 et dont la valeur contre 0 vaut 10%.

Le dosage en cendres de bois influence donc fortement la perte au feu des blocs. De plus, les blocs d'argile de Xeuilley incorporant des cendres de bois présentent une perte au feu (PF) supérieure à 15%, valeur limite préconisée [210], [211].

Par ailleurs, les blocs formulés avec un dosage en cendres de 20% présentent la plus forte teneur en eau de confection et les pertes de masse de séchage et cuisson les plus importantes. Ainsi, la valeur importante de cette perte au feu, serait corrélée à la porosité de ces blocs induite par le départ de l'eau au cours des étapes de séchage puis de cuisson.

3.4.1.3. Action des cendres de bois sur les retraits des blocs « EC »

- Retrait de séchage

La Figure 3.35 présente l'influence du dosage en cendres de bois sur le retrait de séchage des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley.

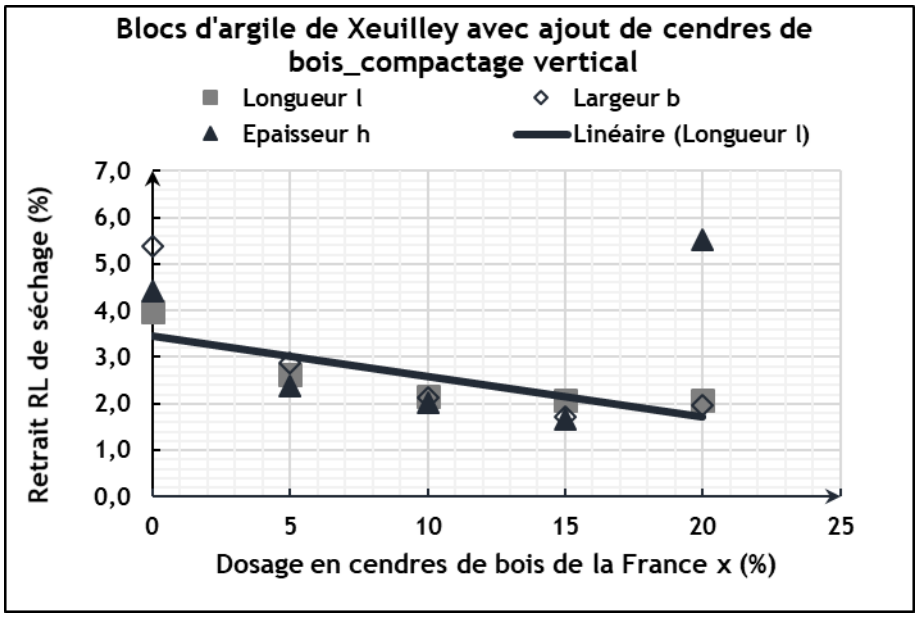



Figure 3.35 : Influence du dosage en cendres de bois sur le retrait de séchage des blocs EC d'argile cuite de Xeuilley

On observe que le retrait moyen de séchage des différentes formulations de blocs d'argile étudiées, a une valeur moyenne constante aux erreurs de mesures près, quelle que soit la direction considérée. Ainsi, le retrait de séchage des blocs se ferait de manière isotrope.

En outre, le retrait de séchage de ces blocs d'argile décroit progressivement avec l'augmentation du dosage en cendres de bois. En effet, les particules de cendres de bois s'insèreraient au niveau de l'espace intergranulaire, ce qui permettrait d'améliorer le contact entre les grains d'argile de Xeuilley et limiterait par voie de conséquence, la contraction des blocs.

- Retrait de cuisson

Au regard de la Figure 3.36, nous remarquons que les phénomènes qui se produisent au cours de la cuisson induisent des comportements non linéaires des blocs, en fonction du dosage en cendres de bois. Ainsi, chaque formulation de blocs (dosage en cendres de bois) présente un comportement spécifique à la cuisson.

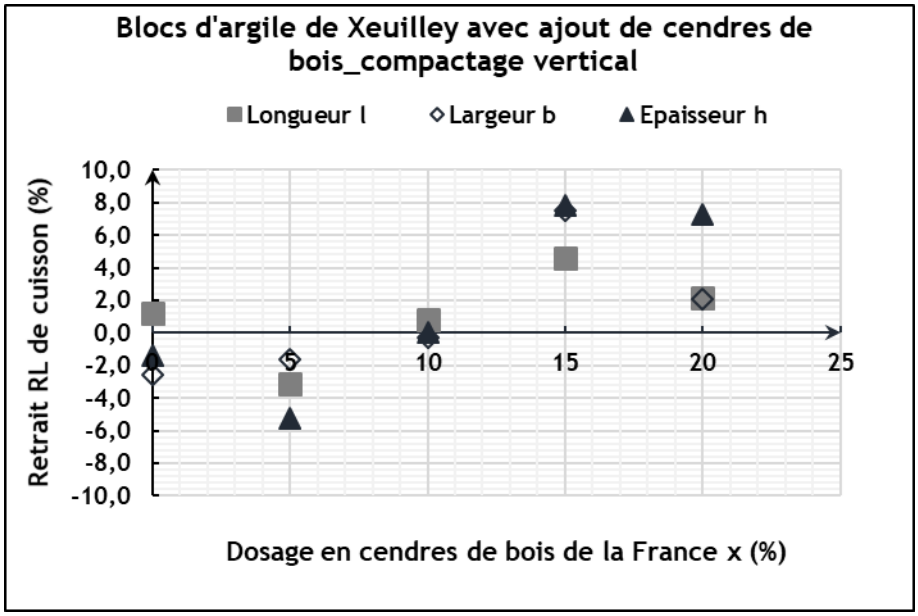



Figure 3.36 : Influence du dosage en cendres de bois sur le retrait de cuisson des blocs EC d'argile cuite de Xeuilley

En outre, la Figure 3.37 montre que montre que les variations dimensionnelles de l'épaisseur et de la largeur des blocs d'argile cuits de Xeuilley, sont corrélées linéairement au retrait longitudinal (axe de compactage du bloc) de cuisson. Mais, la pente des courbes largeur et épaisseur diffèrent entre elles.

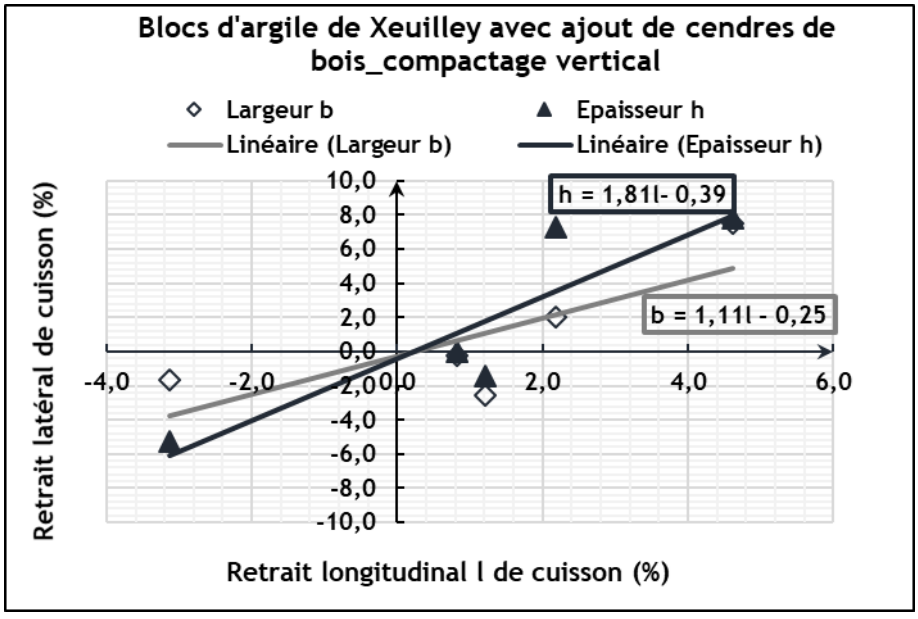



Figure 3.37 : Relation entre le retrait latéral et le retrait longitudinal de cuisson des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley avec ajout de cendres de bois de la France

L'incorporation des cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile créé donc une direction privilégiée du retrait de cuisson : c'est l'anisotropie du retrait. Ceci

serait dû aux différentes transformations microstructurales qui se produisent au cours de la phase de cuisson.

3.4.1.4. Action des cendres de bois sur la masse volumique des blocs « EC »

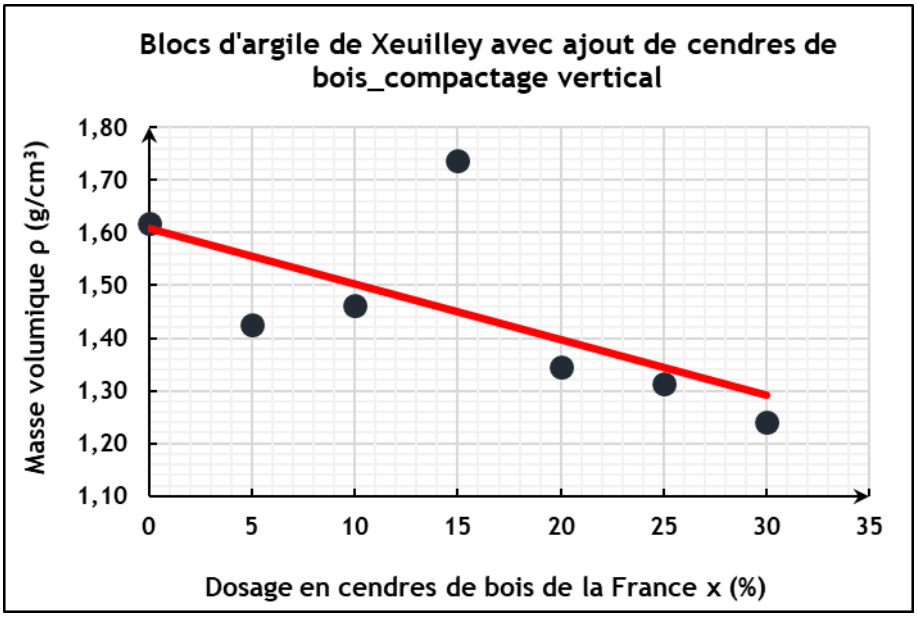



Figure 3.38 : Influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique apparente des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley

Au regard de la Figure 3.38, on observe que l'ajout des cendres de bois induit une diminution progressive de la masse volumique des briques cuites qui décroissent avec le dosage en ajout. Les cendres de bois étant incorporées en remplacement de l'argile, leur faible masse volumique comparée à celle de l'argile, pourrait expliquer la diminution enregistrée. Toutefois, on observe une singularité au niveau du dosage en cendres de 15% où la masse volumique maximale est enregistrée avec un accroissement de 7% comparés aux blocs sans ajout. Cette augmentation pourrait-être occasionnée par des erreurs expérimentales de mesures ou elle pourrait traduire un phénomène particulier au cours de la cuisson de ces blocs d'argile.

3.4.1.5. Action des cendres de bois sur les propriétés mécaniques des blocs « EC »

- Résistances mécaniques



Figure 3.39 : Mode de rupture des blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de 15% des cendres de bois de la France

L'identification des différents modes de rupture sous chargement des briques d'argile cuite revêt son importance. La rupture des blocs a lieu par cisaillement à la traction par flexion trois points, tel que l'indique la Figure 3.39. Cette rupture est moins brusque comparée à celle des blocs sans ajout (Figure 3.6).

La Figure 3.40 présente l'influence du dosage en cendres de bois sur les résistances mécaniques des blocs d'argile cuits de Xeuilley.

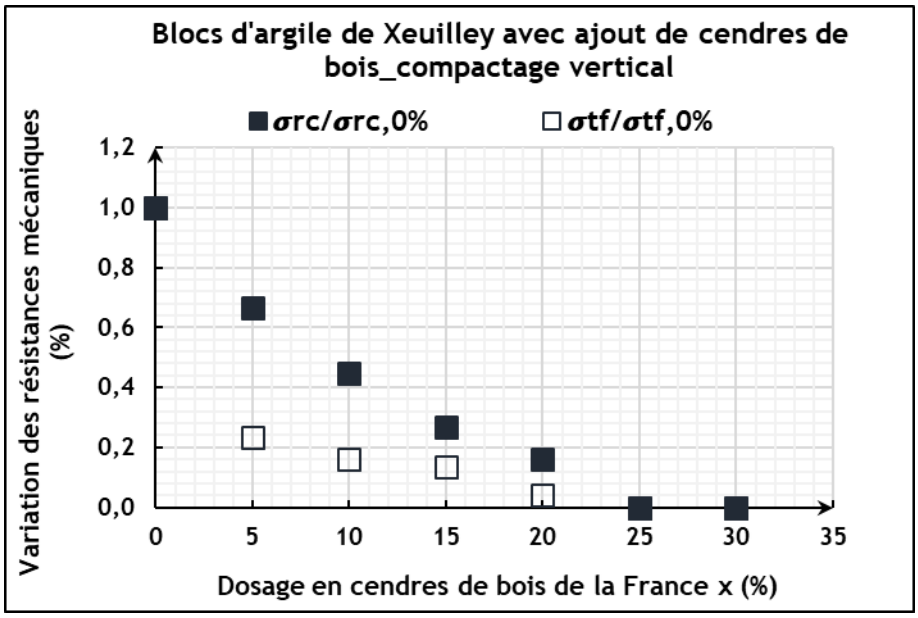



Figure 3.40 : Influence du dosage en cendres de bois de la France sur les résistances mécaniques des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley

On observe que l'incorporation de proportions croissantes des cendres de bois de la France dans la formulation des blocs d'argile cuits de Xeuilley, induit une diminution progressive des résistances mécaniques aussi bien à la compression qu'à la traction par flexion trois points. Déjà avec un dosage de 5% en cendres de bois, une perte d'environ 80% de la résistance à la traction par flexion points et de 40% à la compression est enregistrée.

La perte de résistance augmente ainsi avec le dosage en ajout jusqu'au dosage de 25% en cendres, où les résistances s'annulent.

Ainsi, le dosage en cendres de bois induit une perte de résistances mécaniques des blocs d'argile cuits.

Les résistances mécaniques des blocs d'argile cuits de Xeuilley sont donc fortement corrélées au dosage en cendres de bois.

La Figure 3.41 présente l'évolution des résistances à la compression des blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de cendres de bois, en fonction des résistances à la traction par flexion trois points. Elle est traduite par une relation linéaire croissante qui traduit une relation probable entre l'évolution des résistances mécaniques à la compression et celles à la traction par flexion trois points, des blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de cendres de bois, telle que :

$$\sigma_{tf} \sim 0{,}6\ \sigma_{rc} \qquad 3.12$$

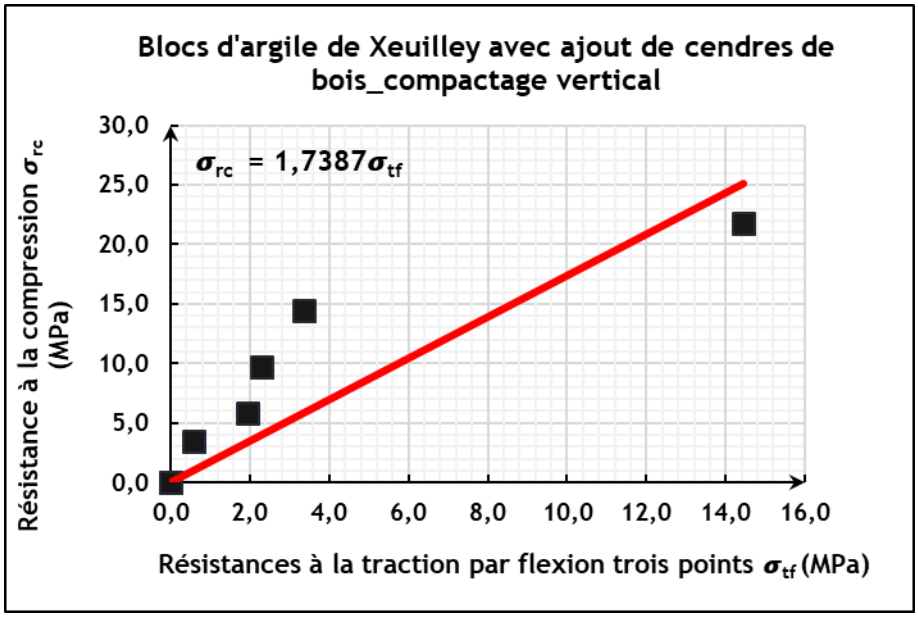



Figure 3.41 : Relation entre les résistances à la compression et celles à la traction par flexion trois points des blocs « EC « d'argile cuite de Xeuilley avec ajout de cendres de bois

- Module de Young

La Figure 3.42 montre que l'incorporation des cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile cuits de Xeuilley, induit la baisse du module de Young des blocs, qui s'annule comme les résistances mécaniques à partir du dosage en cendres de bois de 25% (Figure 3.40Figure 3.40).

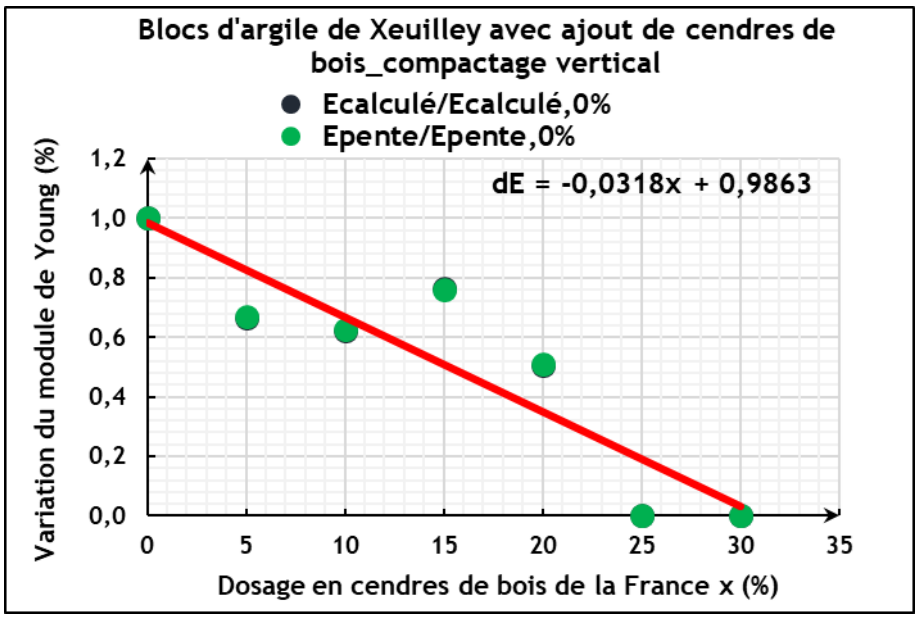



Figure 3.42 : Influence du dosage en cendres de bois sur le module de Young des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley

La variation du module de Young « dE » en fonction du dosage en cendres de bois x(%), est traduite par une relation linéaire décroissante avec un coefficient de corrélation R qui vaut 0,91.

Ce coefficient est significatif à une erreur contre 0 de 1% (la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 99%). Il traduit donc une relation probable entre le module de Young et le dosage en cendres de bois, des blocs d'argile cuits de Xeuilley.

**dE=**$\frac{E_{x\%}}{E_{0\%}}$, avec x% le dosage en cendres de bois ; $E_{x\%}$ le module de Young pour le dosage de x% en cendres et $\mathbf{E_{0\%}}$ le module de Young pour le dosage de 0% en cendres.

En effet, l'incorporation des cendres de bois dans la matrice argileuse réduit la plasticité de la pâte d'argile et affecte ainsi sa cohésion. Ainsi, la porosité des blocs est augmentée par la cuisson, ce qui fait chuter leurs propriétés de rigidité et de résistances mécaniques. En outre, on observe en se référant à la Figure 3.38 et à la Figure 3.42 que, l'évolution du module de Young des blocs EC en fonction du dosage en cendres est similaire à celle de la masse volumique. Ainsi, l'accroissement de la masse volumique des blocs cuits au dosage en cendres de 15% induit une légère augmentation du module de Young de ces blocs comparés aux blocs incorporant 10% de cendres de bois. Toutefois, le module obtenu est inférieur à celui des blocs sans ajout.

Le module de Young des blocs d'argile cuits de Xeuilley est donc fortement influencé par leur masse volumique.

En définitive, des proportions massiques de 5% à 20% des cendres de bois de la France par rapport à la masse sèche totale du mélange argile-cendres améliorent la cuisson des blocs d'argile de Xeuilley. En revanche, les propriétés physiques et mécaniques des produits cuits sont dégradées ; ce qui ne permet pas d'envisager une application de ces produits dans le bâtiment.

## 3.4.2. Argile de Sèmè-Podji

### 3.4.2.1. Comportement à la cuisson des blocs « SPB » et « SPF » avec ajout de cendres de bois

L'observation visuelle des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji incorporant des cendres de bois du Bénin ou de la France (Figure 3.43) montre un défaut de cuisson des différents blocs qui présentent un aspect multicolore. En outre, le noir observé au cœur des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji sans ajout (Figure 3.11) s'atténue avec l'ajout du dosage en cendres de façon générale (Figure 3.44).



a) 5% de cendres de bois du Bénin



b) 10% de cendres de bois du Bénin



c) 15% de cendres de bois du Bénin



d) 20% de cendres de bois du Bénin



e) 5% de cendres de bois de la France



f) 10% de cendres de bois de la France



g) 15% de cendres de bois de la France



h) 20% de cendres de bois de la France

Figure 3.43 : Aspect visuel de blocs cuits d'argile de Sèmè-Podji avec ajout des cendres de bois



a) 5 % des cendres de bois du Bénin



b) 10 % des cendres de bois du Bénin



c) 15 % des cendres de bois du Bénin



d) 20 % des cendres de bois du Bénin



e) 5 % des cendres de bois de la France



f) 10 % des cendres de bois de la France



g) 15 % des cendres de bois de la France



h) 20% des cendres de bois de la France

Figure 3.44 : Aspect du cœur des blocs cuits d'argile de Sèmè-Podji avec ajout des cendres de bois

3.4.2.2. Action des cendres de bois sur les pertes de masse des blocs « SPB » et « SPF »

- Perte de masse de séchage

Au regard de la Figure 3.45, on observe que quels que soient le dosage en cendres de bois et le type de cendres de bois utilisé, une teneur en eau résiduelle de 2% est enregistrée à la fin du séchage des blocs d'argile. La perte de masse de séchage des différents blocs est donc intimement liée à leur teneur en eau de confection. Ainsi, les cendres de bois n'influenceraient pas la perte de masse de séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji.

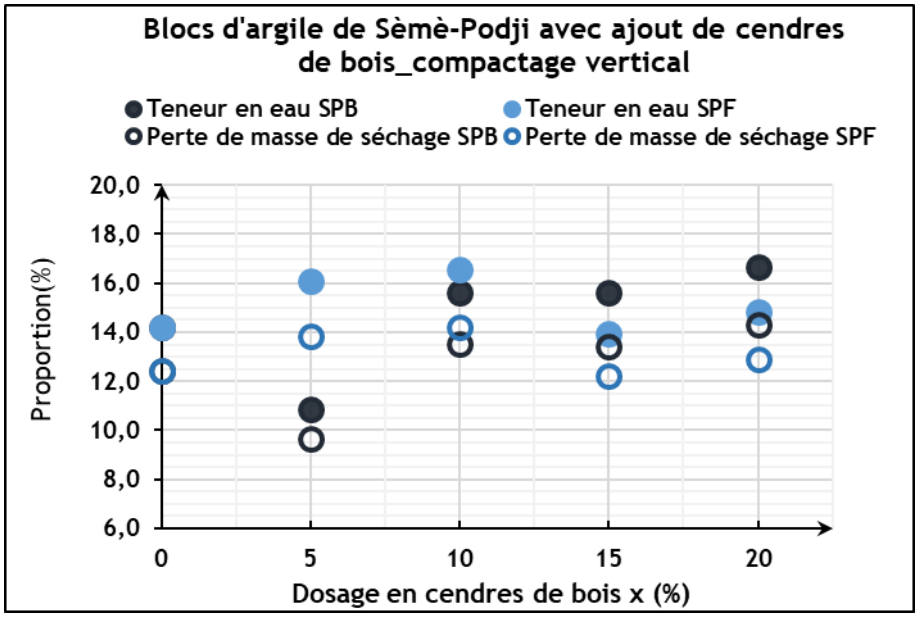



Figure 3.45 : Influence du dosage en cendres de bois et de la teneur en eau de confection sur la perte de masse de séchage des blocs « SPB » et « SPF » d'argile de Sèmè-Podji

- Perte de masse de cuisson

Au regard de la Figure 3.46, on observe que quelles que soient les cendres de bois utilisées (Bénin, France), la perte au feu est pratiquement identique et croit légèrement avec le dosage en cendres de bois.
L'accroissement de la perte au feu des blocs d'argile cuits en fonction du dosage en cendres de bois avait été également observé par rapport à l'argile de Xeuilley.
Ainsi, ce phénomène serait indépendant du type d'argile (Xeuilley, Sèmè-Podji) ou de cendres de bois (Bénin ou France) utilisés.
La cuisson du mélange de cendres et d'argile serait donc à l'origine d'une réaction chimique favorisant la formation de nouvelles phases minérales avec pour conséquence, une perte de masse. La réalisation d'une analyse thermogravimétrique (ATG) couplée à une analyse thermique différentielle (ATD) des mélanges d'argile et de cendres de bois, nous permettrait d'expliciter ce phénomène.

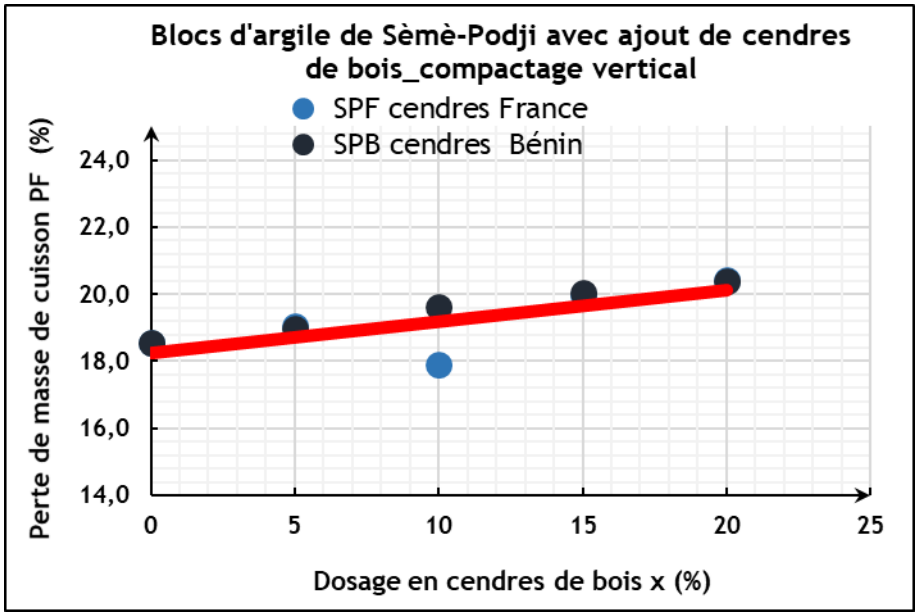



Figure 3.46 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte de masse de cuisson des blocs « SPB » et « SPF » d'argile de Sèmè-Podji

En somme, les blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji ont une perte au feu moyenne de 19 ± 1%, quel que soit le dosage en cendres de bois. Cette valeur est supérieure au seuil de 15% recommandée.

### 3.4.2.3. Action des cendres de bois sur les retraits des blocs « SPB » et « SPF »

- Retrait de séchage

Les Figure 3.47 et Figure 3.48 présentent respectivement l'influence des cendres de bois du Bénin et celle des cendres de bois de la France, sur les valeurs moyennes des retraits de séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji.

On observe que l'incorporation de proportions variables des différentes cendres de bois, induit une diminution progressive du retrait de séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji. Ce phénomène se traduit par une relation linéaire décroissante du retrait de séchage des blocs en fonction du dosage en cendres, quel que soit le type de cendres.

En outre, les pentes des deux relations linéaires diffèrent ; ainsi l'influence des cendres de bois de la France sur le séchage des blocs serait plus importante que celle des cendres de bois du Bénin.

Par ailleurs, l'influence des cendres de bois observée sur le retrait de séchage des blocs d'argile de Sèmè-Podji, est également similaire aux observations avec les « EC » blocs d'argile de Xeuilley.

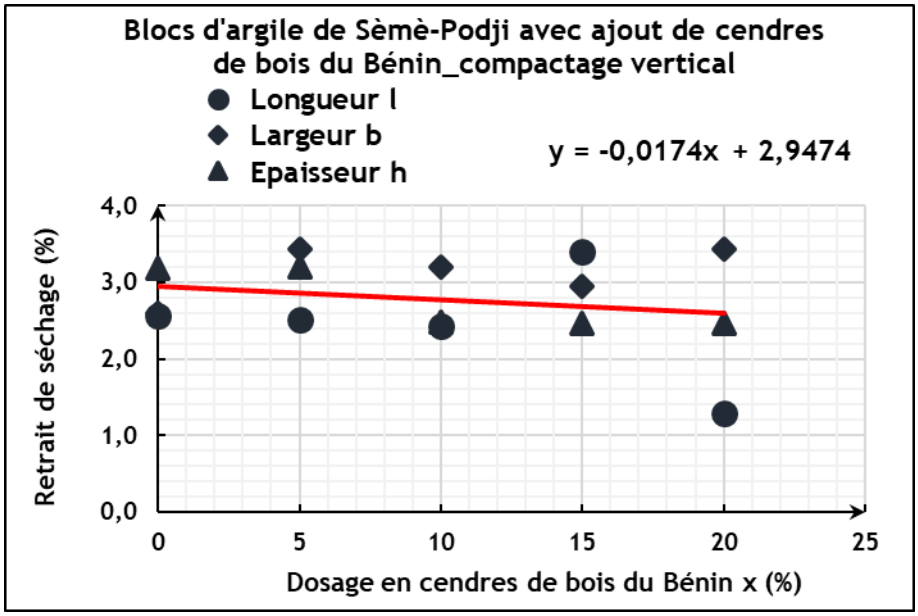



Figure 3.47 : Influence du dosage en cendres de bois du Bénin sur le retrait de séchage des blocs « SPB » d'argile cuite de Sèmè-Podji

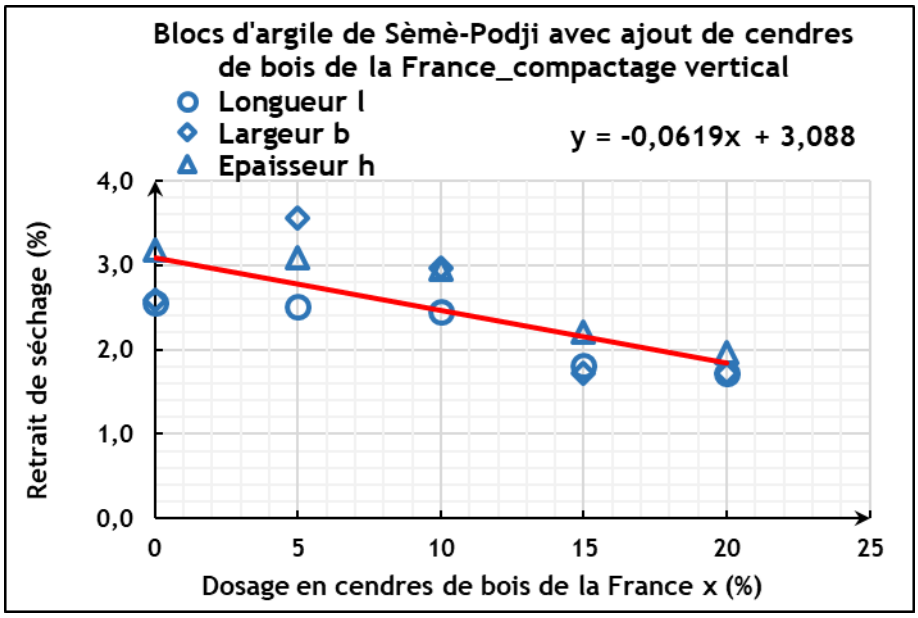



Figure 3.48 : Influence du dosage en cendres de bois de la France sur le retrait de séchage des blocs « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji

- Retrait de cuisson

Les Figure 3.49 et Figure 3.50 présentent respectivement l'influence des cendres de bois du Bénin et celle des cendres de bois de la France, sur les valeurs moyennes des retraits de cuisson des blocs d'argile de Sèmè-Podji.

On observe que, l'incorporation de proportions variables des différentes cendres de bois, induit une diminution progressive du retrait de cuisson des blocs d'argile de Sèmè-Podji. L'argile étant plus sujette au retrait, le remplacement de l'argile par des cendres permet de limiter le retrait des blocs. Ainsi, les cendres auraient un effet dégraissant dans la formulation des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji. En effet,

l'absence de retrait des inertes permet de limiter le retrait global de la pâte d'argile [101].

Par ailleurs, les relations linéaires des Figure 3.49 et Figure 3.50 présentent sensiblement la même pente, aux erreurs expérimentales près. Contrairement donc au séchage des blocs, la cuisson ne serait pas influencée par le type de cendres de bois utilisé.

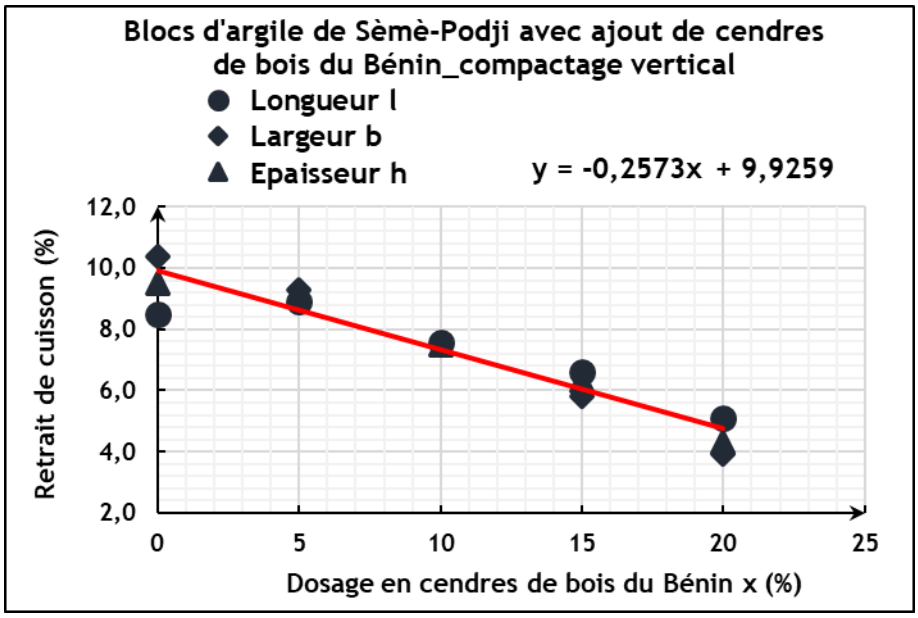



Figure 3.49 : Influence du dosage en cendres de bois du Bénin sur le retrait de cuisson des blocs « SPB » d'argile cuite de Sèmè-Podji

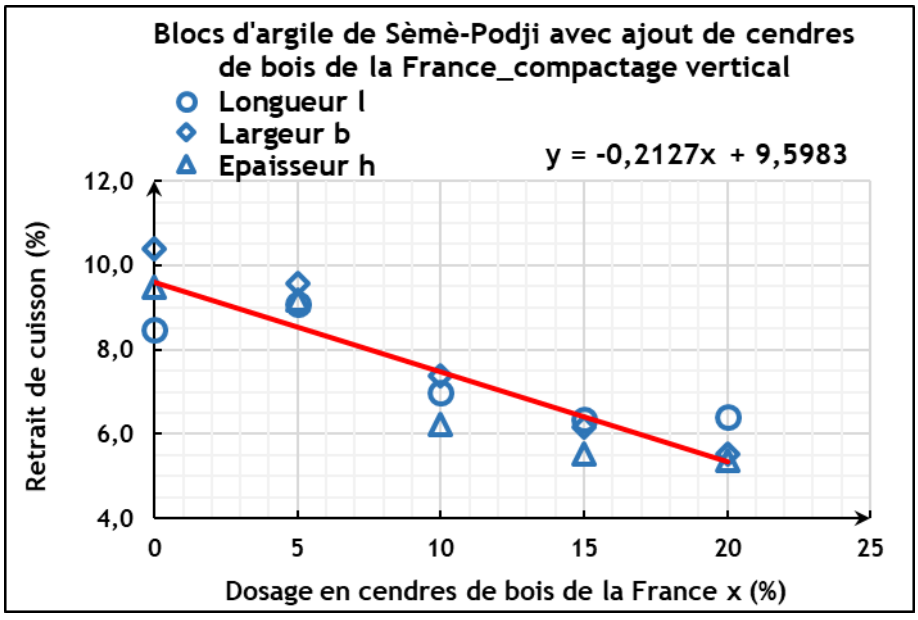



Figure 3.50 : Influence du dosage en cendres de bois de la France sur le retrait de cuisson des blocs « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji

3.4.2.4. Action des cendres de bois sur la masse volumique des blocs « SPB » et « SPF »

La Figure 3.51 présente l'influence du dosage et du type de cendres de bois, sur la masse volumique des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji.
On observe que, pour le dosage de 5% en cendres de bois, les blocs « SPB » et « SPF » présentent une masse volumique assimilable à celle des blocs « SP », sans ajout de cendres de bois (0%).

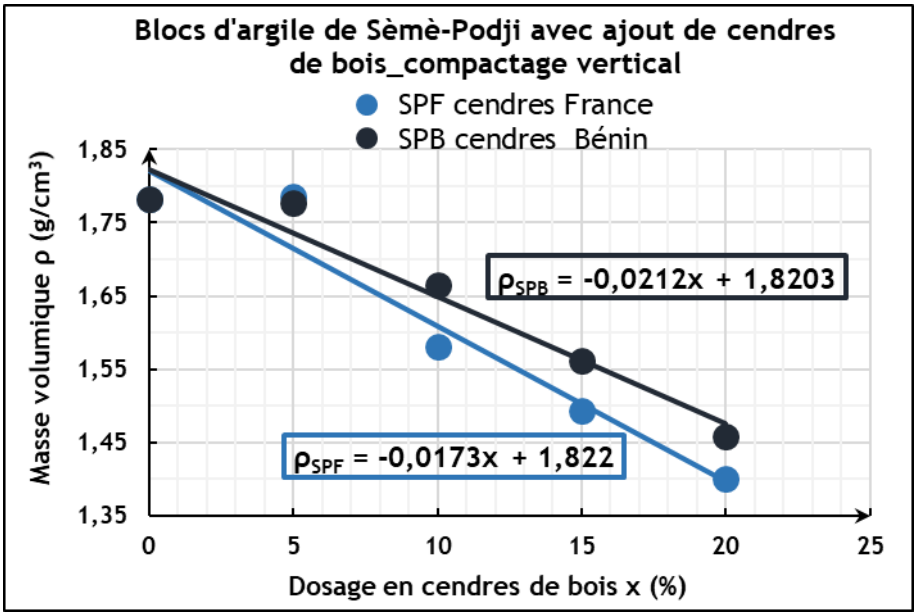



Figure 3.51 : Influence de l'origine et du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji

Par ailleurs, à l'instar des blocs d'argile cuits de Xeuilley, l'incorporation de proportions croissantes de cendres de bois, induit une baisse de la masse volumique des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji, quelle que soit l'origine des cendres de bois utilisées. Cette baisse est traduite par une relation linéaire décroissante, avec un coefficient de corrélation R = 0,97. Ce coefficient est significatif à une erreur contre 0 de 1% (la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 99%), il traduit donc une relation probable entre la masse volumique des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji et le dosage en cendres de bois. De plus, les deux relations linéaires ont sensiblement la même pente, aux erreurs expérimentales près. Ainsi, la diminution de la masse volumique serait proportionnelle au dosage en cendres de bois et ne serait pas corrélée au type de cendres de bois utilisé.
Ces résultats épousent les conclusions des travaux de Eliche-Quesada *et al.* [28] qui ont montré que la masse volumique apparente des produits cuits incorporant 20% de cendres de biomasse sont toutes inférieures à celle des blocs de référence à 0% de cendres. Au regard de leurs compositions chimique et minéralogique, les cendres pourraient agir comme générateurs de pores [28], permettant ainsi d'alléger les blocs d'argile cuits.

Toutefois, il est important de s'assurer que la diminution de la masse volumique des produits cuits n'influence négativement leurs performances mécaniques.

3.4.2.5. Action des cendres de bois sur les propriétés mécaniques des blocs « SPB » et « SPF »

- Résistances mécaniques

Pour les différentes formulations de blocs d'argile cuits étudiées, nous observons une rupture brusque à la traction par flexion trois points en partie médiane, qui apparait à la Figure 3.52.



a) 5% des cendres de bois du Bénin



b) 5% des cendres de bois de la France



c) 10% des cendres de bois du Bénin



d) 10% des cendres de bois de la France



e) 5% des cendres de bois du Bénin



f) 15% des cendres de bois de la France



g) 20% des cendres de bois du Bénin



h) 20% des cendres de bois de la France

Figure 3.52 : Mode de rupture des blocs cuits d'argile de Sèmè-Podji avec ajout des cendres de bois

La Figure 3.53 présente l'influence du dosage en cendres de bois de la France ou du Bénin, sur les résistances mécaniques des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji.
Pour le dosage de 5% en cendres de bois, on enregistre un accroissement de 60% de la résistance à la traction par flexion trois points des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji, quelles que soient les cendres utilisées (blocs « SPB » et « SPF »). Au-delà de 5%, les résistances à la traction par flexion trois points des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji, décroissent avec le dosage en cendres de bois.
A l'instar des résistances à la traction par flexion trois points, les résistances en compression des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji, décroissent avec le dosage cendres de bois, au-delà de 5%. En revanche, l'accroissement de 14% de la résistance à la compression enregistré pour les blocs « SPF » apparait comme un point singulier, qui pourrait être une valeur aberrante.

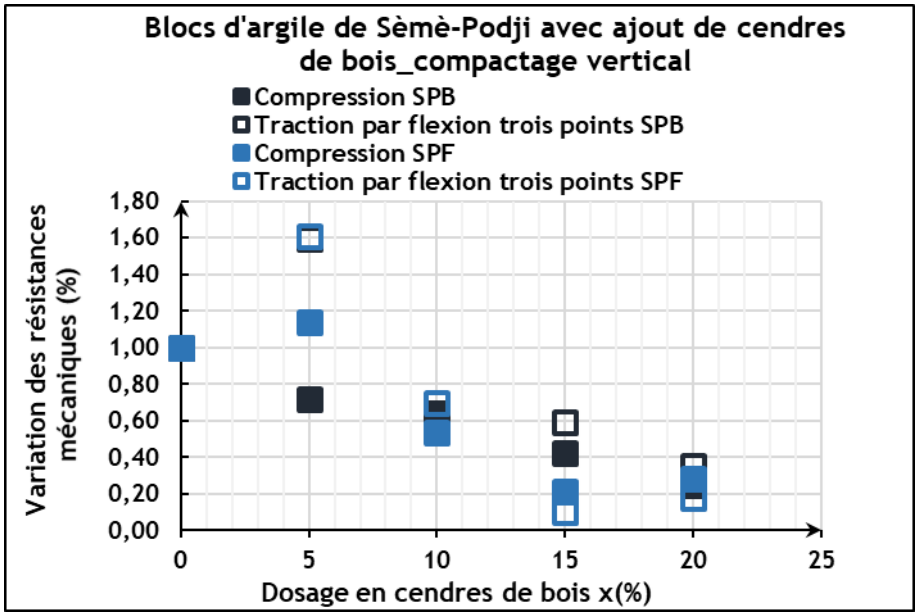



Figure 3.53 : Influence du dosage en cendres de bois sur les résistances mécaniques des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji

Ainsi, dans des proportions massiques de 5%, les particules de cendres auraient pour rôle de combler l'espace intergranulaire au sein du mélange, améliorant ainsi le contact entre grains ce qui induirait alors, l'augmentation de la résistance des blocs cuits à la traction par flexion trois points. En outre, la baisse de la masse volumique des blocs cuits au-delà du dosage en cendres de bois de 5%, serait préjudiciable pour leurs résistances mécaniques tant à la compression qu'à la traction par flexion trois points.

Nous déduisons donc l'influence probable de la masse volumique des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji sur leurs résistances mécaniques. Par ailleurs, Borlini *et al.* [147] montrent que, l'incorporation des cendres de bagasse de canne à sucre dans la formulation de céramique rouge, induit une diminution de la résistance à la compression avec la quantité de cendres incorporées. Ainsi, le taux optimal de substitution de l'argile de Sèmè-Podji par des cendres de bois serait donc de 5%, et conviendrait pour des éléments devant être sollicités à la traction par flexion à l'instar des linteaux de bâtiments.

La Figure 3.54 présente l'évolution des résistances à la compression en fonction de celles à la traction par flexion trois points, des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji avec ajout de cendres de bois.

Quelles que soient les cendres utilisées (blocs « SPB » et « SPF »), il existe une relation linéaire croissante des résistances à la compression en fonction de celles à la traction par flexion trois points, telle que :

$$\sigma_{tf} \sim 0{,}3\ \sigma_{rc} \qquad 3.13$$

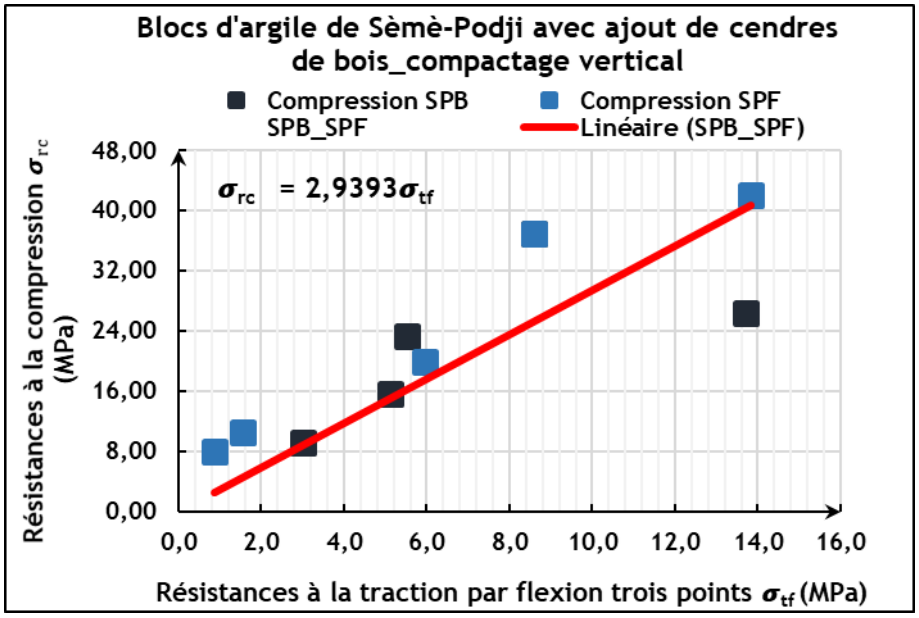



Figure 3.54 : Relation entre les résistances à la compression et celles à la traction par flexion trois points des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji, avec ajout de cendres de bois

- Module de Young

A l'instar des résistances mécaniques présentées à la Figure 3.53, l'évolution du module de Young des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji avec ajout de cendres de bois présentée à la Figure 3.55, est comparable à celle de la masse volumique de ces blocs cuits.

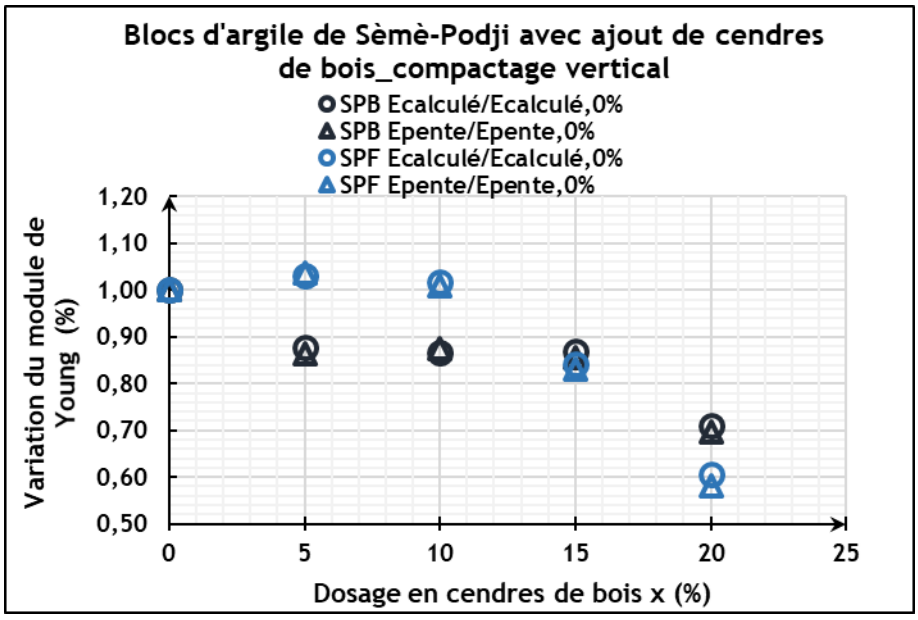



Figure 3.55 : Influence du dosage en cendres de bois sur le module de Young des blocs « SPB » et « SPF » d'argile cuite de Sèmè-Podji

Ainsi, l'incorporation de proportions croissantes de cendres de bois induit une diminution du module de Young de l'ordre de 0% à 40%, quel que soit le type de cendres de bois.
La diminution de la masse volumique des blocs engendre alors la baisse de leurs propriétés mécaniques. Il serait donc judicieux de trouver un meilleur compromis permettant d'obtenir des blocs légers présentant un meilleur aspect physique et de bonnes performances mécaniques.
Les blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji « SPB » et « SPF » incorporant 5% de cendres de bois ont présenté des défauts de cuisson malgré leur bonne résistance à la traction par flexion trois points. Une étude spécifique du programme de cuisson convenable, garantissant une meilleure cuisson et l'amélioration des propriétés physiques de ces blocs d'argile cuits, permettra de définir leur destination dans le bâtiment. En outre, l'association de dégraissants tels que le sable quartzeux aux cendres de bois, pourrait améliorer les propriétés enregistrées au niveau de ces matériaux.

## 3.4.3. Argile de Zogbodomey

### 3.4.3.1. Compactage horizontal

- Comportement à la cuisson des blocs « AC » avec ajout de cendres de bois

Les blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey élaborés au Bénin suivant le mode de compactage horizontal, présentent une couleur qui varie du rouge brique au gris clair en fonction du taux de cendres de bois incorporé, tel que le montre la Figure 3.56. En outre, ces bocs ne présentent pas un cœur noir, quel que soit le dosage en cendres de bois. Ainsi, la couleur du cœur de ces blocs est uniforme avec celle des faces extérieures.



a) 5% b) 10% c) 15% d) 20% e) 25%



f) 30% g) 35% h) 40% i) 45% j) 50%

Figure 3.56 : Blocs « AC » avec ajout de différentes proportions de cendres de bois du Bénin

- Action des cendres de bois sur les pertes de masse des blocs « AC »

Les différentes formulations (0% à 50% de cendres de bois) de blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey étudiées, ont été confectionnés à des teneurs en eau spécifiques correspondant à leur masse volumique sèche maximale.

Le Tableau 3.9 présente la perte de masse de séchage de chaque formulation.

Tableau 3.9 : Perte de masse de séchage des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey en fonction du dosage en cendres de bois

| Dosage en cendres de bois du Bénin (%) | Perte de masse moyenne de séchage (%) |
|---|---|
| 0 | 10 ± 0 |
| 5 | 19 ± 0 |
| 10 | 18 ± 0 |
| 15 | 16 ± 0 |
| 20 | 17 ± 0 |
| 25 | 18 ± 0 |
| 30 | 18 ± 0 |
| 35 | 18 ± 0 |
| 40 | 19 ± 0 |
| 45 | 20 ± 2 |
| 50 | 16 ± 0 |

Ces données ne permettent pas de conclure quant à l'influence des cendres de bois sur la perte de masse de séchage de ces blocs d'argile. En effet, quel que soit le dosage en cendres de bois, la perte de masse de séchage des blocs est en moyenne de 17 ± 2%. Ainsi, l'influence des cendres de bois sur la perte de masse de séchage des blocs « AC » ne serait donc pas marquée.

Nous nous sommes alors intéressés à l'influence de la teneur en eau de confection des blocs « AC » sur leur perte de masse de séchage.

La Figure 3.57 présente l'évolution de la perte de masse de séchage (PS) des blocs « AC » avec ajout de cendres de bois en fonction de leur teneur en eau de confection (w).

Elle traduit une relation linéaire croissante de pente égale à 0,72 avec un coefficient de corrélation linéaire R qui vaut 0,999 et qui est significatif à une erreur contre 0 de 1/1000. Ainsi, l'incorporation des cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile cuits n'influencerait pas la perte de masse de séchage qui serait plutôt fortement corrélée à la teneur en eau de confection.

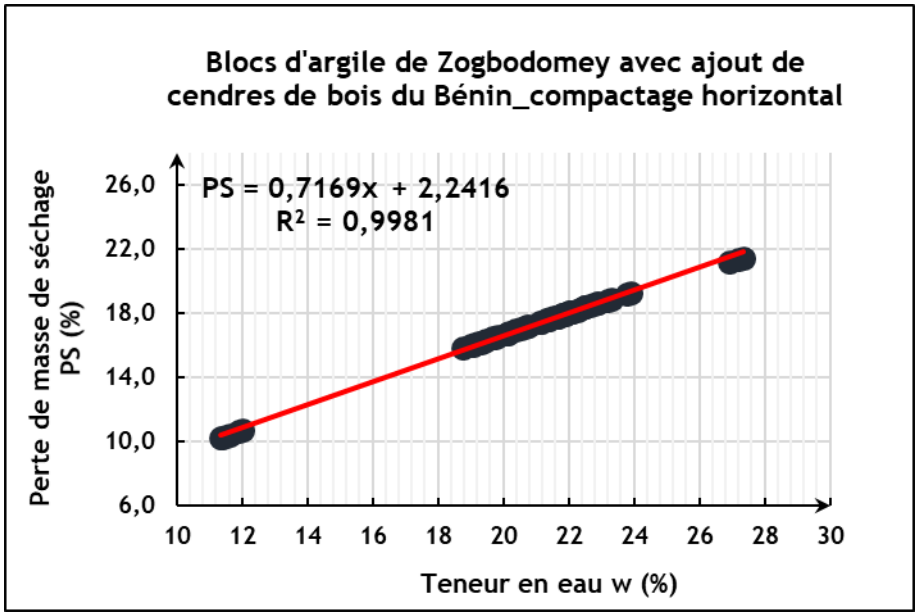



Figure 3.57 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte de masse de séchage des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

La Figure 3.58 présente l'influence du dosage en cendres de bois sur la perte au feu (PF) encore appelée « perte de masse de cuisson », des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey.

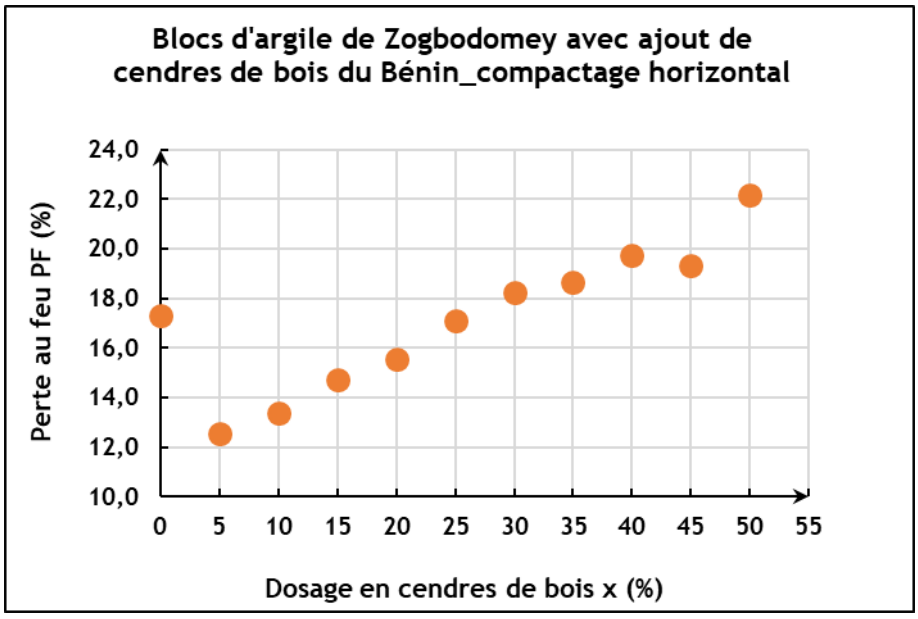



Figure 3.58 : Influence du dosage en cendres de bois sur la perte au feu des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

On observe que l'incorporation de 5% de cendres de bois, induit une diminution de la perte au feu comparés aux blocs sans cendres. De plus, cette diminution est égale à 5% et correspond à la proportion d'argile substituée par les cendres. Mais au-delà de 5% de cendres, la perte au feu croit progressivement avec le dosage en cendres et au-delà d'un dosage en cendres de 25%, la perte au feu des blocs est supérieure à celle des blocs sans cendres. En outre, pour les dosages en cendres de 5%, 10% et 15% ; la perte de feu est non seulement inférieure à celle des blocs sans cendres mais surtout elle est inférieure au seuil de 15% recommandé.

Ainsi, le phénomène observé pourrait s'expliquer par des réactions chimiques qui se produisent au sein des blocs au cours de la cuisson. En effet, selon leur composition, les cendres peuvent contenir des substances qui forment des phases liquides à des températures de cuisson relativement basses et contribuent ainsi à la consolidation par frittage de la structure céramique [140].

- Action des cendres de bois sur le retrait des blocs « AC »

La Figure 3.59 présente l'évolution du retrait latéral de cuisson des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey en fonction du retrait longitudinal de cuisson.

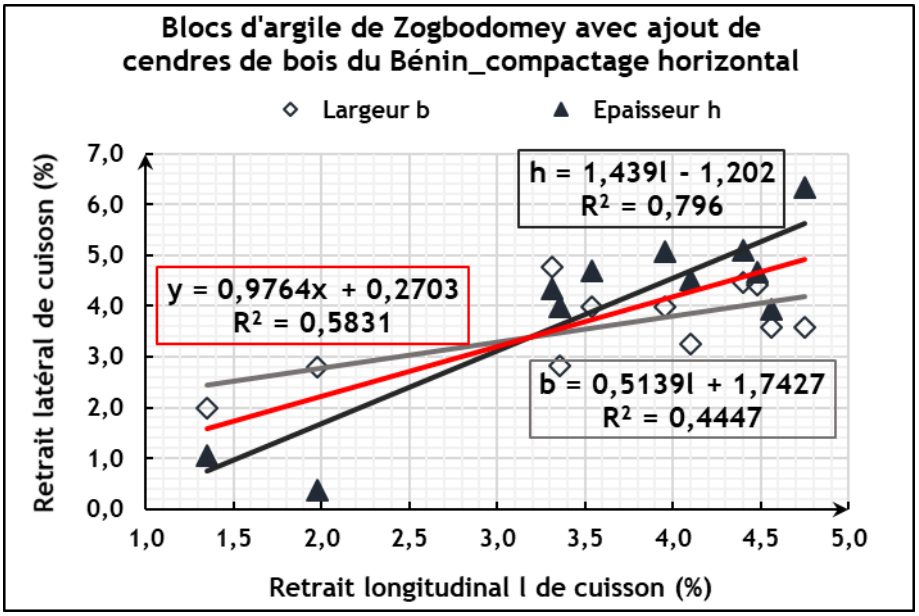



Figure 3.59 : Influence du retrait latéral en fonction du longitudinal de cuisson des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois

On observe que l'incorporation des cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile, créé une direction privilégiée du retrait de cuisson : c'est l'anisotropie du retrait. Des études spécifiques permettront de comprendre les réactions chimiques en jeu au cours de la cuisson afin d'expliciter ce phénomène.

- Action des cendres de bois sur la masse volumique des blocs « AC »

La Figure 3.60 présente l'influence du dosage en cendres de bois du Bénin, sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey.
On observe que, l'incorporation de 5% de cendres de bois, induit une augmentation de 4% de la masse volumique des blocs. Ainsi, à l'instar des argiles de Xeuilley et de Sèmè-Podji, la substitution de 5% de l'argile de Zogbodomey par des cendres de bois, assurerait une masse volumique équivalente à celle des blocs sans cendres. Mais au-delà du dosage de 5% en cendres de bois, la masse volumique décroit. Il existerait alors, un dosage optimal des cendres de bois qui maintienne la masse volumique, au moins égale à celle des blocs d'argile cuits sans cendres.

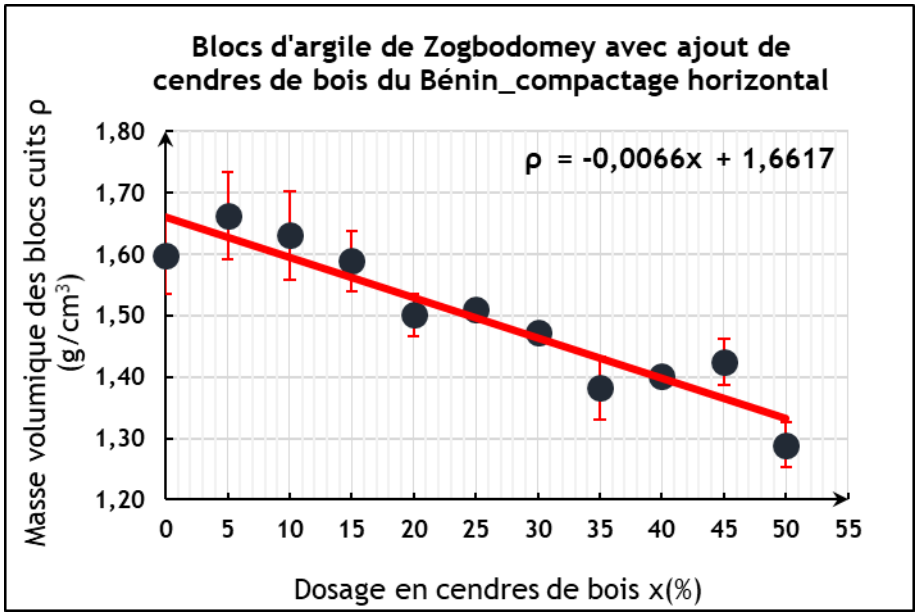



Figure 3.60 : Influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

Par ailleurs, contrairement aux blocs d'argile cuits de Xeuilley et de Sèmè-Podji, les blocs d'argile cuits de Zogbodomey incorporant 10% de cendres de bois présentent également une masse volumique supérieure de 2% à celle des blocs sans cendres. Toutefois, cette valeur reste inférieure à celle du dosage de 5% en cendres. Ainsi, le dosage optimal de cendres permettant d'obtenir une masse volumique semblable à celle des blocs sans ajout, serait de 5%. Une proportion importante de cendres implique la réduction de la quantité d'argile dans le mélange, or la masse volumique des cendres est très faible comparée à celle des argiles. Ainsi, des proportions importantes de cendres favoriseraient la détérioration des propriétés plastiques de la pâte d'argile, ce qui la rendrait moins cohésive et par conséquent, plus poreuse.

- Action des cendres de bois sur la résistance à la traction par flexion trois points des blocs « AC »

La Figure 3.61 présente l'influence du dosage en cendres de bois du Bénin, sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey.
On observe que, pour le dosage de 5% en cendres de bois du Bénin, la résistance à la traction par flexion des blocs « A » d'argile cuite de Zogbodomey augmente de 29%. Pour ce même dosage, un accroissement de 60% de la résistance à la traction par flexion trois, avait été enregistré au niveau des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji, conformément à la Figure 3.53. Ainsi, l'influence des cendres de bois est beaucoup plus marquée au niveau de l'argile de Sèmè-Podji. Ce phénomène pourrait être lié aux transformations microstructurales qui se produisent au cours de la cuisson des blocs, dépendamment des phases minérales associées. Ces deux argiles différent déjà par leur couleur qui pourrait présager de leur composition minéralogique différentes. Ce qui permettrait alors d'expliquer le rapport de l'ordre de $\frac{1}{2}$ enregistré quant à l'influence du dosage de 5% en cendres de bois du Bénin sur la résistance à la traction par flexion trois points, de ces deux blocs d'argile cuits.

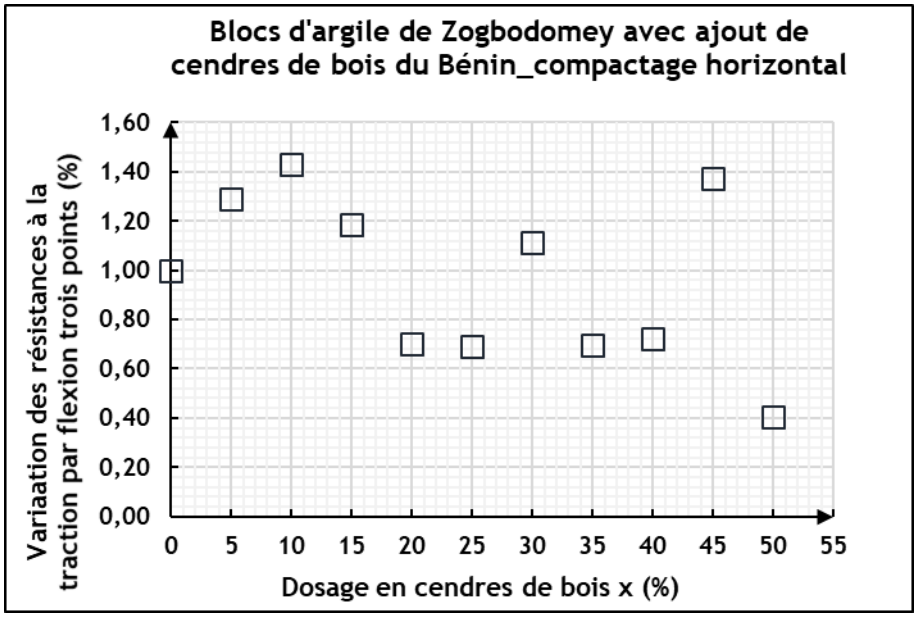



Figure 3.61 : Influence du dosage en cendres de bois sur la résistance à la traction par flexion trois points des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

En outre, les résistances des blocs incorporant 10% et 45% de cendres de bois sont supérieures à celle des blocs sans ajout, avec un accroissement de 43% de la résistance à la traction pour le dosage à 10% de cendres.

- Action des cendres de bois sur la résistance à la compression des blocs « AC »

La Figure 3.62 présente l'influence du dosage en cendres de bois du Bénin, sur la résistance à la compression des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey.

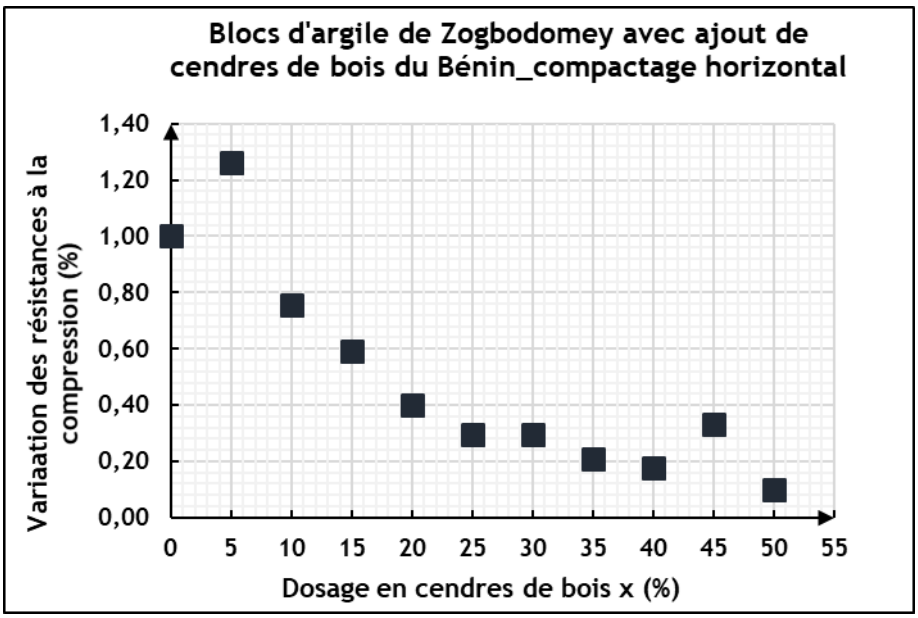



Figure 3.62 : Influence du dosage en cendres de bois sur la résistance à la compression des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

On observe que, pour le dosage de 5% en cendres de bois, la résistance à la compression connait un accroissement similaire à celui observé à la traction par flexion trois points, soit

26%. Au-delà de ce dosage, les résistances à la compression décroissent avec l'augmentation de la proportion de cendres du Bénin dans le mélange. Ce comportement pourrait traduire que l'accroissement de la masse volumique enregistré pour le dosage en cendres de 10% (Figure 3.60) serait plutôt lié aux erreurs expérimentales de mesure.
Ainsi, à l'instar des blocs d'argile cuits de Xeuilley et Sèmè-Podji, l'évolution des résistances mécaniques à la compression des blocs d'argile cuits incorporant des cendres de bois, serait plutôt corrélée à la masse volumique des produits.

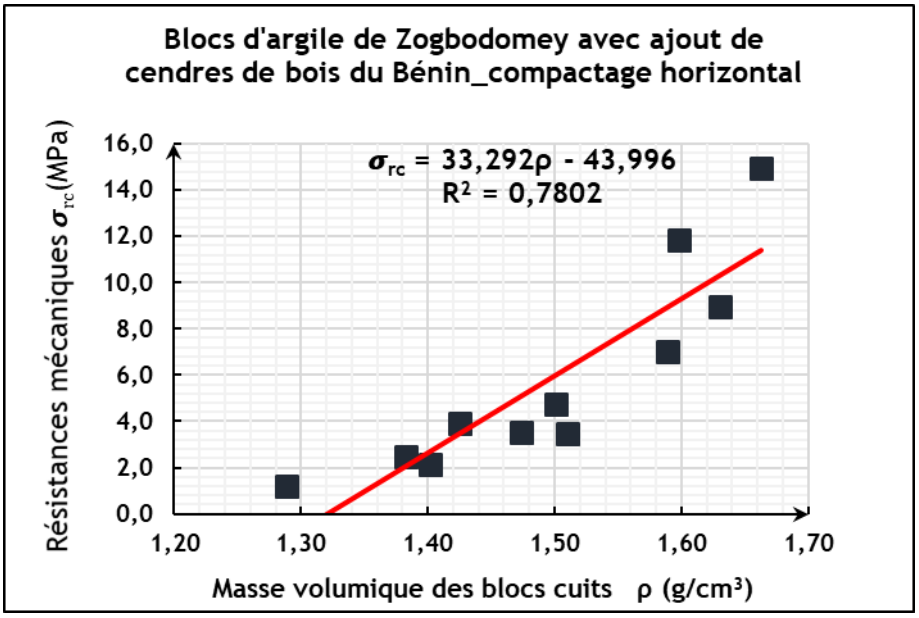



Figure 3.63 : Influence de la masse volumique sur la résistance à la compression des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

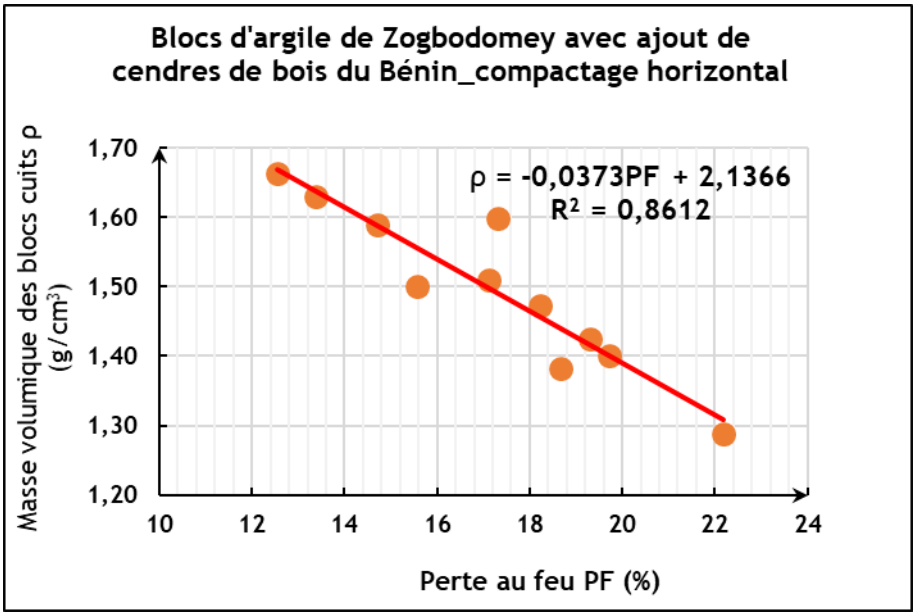



Figure 3.64 : Influence de la perte au feu sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey

En effet, nous observons à la Figure 3.63 que la résistance à la compression des blocs d'argile cuits de Zogbodomey croit avec l'augmentation de la masse volumique. Par

ailleurs, la Figure 3.64 montre que la masse volumique des blocs cuits diminue lorsque la perte au feu augmente. Ainsi, les blocs d'argile cuits de Zogbodomey incorporant 5% de cendres de bois et présentant la plus faible valeur de la perte au feu, présentent la masse volumique maximale et offrent également les résistances mécaniques optimales à la compression. La masse volumique des blocs d'argile cuits est donc corrélée à la perte au feu des blocs et elle influence leurs résistances mécaniques. D'où l'importance de limiter la perte au feu des blocs d'argile cuits.

- Action des cendres de bois sur le module de Young des blocs « AC »

La Figure 3.65 permet d'observer que l'influence des cendres de bois sur le module de Young des blocs cuits est similaire à celui observé à la compression.

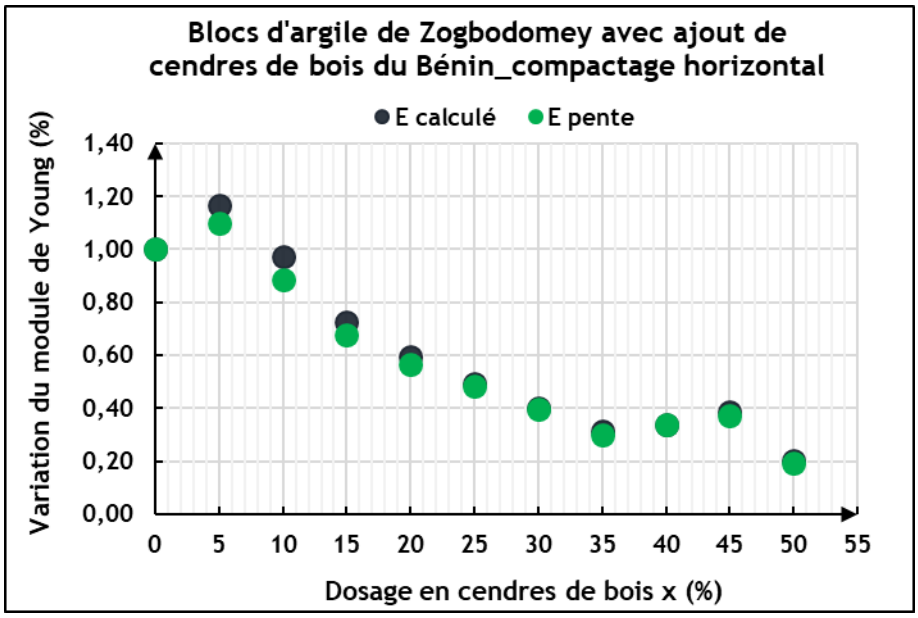



Figure 3.65 : Module de Young des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey en fonction du dosage en cendres de bois du Bénin

Ainsi, le dosage de 5% en cendres de bois, présente également le module de Young maximal, avec un accroissement de 10% comparé aux blocs sans cendres. Des proportions plus importantes de cendres de bois (>5%), induisent une baisse de performance croissante avec le taux de cendres incorporés ; ce qui s'avère très préjudiciable pour le bloc d'argile cuit. De plus, la Figure 3.66 traduit une relation linéaire croissante du module de Young en fonction de la résistance à la compression de ces blocs d'argile cuits.

En conséquence, lorsque l'on combine les différentes propriétés des produits obtenus, le dosage de 5% en cendres de bois présente les meilleures performances, soient :

- une perte au feu de 13%,
- une masse volumique de 1,66 ± 0,07 g/cm$^3$,
- une résistance de 2,3 ± 0,7 MPa à la traction par flexion trois points,
- une résistance de 14,9 ± 1,6 MPa à la compression et
- un module de Young $E_p$ de 1380 ± 239 MPa.

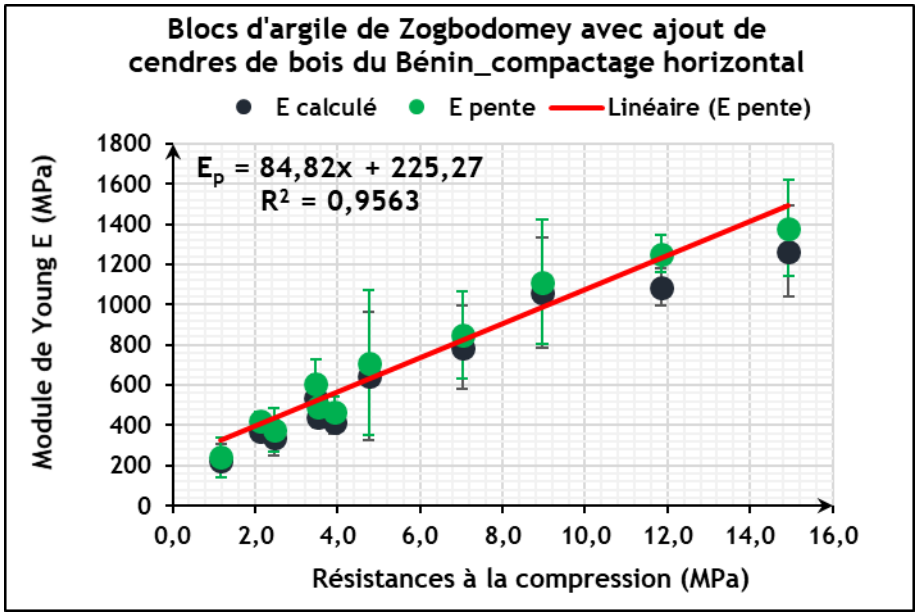



Figure 3.66 : Évolution du module de Young des blocs « AC » d'argile cuite de Zogbodomey en fonction de la résistance à la compression

En conclusion, il est aisé de constater que les propriétés mécaniques (résistances à la traction par flexion trois points et à la compression, module de Young) des blocs d'argile cuits sont influencées par leur masse volumique. Or, la masse volumique est intimement liée à la formulation des blocs (compactage, quantité de cendres, retrait, perte au feu). De plus, les blocs d'argile cuits admettent un dosage maximal en cendres de bois, au-delà duquel, les cendres deviennent préjudiciables à la mise en œuvre du produit.
À cet effet, nous étudions par la suite, l'influence de la variation du mode de compactage des blocs d'argile de Zogbodomey incorporant 0%, 5% et 10% de cendres de bois sur leurs propriétés.

### 3.4.3.2. Compactage vertical

L'un des paramètres les plus importants dans le compactage des sols est l'optimisation de la teneur en eau. Ainsi, les blocs d'argile de Zogbodomey incorporant 0%, 5% et 10% de cendres de bois ont subi ici le compactage vertical tel que décrit au 2.5.2 Modes de façonnage. Le dosage en cendres fixé, la teneur en eau de confection des blocs a donc été variée afin d'en déduire l'influence sur les propriétés des produits.

- Comportement à la cuisson des blocs « BC » avec ajout de cendres de bois

La Figure 3.67 présente l'aspect de surface des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey incorporant 5% et 10% de cendres de bois, à différentes teneurs en eau de confection.

Ainsi, on observe que les blocs cuits présentent une belle couleur rouge brique uniforme et un contour régulier, avec une surface lisse.




a) 5%




b) 10%

Figure 3.67 : Aspect visuel des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois du Bénin

La Figure 3.68 présente le cœur de ces blocs après la rupture à la traction par flexion trois points.



a) 5%




b) 10%

Figure 3.68 : Aspect du cœur des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois du Bénin

A l'instar des blocs « AC », on note également au niveau des blocs « BC », l'absence d'un cœur noir. La cuisson des blocs est donc complète et il n'existe pas de défauts apparents de cuisson. En outre, l'aspect visuel des blocs « BC » est meilleur à celui des blocs « AC ». Les blocs « BC » paraissent plus compacts et plus rigides.

- Action des cendres de bois sur les pertes de masse des blocs « BC »

La Figure 3.69 présente l'évolution de la perte de masse de séchage des blocs « BC » incorporant 5% et 10% de cendres de bois, en fonction de leur teneur en eau de confection. Pour les dosages de 5% et 10% en cendres de bois, on observe une relation linéaire croissante de pente égale à 0,70 aux erreurs expérimentales près, dont le coefficient de corrélation linéaire R vaut 0,999 et est significatif à une valeur contre 0 de 1/1000.

Or, conformément à la Figure 3.18, la pente de la relation linéaire qui lie la perte de masse de séchage des blocs « B » d'argile de Zogbodomey incorporant 0% de cendres de bois, à la teneur en eau de confection, vaut 0,80 aux erreurs expérimentales près.

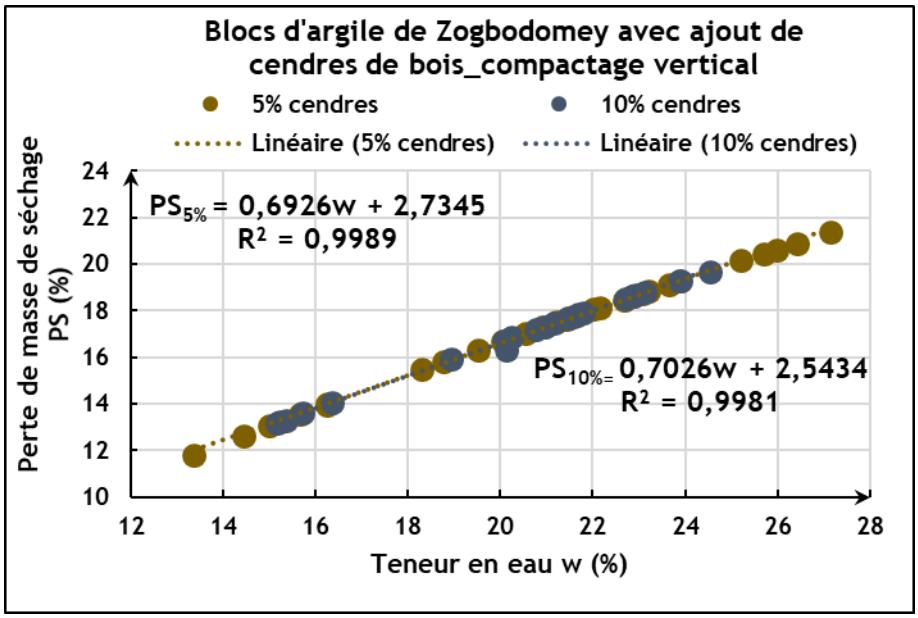



Figure 3.69 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « BC » d'argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois sur la perte de masse de séchage

Ainsi, l'incorporation de 5% à 10% de cendres de bois, induirait une variation d'environ 10% de la perte de masse de séchage des blocs « B» d'argile de Zogbodomey suivant le mode de compactage vertical.

En outre, lorsque nous comparons la relation PS = f(w) des blocs « BC » étudiés en France (Figure 3.69) à celle des blocs « AC » étudiés au Bénin (Figure 3.57), nous remarquons que ces deux relations linéaires ont la même pente de 0,70, aux erreurs expérimentales près. Cependant, le séchage des blocs « AC » et « BC » se fait en atmosphère non contrôlée (température ambiante et humidité relative), donc varie d'un pays à l'autre ; mais la fin du séchage serait marquée par l'atteinte d'une limite d'évaporation de l'eau des blocs. Ce qui est mis en évidence par la pente de la courbe qui est différente de 1.

En conséquence, nous déduisons que quels que soient le mode de compactage et le mode de séchage, les résultats obtenus traduisent que la perte de masse de séchage des blocs est non seulement corrélée à la teneur en eau de confection mais également au dosage en cendres de bois.

La Figure 3.70 présente l'influence de la teneur en eau sur la perte au feu des blocs « BC ». Quelle que soit la teneur en eau de confection, on observe que les blocs « BC05 » incorporant 5% de cendres présentent une perte au feu moyenne de 15 ± 1% et les blocs « BC10 » incorporant 10% de cendres, une perte au feu moyenne de 16 ± 1%. Ces valeurs sont peu différentes aux erreurs expérimentales près, et correspondent à la perte au feu des blocs « BC00 » incorporant 0% de cendres qui vaut 15 ± 1%. Ainsi, la perte au feu des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey varie peu pour un dosage en cendres de bois compris entre 0% à 10%.

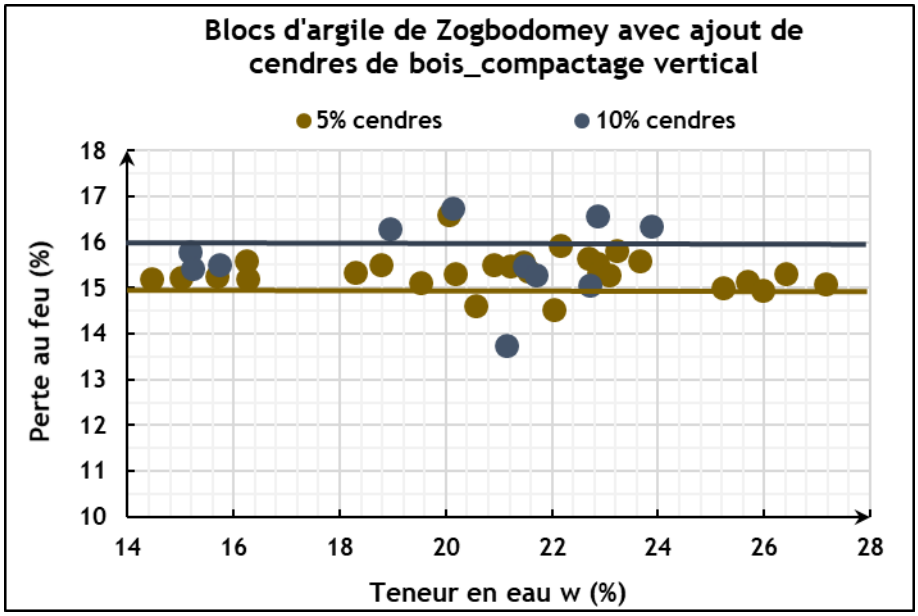



Figure 3.70 : Influence de la teneur en eau de confection sur la perte au feu des blocs « BC » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% et 10% de cendres de bois

➢ Action des cendres de bois sur les retraits des blocs « BC »

Les Figure 3.71 et Figure 3.72 présentent respectivement l'évolution du retrait de séchage suivant la largeur et l'épaisseur (% b et % h) des blocs « BC05 » et « BC10 », en fonction du retrait suivant la longueur (% l).

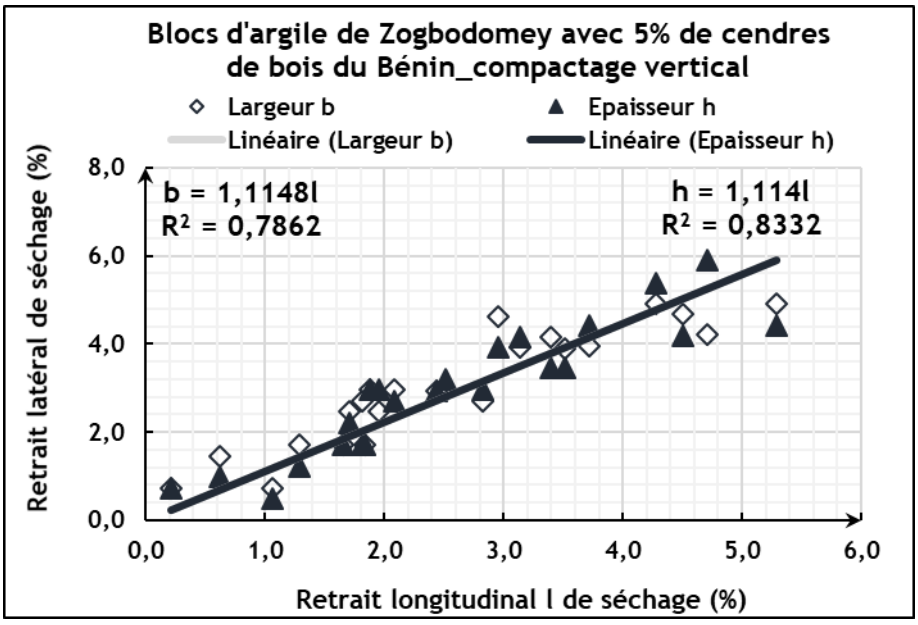



Figure 3.71 : Étude du retrait de séchage des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois

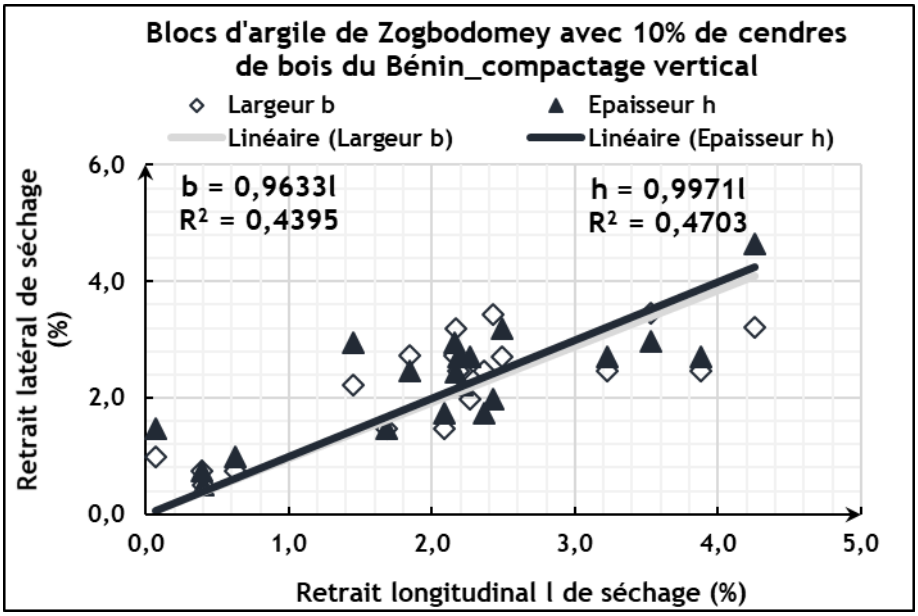



Figure 3.72 : Étude du retrait de séchage des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois

Il existe une relation linéaire qui dénote de la proportionnalité des retraits latéraux par rapport au retrait longitudinal (axe de compactage du bloc) des blocs « BC05 » et « BC10 ». En considérant chaque formulation « BC05 » et « BC10 », on observe que les courbes largeur et épaisseur ont les mêmes équations aux erreurs expérimentales près. Par ailleurs, un comportement similaire a été observé au niveau des blocs « BC00 », tel qu'il a été présenté à la Figure 3.20. Ces observations sont en accord avec le fait que l'échantillon est homogène perpendiculairement à son axe de compression mais que la direction de la compression modifie l'arrangement des particules entre elles. En outre, la pente des relations de la

Figure 3.71 (BC05) diffèrent d'environ 10% de celle des équations de la Figure 3.20 (BC00) tandis que la pente des relations de la Figure 3.72 (BC10) ont 20% de moins. Ceci met en exergue l'influence des cendres de bois sur le retrait de séchage des blocs d'argile de Zogbodomey.

Par ailleurs, les Figure 3.73 et Figure 3.74 présentent respectivement les retraits de cuisson des blocs « BC05 » et « BC10 ».

Ainsi, on observe que, quelles que soient la proportion d'eau et la direction considérée, les blocs « BC05 » (Figure 3.73) présentent une valeur moyenne du retrait de cuisson égale à 3,8 ± 0,3 % et les blocs « BC10», une moyenne de 2,9 ± 1,4 % (Figure 3.74).
En outre, au regard des données des blocs « BC00 » présentées à la Figure 3.21, on enregistre un retrait moyen de cuisson égale à 3,4 ± 0,3 %. Ces valeurs sont inférieures au seuil de 8% recommandé. Cependant, les valeurs du retrait de cuisson des blocs « BC10», incorporant 10% de cendres de bois, sont très dispersées. Ceci met en évidence que des réactions chimiques se produiraient au cours de la cuisson des blocs, lorsque la proportion de cendres dans le mélange est supérieure à 5%. Ainsi, ces transformations seraient à

l'origine des déformations variables en fonction de la direction considérée, et donc de l'anisotropie des blocs cuits.

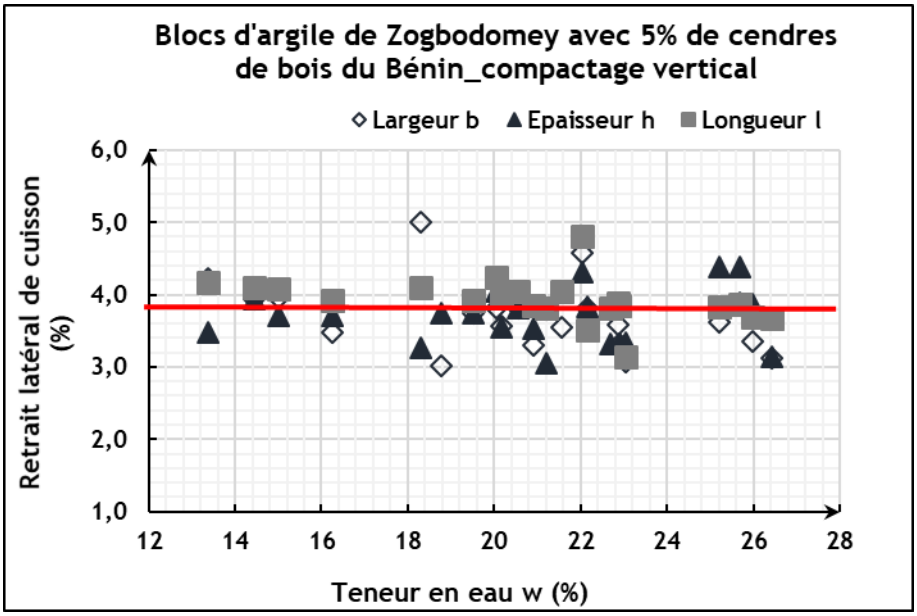



Figure 3.73 : Étude du retrait de cuisson des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois

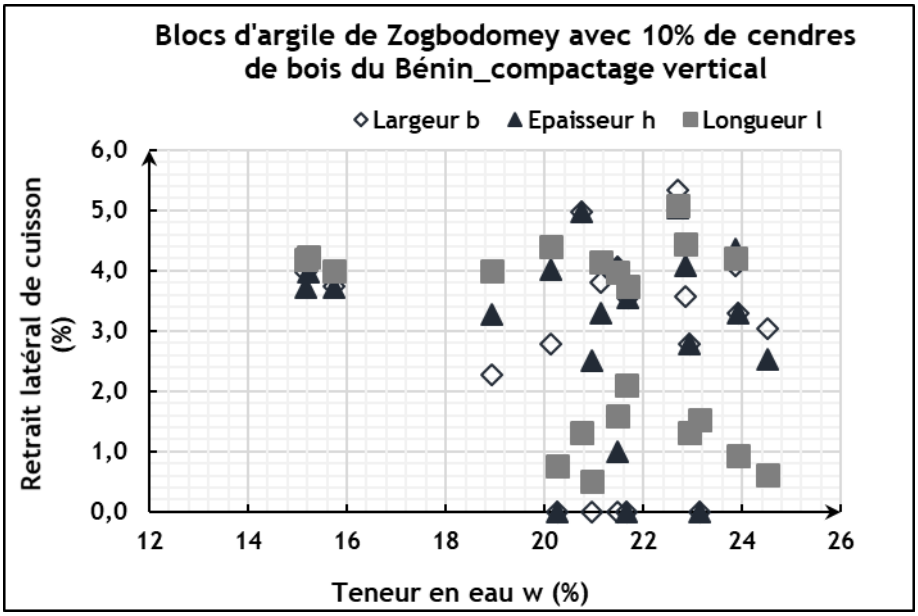



Figure 3.74 : Étude du retrait de cuisson des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois

- Action des cendres de bois sur la masse volumique des blocs « BC »

La Figure 3.75 présente l'influence de la teneur en eau de confection des blocs d'argile de Zogbodomey incorporant 5% de cendres de bois sur la masse volumique après séchage et après cuisson.

On observe une évolution parabolique des masses volumiques avec l'augmentation de la teneur en eau. Les blocs admettent une teneur en eau optimale qui correspond aussi bien

à la masse volumique sèche maximale qu'à la masse volumique maximale des blocs après cuisson.

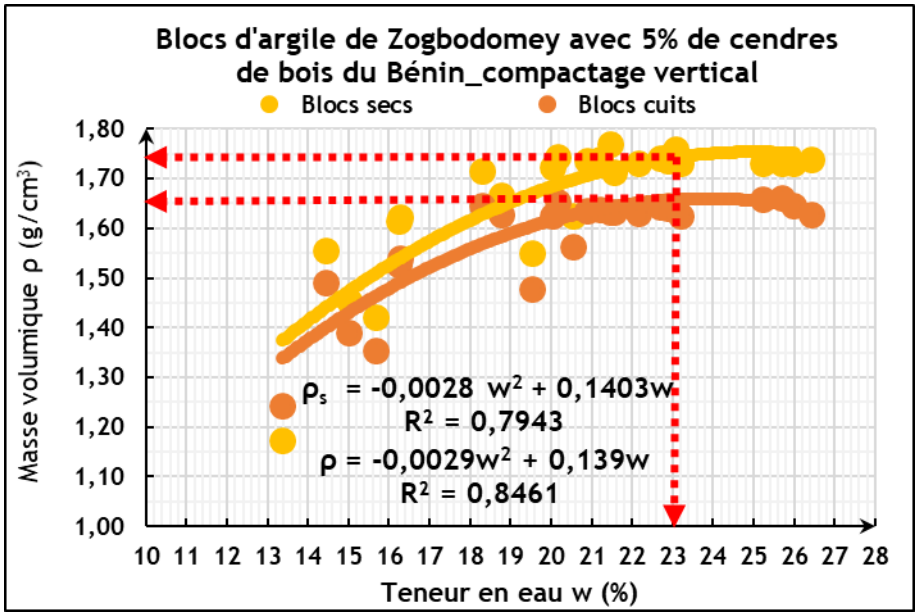



Figure 3.75 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois sur leur masse volumique

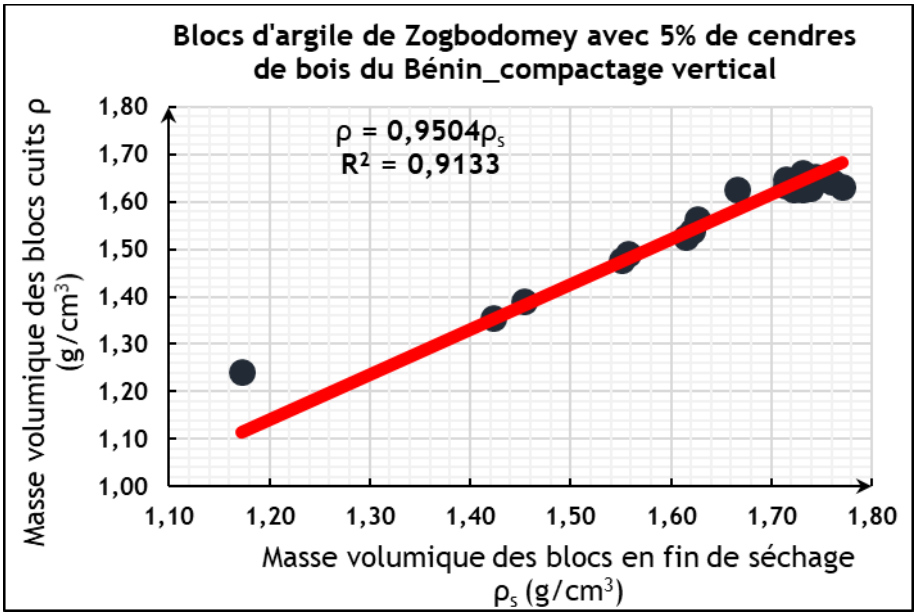



Figure 3.76 : Influence de la masse volumique sèche des blocs « BC05 » sur leur masse volumique après cuisson

En effet, la Figure 3.76 montre qu'il existe une relation linéaire entre la masse volumique sèche des blocs et leur masse volumique après cuisson. Ainsi, il est pratique de se référer à la masse volumique sèche maximale des blocs afin de déterminer la teneur en eau optimale de formulation des produits cuits. La détermination de cette teneur en eau est très importante dans le procédé d'élaboration des blocs d'argile cuits.

L'étude de l'influence de la teneur en eau de confection des blocs avec ajout de 5% de cendres de bois révèle donc une teneur en optimale de compactage des blocs de 23 % ± 0% correspondant aux masses volumiques maximales de 1,74 ± 0,01 g/cm$^3$ pour les blocs secs et 1,64 ± 0,01 g/cm$^3$ pour les blocs cuits.
L'ajout de 5% de cendres de bois n'influence donc pas la demande en eau de façonnage des blocs d'argile de Zogbodomey par compactage vertical. De plus, la masse volumique maximale sèche des blocs et la masse volumique maximale des blocs cuits sont obtenues pour le même point de teneur en eau.
Pour une même teneur en eau optimale de compactage, c'est-à-dire **23% d'eau**, la masse volumique des blocs cuits avec ajout de 5% de cendres de bois est légèrement en baisse par rapport à celle des blocs à 0% de cendres de bois qui vaut 1,69 ± 0,01 g/cm$^3$.

La Figure 3.77 présente l'influence de la teneur en eau de confection des blocs d'argile de Zogbodomey incorporant 10% de cendres de bois sur la masses volumique après séchage et après cuisson.

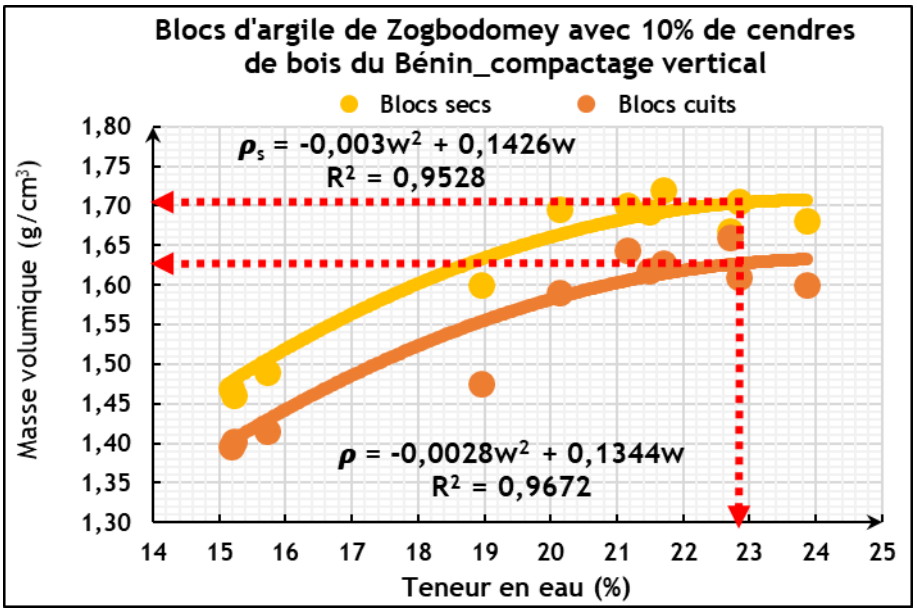



Figure 3.77 : Influence de la teneur en eau de confection des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois sur leur masse volumique

A l'instar des blocs incorporant 5% de cendres de bois, on observe une évolution parabolique des masses volumiques avec l'augmentation de la teneur en eau. Les blocs incorporant 10% de cendres de bois admettent également une teneur en optimale de compactage de 23% correspondant aux masses volumiques maximales de 1,69 ± 0,02 g/cm$^3$ pour les blocs secs et 1,64 ± 0,03 g/cm$^3$ pour les blocs cuits. Ainsi, nous constatons que quel que soit le dosage en cendres de bois, les blocs « BC » d'argile de Zogbodomey admettent une teneur en eau optimale de compactage qui correspond aussi bien à la masse volumique sèche maximale qu'à la masse volumique maximale des blocs après cuisson.
Les résultats ainsi obtenus rendent compte de la fiabilité du principe adopté dans l'étude des blocs « AC » d'argile de Zogbodomey ayant subis le compactage horizontal. En effet, il convient de rappeler que les blocs « AC » ont été étudiés à leur teneur en eau optimale déterminée à partir de leur masse volumique sèche maximale.
Il est donc pratique de se référer à la masse volumique sèche maximale des blocs afin de déterminer la teneur en eau optimale de formulation des produits cuits. La détermination

de cette teneur en eau est très importante dans le procédé d'élaboration des blocs d'argile cuits puisque la masse volumique d'une brique en terre cuite est un paramètre important pour son utilisation dans la construction [106].

Les différents résultats obtenus traduisent une relation linéaire entre la masse volumique sèche et la masse volumique après cuisson des blocs « BC » d'argile de Zogbodomey pour les dosages en cendres de 0%, 5% et 10% étudiés par le mode de compactage vertical. Quel que soit donc le dosage en cendres, cette relation se définit comme suit :

$$\rho = 0{,}95\ \rho_s \qquad 3.14$$

où $\rho$ désigne la masse volumique des blocs cuits et $\rho_s$ la masse volumique sèche des blocs avant cuisson.

En outre, pour le mode de compactage vertical, l'incorporation des cendres de bois à la matrice argileuse n'influence pas la teneur en eau optimale des blocs BC qui est égale à 23% tant pour les blocs « BC00 » sans ajout de cendres de bois (0%) que pour les blocs incorporant 5% et 10% de cendres de bois, soient respectivement « BC05 » et « BC10 ».

Par ailleurs, on observe que la masse volumique après cuisson de ces blocs « BC00 », « BC05 » et « BC10 » confectionnés à la même teneur en eau de 23%, décroit avec le dosage en cendres de bois. Ainsi, on enregistre une diminution moyenne de 3% par rapport aux blocs sans cendres.

Il apparait donc que, l'incorporation des cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile cuits de Zogbodomey rend les briques moins denses. Les cendres de bois permettent ainsi d'alléger les produits cuits. En revanche, il est opportun de vérifier la tenue mécanique de ces blocs.

- Action des cendres de bois sur les résistances mécaniques des blocs « BC »

Les Figure 3.78 et Figure 3.79 présentent la rupture à la traction par flexion trois points, des blocs BC d'argile de Zogbodomey incorporant respectivement 5% et 10% de cendres de bois. Les essais montrent un comportement fragile des blocs représenté par une rupture brusque. Les fissures de ruptures apparaissent généralement en partie basse au milieu de l'éprouvette, où la contrainte en traction est plus grande [121]. Les fissures se propagent par la suite vers le haut.




Figure 3.78 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois, ayant subi le compactage vertical




Figure 3.79 : Mode de rupture à la traction par flexion trois points des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois, ayant subi le compactage vertical

La Figure 3.80 présente l'évolution des résistances mécaniques en fonction de la teneur en eau de confection des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey incorporant 5% de cendres de bois.

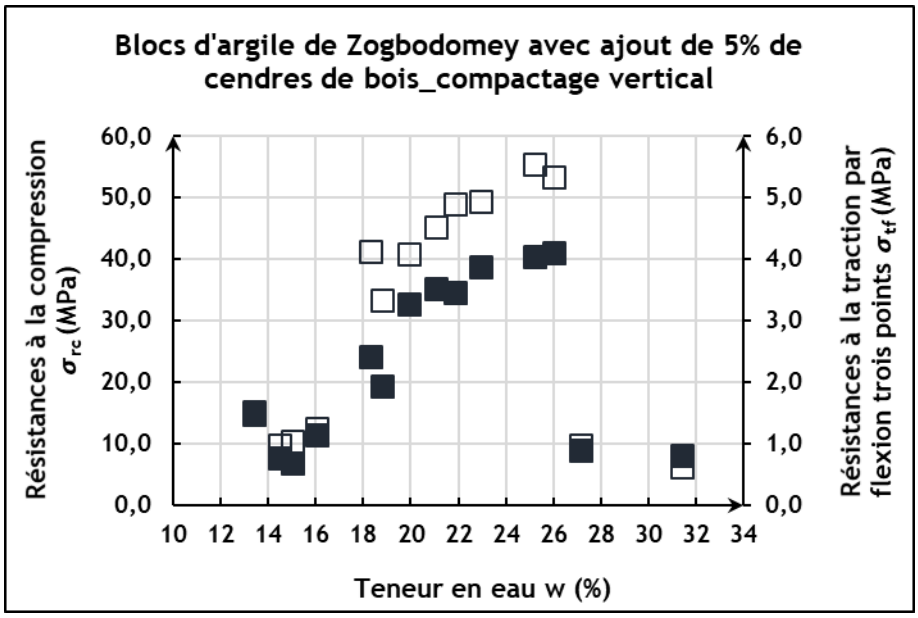



Figure 3.80 : Influence de la teneur en eau sur les résistances mécaniques des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois

On observe les résistances mécaniques croissent avec l'augmentation de la proportion d'eau entre 12% et 26%, mais au-delà de 26%, les résistances décroissent. En outre, la résistance à la compression varie peu entre 23% et 26% d'eau et les blocs confectionnés à une teneur en eau comprise entre 20% et 26% sont en moyenne de 30 MPa.

Ces résultats montrent que la teneur en eau de 23 ± 3 % convient à l'élaboration des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de 5% cendres de bois pour des résistances mécaniques optimales.

La Figure 3.81 présente l'évolution des résistances mécaniques en fonction de la masse volumique des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey incorporant 5% de cendres de bois.

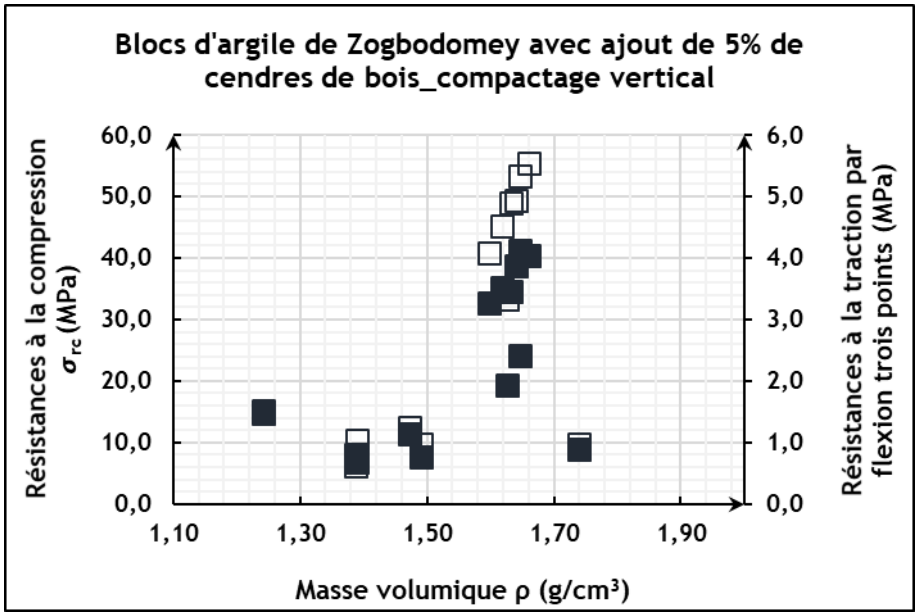



Figure 3.81 : Influence la masse volumique sur les résistances mécaniques des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois

On observe que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues pour les blocs dont la masse volumique est comprise entre 1,50 g/cm$^3$ et 1,70 g/cm$^3$ et la résistance à compression est au moins égale à 20 MPa. En dehors de cet intervalle, les résistances mécaniques sont très faibles. Les blocs confectionnés à une teneur en eau moyenne de 23% présentent les valeurs moyennes optimales soit une résistance moyenne de 38,9 ± 2,3 MPa à la compression et 4,9 ± 0,6 MPa à la traction par flexion trois points.

Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des résistances à la traction par flexion trois points en fonction de celles en compression.

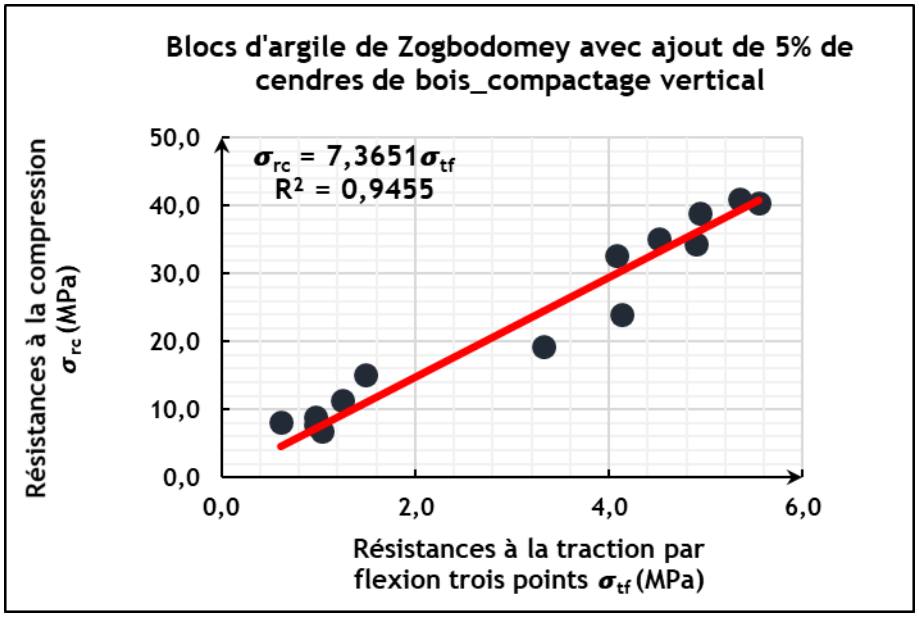



Figure 3.82: Relation entre les résistances à la traction par flexion trois points et celles à la compression des blocs « BC05 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 5% de cendres de bois

Au regard de la Figure 3.82, on déduit une relation linéaire entre les résistances mécaniques à la compression et celle à la traction par flexion trois points. Cette relation est traduite par une droite affine de pente égale à 7,3651 avec un coefficient de corrélation R égale à 0,9724 qui est significatif a une erreur contre 0 de 1/1000.
Ainsi, la résistance à la traction par flexion trois points $\sigma_{tf}$ des blocs « BC05 » d'argile cuite de Zogbodomey vaut environ le septième de sa résistance $\sigma_{rc}$ à la compression.

La Figure 3.83 présente l'évolution des résistances mécaniques en fonction de la teneur en eau de confection des blocs « BC10 » d'argile cuite de Zogbodomey incorporant 10% de cendres de bois.

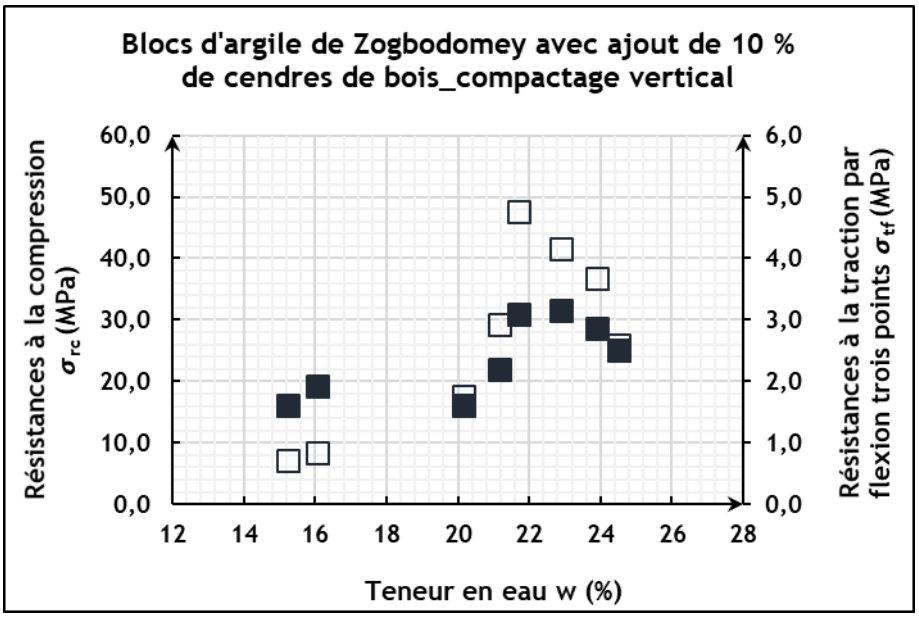



Figure 3.83 : Influence de la teneur en eau sur les résistances mécaniques des blocs « BC10 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois

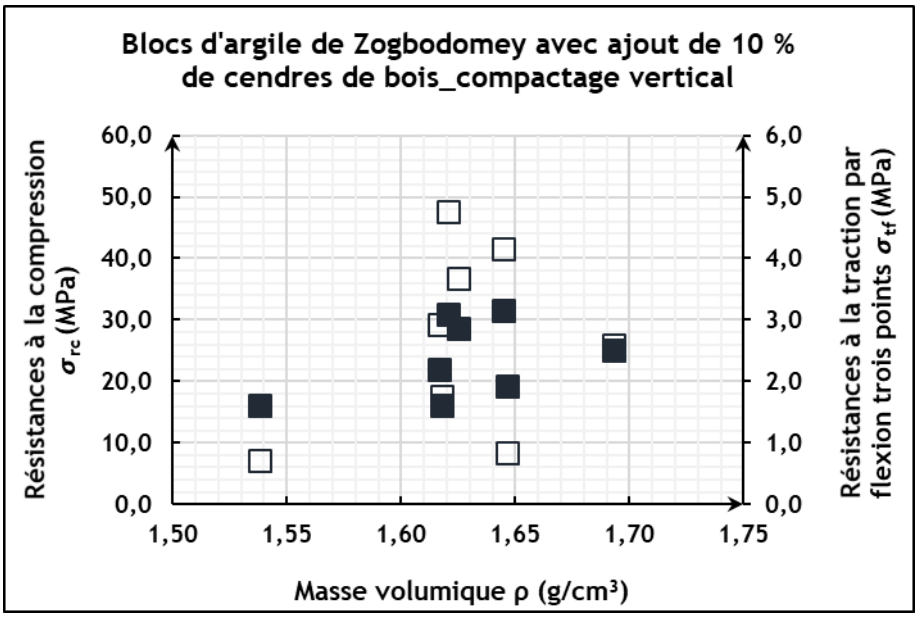



Figure 3.84 : Influence la masse volumique sur les résistances mécaniques des blocs « BC10 » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois

On observe l'accroissement des résistances mécaniques des blocs avec l'augmentation de la proportion d'eau jusqu'à un seuil maximal de 23% au-delà duquel, les résistances décroissent. Les blocs confectionnés à une teneur en eau moyenne de 23% présentent les valeurs moyennes optimales soit une résistance moyenne de 31,6 ± 5,6 MPa à la compression et 4,2 ± 1,1 MPa à la traction par flexion trois points.
Conformément à la Figure 3.84, on observe que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues pour les blocs dont la masse volumique est comprise entre 1,60 g/cm$^3$ et 1,65 g/cm$^3$ et la résistance à compression est au moins égale à 15 MPa.

Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des résistances à la traction par flexion trois points en fonction de celles en compression.

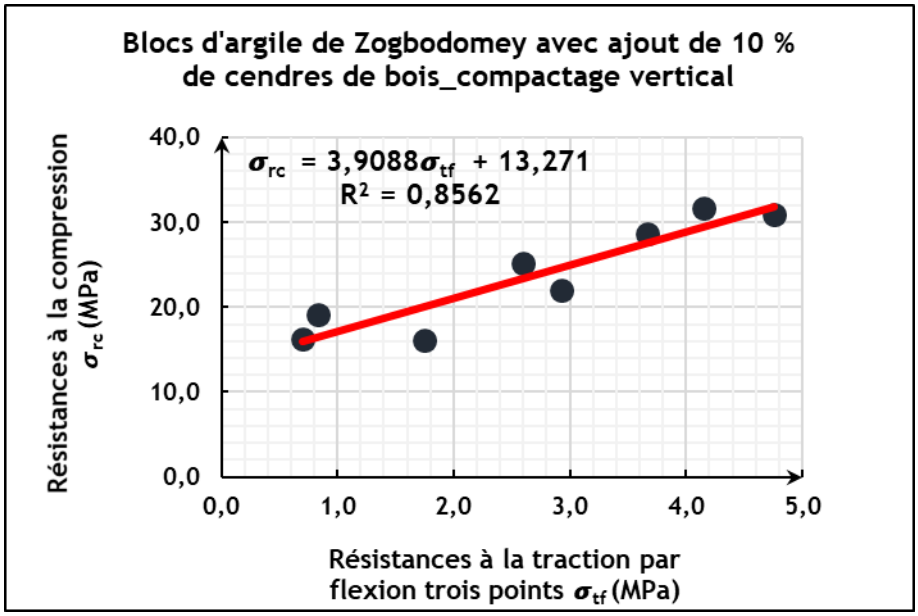



Figure 3.85 : Relation entre les résistances à la traction par flexion trois points et celles à la compression des blocs « BC10 » d'argile de Zogbodomey avec ajout de 10% de cendres de bois

Au regard de la Figure 3.85, on déduit une relation linéaire croissante d'ordonnée à l'origine non nulle, de pente égale à 3,9088 avec un coefficient de corrélation R égale à 0,9253 qui est significatif avec une erreur contre 0 de 1/1000.
Nous observons sur la Figure 3.86 , une baisse de 12% à 28% de la résistance à la compression des blocs « BC05 » et « BC10 » incorporant respectivement 5% et 10% de cendres de bois.
Il apparait donc que, la diminution moyenne de 3% de la masse volumique induite par la substitution de 5% à 10% de cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, impacte significativement les résistances du matériau à la compression. Toutefois, un accroissement de 25% de la résistance à la traction par flexion trois points est observée pour le dosage en cendres de 5% malgré une perte de 12% de la résistance en compression.
Le dosage de 5% en cendres de bois se révèle donc intéressant puisqu'il favorise un gain de résistance à la traction par flexion trois points et offre également une résistance en compression qui avoisine celle des blocs sans cendres de bois.

De plus, la valeur de résistance en compression de 38,9 ± 2,3 MPa obtenue pour le dosage en cendres de 5% garantit la valeur minimale de résistance 10 MPa en compression exigée par les normes industrielles [210], [211].

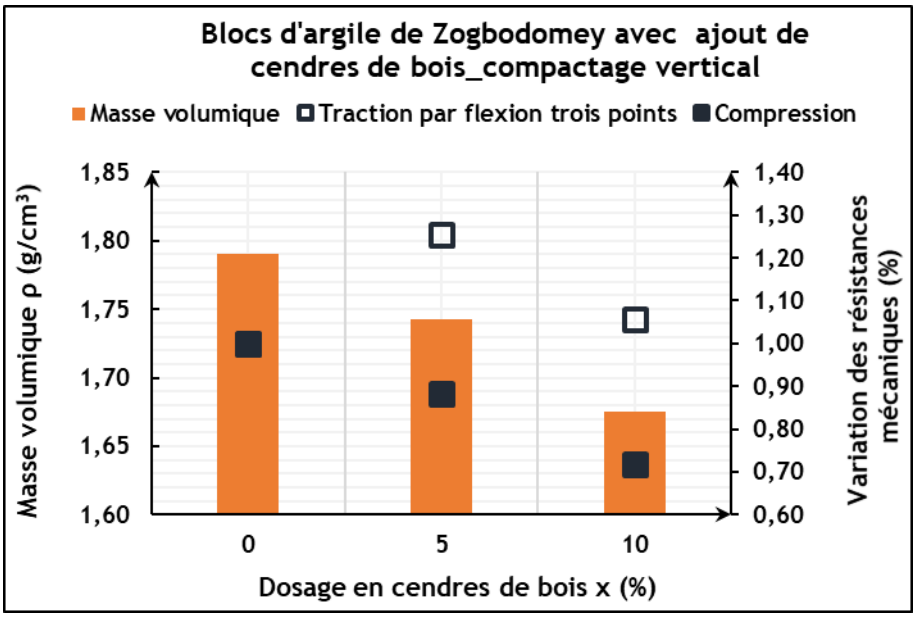



Figure 3.86 : Influence des cendres de bois sur les résistances mécaniques des blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey confectionnés à une teneur en eau de 23%

Ainsi, en combinant les valeurs de résistances mécaniques enregistrée tant à la traction par flexion trois points qu'à la compression pour les blocs « BC » d'argile cuite de Zogbodomey, le taux optimal des cendres de bois envisageable pour substituer cette argile est de 5%.

Ces résultats confirment donc les conclusions de l'étude des blocs « AC » où le dosage en cendres de 5% s'est également révélé comme l'optimum.

### 3.4.3.3. **Comparaison des deux modes de compactage des blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout** de cendres de bois

Les caractéristiques obtenues pour les blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois du Bénin, sont synthétisées dans le Tableau 3.10 en fonction de chaque mode de façonnage (compactage horizontal et compactage vertical) étudié.

Nous observons que l'ajout des cendres de bois modifie fortement la teneur en eau optimale de compactage des blocs « AC » qui passe de 12% à 23% pour les blocs « BC ». En revanche, la teneur en eau optimale des blocs « BC » reste constante et égale à 23% malgré l'ajout des cendres. Pour un taux de 5% en cendres de bois, les masses volumiques des deux types de blocs « AC05 » et « BC05 » s'avoisinent. Tandis que l'incorporation des cendres de bois (5%) induit une augmentation de la masse volumique des blocs « AC00 » par rapport à celle des blocs « AC05 », celle des blocs « BC05 » diminue comparativement à « BC00 ». Le probable accroissement enregistré serait dû aux écarts importants notés au niveau des masses volumiques des blocs « AC ».

Tableau 3.10 : Comparaison des formulations optimales de blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout des cendres de bois (Bénin) en fonction du compactage

| Dosage en cendres de bois x (%) | Compactage horizontal « AC » | | | | Compactage vertical « BC » | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | w (%) | ρ (g/cm³) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | w (%) | ρ (g/cm³) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) |
| 0 | 12 | 1,60 ± 0,06 | 1,8 ± 0,2 | 11,8 ± 0,9 | 23 | 1,69 ± 0,01 | 3,9 ± 0,6 | 44,1 ± 3,6 |
| 5 | 23 | 1,66 ± 0,07 | 2,3 ± 0,7 | 14,9 ± 1,6 | 23 | 1,64 ± 0,01 | 4,9 ± 0,6 | 38,9 ± 2,3 |

En outre, les valeurs de résistances mécaniques obtenues tant à la traction par flexion trois qu'à la compression des blocs « BC » (compactage vertical), sont nettement supérieures à celle des blocs « AC » (compactage horizontal). Toutefois, au niveau des blocs « B », on enregistre une petite perte de résistance à la compression des blocs incorporant 5% de cendres comparés aux blocs sans cendres. Cette perte est équilibrée avec les écarts de mesures ; ce qui permet de dire que les propriétés des blocs « B » incorporant 5% de cendres de bois, sont voisines de celles des blocs sans cendres.

Quel que soit le mode de compactage des blocs d'argile de Zogbodomey, la substitution de 5% de cette argile par des cendres de bois permet d'obtenir des produits cuits qui présentent des propriétés comparables à celles des blocs sans cendres.

La valorisation des cendres de bois dans la formulation des briques d'argile cuite est donc possible, ce qui permettrait alors, de limiter la pression sur la ressource locale argileuse et de donner vie aux cendres.

### 3.4.4. Comparaison de l'influence des cendres de bois sur les argiles

L'observation visuelle des blocs d'argile cuits de Xeuilley, Sèmè-Podji et Zogbodomey incorporant différentes proportions de cendres de bois révèle un défaut de cuisson au niveau des deux premières argiles.

Quel que soit le mode de façonnage des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, les propriétés physiques enregistrées témoignent de la bonne tenue physique de ces produits de l'étape de façonnage à celle de la caractérisation mécanique.

Les trois argiles étudiées offrent une résistance en compression au minimum égale à 10 MPa, valeur minimale exigée par les normes industrielles[210], [211].

Les propriétés physico-mécaniques des blocs d'argile cuits incorporant des cendres de bois (mode de compactage vertical) sont présentées au Tableau 3.11.

On constate que l'incorporation des cendres de bois à l'argile de de Xeuilley dégrade les propriétés mécaniques du produit. En effet, les propriétés des blocs d'argile pure de Xeuilley sont nettement supérieures à celles des blocs incorporant des cendres. Ainsi, la formulation optimale des blocs d'argile cuits de Xeuilley demeure celle des blocs de référence sans ajout des cendres de bois de la France.

En outre, la possibilité de substituer 5% en masse de l'argile de Sèmè-Podji ou de l'argile de Zogbodomey, par des cendres de bois est bénéfique.

Tableau 3.11 : Formulations optimales des blocs d'argile avec ajout de cendres : mode de compactage vertical

| Observations | Dosage en cendres de bois x (%) | Teneur en eau w (%) | ρ ($g/cm^3$) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| Xeuilley cendres France | 0 | 16 ± 0 | 1,62 ±0,03 | 14,4 ± 4,5 | 21,7 ± 4,5 |
| Sèmè-Podji cendres France | 5 | 16 ± 0 | 1,79 ± 0,03 | 13,8 ± 0,5 | 42,0 ± 2,5 |
| Sèmè-Podji cendres Bénin | 5 | 11 ± 4 | 1,78 ± 0,00 | 13,7 ± 2,2 | 26,4 ± 3,2 |
| Zogbodomey cendres Bénin | 5 | 23 ± 0 | 1,64 ± 0,01 | 4,9 ± 0,6 | 38,9 ± 2,3 |

L'argile de Sèmè-Podji offre un meilleur intérêt lorsqu'elle est substituée par des cendres de bois de la France en compactage vertical. En effet, les performances mécaniques enregistrées au niveau des blocs de cette formulation sont les meilleures en comparaison aux cendres du Bénin et aux autres argiles. Cependant, les propriétés physiques des blocs d'argile de Sèmè-Podji ne permettent pas une valorisation en construction. Il faudrait étudier le procédé de cuisson adapté à ces blocs et qui permette d'obtenir des produits finis présentant des résistances mécaniques optimales mais surtout des propriétés physiques appréciables. L'aspect esthétique des briques d'argile cuite est une caractéristique à faire valoir car susceptible d'induire des gains économiques.

L'argile de Zogbodomey lorsqu'elle subit le compactage vertical, apparait au regard de ses bonnes performances : esthétique, propriétés physiques et mécaniques, comme celle qui permet d'obtenir les meilleurs produits cuits pour un taux de substitution en cendres de bois du Bénin de 5%.

## 3.5. Influence des verres broyés sur les propriétés des blocs d'argile

### 3.5.1. Argile de Xeuilley

Les différents échantillons d'argile cuite de Xeuilley incorporant des verres broyés ont présenté de multiples déformations consécutives à la cuisson des blocs, tel qu'il est présenté à la Figure 3.87.



Figure 3.87 : Aspect visuel des blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de verres broyés

Au regard donc des difficultés d'élaboration de ces blocs d'argile cuits de Xeuilley, nos travaux n'ont pas pu permettre une étude plus fournie.

### 3.5.2. Argile de Sèmè-Podji

#### 3.5.2.1. Comportement à la cuisson des blocs « SPV » avec ajout de verres broyés




Figure 3.88 : Aspect visuel des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji avec ajout de verres broyés



Figure 3.89 : Aspect du cœur des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji avec ajout de verres broyés

La Figure 3.88 présente l'aspect visuel après cuisson, des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji, incorporant respectivement : 5%, 10%, 15% et 20% de verres broyés.
On observe que les blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji incorporant des verres broyés ne présentent pas de déformations (fissurations, flambement) apparentes.
Par ailleurs, conformément à la Figure 3.89, nous observons également l'absence d'un noir au cœur de ces blocs, tandis que les blocs d'argile de Sèmè-Podji sans ajout, présentaient un cœur noir, telle que l'indique la Figure 3.11.
De plus, il est possible de constater l'amélioration de la cuisson des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji avec l'ajout des verres broyés, comparés aux blocs « SP » sans ajout, présentés à la Figure 3.9 et aux blocs « SPB » et « SPF » incorporant des cendres de bois, présentés à la Figure 3.43. En effet, les travaux de Morelli et Baldo ont montré également que l'introduction d'un résidu vitreux tend à diminuer la température de cuisson requise pour la consolidation du corps en argile [168] ; c'est ce qui explique la meilleure cuisson obtenue pour les blocs avec ajout de verres broyés.
Ainsi, le remplacement partiel de l'argile de Sèmè-Podji par les verres broyés permettrait de limiter les transformations chimiques qui se produiraient au cours de la cuisson des blocs d'argile, de 0°C à 950°C.
En revanche, les déformations enregistrées au niveau des blocs d'argile cuits de Xeuilley incorporant des verres broyés, traduiraient l'influence de la minéralogie des argiles, dans la fabrication des blocs cuits de qualité.

### 3.5.2.2. Action verres broyés sur les pertes de masse des blocs « SPV »

- Perte de masse de séchage

La Figure 3.90 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji.

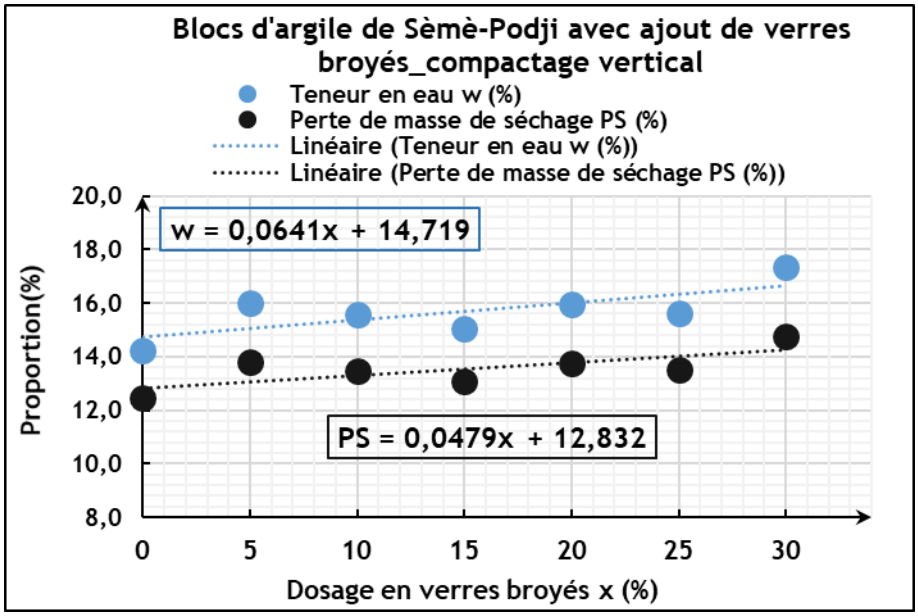



Figure 3.90 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « SPV »

On observe que, l'évolution de la perte de masse due au séchage des blocs est semblable à celle de la teneur en eau de confection des blocs. Ainsi, la fin du séchage serait marquée par l'atteinte d'une limite d'évaporation de l'eau du bloc.
Cette limite peut être exprimée par la relation :

**w-PS = 0,0162 x+1,887** 3.15

La pente de cette relation linéaire représente moins de 1% de la teneur en eau résiduelle des blocs à la fin du séchage (l'ordonnée à l'origine). Ainsi l'influence du dosage en verres broyés, sur la perte de masse de séchage des blocs ne serait pas marquée. En effet, Matteucci et al. ont observé que l'incorporation de résidus de verre dans une masse céramique pour la fabrication de carreaux n'entraînait pas de modifications significatives sur les produits semi-finis (séchage) [167].
Par ailleurs, la teneur en eau résiduelle des blocs à la fin du séchage a une valeur constante égale à 2%, quel que soit le dosage en verres broyés ; d'où l'influence de la teneur en eau de confection des blocs sur leur perte de masse au séchage.

- Perte de masse de cuisson

La Figure 3.91 présente l'influence du dosage en verres broyés, sur la perte au feu des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji.

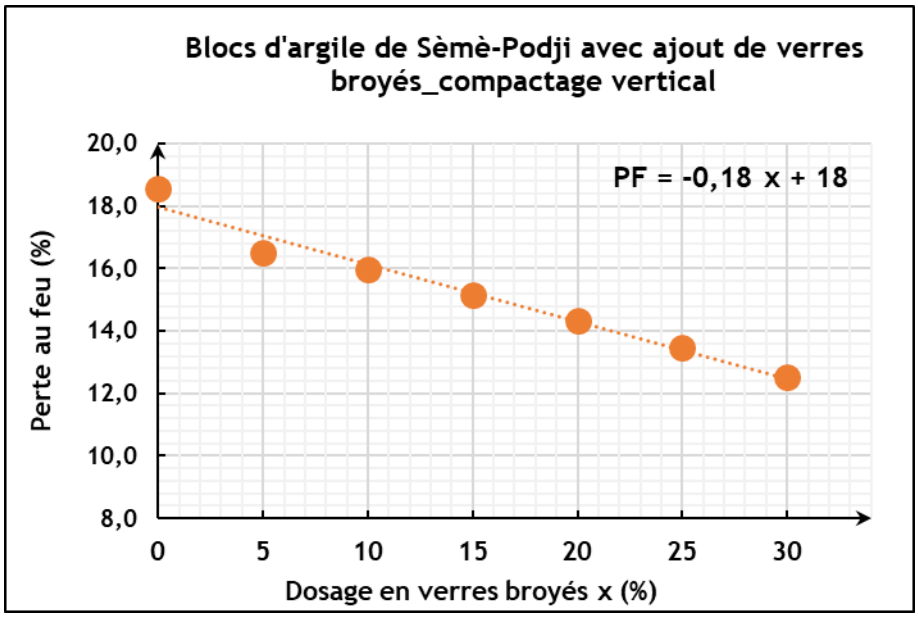



Figure 3.91 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu des blocs « SPV »

On observe une diminution progressive de la perte au feu des blocs « SPV » avec l'incorporation des verres broyés. Elle est traduite par la relation linéaire :

**PF=-0,18x + 18** 3.16

Or, la perte au feu des blocs « SP » sans ajout (0% de verres broyés) vaut 18% ; ce qui correspond à la pente de la relation linéaire. De plus, l'ordonnée à l'origine de cette équation est égale à 100PF ; PF étant exprimé en pourcentage (%).
Ainsi, la perte au feu des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji avec ajout de verres broyés (**$PF_{x\%}$**), serait donc une fonction de la perte au feu des blocs sans ajout (**$PF_{0\%}$**) et de la proportion x% de verres broyés dans le mélange.

3.5.2.3. Action des verres broyés sur les retraits des blocs « SPV »

- Retrait de séchage

La Figure 3.92 présente les retraits de séchage des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji incorporant des verres broyés.

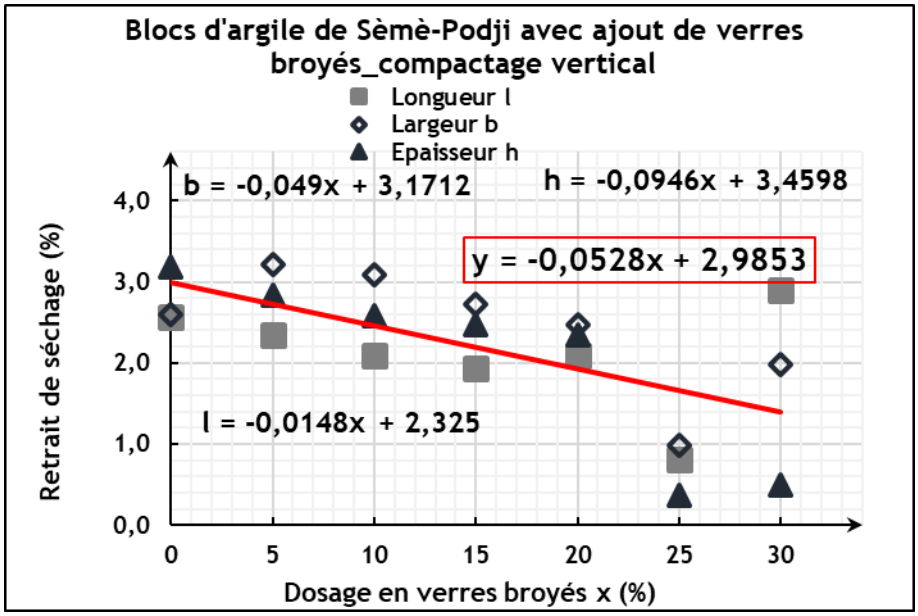



Figure 3.92 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de séchage des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji

On observe que le retrait des blocs varie suivant la direction considérée ; le retrait de séchage semble plus important suivant la largeur du bloc. Effet, les données expérimentales traduisent l'expansion du bloc suivant sa largeur, pour les faibles dosages en verres broyés (0% à 15%).
Mais au regard de l'ensemble des valeurs expérimentales (trait continu en rouge), l'incorporation des verres broyés dans la formulation des blocs d'argile de Sèmè-Podji, semble limiter le retrait de séchage des blocs, quel que soit l'axe du bloc considéré.

- Retrait de cuisson

La Figure 3.93 présente les retraits de cuisson des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji incorporant des verres broyés.
On observe que la cuisson des blocs semble limiter l'effet de l'anisotropie du retrait des blocs observée au séchage. Ce phénomène se justifierait du fait de la fusion plus efficace du quartz favorisée par les déchets de verre et conduisant à une phase liquide plus abondante et moins visqueuse, ce qui accélère la cinétique de frittage [167].

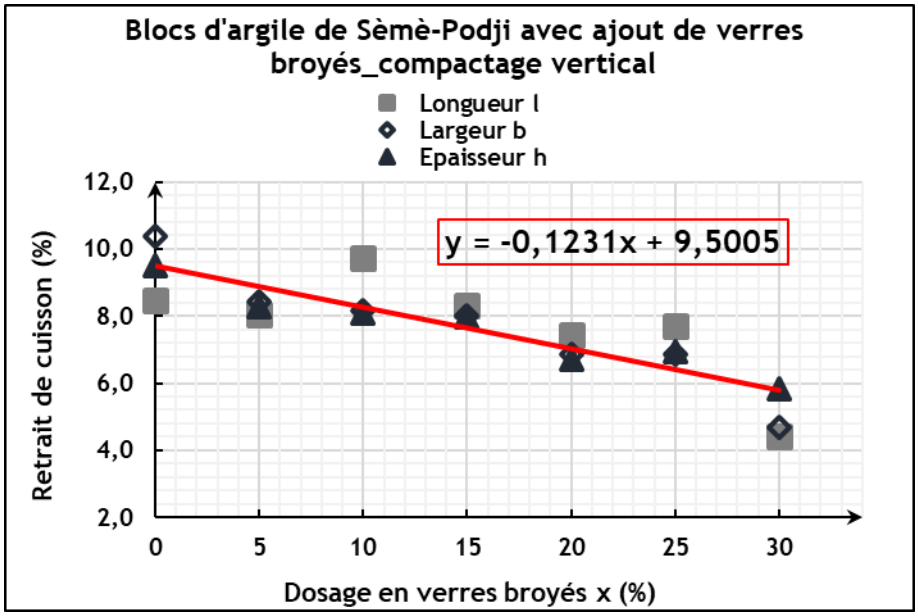



Figure 3.93 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de cuisson des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji

En outre, l'augmentation du dosage en verre broyés, induirait une diminution du retrait de cuisson, à l'instar du phénomène observé pour la perte au feu de ces blocs. En effet, Matteucci et al. ont également observé que l'incorporation de résidus de verre dans une masse céramique pour la fabrication de carreaux, influence notablement le comportement au feu, le retrait des produits [167]. De plus, les conclusions des travaux de Bragança et Bergmann montrent que l'utilisation de la poudre de verre à bouteille classique, en remplacement d'un fondant dans la fabrication de la céramique en porcelaine, a permis d'abaisser la température de cuisson de 100°C et le retrait linéaire [169]. Ainsi, l'action des verres broyés est donc favorable au comportement technologique des produits cuits, ce qui se traduit par le meilleur aspect visuel observé au niveau des blocs « SPV », comparés aux blocs « SP ».

### 3.5.2.4. Action des verres broyés sur la masse volumique des blocs « SPV »

La Figure 3.94 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji.

On observe que l'ajout des verres broyés induit une augmentation de la masse volumique des blocs cuits pour des dosages allant de 5% à 20%. Mais, au-delà de 20% de verres broyés, la masse volumique diminue. Toutefois, elle reste supérieure à celle des blocs « SP » à 0% de verres broyés, pour les dosages en verres broyés étudiés.
La substitution partielle de l'argile de Sèmè-Podji par des verres broyés admet alors un dosage optimal au-delà duquel, les propriétés des produits se dégraderaient.

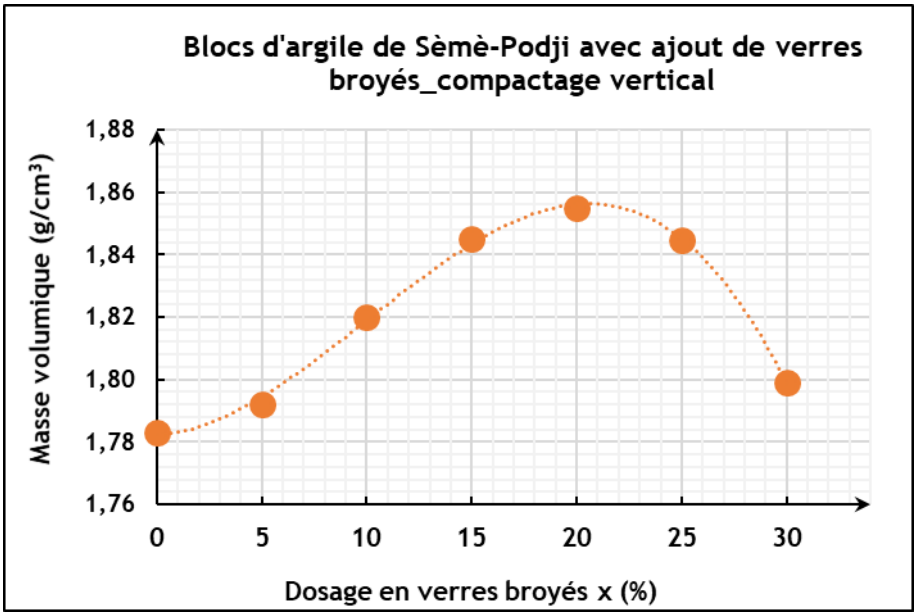



Figure 3.94 : Influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji

3.5.2.5. Action des verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « SPV »

La Figure 3.95 présente l'influence du dosage en verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji.

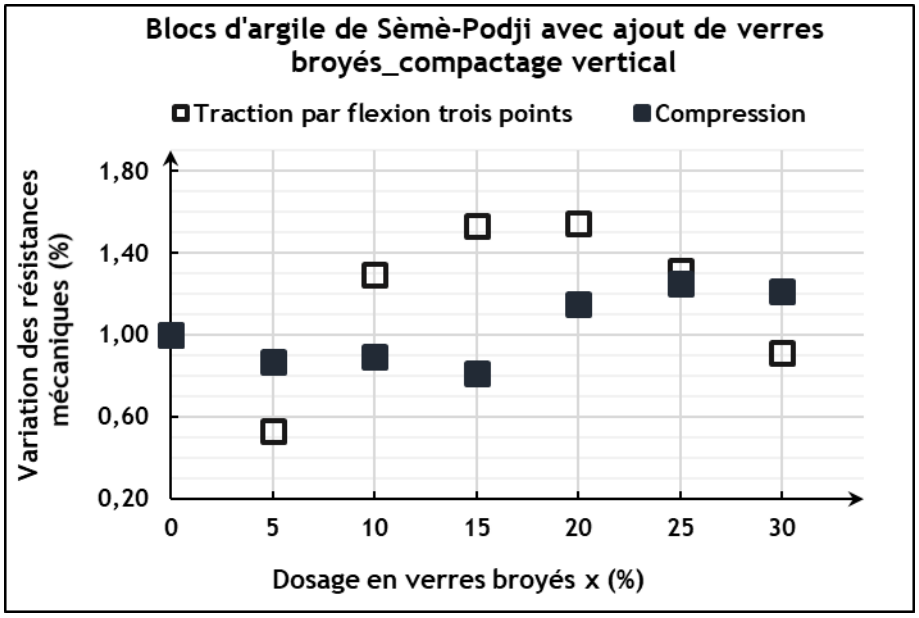



Figure 3.95 : Variation des résistances mécaniques des blocs « SPV » en fonction du dosage en verres broyés

Le comportement observé au niveau de l'évolution des résistances mécaniques à la Figure 3.95, se rapproche de celui observé avec la masse volumique, tel que présenté à la Figure 3.94. Ainsi, le dosage de 20% en verres broyés se révèle comme le taux optimal de substitution favorable au couple de résistances mécaniques étudiées.

En effet, l'incorporation de 20% de verres broyés induit un accroissement de 55% de la résistance à la traction par flexion trois et de 15% à la compression. Ces différents résultats témoignent de l'action bénéfique des verres broyés dans la formulation des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji.

Du fait de la corrélation linéaire entre la perte au feu des blocs et leur masse volumique après cuisson, l'amélioration des propriétés technologiques obtenus par l'incorporation des verres broyés, induit alors l'accroissement de la masse volumique. Or, il existe une corrélation entre l'évolution de la masse volumique des blocs d'argile cuits et leurs résistances mécaniques. C'est ce qui explique l'amélioration des résistances mécaniques observées au niveau des blocs « SPV » d'argile cuite de Sèmè-Podji.

Ainsi, les verres broyés agiraient comme :

- dégraissants en limitant le retrait des blocs d'argile de Sèmè-Podji ;
- fondants en améliorant la cuisson à cœur des blocs d'argile de Sèmè-Podji ;
- renforts en faisant croître la masse volumique et les résistances mécaniques des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji.

Toutefois, le dosage en verres broyés admet un optimal au-delà duquel, les propriétés du matériau se dégradent.

Ainsi, dans la formulation des blocs cuits, la proportion massique optimale pour la substitution de l'argile de Sèmè-Podji par des verres broyés, est de 20%.

En revanche, nous avons pu observer que l'incorporation des verres broyés dans la formulation des blocs d'argile cuits de Xeuilley, est néfaste au produit final.

Nous nous intéresserons alors à l'influence des verres broyés sur les blocs d'argile de Zogbodomey.

## 3.5.3. Argile de Zogbodomey

### 3.5.3.1. Compactage horizontal

- Comportement à la cuisson des blocs « AV » avec ajout de verres broyés

Les blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey élaborés au Bénin suivant le mode de compactage horizontal, présentent une couleur uniforme, telle que le montre la Figure 3.96.

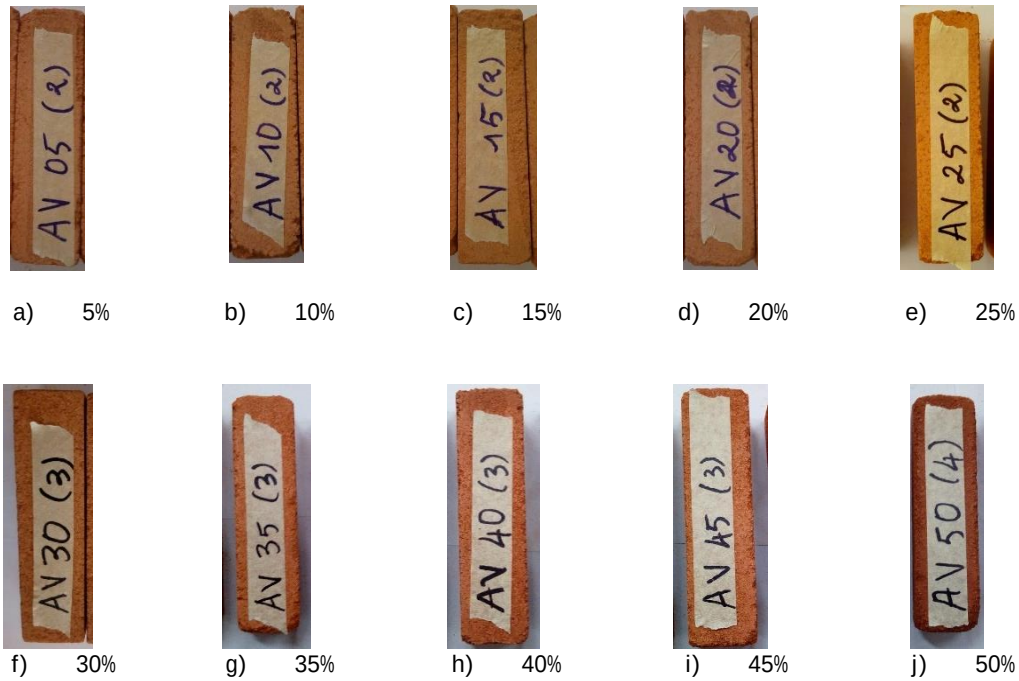



Figure 3.96 : Aspect visuel des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés

En outre, la Figure 3.97 montre l'absence d'un noir au cœur de ces bocs : la cuisson des blocs est donc complète.



Figure 3.97 : Aspect du cœur des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés

➢ Action des verres broyés sur les pertes de masse des blocs « AV »

- Perte de masse de séchage

La Figure 3.98 présente l'influence du dosage en verres broyés, sur la perte de masse de séchage des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey ayant subis le compactage horizontal.

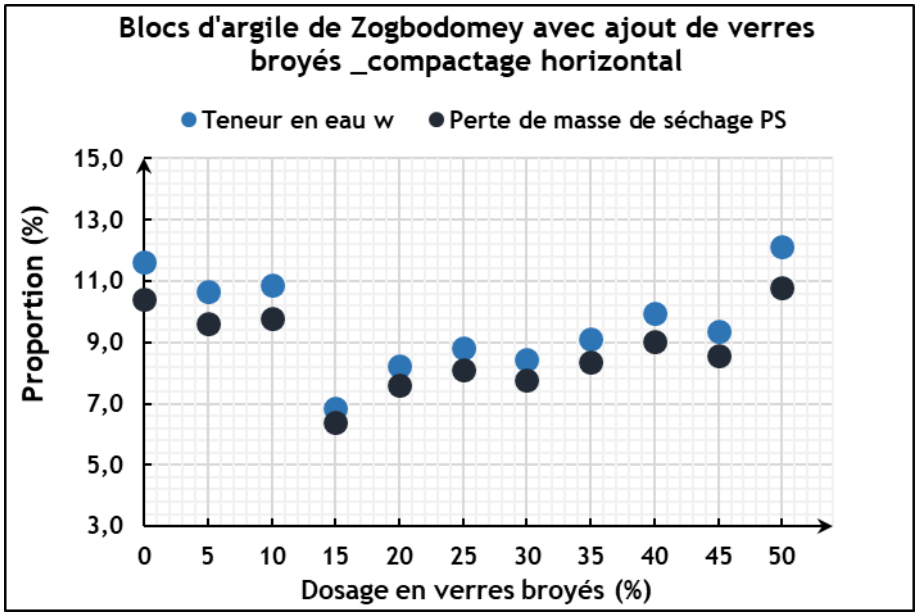



Figure 3.98 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal

Les blocs « AV » d'argile de Zogbodomey incorporant des proportions variables de verres broyés, ont été confectionnés à leur teneur en eau optimale comprise entre 6% et 12%. Ainsi, on observe que la perte de masse de séchage des blocs présente la même évolution que la teneur en eau de confection des blocs.

Quels que soient le dosage en verres broyés et la teneur en eau de confection des blocs, la fin du séchage est marquée par une teneur en eau résiduelle constante égale à 2%.

La teneur en eau de formulation des bocs conditionne leur perte de masse de séchage. Il est donc opportun d'optimiser cette teneur en eau afin de limiter le départ d'une grande quantité d'eau au cours du séchage ; ce qui pourrait être préjudiciable à la bonne tenue mécanique des produits cuits.

- Perte de masse de cuisson

La Figure 3.99 présente l'évolution de la perte au feu des blocs « AV » en fonction du dosage en verres broyés.

On observe que l'augmentation du dosage en verres broyés induit une diminution linéaire de la perte au feu des blocs définie par l'équation :

$$\mathbf{PF=-0,16x + 17} \qquad 3.17$$

Or, la perte au feu des blocs « A » d'argile de Zogbodomey, sans ajout (0%) de verres broyés ($PF_{0\%}$) est égale à 17%, peu différente de la pente de la relation linéaire aux erreurs expérimentales près.

De plus, l'ordonnée à l'origine de cette équation est égale à 100PF ; PF étant exprimé en pourcentage (%).

A l'instar donc des blocs « SPV », la perte au feu des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés ($\mathbf{PF_{x\%}}$), serait donc une fonction de la perte au feu des blocs sans ajout ($\mathbf{PF_{0\%}}$) et de la proportion x% de verres broyés dans le mélange.

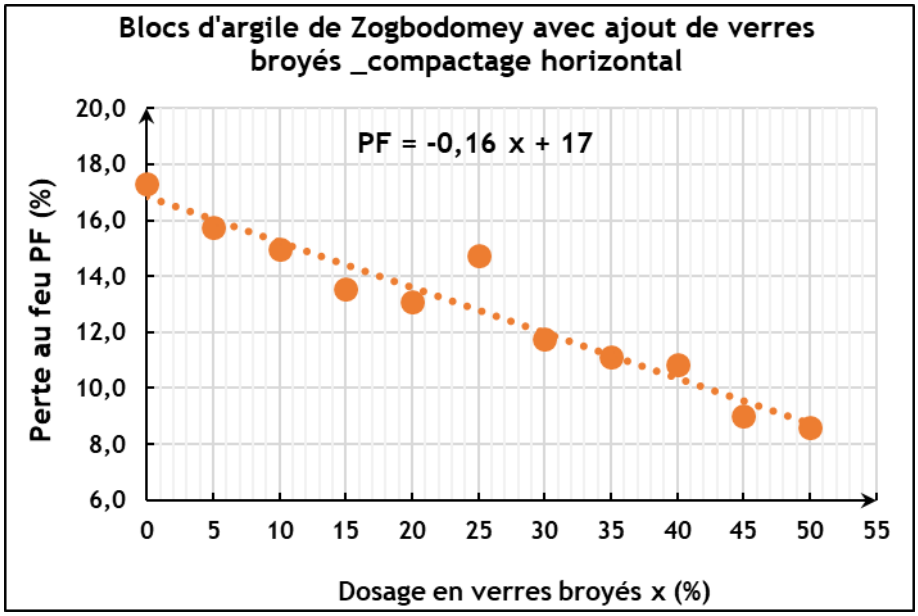



Figure 3.99 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal

➢ Action des verres broyés sur les retraits des blocs « AV »

- Retrait de séchage

La Figure 3.100 présente les retraits de séchage des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey incorporant des verres broyés.

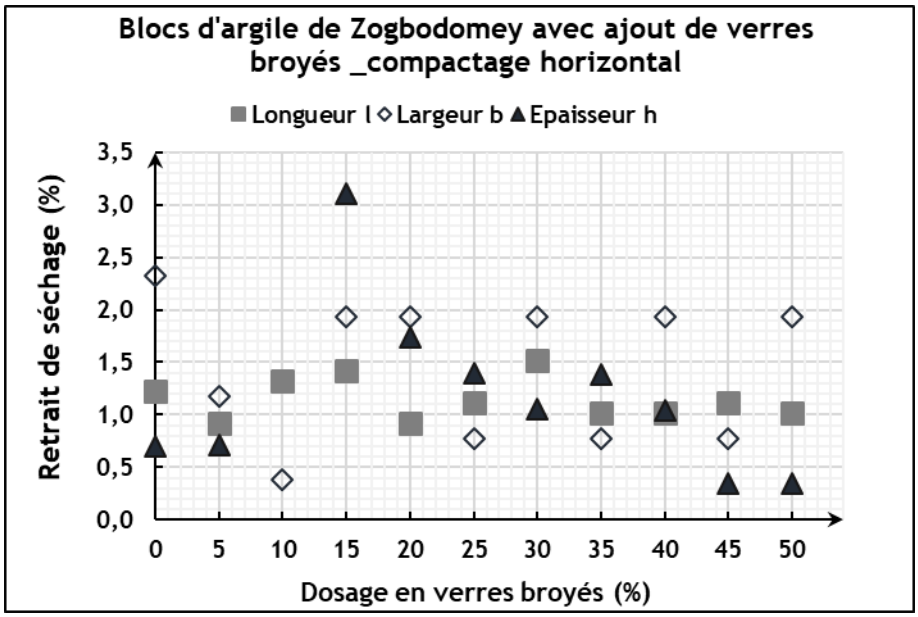



Figure 3.100 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de séchage des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal

Les blocs sont confectionnés à des teneurs en eau différentes, de ce fait on observe que, le retrait de séchage des blocs varie en fonction de la formulation considérée. En outre, pour chaque formulation, le retrait varie selon l'axe du bloc considéré :

c'est l'anisotropie du retrait. Par ailleurs, les données obtenues ne nous permettent pas de conclure quant à l'influence des verres broyés sur le retrait de séchage des blocs.

- Retrait de cuisson

La Figure 3.101 présente les retraits de cuisson des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey incorporant des verres broyés.

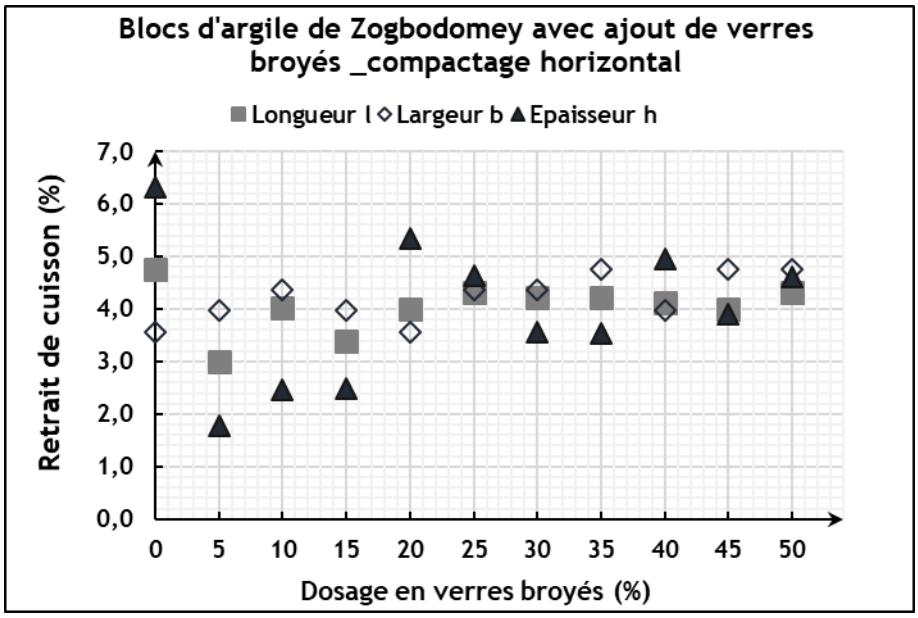



Figure 3.101 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de cuisson des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal

A la cuisson, l'incorporation des verres broyés limiterait l'anisotropie observé au séchage, surtout lorsque le dosage en verre est compris entre 20% et 50%. Ainsi, ces blocs présentent un retrait moyen de 4% à la cuisson, quel que soit l'axe du boc.

➢ Action des verres broyés sur la masse volumique des blocs « AV »

La Figure 3.102 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, élaborés par compactage horizontal.
On observe que l'incorporation de 5% à 20% des verres broyés, induit un accroissement de 0% à 7% de la masse volumique qui reste relativement constante au-delà du dosage en verres de 20%.

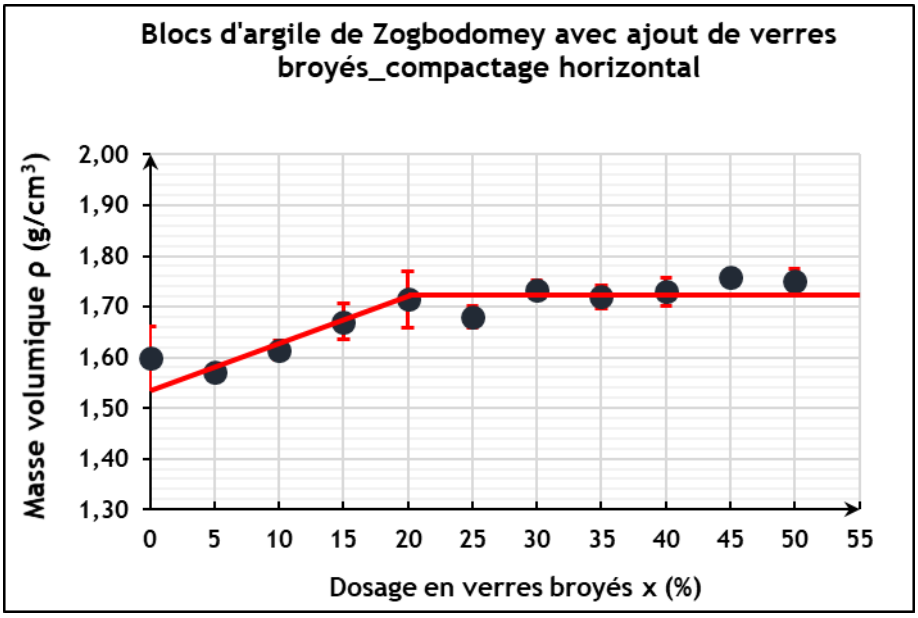



Figure 3.102 : Influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey, compactage horizontal

➢ Action des verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « AV »

La Figure 3.103 présente la variation des résistances mécaniques des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey en fonction du dosage en verres broyés, par rapport à celle des blocs « A » sans ajout.

Nous remarquons qu'il existe un dosage optimal en verres permettant d'obtenir les résistances mécaniques maximales aussi bien à la traction par flexion trois qu'à la compression.

En effet, les blocs incorporant 20% de verres broyés ont une masse volumique de 1,71 ± 0,06 g/cm$^3$ et favorisent un gain des résistances mécaniques de 30% à la compression et 65% à la traction par flexion trois points. Les valeurs optimales des résistances mécaniques correspondantes sont de 15,6 ± 2,3 MPa à la compression et 3,0 ± 0,3 MPa à la traction par flexion trois points.

Au regard de la baisse de performance observée à la compression pour les dosages en verres supérieures à 30% malgré le gain de résistance obtenu à la traction par flexion trois, le taux de 30% se révèle comme le seuil maximal probable de substitution de l'argile de Zogbodomey par les verres broyés.

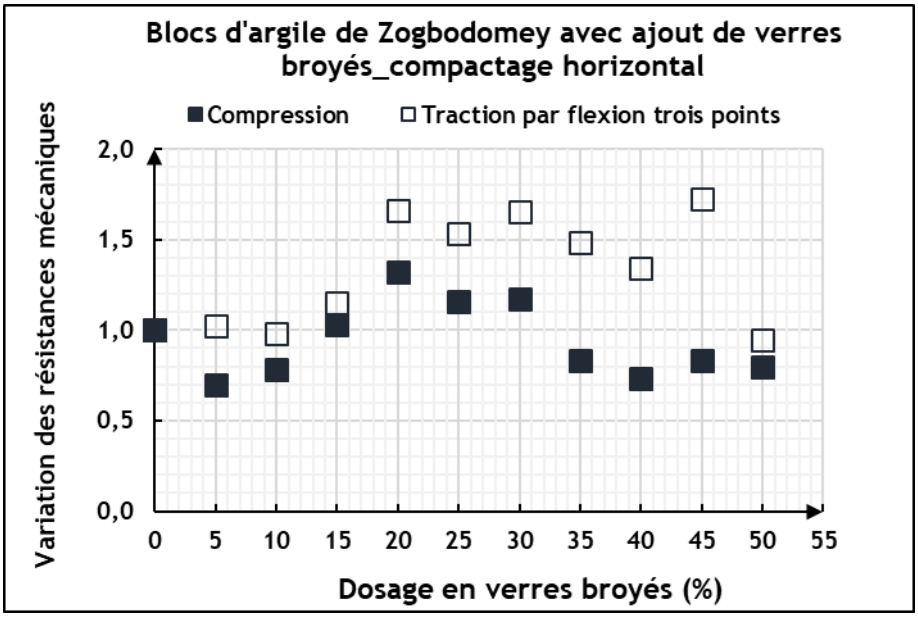



Figure 3.103 : Influence du dosage en verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « AV » d'argile de Zogbodomey (compactage horizontal)

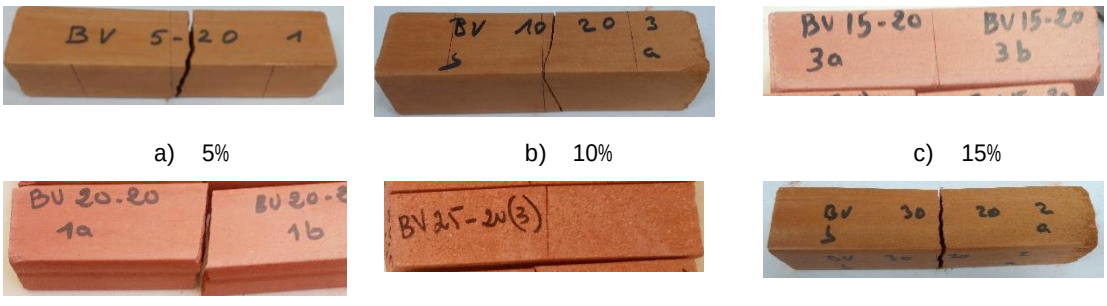
Nous nous sommes alors intéressés aux blocs incorporant des proportions variables en verres broyés de 5% à 30% avec un pas de 5% dans la suite des travaux. Ainsi, ces blocs ont été étudiés via le mode de compactage vertical, pour des teneurs en eau variables.

### 3.5.3.2. Compactage vertical

➢ Comportement à la cuisson des blocs « BV » avec ajout de verres broyés

La Figure 3.104 présente l'aspect des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de 5% à 30% de verres broyés, à différentes teneurs en eau.

On observe que les blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey présentent une belle couleur rouge brique uniforme et un contour régulier, avec une surface lisse.




a) 5% b) 10% c) 15%

d) 20 % e) 25% f) 30%

Figure 3.104 : Aspect visuel des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés

La Figure 3.105 présente le cœur de ces blocs après la rupture à la traction par flexion trois points.

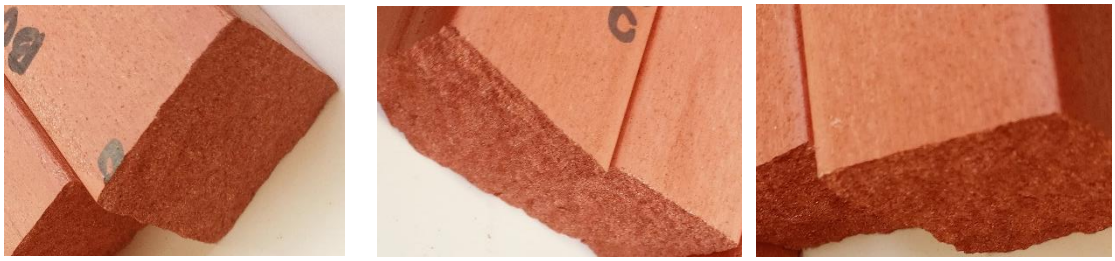


Figure 3.105 : Aspect du cœur des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés

A l'instar des blocs « AV », on note également au niveau des blocs « BV », l'absence d'un cœur noir. La cuisson des blocs est donc complète et il n'existe pas de défauts apparents de cuisson. En outre, l'aspect visuel des blocs « BV » est meilleur à celui des blocs « AV ». Les blocs « BV » paraissent plus compacts et plus rigides.

Dans la suite, les blocs « BV » de chaque dosage en verres broyés (de 0% à 30%), sont étudiés à la teneur en eau optimale, c'est-à-dire, la teneur en eau pour laquelle, la masse volumique est maximale.

➢ Action des verres broyés sur les pertes de masse des blocs « BV »

- Perte de masse de séchage

La Figure 3.106 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey ayant subis le compactage vertical.

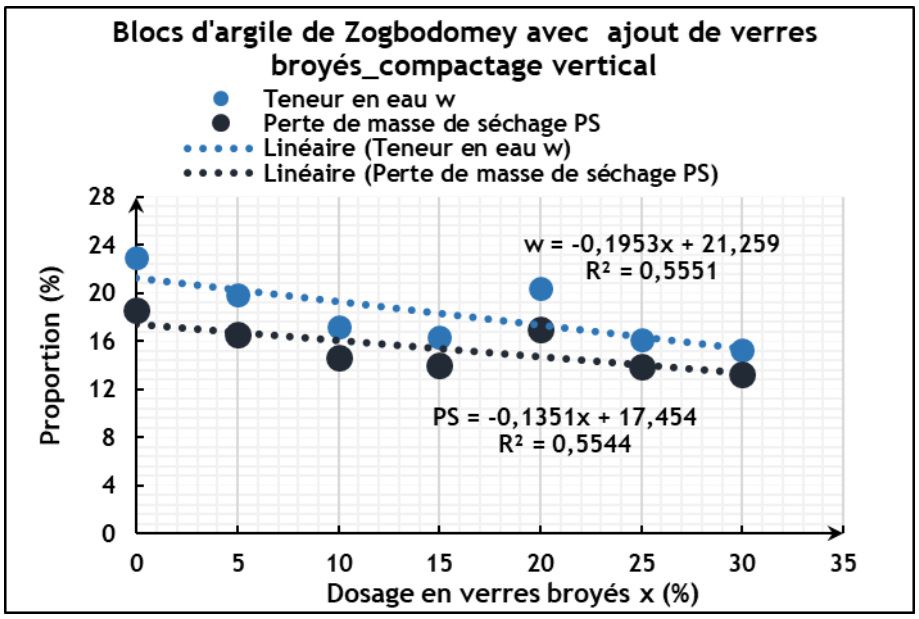



Figure 3.106 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte de masse de séchage des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical

On observe que, l'évolution de la perte de masse due au séchage des blocs est semblable à celle de la teneur en eau de confection des blocs ; la fin du séchage est

marquée par l'atteinte d'une limite d'évaporation de l'eau du bloc traduite par la relation :

**w-PS = -0,0602 x+3,805** 3.18

La pente de cette relation linéaire représente moins de 2% de la teneur en eau résiduelle des blocs à la fin du séchage (l'ordonnée à l'origine). Ainsi l'influence du dosage en verres broyés, sur la perte de masse de séchage des blocs ne serait pas marquée.

En outre, la teneur en eau résiduelle des blocs à la fin du séchage a une valeur moyenne constante de 4%, quel que soit le dosage en verres broyés ; d'où l'influence de la teneur en eau de confection des blocs sur leur perte de masse au séchage.

- Perte de masse de cuisson

La Figure 3.107 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey.

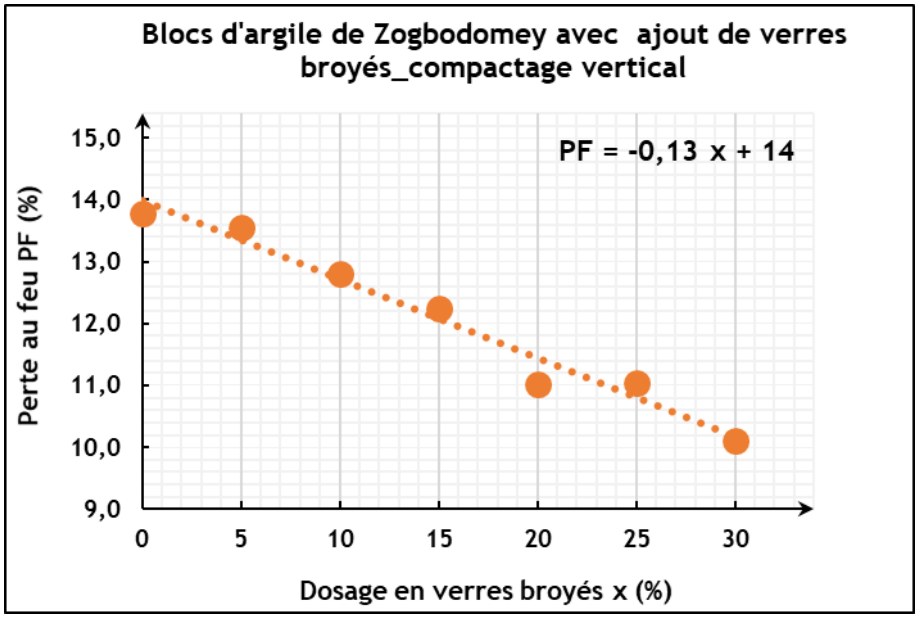



Figure 3.107 : Influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu (PF) des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical

On observe une diminution linéaire de la perte au feu des blocs (BV) avec l'incorporation des verres broyés. En effet, contrairement à l'argile, le verre ne renferme pas des matières organiques ni d'eau de constitution ; ce sont ces éléments qui subissent des transformations au cours de la cuisson et induisent la perte au feu des blocs. Par ailleurs, la cuisson des blocs s'effectue à la température maximale de 950°C, cette température est inférieure à la température de fusion du verre. Ainsi, les verres broyés se comporteraient comme des inertes et limiteraient les pertes consécutives à la cuisson des blocs.

La relation entre la perte au feu PF (%) des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey ayant subi le compactage vertical et le dosage x(%) en verres broyés est définie par l'équation linéaire :

**PF=-0,13 x +14**. 3.19

Or, la perte au feu des blocs « B » d'argile de Zogbodomey, sans ajout (0%) de verres broyés ($PF_{0\%}$) est égale à 14%, valeur peu différente de la pente de la relation linéaire aux erreurs expérimentales près.
De plus, l'ordonnée à l'origine de cette équation est égale à 100*PF ; PF étant exprimée en pourcentage (%).

La perte au feu des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de verres broyés ($\mathbf{PF_{x\%}}$), serait donc une fonction de la perte au feu des blocs sans ajout ($\mathbf{PF_{0\%}}$) et de la proportion x% de verres broyés dans le mélange.
Nous observons donc une évolution similaire, de la perte au feu des blocs « SPV » d'argile de Sèmè-Podji et des blocs « AV » et « BV » d'argile de Zogbodomey (compactage horizontal et vertical) en fonction du dosage en verres broyés.
En effet, aux erreurs expérimentales près, la pente de chaque courbe PF = f(x) vaut $\mathbf{PF_{0\%}}$ et l'ordonnée à l'origine $\mathbf{100*PF_{0\%}}$, quels que soient l'origine de l'argile et le mode de compactage des blocs.
Nous pouvons donc traduire l'influence du dosage en verres broyés sur la perte au feu des blocs d'argile cuits étudiée par la relation :

$$\mathbf{PF_{x\%}=(100-x)PF_{0\%}} \qquad 3.20$$

Où x désigne le pourcentage massique de verres broyés (%) et $PF_{0\%}$ la perte au feu des blocs d'argile cuits sans ajout de verre (%).
$PF_{0\%}$ varie en fonction de l'argile et du mode de compactage des blocs.

➢ Action des verres broyés sur les retraits des blocs « BV »

- Retrait de séchage

La Figure 3.108 présente l'évolution des retraits latéraux de séchage (dimensions b et h) des blocs en fonction du retrait suivant l'axe de compactage (longueur l) des blocs « BV » .
Elle montre que ce soit pour l'épaisseur ou la largeur, ces deux valeurs sont corrélées linéairement au retrait longitudinal. Les courbes largeur et épaisseur ont les mêmes équations aux erreurs expérimentales près.
Les coefficients directeurs n'étant pas de 1, ceci montre que mécaniquement la compression qui se fait suivant la longueur de l'échantillon fixe un axe de propriétés particulières vis-à-vis du séchage. Le même comportement a été observé au niveau des blocs « B » sans ajout, conformément à la Figure 3.20. Ainsi, l'incorporation des verres broyés à la matrice argileuse, n'entraînerait pas de modifications significatives au niveau du séchage des blocs. Ces résultats rejoignent les conclusions de Matteucci et al. [167] par rapport à l'incorporation de résidus de verre dans une masse céramique pour la fabrication de carreaux.

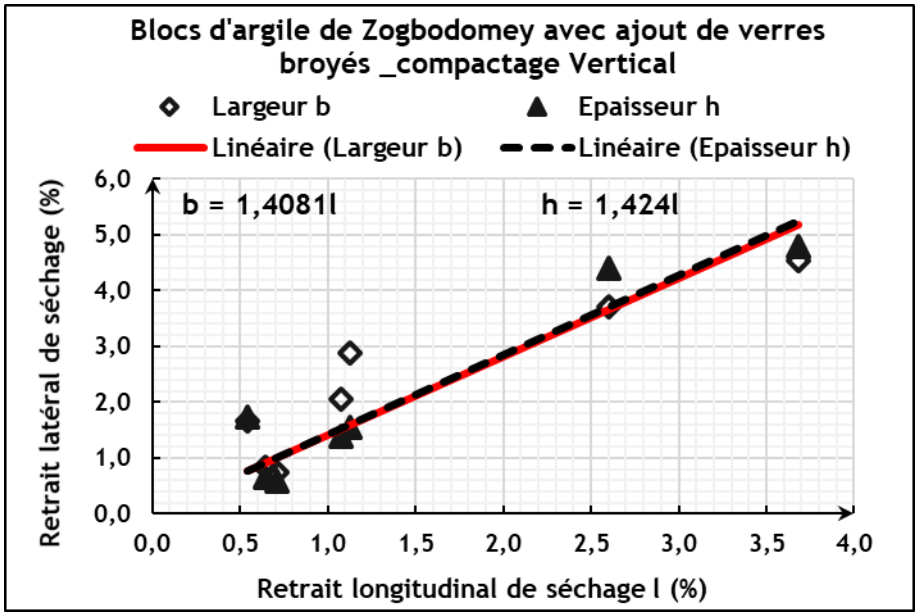



Figure 3.108 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de séchage des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical

- Retrait de cuisson

La Figure 3.109 présente le retrait moyen de cuisson des blocs de chaque formulation (dosage en verres broyés) en fonction de l'axe considéré.
On observe que le retrait moyen de cuisson des blocs est de 3%, quels que soient le dosage en verres broyés et l'axe du bloc considérée.

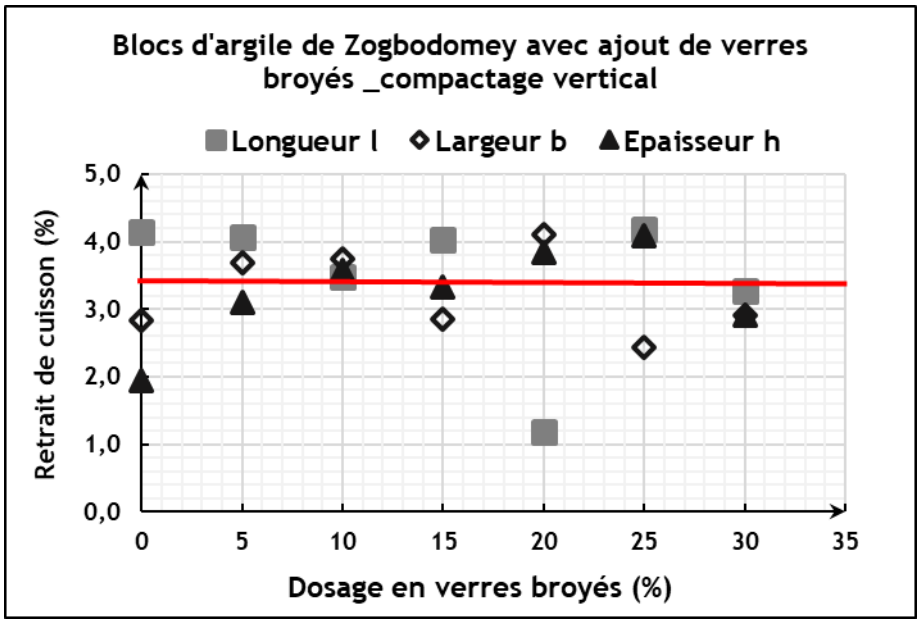



Figure 3.109 : Influence du dosage en verres broyés sur le retrait de cuisson des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey, compactage vertical

➢ Action des verres broyés sur la masse volumique des blocs « BV »

Le Tableau 3.12 présente les valeurs de la masse volumique des blocs « BV » en fonction du dosage en verres broyés et de la teneur en eau de confection.

Tableau 3.12 : Masses volumiques des blocs « BV » en fonction de la teneur en eau et du dosage en verres broyés

| Dosage en verres broyés x (%) | Teneur en eau w (%) | Masse volumique ρ ($g/cm^3$) | |
|---|---|---|---|
| 5 | 14 | 1,51 | ± 0,08 |
| | 15 | 1,39 | ± 0,00 |
| | 17 | 1,52 | ± 0,02 |
| | 20 | 1,66 | ± 0,02 |
| 10 | 13 | 1,46 | ± 0,01 |
| | 14 | 1,47 | ± 0,00 |
| | 15 | 1,50 | ± 0,00 |
| | 17 | 1,56 | ± 0,01 |
| 15 | 13 | 1,51 | ± 0,01 |
| | 14 | 1,56 | ± 0,01 |
| | 16 | 1,68 | ± 0,02 |
| 20 | 13 | 1,53 | ± 0,03 |
| | 15 | 1,66 | ± 0,06 |
| | 16 | 1,67 | ± 0,06 |
| | 20 | 1,78 | ±0,00 |
| | 21 | 1,89 | ± 0,14 |
| 25 | 12 | 1,78 | ± 0,00 |
| | 13 | 1,52 | ± 0,00 |
| | 14 | 1,74 | ± 0,04 |
| | 16 | 1,82 | ± 0,01 |
| | 20 | 1,81 | ± 0,04 |
| | 21 | 1,83 | ± 0,00 |
| 30 | 14 | 1,59 | ± 0,05 |
| | 15 | 1,71 | ± 0,03 |

L'étude des blocs « B » à 0% de verres broyés, avait montré un accroissement de la masse volumique de ces blocs, en fonction de la teneur en eau de confection et l'atteinte d'une proportion optimale d'eau (23%) pour laquelle, la masse volumique des blocs est maximale (Figure 3.22). Au regard du Tableau 3.12, on observe également un accroissement de la masse volumique de chaque formulation (dosage en verres broyés) de blocs « BV » en fonction de la teneur en eau de confection. Toutefois, l'intervalle de variation de la teneur,

ne permet pas d'atteindre la masse volumique maximale de ces blocs. Il faudrait donc effectuer des mesures complémentaires afin de définir à l'instar des blocs « B » et « BC », la teneur en eau optimale de confection des blocs « BV » correspondant à la masse volumique maximale.
Par ailleurs, pour une teneur en eau de 14%, la masse volumique des blocs « B » sans ajout vaut 1,47 ± 0,07 g/cm$^3$ (Figure 3.22). Ainsi, l'incorporation de 5% à 25% des verres broyés induirait un accroissement de la masse volumique des blocs (Tableau 3.12) et au-delà de 25%, la masse volumique baisse. En revanche, au niveau des blocs « AV », un accroissement de la masse volumique est observé pour un dosage en verres variant de 0% à 20% des verres broyés, et au-delà, la masse volumique est relativement constante. Ainsi, le dosage de 20% en verres broyés apparait comme le dosage optimal.

La masse volumique des blocs étant très sensible à la variation de la teneur en eau ; l'action des verres broyés sur la masse volumique des blocs d'argile cuits ne saurait être appréciée indépendamment de la teneur en eau de formulation. En conséquence, l'optimisation de la teneur en eau de formulation pour chaque dosage de verres broyés, favoriserait une analyse plus précise de l'influence du dosage en verres broyés sur les propriétés de ces blocs d'argile cuits.

- Action des verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « BV »

La Figure 3.110 présente les valeurs moyennes des résistances mécaniques obtenues à l'issue de la caractérisation de blocs « BV ».

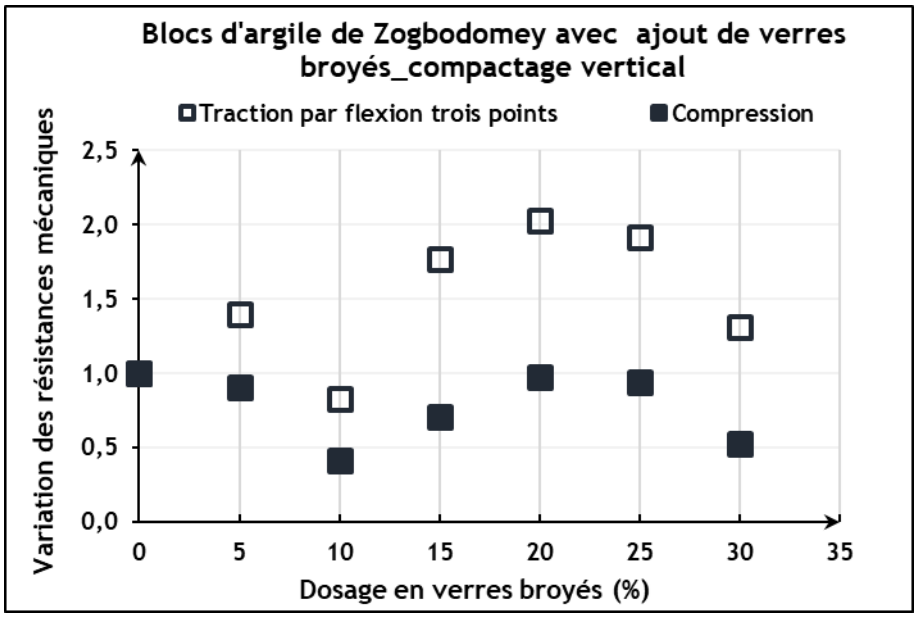



Figure 3.110 : Influence du dosage en verres broyés sur les résistances mécaniques des blocs « BV » d'argile de Zogbodomey (compactage vertical)

Les résultats permettent d'observer que les résistances mécaniques sont maximales tant à la traction par flexion trois points qu'à la compression, pour le dosage de 20% en verres broyés. Ainsi, la substitution de 20% de l'argile par les verres broyés, favorise un accroissement de résistance, de 100% à la traction par flexion trois points et une résistance

en compression sensiblement égale à celle des blocs sans ajout (0% de verres broyés), aux erreurs expérimentales près.
Le taux optimal de substitution de l'argile de Zogbodomey par des verres broyés est alors de 20%. Ce taux permet une nette amélioration de la résistance à la traction par flexion trois points et une résistance en compression satisfaisante, quel que soit le mode de compactage adopté.

### 3.5.4. Influence du mode de compactage

Les caractéristiques obtenues à l'issu de l'étude des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de verres broyés, par les modes de compactage horizontal et vertical, sont présentées dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.13 : Comparaison des formulations optimales de blocs d'argile de Zogbodomey avec ajout de verres broyés en fonction du compactage

| Dosage en verres broyés x (%) | Compactage horizontal « AV » | | | | Compactage vertical « BV » | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | w (%) | ρ (g/cm$^3$) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) | w (%) | ρ (g/cm$^3$) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) |
| 0 | 12 | 1,60 ± 0,06 | 1,8 ± 0,2 | 11,8 ± 1,5 | 23 | 1,69 ± 0,01 | 3,9 ± 0,6 | 44,1 ± 3,6 |
| 20 | 8 | 1,71 ± 0,06 | 3,0 ± 0,3 | 15,6 ± 2,3 | 20 | 1,78 ± 0,00 | 8,0 ± 0,0 | 42,9 ± 0,0 |

Les résultats montrent que :

- Quel que soit le mode de compactage adopté, la substitution de 20% de l'argile de Zogbodomey par des verres broyés, induit la diminution de la teneur en eau optimale de confection des blocs et l'augmentation de la masse volumique. Ainsi, la résistance à la traction par flexion trois points des blocs s'en trouve améliorée.
  Par ailleurs, Godinho et al. ont également montré l'accroissement de la résistance à la flexion avec l'incorporation de la poudre de verre, à une formulation argileuse utilisée pour la production de tuiles [170]. En effet, les études de Shutt et al. montrent que le verre pilé de bouteilles s'écoule et comble les pores au cours de la cuisson des produits [164]. Sa solidification durant le refroidissement justifie alors l'amélioration notable de la résistance à la traction par flexion observée.

- On enregistre également, un accroissement de la résistance à la compression des blocs « AV 20 » incorporant 20% de verres, comparée à celle des blocs « AV00 » sans ajout (0%). S'agissant des blocs « BV », on observe une petite baisse de la résistance à la compression des blocs « BV20 » incorporant 20% de verres, comparés aux blocs « BV00 » sans ajout (0%). Mais au regard des erreurs expérimentales de mesures, la résistance à la compression des blocs « BV20 » avoisine celle des blocs « BV00 ».
  Ainsi, quel que soit le mode de compactage des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, la substitution de 20% de cette argile par des verres broyés permet d'obtenir des produits cuits qui présentent une résistance à la compression comparable à celle des blocs sans ajout.

- En outre, les valeurs de résistances mécaniques obtenues tant à la traction par flexion trois qu'à la compression des blocs « BV», sont nettement supérieures à celle des blocs « AV », quel que soit le dosage en verres broyés.

### 3.5.5. **Comparaison de l'influence des verr**es broyés sur les argiles

Les blocs d'argile de Xeuilley élaborés avec différentes proportions de verres broyés se sont dégradés à la cuisson, ce qui n'a pas permis l'étude de leurs propriétés. Ainsi, la formulation optimale des blocs d'argile de Xeuilley, demeure celle des blocs sans ajout de verres broyés.

Le Tableau 3.14 résume les caractéristiques des formulations optimales des blocs d'argile cuits avec ajout de verres.

Tableau 3.14 : Formulations optimales des blocs d'argile cuits avec ajout de verres broyés, mode de compactage vertical

| Observations | Dosage en verres broyés x (%) | w (%) | ρ (g/cm$^3$) | $\sigma_{tf}$ (MPa) | $\sigma_{rc}$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| Argile de Xeuilley | 0 | 16 | 1,62 ± 0,03 | 14,4 ± 1,1 | 21,7 ± 4,5 |
| Argile de Sèmè-Podji | 20 | 16 | 1,85 ± 0,01 | 13,3 ± 0,1 | 42,4 ± 0,2 |
| Argile de Zogbodomey | 20 | 20 | 1,78 ± 0,00 | 8,0 ± 0,0 | 42,9 ± 0,0 |

Au regard de la caractérisation des blocs d'argile incorporant des proportions variables de verres broyés effectuée, le dosage de 20% en verres broyés ressort comme optimal pour les argiles du Bénin : Sèmè-Podji et Zogbodomey. L'argile de Zogbodomey a été élaboré selon deux modes de compactage ; le compactage vertical est le plus bénéfique.
On observe que la teneur en eau de confection des blocs « SPV20 » d'argile de Sèmè-Podji est inférieure à celle des blocs « BV20 » d'argile de Zogbodomey. En outre, les blocs « SPV20 » présentent la masse volumique et la résistance à la traction maximales. La résistance à la traction des produits serait donc fortement corrélée à la masse volumique, qui serait influencée par la teneur en eau de confection.
Par ailleurs les deux familles de blocs présentent les mêmes résistances mécaniques à la compression.
La substitution de 20% en masse de l'argile de Zogbodomey ou de Sèmè-Podji par des verres broyés, dans la formulation des briques cuites constitue donc une alternative fort louable qui permet de recycler les déchets de verre, de limiter la pression exercée sur la ressource argileuse, de faire une économie d'eau et d'obtenir des produits finis de qualité exceptionnelle.

## 3.6. Synthèse

À travers ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la formulation de blocs cuits à base de trois différentes argiles. L'influence de la teneur en eau, du dosage en cendres de bois, du dosage en verres broyés et du mode de compactage sur les propriétés des blocs d'argile cuits, ont été étudiées.

L'étude expérimentale effectuée montre une forte corrélation entre la perte de masse de séchage des différents blocs et leur teneur en eau de confection. La fin du séchage est marquée par l'atteinte d'une limite d'évaporation de l'eau. La perte au feu influence la masse volumique des blocs cuits.

Les blocs d'argile de Xeuilley ont présenté un mauvais comportement à la cuisson. La composition minéralogique de cette argile, notamment la présence des minéraux tels que la calcite et la dolomite en seraient la cause. Par ailleurs, les déformations des blocs sont aggravées avec l'ajout des verres broyés, ce qui n'a pas permis leur caractérisation. En outre, le dosage en cendres de bois de la France favorise une meilleure cuisson à cœur et limite les déformations. Les cendres de bois de la France joueraient alors un rôle de fondant dans la formulation des blocs d'argile cuits de Xeuilley. Cependant, les propriétés mécaniques des blocs ont diminué proportionnellement au taux de cendres incorporé. L'argile de Xeuilley ne peut pas être utilisée dans la fabrication des briques cuites.

La cuisson des blocs d'argile de Sèmè-Podji avec ou sans ajout de cendres de bois (du Bénin et de la France) s'est avérée incomplète au regard du programme de montée en température adopté.
Mais une amélioration de l'aspect du cœur des blocs cuits est observée avec l'incorporation des cendres de bois. Les cendres de bois diminuent le retrait des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji, ils ont donc un effet dégraissant. L'évolution des résistances mécaniques et du module de Young est corrélée à celle de la masse volumique, le dosage en cendres de 5% présente les résistances maximales à la traction par flexion trois points et les propriétés mécaniques optimales, quand l'on combine les trois paramètres (module de Young, résistance à la compression et résistance à la traction par flexion trois points). Mais les cendres de bois de la France sont plus avantageuses du point de vue de la résistance à la compression. La caractérisation de ces différentes cendres de bois permettrait une meilleure analyse. L'amélioration de l'aspect physique de ces blocs est indispensable en vue d'envisager toute application. Ainsi, des études complémentaires doivent être menées dans le but d'établir un programme de cuisson approprié.
Les verres broyés améliorent la cuisson des blocs d'argile de Sèmè-Podji aussi bien en surface qu'à cœur ; ils jouent alors un rôle de fondant. L'incorporation des verres dans le mélange favorise également la diminution de la perte au feu et du retrait (séchage et cuisson) des blocs. La masse volumique des blocs croit avec le dosage en verres broyés jusqu'au seuil maximal de 20% au-delà duquel, elle chute. L'évolution des résistances mécaniques est corrélée à celle de la masse volumique et le dosage de 20% de verres broyés présentent les résistances mécaniques optimales aussi bien à la traction par flexion trois points, qu'à la compression.
La valorisation de l'argile de Sèmè-Podji avec ajout de 20% de verres broyés dans la fabrication de briques cuites est bénéfique.

Les différents blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ou sans ajout présentent un bel aspect visuel (absences de déformations visuelles) et une cuisson complète. La masse volumique des blocs cuits varie en fonction de la teneur en eau de confection et admet un optimum. Ces observations justifient la nécessité d'optimiser la teneur en eau de confection des blocs. Le compactage vertical nécessite une proportion plus importante d'eau de confection que le compactage horizontal. La masse volumique des blocs est influencée par la perte au feu et les résistances mécaniques sont fortement corrélées à la masse volumique. Pour mettre en évidence l'influence des ajouts sur la masse volumique, il faudrait considérer pour chaque formulation la masse volumique maximale correspondant à la teneur en eau optimale de confection. Les résistances mécaniques des blocs ayant subis le compactage vertical sont nettement supérieures à celles des blocs ayant subis le compactage horizontal.
L'incorporation de 5% et 10% de cendres de bois du Bénin, n'influence pas la teneur en eau optimale de confection des blocs ayant subis le compactage vertical ; elle reste constante et égale à celle des blocs sans ajout, soit 23%. Pour cette teneur en eau optimale, la masse volumique des blocs cuits diminue avec le dosage en cendres de bois. Les retraits latéraux de séchage de ces blocs sont proportionnels au retrait suivant l'axe de compactage (retrait longitudinal).
La perte au feu des blocs d'argile de Zogbodomey incorporant des verres broyés est proportionnelle à celle des blocs sans ajout et au dosage en verres. Elle diminue avec l'augmentation de la proportion de verres et il s'en suit une augmentation de la masse volumique des blocs cuits.
Quel que soit le mode de compactage des blocs d'argile de Zogbodomey,

- un dosage de 5% en cendres de bois et de 20% en verres broyés favorisent un gain de résistance à la traction par flexion trois points ;
- la résistance à la traction par flexion trois points des blocs incorporant 20% de verres broyés vaut environ le double de celle des blocs à 5% de cendres.

Les deux argiles du Bénin (Sèmè-Podji et Zogbodomey) présentent un dosage optimal de 5% en cendres de bois et de 20% en verres broyés. La teneur en eau de confection de ces formulations de blocs d'argile de Sèmè-Podji est inférieure à celles des blocs de Zogbodomey. De même, la masse volumique et la résistance à la traction par flexion trois points des blocs d'argile de Sèmè-Podji sont supérieures à celles des blocs de Zogbodomey. Pour le dosage de 20% de verres broyés, les deux argiles présentent relativement les même résistances en compression mais la résistance à la compression des blocs de Zogbodomey à 5% de cendres sont supérieures à celle de Sèmè-Podji.

La valorisation des cendres de bois et des verres broyés dans la formulation des blocs d'argile cuits du Bénin, est donc bénéfique. La maitrise du procédé d'élaboration de ces matériaux, conditionne donc les performances des produits développés notamment, la masse volumique et les résistances mécaniques.

Il est donc opportun de s'intéresser également aux propriétés thermophysiques des matériaux ainsi développés. La connaissance de ces propriétés permettrait d'apprécier l'influence de la mise en œuvre de ces matériaux dans l'enveloppe du bâtiment, sur le maintien d'une ambiance thermique convenable, sans un recours à des sources mécaniques énergivores.

# CHAPITRE 4 ▪ Étude Thermique.

## Sommaire

4.1. Introduction ..... 179
4.2. Méthodes de caractérisation thermophysique des blocs d'argile cuits ..... 180
4.3. Propriétés thermophysiques des blocs d'argile cuits sans ajout ..... 192
4.4. Influence des cendres de bois sur les propriétés des blocs d'argile cuits . 195
4.5. Influence des verres broyés sur les propriétés des blocs d'argile cuits .... 202
4.6. Comportement thermique d'une paroi opaque verticale d'un bâtiment . 209
4.7. Synthèse ..... 213

## 4.1. Introduction

Les bâtiments constituent un facteur clé de la demande énergétique et les développements au sein du secteur tels que l'utilisation croissante des climatiseurs, ont un impact important sur les tendances énergétiques et environnementales, au niveau mondial [220]. Le monde scientifique s'est alors assigné comme mission, la recherche effrénée d'alternatives économes et éco-respectueuses. Ainsi, l'élaboration de blocs d'argile cuits intégrant différentes matières premières secondaires tels que les cendres de bois ou les résidus de verres (verres broyés), a été envisagée. Il est souhaitable que les nouveaux matériaux satisfassent aux exigences de tenue mécanique compte tenu de leur destination, sans compromettre la consommation énergétique du bâtiment tout au long de son cycle de vie.

Des propriétés thermophysiques des matériaux mis en œuvre dans l'enveloppe du bâtiment, vont dépendre, l'ambiance intérieure et la demande énergétique du bâtiment. Il s'agit fondamentalement de la conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda}$ et de la capacité thermique massique c. La connaissance de ces deux paramètres $\boldsymbol{\lambda}$ et c permet de faire différentes simulations afin d'apprécier et ou d'améliorer la performance énergétique du bâtiment.

Différentes méthodes ont donc été développées pour accéder aux propriétés thermophysiques des matériaux de construction. Ces méthodes peuvent être classées selon trois critères [83]: le type de régime thermique, le type de mesure, la géométrie de l'appareillage et des éprouvettes [221], [222]. Mais, la classification la plus naturelle consiste à considérer, le type de régime thermique variable ou permanent [83].

Dans ce chapitre, nous étudions en prime abord, la capacité thermique massique c et la conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda}$ des blocs d'argile cuits de Zogbodomey incorporant des cendres de bois ou des verres broyés suivant une méthode en régime variable. Nous mesurons ensuite, la conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda}$ des blocs cuits des trois argiles étudiées (Xeuilley, Sèmè-Podji et Zogbodomey), par la méthode du régime permanent. Enfin, nous évaluons le déphasage thermique et l'amortissement thermique d'une paroi de bâtiment constitué des blocs d'argile cuits élaborés, en fonction de l'épaisseur de la paroi considérée. Ces paramètres traduisent le comportement thermique de la paroi face aux sollicitations thermiques, et par conséquent, l'influence probable sur la demande énergétique pour une ambiance thermique convenable à l'intérieur du bâtiment.

## 4.2. Méthodes de caractérisation thermophysique des blocs d'argile cuits

La détermination de la conductivité thermique λ des blocs d'argile cuits étudiés s'est faite suivant :

- la méthode en géométrie plane et régime variable, qui permet de déduire **λ** à la suite de la détermination de deux paramètres tels que l'effusivité thermique **E** et la capacité thermique volumique **ρc** ; cette méthode est indirecte ;
- la méthode en géométrie cylindrique et régime permanent, qui permet de mesurer uniquement la conductivité thermique **λ**, cette méthode est directe.

### 4.2.1. Méthode de mesure en régime variable

Les méthodes de mesure en régime variable permettent l'identification de plusieurs paramètres : conductivité, diffusivité, effusivité ou d'autres groupements de λ et ρc [83].
De ce fait, elles sont les plus utilisées actuellement. Toutes ces méthodes consistent à appliquer sur un échantillon initialement à l'équilibre thermique, une perturbation thermique et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps. Ce qui différencie les différentes méthodes, ce sont : le type de perturbation, le type de mesure, la géométrie du système déterminée par la perturbation. Il est alors possible de classer les méthodes de mesure en régime variable selon ces trois critères. La mise sur le marché de caméras infrarouges performantes ainsi que des logiciels d'identification de paramètres a permis le développement de nouvelles techniques utilisant un grand nombre de points de mesure de températures. Ces techniques sont néanmoins, dans l'esprit, comparables à celles utilisant deux mesures de températures [83].
Par ailleurs, la méthode du plan chaud à deux mesures de températures a été développée au Bénin, par Osséni [79] dans le cadre de ses travaux de thèse de doctorat. Dans la littérature, cette méthode a été mise au point spécialement pour mesurer les propriétés thermiques de matériaux de construction « lourds » dont la conductivité thermique est comprise entre 0,2 et 5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [223]. Étant donné qu'il peut être difficile dans certains cas d'obtenir deux échantillons de même composition et de même teneur en eau, un montage asymétrique à un seul échantillon a été retenu [79], [223]–[226]. Cette méthode est donc adaptée pour les briques de terre cuite. En outre, elle a été utilisée avec succès par Bal [77] pour la caractérisation thermique de briques de terre compactée avec ajout de différentes proportions d'un isolant naturel pour des valeurs de conductivité thermique allant de 0,3 à 3,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ et de capacité thermique volumique variant entre 106 et $2{,}4.10^{6}$ $J.m^{-3}.K^{-1}$ [223]. Ainsi, compte tenu de la facilité de mise en œuvre du dispositif, des hypothèses faciles à vérifier et de la fiabilité des mesures prouvées, nous l'utiliserons au Bénin pour la détermination de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey.

#### 4.2.1.1. Principe de la méthode

La chaîne de mesures thermiques basée sur la méthode du plan chaud à deux mesures de températures mise en place au LEMA (UAC/EPAC/Bénin) permet de déterminer certaines propriétés thermophysiques tels que l'effusivité et la capacité thermique volumique puis d'en déduire la conductivité thermique.
En outre, il faut vérifier une condition sur l'épaisseur de l'échantillon, qui est fonction de la résistance de contact.

Le principe de la méthode est d'estimer les valeurs des paramètres E et ρc qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre la courbe expérimentale et la courbe calculée.
On modélise le système en faisant l'hypothèse que le transfert de chaleur reste 1D au centre du dispositif pendant la durée de la mesure.
La transformation de Laplace inverse montre que l'effusivité thermique **E** de l'échantillon, peut être estimée à partir de la pente **α** de la partie linéaire de la courbe **$T(t)=f(\sqrt{t})$** et de **$E_i$** **l'**effusivité thermique de l'isolant, par la relation :

$$E=\frac{\varphi_0}{\alpha\sqrt{\pi}}-E_i \qquad 4.1$$

Par ailleurs, aux temps plus longs, l'hypothèse d'un régime semi-stationnaire permet d'écrire :

$$\varphi=[\rho ce+(\rho ce)_i+(\rho ce)_s]\frac{dT}{dt} \qquad 4.2$$

Lorsqu'on désigne par **β** la pente de la partie linéaire de la courbe **$T(t)=f(t)$**, la capacité thermique volumique de l'échantillon, est estimée aux temps très longs en régime semi permanent par la relation :

$$\rho c=\frac{\varphi_0}{\beta}-(\rho ce)_i+(\rho ce)_s \qquad 4.3$$

Avec :
**$\varphi_0$** la densité de flux de chaleur sur la face chauffée en **$W/m^2$** ;
**ρc** la capacité thermique volumique de l'échantillon ;
**e** **l'**épaisseur de l'échantillon en **m** ;
$(\rho ce)_i$ les paramètres de l'isolant ;
$(\rho ce)_s$ les paramètres de la sonde.

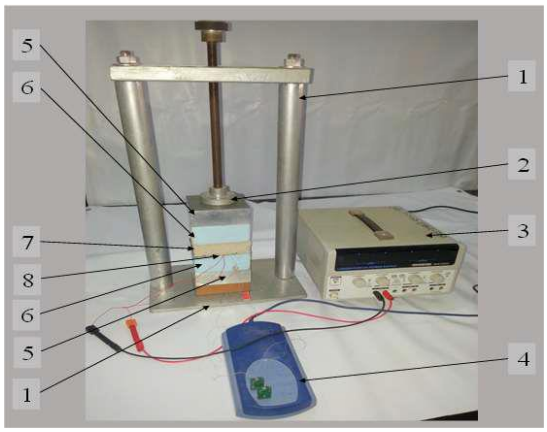
La connaissance de l'effusivité thermique **E** et de la capacité thermique volumique **ρc** permet de déduire :

- la capacité thermique massique **c** et
- la conductivité thermique **λ** par la relation :

$$E=\sqrt{\lambda\rho c} \Rightarrow \lambda=\frac{E^2}{\rho c} \qquad 4.4$$

#### 4.2.1.2. Descriptif technique

La chaine de mesures thermiques se compose du dispositif de type plan chaud asymétrique qui est relié à une alimentation stabilisée « GPS 3303 » de puissance 90 W et couplée à une centrale d'acquisition (PICOLOG TC08), permettant l'acquisition des températures et leur stockage sur un ordinateur. Le dispositif est constitué d'un bâti qui sert d'ossature-guide formant la potence, de deux blocs d'aluminium, de deux blocs d'isolant en polystyrène entre lesquels sont disposés l'échantillon à caractériser et la résistance chauffante plane de faible épaisseur sur laquelle est fixé un thermocouple de type K (Chromel-Alumel). L'ensemble est ajusté entre la mâchoire mue par serrage à l'aide d'une longue vis et l'embase de la potence servant de support au bloc inférieur en aluminium.
La Figure 4.1 présente un schéma du dispositif.




1 Potence
2 Dispositif de serrage
3 Alimentation stabilisée (ALR 3003, P=90W)
4 Enregistreur de température
5 Deux (02) blocs d'aluminium à température constante
6 Isolants : deux (02) blocs de polystyrène
7 Échantillon à caractériser
8 Résistance chauffante plane de faible épaisseur ($3 \times 10^{-4}$ m) sur laquelle est fixé un thermocouple de type K (Chromel-Alumel)

Figure 4.1 : Dispositif du plan chaud asymétrique

Un élément chauffant plan de faible épaisseur et de surface S = 10 x 10 $cm^2$ (même surface que l'échantillon) est placé entre la face inférieure de l'échantillon à caractériser et un premier bloc de polystyrène. Un thermocouple constitué de deux fils de diamètres inférieur ou égal à 0,05 mm est collé sur la face de l'élément en contact avec le polystyrène. La face supérieure de l'échantillon est en contact avec un second bloc de polystyrène. Les faces extérieures des deux blocs de polystyrène sont maintenues à la température ambiante par contact avec des blocs d'aluminium massifs.
Deux thermocouples ont été placés sur les deux blocs d'aluminium pour enregistrer l'évolution de leurs températures. Les deux thermocouples de type K (Chromel-Alumel), l'un fixé au centre de la face non chauffée et l'autre à la résistance chauffante, permettent de transférer l'information à l'enregistreur de température. Le thermocouple placé sur la face non chauffée de l'échantillon, entre l'isolant du haut et l'échantillon permet de mesurer la température et d'apprécier le moment où on observe l'apparition du flux de chaleur sur cette face. L'exploitation de cette température permettra d'améliorer la précision d'estimation de la conductivité thermique sur une durée plus courte.
La Figure 4.2 montre la position des thermocouples au sein du dispositif de mesures.

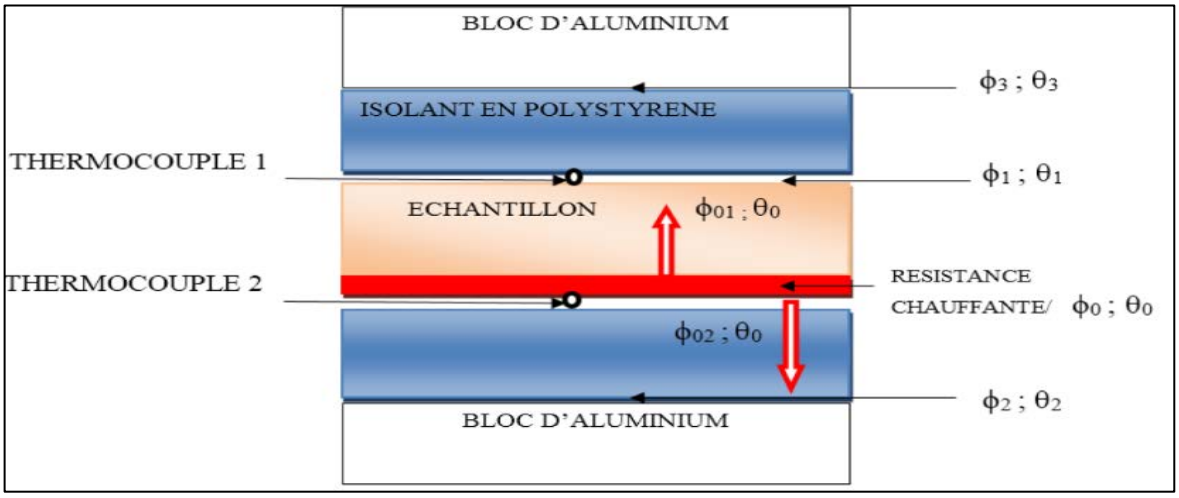



Figure 4.2 : Schéma équivalent du dispositif à plaque chauffante asymétrique en montage en face arrière isolée [79], [223].

Les propriétés thermiques des blocs isolants (polystyrène) avaient été mesurées par le calorimètre « µdSc3 de Setaram ». La précision relative de ces deux méthodes a été estimée à 2%. Les paramètres thermiques des blocs d'aluminium utilisés étaient tirés du tableau d'Edward [77]. Les résistances de contact aux interfaces respectives : résistance chauffante/polystyrène et échantillon/polystyrène, ont été négligées du fait du contact avec un isolant flexible. L'épaisseur de la résistance chauffante est très faible par rapport à celle de l'échantillon. Suivant la configuration du dispositif, le gradient de température dans l'épaisseur de la résistance chauffante peut donc être négligé c'est-à-dire que la température y est uniforme.

Les caractéristiques des composants de l'appareil sont répertoriées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des composants de l'appareil

| Composants | Section | Épaisseur | Conductivité thermique | Capacité thermique volumique |
|---|---|---|---|---|
| | $S\ (m^2)$ | e (m) | $\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$ | $\rho c\ (J.m^{-3}.K^{-1})$ |
| Blocs isolants en polystyrène | 0,10 x 0,10 | 0,05 | 0,032 | $4,8\ x10^4$ |
| Blocs d'aluminium | 0,10 x 0,10 | 0,04 | 226 | $248\ x\ 10^4$ |
| Résistance chauffante | Section | Épaisseur | Résistance électrique | |
| | $S(m^2)$ | e(m) | R(Ω) | |
| | 0,0105 | $3\ x\ 10^{-4}$ | 41,3 | |

4.2.1.3. Procédure de mesure

Étalonnage du dispositif

L'étalonnage du dispositif de mesures réalisé au cours des travaux de Osséni [79] a consisté en trois expériences successives.

- ✓ Un échantillon de PVC a été étudié. Sa capacité thermique massique a été mesurée au moyen d'un calorimètre « Setaram µdsc3 ». Les résultats obtenus combinés à la masse volumique de l'échantillon permettent d'obtenir pour la capacité calorifique volumique, la valeur $\rho c = 1,42\ x\ 10^6\ J.m^{-3}.K^{-1}$. D'autre part, la conductivité thermique λ de l'échantillon de PVC déterminée par la méthode flash vaut $0,19\ W.m^{-1}.K^{-1}$ .
- ✓ Deux échantillons de polystyrène extrudé (isolants) ont été également étudiés. La capacité thermique massique de ces échantillons mesurée à l'aide du calorimètre « Setaram µdsc3 » combinée à leur masse volumique, permet d'obtenir $\rho_i c_i = 48000\ J.m^{-3}.K^{-1}$ pour la capacité calorifique volumique et la conductivité thermique λ mesurée par la méthode du plan chaud centré a pour valeur $\lambda_i = 0,032\ W.m^{-1}.K^{-1}$.

En outre, la validation du dispositif expérimental a également été effectuée par la caractérisation thermique d'un échantillon de mortier sec. Les dimensions de l'échantillon sont de $10,1\ x\ 10,2\ x\ 3,15\ cm^3$ et sa masse volumique apparente $\rho = 1600\ kg.m^{-3}$. La capacité thermique massique de ce matériau, mesurée avec le calorimètre « Setaram µdSc3 » est

c = 758 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ à 25°C, ce qui conduit à une valeur de la capacité thermique volumique ρc = 1,213 x $10^6$ $J.m^{-3}.K^{-1}$ [79].
Le Tableau 4.2 donne les résultats d'estimation des paramètres en utilisant la méthode du plan chaud à deux mesures de températures.

Tableau 4.2 : Valeurs moyennes des paramètres estimées et leurs écarts-types pour un échantillon de mortier sec par la méthode du plan chaud à une et deux températures (I = 0,33 A, $t_{max}$ = 250 s) [79]

| | |
|---|---|
| E ($J.s^{-1/2}.m^{-2}.K^{-1}$) | 1014 |
| Écart type (%) | 0,004 |
| ρc ($J.m^{-3}.K^{-1}$) | 1,234 x $10^6$ |
| λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | 0,832 |
| Écart type (%) | 0,008 |

La valeur estimée de ρc par la méthode avec la mesure de deux températures, celle de la face chauffée et celle de la face non chauffée de l'échantillon, diffère de moins de 2% de la valeur mesurée par calorimétrie DSC [79].

Mesures
Après avoir monté l'échantillon, nous isolons complètement le dispositif afin d'éviter les pertes latérales. Il est conseillé d'attendre au moins 10 minutes pour avoir une stabilisation de la température, c'est-à-dire atteindre le régime permanent au niveau de la face chauffée et de la face non chauffée avant le démarrage de l'essai.
Un échelon de flux est appliqué à l'élément chauffant et on enregistre l'évolution de la température T(t) du thermocouple.
L'enregistrement de température sera effectué de manière que, la portion de courbe où la température T est linéaire par rapport au temps t soit d'une longueur suffisante.
Un pas de temps de 0,1 s pour l'enregistrement de la température donne des résultats satisfaisants.
À partir des informations recueillies, le tracé des courbes expérimentales traduisant l'évolution de la température des deux faces de l'échantillon (face chauffée et celle non chauffée) en fonction du temps est alors effectué (Figure 4.3).

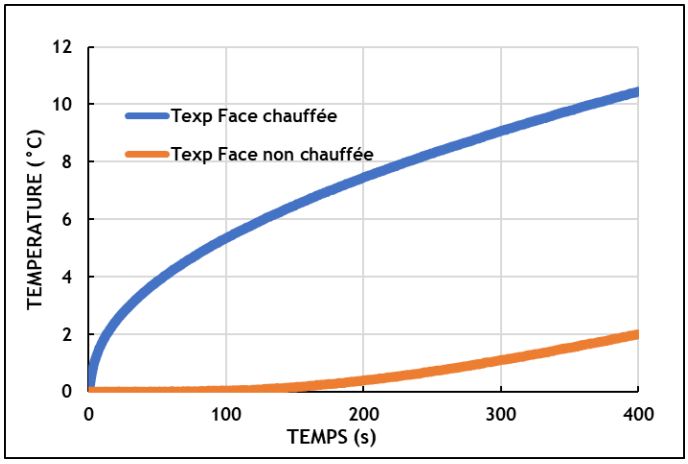



Figure 4.3 : Évolution de la température des deux faces de l'échantillon, par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures

Ces courbes sont ensuite comparées aux courbes théoriques correspondantes (Figure 4.4). Les valeurs initiales permettent le tracé des courbes théoriques en fonction du temps.

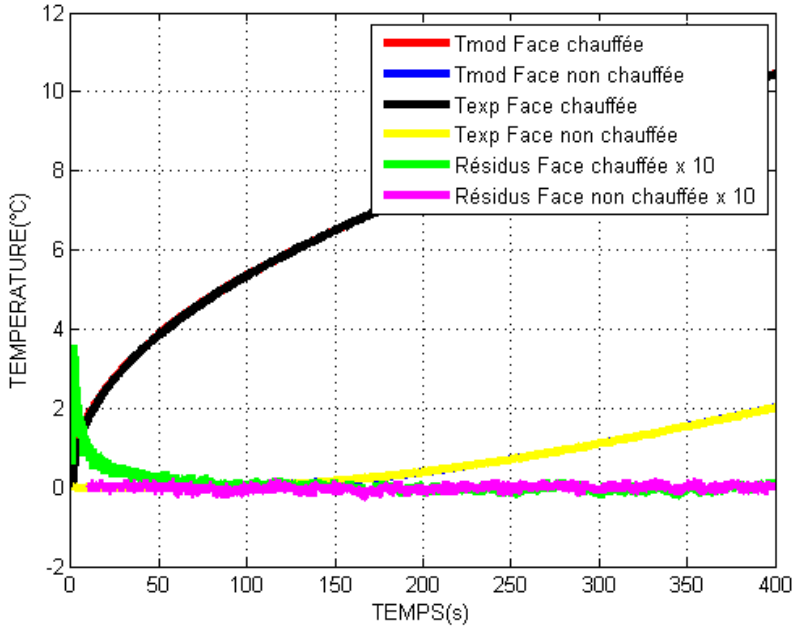



Figure 4.4 : Évolution des températures expérimentales et théoriques et des résidus en fonction du temps, par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures

La mesure est validée si :

- ✓ les courbes expérimentales (noire et jaune) et théoriques (rouge et bleu) coïncident ;
- ✓ les courbes des résidus des différentes faces sont plates et centrées sur zéro pendant le temps d'estimation.

La durée maximale d'estimation correspond à la zone où la courbe des résidus d'estimation est plate et centrée sur la valeur 0 ; la méthode des résidus étant la plus appropriée pour déterminer la durée précise des estimations [79]. Ainsi, conformément à la Figure 4.4, la préestimation des paramètres thermophysiques est faite sur un intervalle [0 s ; 400 s].

Au début de chaque essai, on effectue le choix d'une intensité de courant (I) qui permettra le chauffage de l'échantillon de manière à avoir une différence de température de 10°C ± 2°C au niveau de la face chauffée après le temps d'estimation.

À l'issu de plusieurs essais préliminaires effectués sur chaque type de blocs d'argile cuits, les paramètres d'estimation présentés au Tableau 4.3 sont retenus.

Tableau 4.3 : Paramètres d'initiation du programme de mesures théoriques

| Type de blocs | Intensité du courant I (A) | Résistance électrique R (Ω) | Effusivité E ($J.s^{-1/2}.m^{-2}.K^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| Bloc d'argile cuit sans ajout | 0,24-0,25 | 41,3 | 750-800-850 |
| Bloc d'argile cuit avec ajout des cendres de bois | 0,25 | 41,3 | 600-650 |
| Bloc d'argile cuit avec ajout des verres broyés | 0,28 | 41,3 | 750-800-850 |

L'intensité et la tension correspondantes ont été réglées à l'aide de l'alimentation stabilisée connectée à un multimètre nous permettant de lire directement les valeurs.
Un enregistrement d'une durée de l'ordre de 60 secondes après le début du chauffage permet de tracer la courbe $\mathbf{T(t)=f(\sqrt{t})}$ puis d'estimer avec une bonne précision l'effusivité thermique **E** de l'échantillon, à partir de la pente **α** de la partie linéaire de la courbe [224].

**Dimensions de l'échantillon**

En fonction du matériau en étude, il est nécessaire de déterminer l'épaisseur des échantillons permettant non seulement d'obtenir lors des mesures de température sur la face non chauffée, un signal suffisant pour une bonne estimation de **λ** ; mais aussi, d'estimer **E** avec la température de la face chauffée tout en respectant l'hypothèse du milieu semi-infini.

En effet, le temps mis par le flux de chaleur pour traverser l'échantillon est τ. Ainsi, la durée de chauffage nécessaire à une élévation de température d'environ 10°C, augmente avec l'épaisseur du matériau. Il en est de même pour l'intensité du courant de chauffage nécessaire pour obtenir la même variation de température de la face chauffée.
Dans ces travaux, Osséni a étudié l'influence des paramètres d'entrée du simulateur, tels que l'intensité du courant dans la résistance chauffante et le temps de chauffage pour des échantillons de latérite humide, plâtre et PVC qui sont représentatifs de la gamme des matériaux de construction [79].
Les résultats obtenus ont permis de classer les matériaux et d'avoir un repère pour le choix desdits paramètres. Pour un matériau isolant comme le PVC, l'estimation de l'effusivité thermique est possible déjà avec une épaisseur de 1 cm ce qui n'est pas le cas d'un matériau plus conducteur comme la latérite qui nécessite une épaisseur de 3 cm afin d'avoir un milieu semi-infini. Pour les matériaux (hétérogènes) comportant des inclusions, on veillera à ce que l'épaisseur de l'échantillon soit égale à plusieurs fois la taille de ces inclusions [79], [223], [225], [226]. En effet, il faut une épaisseur d'échantillon suffisante pour être représentative des hétérogénéités. Toutefois, une épaisseur trop grande, entraine une trop lente montée de la température en face arrière. Le signal correspondant à la température sur la face non chauffée sera donc trop faible et inexploitable. Pour les matériaux en étude dans cette thèse, les échantillons d'épaisseur 3 cm n'ont pas permis d'enregistrer l'élévation de température de la face non chauffée. L'étude de ces matériaux pour une épaisseur de 2 cm, permet d'observer cette variation sur un intervalle de temps d'environ 400 s. En outre, les travaux de Bal [77] ont montré que pour le plan chaud asymétrique, le cas le plus favorable correspond à celui où la résistance chauffante et l'échantillon ont la même surface [79]. C'est ce qui justifie les dimensions (10 x 10 x 2 $cm^3$) retenus pour les blocs destinés à la détermination des propriétés thermophysiques par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures dans cette étude.

La procédure de détermination des caractéristiques thermophysiques des blocs d'argile cuits étudiés, par la méthode décrite précédemment (plan chaud à deux mesures de température), est synthétisée à la Figure 4.5.

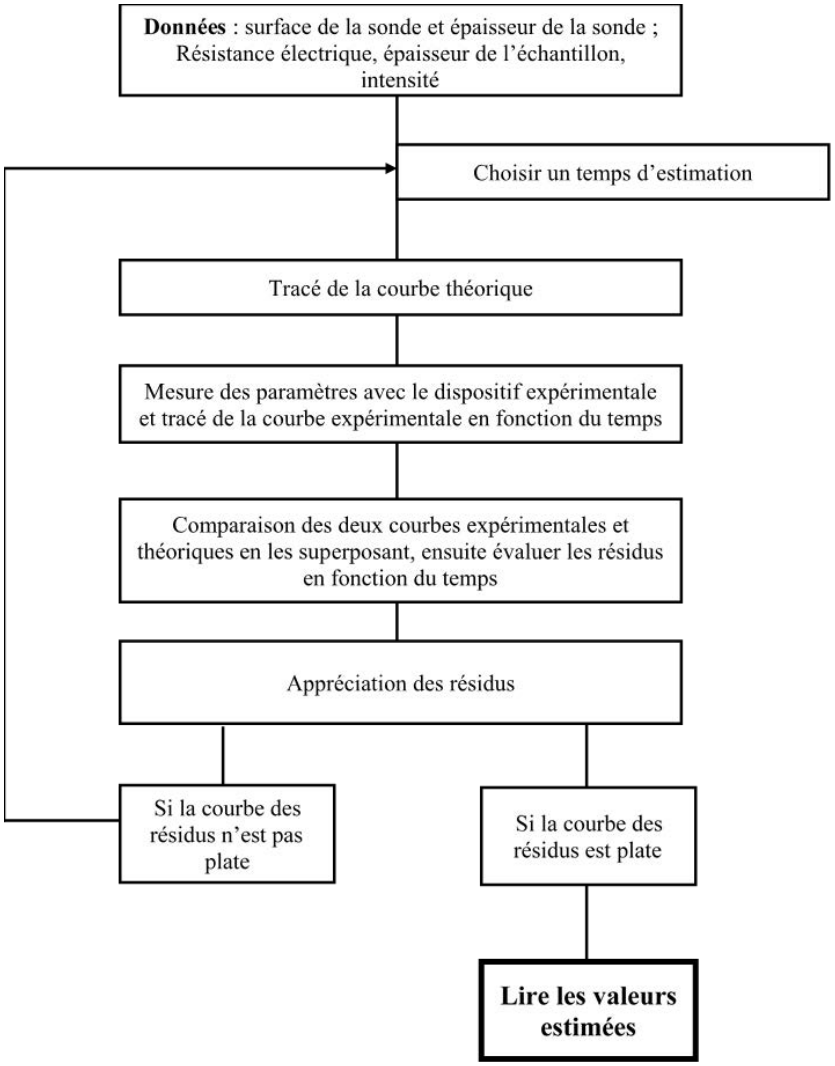



Figure 4.5 : Principe de mesure des caractéristiques thermiques par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures

Par ailleurs, il est toujours souhaitable de confronter plusieurs mesures du même paramètre avec deux méthodes différentes pour s'assurer de la cohérence des résultats [221]. Par conséquent, une étude comparative des valeurs de la conductivité thermique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey obtenues par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures au LEMA (Bénin), est effectuée par rapport à celles obtenues en régime permanent, par la méthode dite à flux radial (mesure en géométrique cylindrique), développée au LERMAB en France.

### 4.2.2. Méthode de mesure en régime permanent

Les méthodes de mesure en régime permanent permettent d'atteindre uniquement la conductivité thermique et se caractérisent par la mesure simultanée d'un flux de chaleur traversant l'échantillon et d'une différence de température qui permettent d'obtenir la résistance thermique de l'échantillon. La connaissance de la résistance thermique permet alors de déduire la conductivité thermique de l'échantillon.

Selon la géométrie de l'échantillon, on distingue la mesure en géométrie plane et la mesure en géométrie cylindrique.

La méthode dite à flux radial de mesure en géométrie cylindrique a été développée par les auteurs comme De Ponte et Klarsfeld [222] et plus récemment par Carlson [227]. Elle sera donc mise en place au LERMAB pour la caractérisation des blocs d'argile cuits.

#### 4.2.2.1. Principe de la méthode

On considère un cylindre creux de conductivité thermique $\lambda$, de rayon intérieur $r_0$, de rayon extérieur $r_1$, de longueur L, les températures des faces internes et externes étant respectivement $T_0$ et $T_1$ (Figure 4.6).

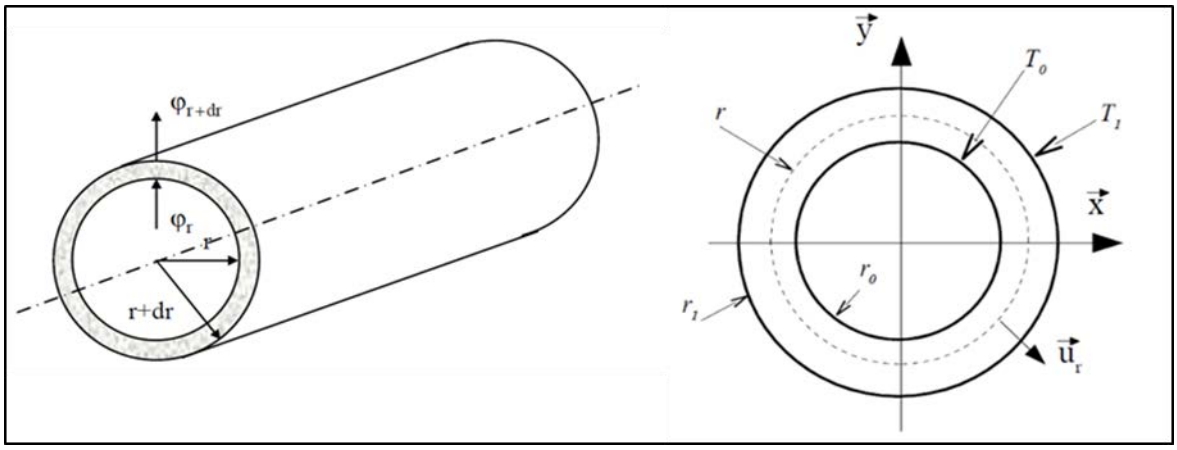



Figure 4.6 : Schéma des transferts dans un cylindre creux

On suppose que le gradient longitudinal de température est négligeable devant le gradient radial et qu'il n'existe pas de terme source.
Dans un système de coordonnées cylindriques conformément à la Figure 4.6, l'équation de la chaleur en régime stationnaire devient :

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} = 0 \qquad 4.5$$

Au vu de la géométrie, et en considérant le cylindre infini, le problème devient unidimensionnel : $T(r, \theta, x)=T(r)$ .

Mais dans la réalité, le cylindre n'est pas infini car $\frac{d}{r}<10$.

On supprime alors le flux axial en plaçant des isolants en polystyrène aux deux bords de l'échantillon. Ainsi, pour une raison de symétrie, lorsque l'on se place juste au milieu de la partie chauffée, le flux ne peut-être que radial. La mesure est donc effectuée dans le plan médian de l'échantillon.

L'équation 4.5 s'écrit alors :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)=0 \qquad 4.6$$

Sa résolution nous donne la température en fonction de $r$ :

$$\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{A}{r} \Rightarrow T(r)=A\ln r + B \qquad 4.7$$

A et B sont déterminés par les conditions aux limites du problème :

- $T(r_0)=T_0$ désigne la température de la paroi intérieure et
- $T(r_1)=T_1$ désigne la température de la paroi extérieure.

En intégrant les conditions aux limites dans l'équation 4.7, on a :

$$A=\frac{T_1-T_0}{\ln\frac{r_1}{r_0}} \qquad 4.8$$

$$B=T_0-A\ln r_0=T_0-\frac{T_1-T_0}{\ln\frac{r_1}{r_0}}\ln r_0 \qquad 4.9$$

Ce qui permet d'expliciter les constantes d'intégration et l'équation 4.7 devient :

$$T(r)=\frac{T_1-T_0}{\ln\frac{r_1}{r_0}}\ln\frac{r}{r_0}+T_0 \qquad 4.10$$

d'où :

$$\frac{T(r)-T_0}{T_1-T_0}=\frac{\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \qquad 4.11$$

Et par application de l'hypothèse de Fourrier, on a la relation $\varphi=-\lambda L 2\pi r\left(\frac{dT}{dr}\right)$ avec $L2\pi r = S$.

Ainsi, on obtient :

$$\varphi=\frac{2\pi\lambda L(T_0-T_1)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \qquad 4.12$$

Avec le terme $\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)/2\pi\lambda L$ qui désigne la résistance thermique R.

Par conséquent, connaissant le flux thermique $\varphi$ auquel est soumis le matériau dans la pratique, l'on détermine sa résistance thermique globale R entre le centre et la périphérie qui est égale à $\frac{T_0-T_1}{\varphi}$.

Ceci permet alors de déduire la conductivité thermique $\lambda$ par la relation :

$$\lambda=\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi RL} \qquad 4.13$$

avec le flux thermique $\varphi$ exprimé en Watts (W) et les dimensions de l'échantillon $r_0$ , $r_1$, $L$ exprimés en mètres (m).

#### 4.2.2.2. Descriptif technique

Le dispositif expérimental utilisé au LERMAB est illustré par la Figure 4.7 où est indiquée la position de chaque thermocouple.

Il se compose :

- d'une cartouche chauffante ACIM JOUANIM de 6,53 mm de diamètre et de puissance axiale uniformément répartie. Elle possède au milieu de son axe, un thermocouple K qui mesure la température au voisinage immédiat de sa paroi externe métallique. Sa

puissance nominale mesurée est de 15 W à 220 V lorsque sa température est de 85°C, température moyenne de nos essais.

- d'un tube de cuivre central (6,7 mm x 8 mm) entourant la cartouche et qui est ajusté au plus près de celle-ci au moyen d'un jeu fonctionnel de 1/10 mm. Pour parfaire le contact thermique, nous utilisons une graisse graphitée de conductivité thermique 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ce tube sert à parfaire l'homogénéité thermique de l'intérieur du cylindre.
- de thermocouples type K, chemisés de 0,5 mm de diamètre avec compensation de soudure froide. L'acquisition de données (températures) se fait par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition ALMEMO 2290-8 qui a été préalablement étalonnée.
- de la centrale Almemo qui permet la mesure simultanée de la tension et du courant de façon à synchroniser toutes les données par rapport au temps. La fréquence d'acquisition est 1 s. La durée d'acquisition est de 3 à 4 heures, temps au bout duquel le régime établi est obtenu avec nos échantillons.

La tension est ajustée par un autotransformateur, la tension la plus fréquemment utilisée est d'environ 105 V ce qui donne une puissance thermique totale dissipée entre 3 et 4 W [222].

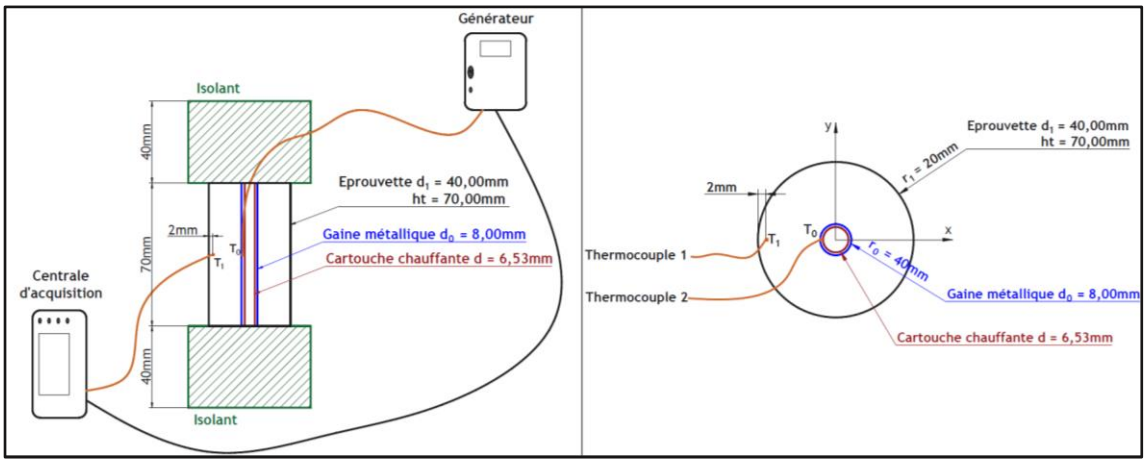



Figure 4.7 : Dispositif expérimental de mesures en géométrie cylindrique

### 4.2.2.3. Procédure de mesure

L'étalonnage du dispositif de mesures a été fait avec des échantillons de PVC. Ainsi, l'étude de l'influence de la géométrie (diamètre) des échantillons sur les mesures a été effectuée. Des échantillons de hauteur moyenne 8 cm et de diamètre 4 cm et 6 cm sont donc utilisés. De même, l'influence de la puissance transmise a été appréciée. La puissance moyenne a été variée de 1,10 W à 3,20 W. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Valeurs de conductivité thermique obtenues avec des échantillons de PVC

| Diamètre de l'échantillon (cm) | Hauteur de l'échantillon (cm) | Puissance transmise (W) | Masse volumique ($g/cm^3$) | Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 7 | 3,20 | 1,43 | 0,22<br>0,21<br>0,21 |
| 6 | 7 | 1,10 | 1,43 | 0,16 |
| | | 1,17 | 1,43 | 0,19 |
| | | 2,67 | 1,43 | 0,20 |
| | | 3,07 | 1,43 | 0,17 |

On observe que la mesure n'est ni influencée par le diamètre des échantillons, ni par la puissance transmise. La valeur moyenne de $\lambda = 0,19\ W.m^{-1}.K^{-1}$ est obtenue pour les étalons avec un écart moyen de 5%. La conductivité thermique du PVC le plus isolant s'approche de **$0,18\ W.m^{-1}.K^{-1}$** [228] ; ceci permet de valider le protocole d'essai.
Par ailleurs, il a fallu réaliser aussi, plusieurs échantillons tests avec l'argile pour la mise en place du protocole d'essai. Il s'est donc agi de l'étude de la géométrie convenable de l'échantillon qui permette d'obtenir des résultats suffisamment précis, tout en minimisant la quantité de matériau nécessaire à la confection d'un bloc.
L'argile de Xeuilley ne présente pas un intérêt pour l'étude thermique du fait du mauvais comportement à la cuisson des échantillons, quelle que soit la formulation. Cependant, cette argile est disponible sans grande dépense dans la carrière de la cimenterie VICAT non loin du LERMAB en France. En revanche, les argiles du Bénin ont été acheminées à coûts onéreux par avion en France, compte tenu des délais et de la fiabilité du service de livraison. Il était donc opportun de trouver un matériau de substitution pour la mise en place du protocole d'essais dans le but d'être rationnel. Ce qui justifie la caractérisation des blocs d'argile cuits de Xeuilley. Par ailleurs, seulement quelques blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji ont été réalisés, partant de la quantité de matériau disponible en France à l'issu des essais mécaniques effectués.

Les blocs d'argile cuits de Zogbodomey constituent l'objet principal de la présente étude. De ce fait, les données disponibles sur les argiles de Zogbodomey sont beaucoup plus importantes que celles des deux autres argiles : Xeuilley et Sèmè-Podji. Pour une formulation donnée, les mesures sont effectuées sur des échantillons qui diffèrent par leur teneur en eau de confection. Par ailleurs, l'étude physique et mécanique des blocs présentée dans le chapitre 3, a montré l'influence de la teneur en eau de confection des blocs sur la masse volumique apparente des produits cuits. Ainsi, la teneur en eau de confection des blocs ne sera pas un paramètre de cette étude thermique. Nos analyses seront plutôt axées sur la relation entre la masse volumique des blocs cuits et leurs propriétés et sur l'influence probable du dosage en ajout, sur les propriétés (capacité thermique massique et conductivité thermique) des blocs cuits.

## 4.3. Propriétés thermophysiques des **blocs d'argile cuits** sans ajout

### 4.3.1. Argile de Zogbodomey

#### 4.3.1.1. Capacité thermique massique c

Le Tableau 4.5 présente les valeurs de la capacité thermique massique obtenues pour les blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout.

Tableau 4.5 : Capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température

| Masse volumique ρ (g/cm$^3$) | Capacité thermique massique c (J.Kg$^{-1}$.K$^{-1}$) |
|---|---|
| 1,70 | 826 |
| 1,64 | 785 |
| 1,51 | 851 |
| 1,62 ± 0,07 | 820 ± 25 |

La valeur moyenne de 820 ± 25 J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$ est obtenue pour la capacité thermique massique de ces blocs cuits qui présentent une masse volumique moyenne de 1620 ± 70 kg/m$^3$. Cette valeur est en effet comparable à la valeur de 864 J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$ présentée par Sambou pour une brique de terre cuite de masse volumique égale à 1900 kg/m$^3$ [122]. Ainsi, la capacité thermique des blocs cuits varierait peu avec la masse volumique et serait également indépendante du type d'argile utilisée.

#### 4.3.1.2. Conductivité thermique **λ**

La conductivité thermique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey est déterminée par les deux méthodes d'étude présentées (4.2 Méthodes de caractérisation thermophysique des blocs d'argile cuits), contrairement aux autres argiles de Xeuilley et Sèmè-Podji qui sont étudiées uniquement par la méthode décrite au 4.2.2 Méthode de mesure en régime permanent.
Ainsi, la méthode du plan chaud à deux mesures de température est utilisée uniquement avec l'argile de Zogbodomey en géométrie plane. Ces blocs caractérisés au Bénin en géométrie plane, ont subi le compactage horizontal et sont alors désignés « A », tandis que les blocs étudiés en France en géométrie cylindrique sont désignés « B ».

- Méthode du plan chaud à deux mesures de température en géométrie plane

Le Tableau 4.6 présente les valeurs obtenues pour la conductivité thermique des blocs « A » d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, en fonction de leur masse volumique.

Tableau 4.6 : Conductivité thermique des blocs « A » d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température

| Masse volumique $\rho$ (g/cm$^3$) | Conductivité thermique $\lambda$ (W m$^{-1}$ K$^{-1}$) |
|---|---|
| 1,51 | 0,30 |
| 1,64 | 0,30 |
| 1,70 | 0,30 |
| 1,62 ± 0,07 | 0,30 ± 0,00 |

On observe que les blocs « A » d'argile cuits de Zogbodomey présentent une valeur moyenne de la conductivité thermique de 0,30 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$, pour une masse volumique moyenne de 1620 ± 70 kg/m$^3$.

- Méthode de mesure en régime permanent et en géométrie cylindrique

Le Tableau 4.7 présente l'évolution de la conductivité thermique des blocs « B » d'argile cuite de Zogbodomey sans ajout, en fonction de leur masse volumique.

Tableau 4.7 : Conductivité thermique des blocs « B » d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, obtenue par la méthode du flux radial

| Masse volumique $\rho$ (g/cm$^3$) | Conductivité thermique $\lambda$ (W m$^{-1}$ K$^{-1}$) |
|---|---|
| 1,36 | 0,31 |
| 1,38 | 0,22 |
| 1,45 | 0,23 |
| 1,50 | 0,33 |
| 1,57 | 0,31 |
| 1,45 ± 0,07 | 0,31 ± 0,07 |

On observe que les blocs « B » d'argile cuits de Zogbodomey présentent une valeur moyenne de la conductivité thermique de 0,31 ± 0,07 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$ pour une masse volumique moyenne de 1450 ± 70 kg/m$^3$.

4.3.1.3. Comparaison de la conductivité thermique obtenue par **les deux méthodes d'étude**

Les deux méthodes utilisées pour la détermination de la conductivité thermique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey (sans ajout) présentent des résultats comparables, bien que la masse volumique de ces blocs diffère. Par ailleurs, l'écart sur les valeurs mesurées par la méthode du flux radial est plus important que celui de la méthode du plan chaud à deux mesures de températures. L'intervalle de variation de la masse volumique des blocs étant un peu réduit, les différents résultats expérimentaux obtenus à la suite de la caractérisation des blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, ne permettent pas de conclure quant à l'influence de la masse volumique de ces blocs sur leur conductivité thermique. Ainsi, ces résultats combinés, permettent d'évaluer la conductivité thermique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey sans ajout, à une moyenne de 0,31 ± 0,05 $W.m^{-1}.K^{-1}$ lorsque la masse volume est comprise entre 1500 ± 100 $kg/m^3$.

## 4.3.2. Argile de Sèmè-Podji

Une seule mesure a été effectuée par la méthode du flux radial, sur une éprouvette cylindrique d'argile cuite de Sèmè-Podji. L'échantillon présentant une masse volumique de 1730 $kg/m^3$ a une conductivité thermique de 0,58 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

## 4.3.3. Argile de Xeuilley

Le Tableau 4.8 présente les valeurs mesurées de la conductivité thermique des blocs « E » d'argile cuite de Xeuilley, en fonction de la masse volumique

Tableau 4.8 : Conductivité thermique des blocs « E » d'argile cuits de Xeuilley obtenue par la méthode du flux radial

| Masse volumique ρ ($g/cm^3$) | Conductivité thermique λ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) |
|---|---|
| 1,58 | 0,93 |
| 1,59 | 0,59 |
| 1,74 | 0,31 |
| 1,75 | 0,31 |
| 1,77 | 0,68 |
| 1,68 ± 0,08 | 0,56 ± 0,20 |

Ces blocs présentent une conductivité thermique moyenne de **0,56 ± 0,20 $W.m^{-1}.K^{-1}$** pour une masse volumique moyenne de **1680 ± 80 $kg/m^3$** . Les résultats obtenus sont très dispersés et ne permettent pas d'établir un lien entre la conductivité thermique et la masse volumique de ces blocs d'argile cuits. En effet, l'argile de Xeuilley présente un mauvais comportement à la cuisson au regard des différents programmes adoptés. Une étude plus affinée de cette argile et de son comportement à la cuisson permettra de conclure quant à son intérêt pour une application en terre cuite. Des mesures complémentaires sont donc indispensables pour conclure.

## 4.4. Influence des cendres de bois sur les propriétés des blocs d'argile cuits

### 4.4.1. Argile de Zogbodomey

#### 4.4.1.1. Capacité thermique massique c

✓ Influence des cendres de bois sur la capacité thermique massique c

La Figure 4.8 présente l'influence du dosage en cendres de bois sur la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey.

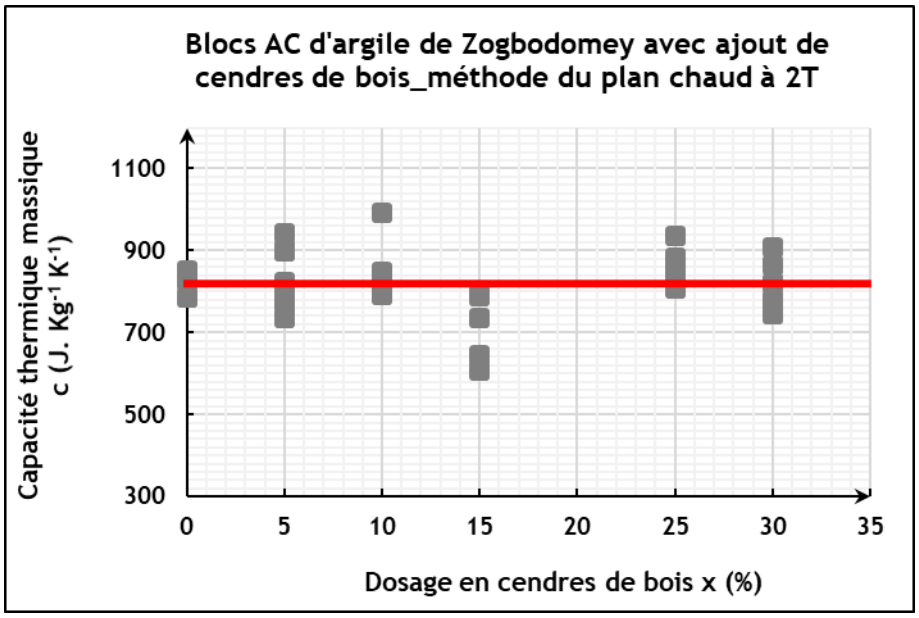



Figure 4.8 : Influence du dosage en cendres de bois sur la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey

Nous observons que l'influence du dosage en cendres de bois sur la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey n'est pas très marquée. En effet, ces blocs présentent une valeur moyenne de la capacité thermique massique égale à 820 ± 50 $J.kg^{-1}.K^{-1}$, quel que soit le dosage en cendres de bois. De plus, aux erreurs expérimentales près, la valeur moyenne obtenue pour les blocs incorporant des cendres de bois est équivalente à celle des blocs sans ajout qui vaut 820 ± 25 $J.kg^{-1}.K^{-1}$.
Ainsi, la substitution de l'argile de Zogbodomey par des cendres de bois dans la formulation des blocs cuits, serait sans effet sur la capacité thermique massique.

✓ Influence de la masse volumique sur la capacité thermique massique c

La Figure 4.9 présente la variation de la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois, en fonction de la masse volumique.

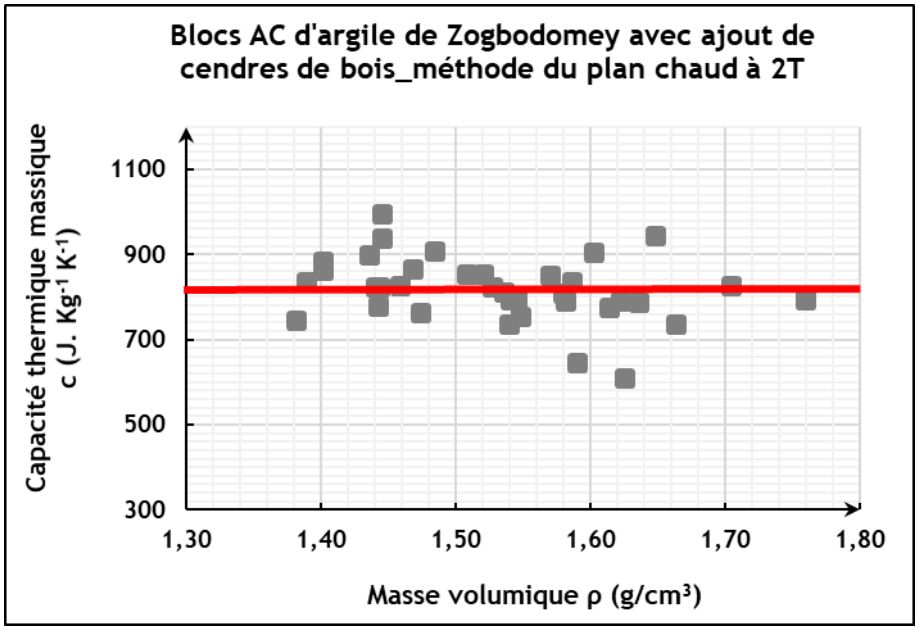



Figure 4.9 : Influence de la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois, sur la capacité thermique massique

Le comportement observé à la Figure 4.9 est semblable à celui de la Figure 4.8 où l'influence des cendres de bois sur la capacité thermique massique des blocs cuits n'est pas marquée. Ainsi donc, à l'instar des blocs d'argile de Zogbodomey sans ajout, la capacité thermique des blocs avec ajout de cendres varierait peu avec la masse volumique. Par ailleurs, Pompeo et Gueret [124] montrent que, pour une masse volumique ρ telle que : $1000\ kg/m^3 < \rho \leq 2400\ kg/m^3$, la capacité thermique de la terre cuite est égale à $1000\ J.kg^{-1}.K^{-1}$. Ces résultats montrent que la masse volumique des blocs influence peu la capacité thermique massique. En outre, la valeur moyenne de $820 \pm 50\ J.kg^{-1}.K^{-1}$ obtenue pour des blocs présentant une masse volumique moyenne de **$1500 \pm 100\ kg/m^3$** , est en effet comparable à la valeur de $864\ J.kg^{-1}.K^{-1}$ présentée par Sambou pour une brique de terre cuite de masse volumique égale à $1900\ kg/m^3$ [122]. Ainsi, la capacité thermique des blocs cuits varierait peu avec la masse volumique et serait également indépendante de la formulation des blocs cuits.

4.4.1.2. Conductivité thermique **λ**

- Méthode du plan chaud à deux mesures de températures en géométrie plane

  ✓ Influence des cendres de bois sur la masse volumique

  La Figure 4.10 présente l'influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey.

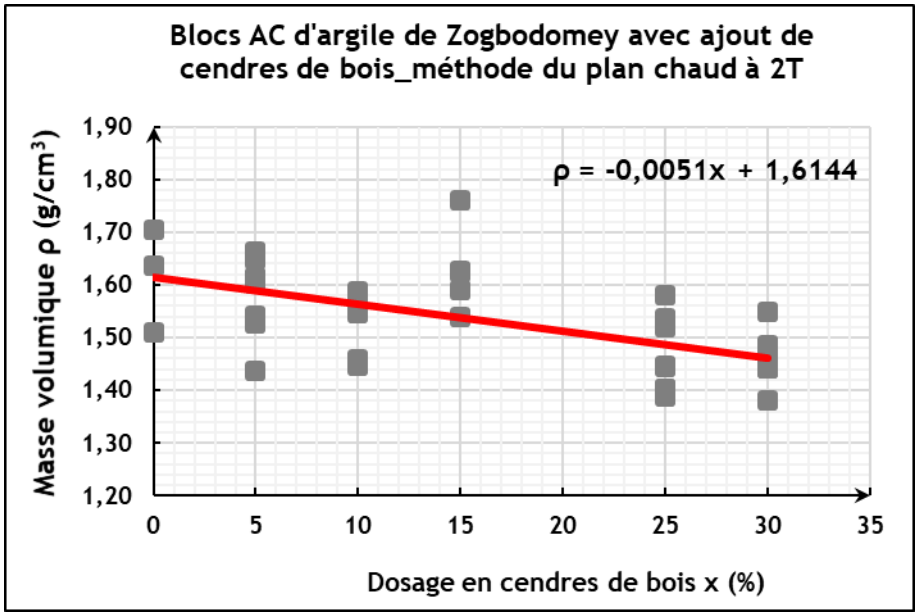



Figure 4.10 : Influence du dosage en cendres de bois sur la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey

L'influence des cendres sur la masse volumique des blocs cuits est traduite par une relation linéaire décroissante avec un coefficient de corrélation R = 0,5681 qui est significatif à une erreur contre 0 de 1/1000 (la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 99,999%).

Ainsi, l'incorporation de proportions croissantes de cendres de bois dans la formulation des blocs d'argile cuits, induirait une légère diminution, soit 0,3% de la masse volumique des blocs cuits.

Par ailleurs, au regard de l'erreur probable de 1/1000, la variation de 3/1000 peut être significative. Par conséquent, le dosage en cendres de bois pourrait donc influencer la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey. Ces résultats confirment d'ailleurs les conclusions du chapitre 3, où l'influence des cendres de bois sur la masse volumique des blocs cuits a été mis en exergue, pour une même teneur en eau de confection des blocs.

En effet, au regard des données du Tableau 2.1, on observe que la masse volumique apparente des cendres de bois étudiées, représente environ 44% de la masse volumique apparente de l'argile de Zogbodomey. De plus, les cendres de bois renferment trois fois plus de vides que l'argile de Zogbodomey (Tableau 2.2). Ainsi, la substitution d'une masse d'argile par la masse équivalente de cendres de bois, augmenterait la proportion de vides au sein du matériau et aurait pour conséquence, l'allègement des blocs cuits. Mais, l'influence des cendres de bois sur la masse volumique des blocs peut être inhibée par la variation de la teneur en eau de confection des blocs, du fait de la forte corrélation entre la teneur en eau de confection des blocs et la masse volumique des blocs cuits.

C'est ce qui pourrait donc expliquer la variation observée au regard des résultats ici présentés.

✓ Influence des cendres de bois sur la conductivité thermique

La Figure 4.11 présente l'influence du dosage en cendres de bois sur la conductivité thermique des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey.

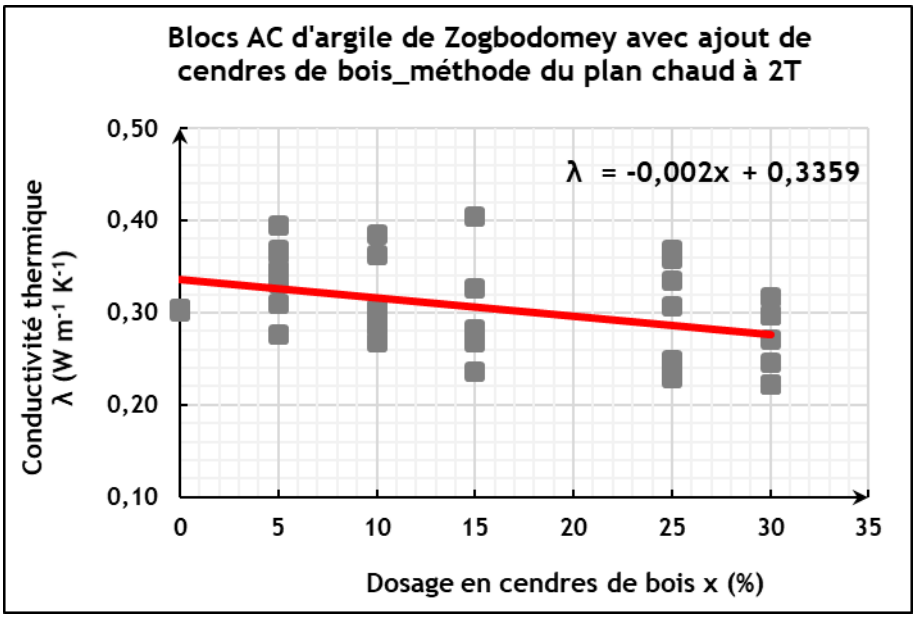



Figure 4.11 : Influence du dosage en cendres de bois sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey

L'influence des cendres sur la conductivité thermique des blocs est traduite par une relation linéaire décroissante avec un coefficient de corrélation R = 0,4170 qui est significatif à une erreur contre 0 de 5% (la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 95%). Le coefficient directeur de la droite vaut moins de 1% de la valeur moyenne. Ainsi, au regard de l'erreur probable d'environ 5% équivalente supérieure au coefficient d'accroissement, la valeur moyenne de **λ** = 0,30 ± 0,04 $W.m^{-1}.K^{-1}$ peut être considérée comme étant suffisante pour des calculs thermiques.

✓ Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique

La Figure 4.12 présente l'influence de la masse volumique des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey sur la conductivité thermique.

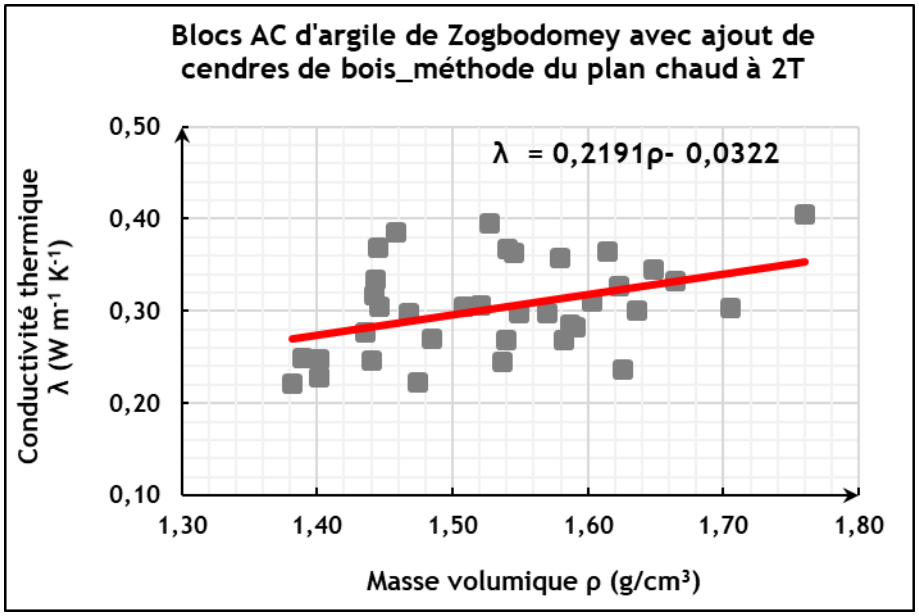



Figure 4.12 : Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey

Le comportement observé à la Figure 4.12, est la conséquence directe des phénomènes observés à la Figure 4.10 et à la Figure 4.11, c'est-à-dire que :

- la substitution partielle de la matrice argileuse par des proportions massiques croissantes de cendres de bois, induit une légère diminution de la masse volumique des blocs cuits ;
- la substitution partielle de la matrice argileuse par des proportions croissantes de cendres de bois, induit une légère diminution de la conductivité thermique des blocs cuits.

Ainsi, l'augmentation probable de la conductivité thermique des blocs « AC » d'argile cuits de Zogbodomey avec l'accroissement de la masse volumique est observée à la Figure 4.12. Cette évolution est traduite par une relation linéaire avec un coefficient de corrélation R = 0,4064. Ce coefficient est significatif à une erreur contre 0 de 5% ; la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 95%.

- Méthode de mesure en régime permanent et en géométrie cylindrique

Le Tableau 4.9 présente les valeurs mesurées en géométrie cylindrique, de la conductivité thermique des blocs « BC » d'argile cuits de Zogbodomey et la masse volumique des blocs, en fonction du dosage en cendres de bois.

Tableau 4.9 : Conductivité thermique, en fonction du dosage en cendres de bois des blocs « BC » d'argile cuits de Zogbodomey, obtenue par la méthode du flux radial

| Dosage en cendres de bois x(%) | Masse volumique ρ (g/cm³) | Conductivité thermique λ (W m⁻¹ K⁻¹) |
|---|---|---|
| 0 | 1,45 | 0,31 |
| 5 | 1,65 | 0,37 |
| 10 | 1,71 | 0,34 |
| 15 | 1,35 | 0,22 |
| 20 | 1,55 | 0,36 |
| Valeur moyenne | 1,54 ± 0,11 | 0,32 ± 0,04 |

En géométrie cylindrique, les blocs d'argile cuits de Zogbodomey présentent une conductivité thermique moyenne de **0,32 ± 0,04 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$**, quel que soit le dosage en cendres de bois. En outre, la masse volumique moyenne des blocs est de **1540 ± 110 kg/m$^3$** . Les résultats ainsi obtenus, ne permettent pas de conclure quant à l'influence des cendres de bois ou de la masse volumique sur la conductivité thermique des blocs « BC » d'argile cuits de Zogbodomey.

### 4.4.1.3. Comparaison de la conductivité thermique obtenue par les deux méthodes d'étude des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois

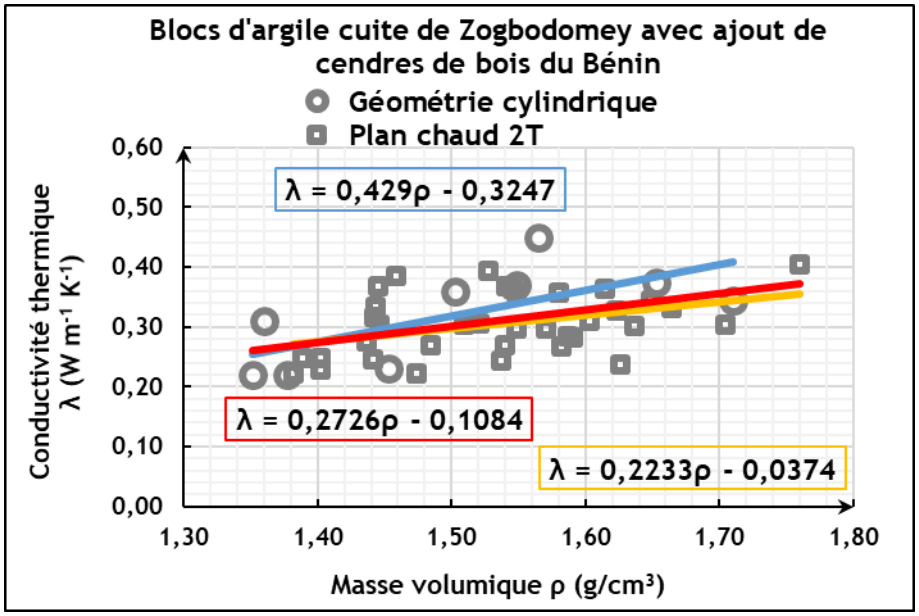



Figure 4.13 : Comparaison de la conductivité thermique des blocs « AC » et « BC » d'argile cuite de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois

La Figure 4.13 présente sur le même graphe la relation linéaire qui lie λ à ρ en fonction de la méthode de mesure utilisée pour les blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois et la relation linéaire qui ressort de l'ensemble de ces points de mesures.

La forme du nuage de point des mesures en géométrie cylindrique (trait continue en bleu) est parfaitement compatible avec celui trouvé pour les mesures en géométrie plane (trait continu en jaune). Toutefois, les coefficients directeurs de ces deux relations linéaires qui lient λ à ρ n'ont pas le même poids. Les mesures en géométrie cylindrique (trait continue en bleu) admettent une erreur plus importante par rapport à la tendance globale des mesures (trait continu en rouge). En revanche, les mesures en géométrie plane (trait continu en jaune) épousent l'allure de l'ensemble des données (trait continu en rouge) dans la plage de masse volumique étudiée, soit entre 1350 kg/m$^3$ et 1760 kg/m$^3$.

L'ensemble des valeurs mesurées pour les blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois étudiés (trait continu en rouge), traduit un accroissement de la conductivité thermique λ avec l'augmentation de la masse volumique ρ. Cette relation croissante est linéaire avec un coefficient de corrélation R qui vaut 0,4767. Ce coefficient est significatif à une erreur contre 0 de 1/1000, il traduit donc une forte relation probable entre la conductivité thermique et la masse volumique. De plus, le coefficient directeur de la droite vaut 0,2726 soit près de 90% de la valeur moyenne de λ= 0,31 ± 0,05 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$.
Par conséquent, la conductivité thermique serait donc beaucoup plus sensible à la masse volumique qu'à la teneur en cendres de bois. En effet, la masse volumique est non seulement fonction de la teneur en cendres, mais aussi et surtout, de la teneur en eau de confection des blocs.

### 4.4.2. Argile de Xeuilley

La cuisson de l'argile de Xeuilley est très difficile et cette argile ne constitue pas notre sujet principal d'étude. Nous présentons au Tableau 4.10, les résultats des échantillons cuits ayant servi de test de faisabilité, sur cette argile avec ajout des cendres de bois de la France.

Tableau 4.10 : Conductivité thermique, en fonction du dosage en cendres de bois de la France des blocs « EC » d'argile cuite de Xeuilley, obtenue par la méthode du flux radial

| Dosage en cendres de bois de la France (%) | Masse volumique apparente ρ (g/cm$^3$) | Conductivité thermique λ (W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 5 | 1,63 | 0,41 |
| 5 | 1,63 | 0,36 |
| 20 | 1,31 | 0,26 |

Ces blocs ont été confectionnés à la même teneur en eau. Les résultats montrent une grande disparité des mesures à 5% probablement due au comportement à la cuisson des blocs. Nous voyons aussi que la conductivité thermique pour une teneur en cendres de bois de 20% est plus faible que celle à 5%. Il en est de même pour la masse volumique ; ce qui va dans le même sens que les mesures sur l'argile de Zogbodomey (Figure 4.11 et Figure 4.13).

## 4.5. Influence des verres broyés sur les propriétés des blocs d'argile cuits

### 4.5.1. Argile de Zogbodomey

#### 4.5.1.1. Capacité thermique massique c

✓ Influence des verres broyés sur la capacité thermique massique c

La Figure 4.14 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey.

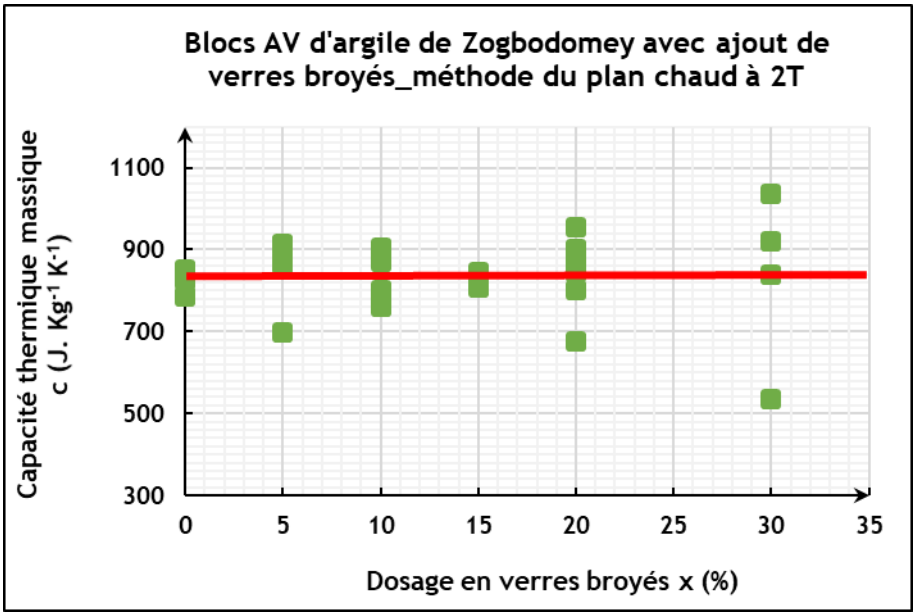



Figure 4.14 : Influence du dosage en verres broyés sur la capacité thermique massique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs d'argile cuits de Zogbodomey

Nous observons que l'influence du dosage en broyés sur la capacité thermique massique de ces blocs n'est pas très marquée. Quel que soit le dosage en verres broyés, la valeur moyenne de la capacité thermique des blocs cuits vaut 840 ± 65 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. De plus, cette valeur est peu différente de celle des **blocs d'argile** cuits sans ajout qui est égale à 820 ± 25 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ et de celle des blocs avec ajout de cendres de bois qui vaut 820 ± 50 $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

En conséquence, aux erreurs expérimentales de mesures près, le dosage en ajout de 0% à 30% et le type d'ajout (cendres de bois ou verres broyés), seraient sans effets sur la capacité thermique massique des blocs cuits, dont la valeur est relativement constante. Ainsi, quels que soient, le dosage en ajout et le type d'ajout, les différentes valeurs obtenues pour la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey présentent une valeur moyenne de 830 ± 60 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Ainsi, la capacité thermique massique c des blocs d'argile cuits de Zogbodomey ne serait ni influencée par la proportion d'ajout ni par le type d'ajout. Ces conclusions sont en accord avec les données de la littérature [124]. En outre, la valeur moyenne de 830 ± 60 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ainsi obtenue, est en effet comparable à la valeur de 864 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ présentée par Sambou pour une brique

de terre cuite [122]. Par ailleurs, les résultats du Centre Scientifique et Technique des Bâtiments (CSTB, 2005), de Kornmann et CTTB [90] cité par Nguyen [121] indiquent que la capacité thermique massique à température ambiante de la terre cuite sèche est de l'ordre de 800 à 1100 $J{\cdot}kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$, selon sa composition chimique et sa structure cristallographique.

✓ Influence de la masse volumique sur la capacité thermique massique c

La Figure 4.15 présente l'influence de la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout de verres broyés, sur la capacité thermique massique.

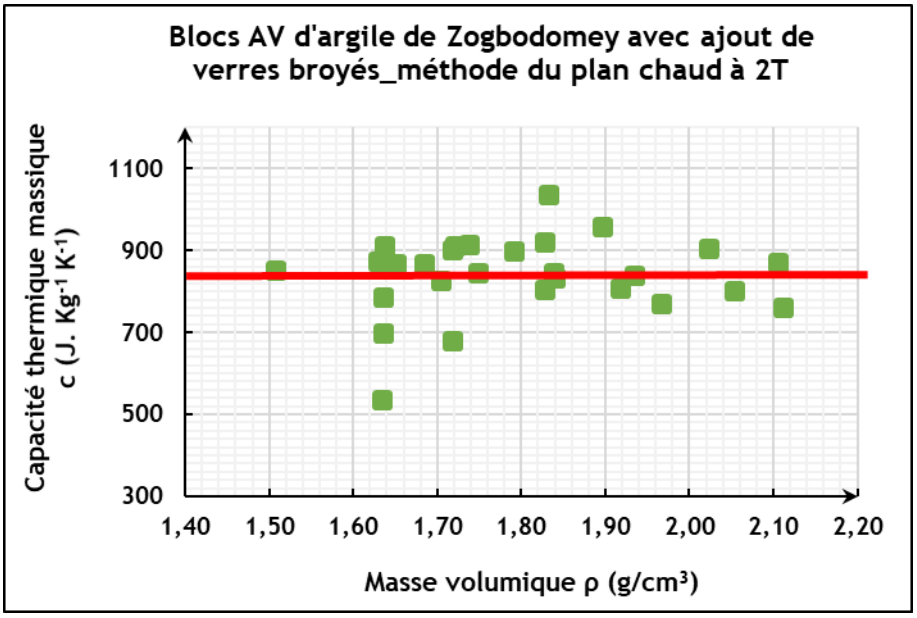



Figure 4.15 : Influence de la masse volumique sur la capacité thermique massique mesurée par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs d'argile cuits de Zogbodomey

On observe que la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey incorporant différents dosages en verres broyés, varie peu avec la masse volumique du bloc. Ces résultats sont donc comparables à ceux des blocs d'argile cuits avec ou sans ajout de cendres de bois.

4.5.1.2. Conductivité thermique **λ**

- Méthode du plan chaud à deux mesures de températures en géométrie plane

✓ Influence des verres broyés sur la masse volumique

La Figure 4.16 présente l'influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs « AV » d'argile cuits de Zogbodomey.

L'influence des verres broyés sur la masse volumique de ces blocs se traduirait par une relation linéaire croissante avec un coefficient de corrélation R qui vaut 0,2243, mais ce coefficient n'est pas significatif à une erreur contre 0 de 10%.

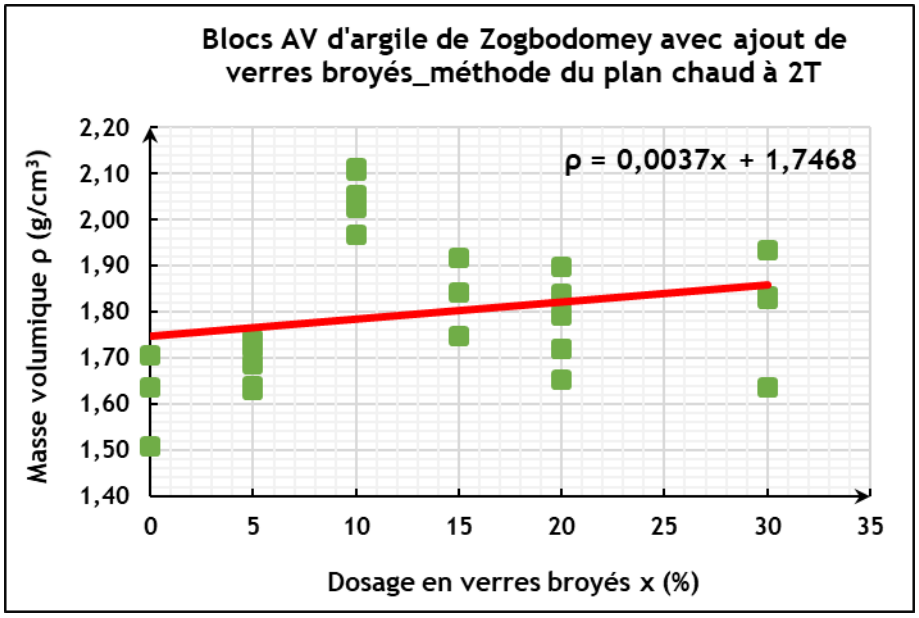



Figure 4.16 : Influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique, des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey

Les résultats ainsi obtenus ne permettent donc pas de conclure quant à l'influence des verres broyés sur la masse volumique des blocs cuits.

En effet, l'influence de la substitution de l'argile de Zogbodomey par des verres broyés sur la conductivité thermique ne serait pas marquée du fait de :

- les valeurs de porosités (56% et 59%) et masses volumiques en vrac (1,15 ± 0,02 g/cm$^3$, 1,20 ± 0,01 g/cm$^3$ ) respectives de l'argile de Zogbodomey et des verres broyés qui sont peu différentes ( Tableau 2.1 et Tableau 2.2) ;
- l'argile de Zogbodomey et les verres qui renferment en proportion prépondérante le même minéral, la silice : $SiO_2 \geq 60\%$ pour l'argile de Zogbodomey (Tableau 2.11 [6] [186]) et >70% pour le verre ( Tableau 1.8 [155]).
- Par ailleurs, les résultats de la caractérisation physique des blocs présentés au chapitre 3, ont montré la forte influence de la teneur en eau de confection des blocs sur la masse volumique des produits cuits. Or, ce paramètre est très variable par rapport aux résultats ici présentés. En conséquence, il n'est pas aisé d'apprécier l'influence probable du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs cuits, au regard de ces résultats expérimentaux. Ces conclusions sont bien comparables à celles tirées de l'exploitation des résultats de l'influence du dosage en verres broyés, sur la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, présentés au chapitre 3. Ceci met une fois de plus en exergue la forte corrélation entre la masse volumique des blocs cuits et la teneur en eau de confection des blocs.

En conséquence, l'optimisation de la teneur en eau de formulation pour chaque dosage en verres broyés, montrerait de façon plus tangible, l'influence du dosage en verres broyés sur la masse volumique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey.

✓ Influence des verres broyés sur la conductivité thermique

La Figure 4.17 présente l'évolution de la conductivité thermique des blocs « AV » d'argile cuits de Zogbodomey, en fonction du dosage en verres broyés.

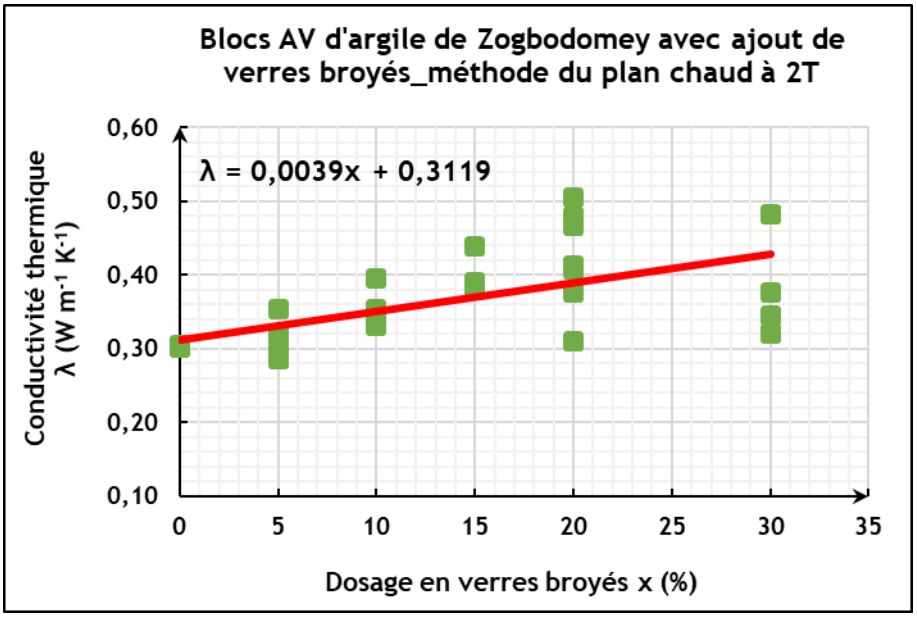



Figure 4.17 : Influence du dosage en verres broyés sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AV » d'argile cuits de Zogbodomey

L'évolution de la conductivité thermique de ces blocs en fonction du dosage en verres broyés est traduite par une relation linéaire croissante avec un coefficient de corrélation R égale à 0,5778. Ce coefficient est significatif à une erreur contre 0 de 1% (la probabilité que la proposition soit vraie est donc de 99%). Ainsi, l'incorporation de proportions croissantes de verres broyés dans la formulation des blocs d'argile cuits, induirait une légère augmentation de la conductivité thermique des blocs cuits. Le coefficient directeur de la droite est égal à 1% de la valeur moyenne. Ainsi, au regard de l'erreur probable d'environ 1% équivalente au coefficient d'accroissement, la valeur moyenne de $\boldsymbol{\lambda}$ = 0,37 ± 0,05 $W.m^{-1}.K^{-1}$ peut être considérée comme étant suffisante pour des calculs thermiques.

✓ Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique

La Figure 4.18 présente l'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique des blocs « AV » d'argile cuits de Zogbodomey incorporant des verres broyés.

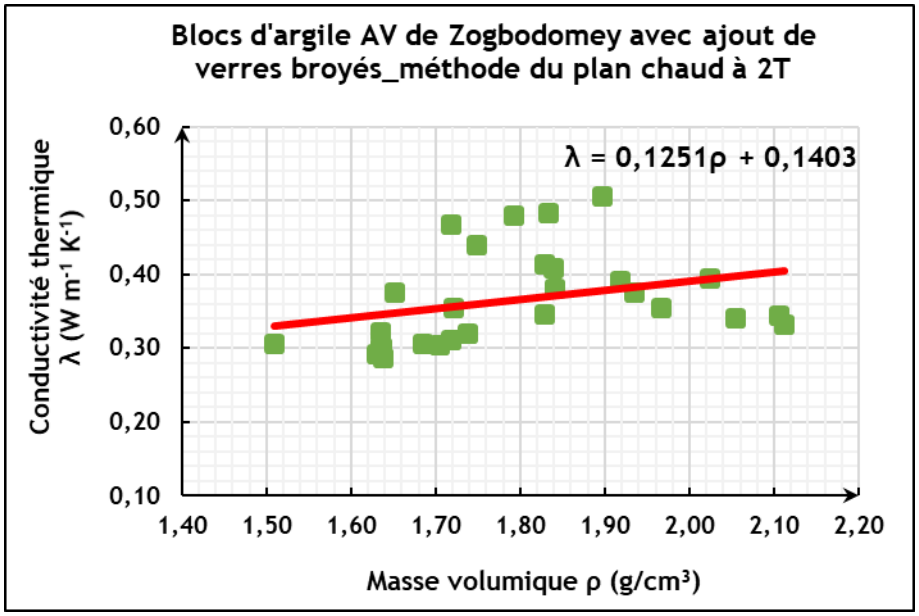



Figure 4.18 : Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du plan chaud à deux mesures de température, des blocs « AV » d'argile cuite de Zogbodomey

Elle traduit une relation linéaire légèrement croissante avec un coefficient de corrélation R égale à 0,3105, mais ce coefficient n'est pas significatif à une erreur contre 0 de 10%. Les résultats ainsi obtenus ne permettent donc pas de conclure quant à l'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique des blocs cuits. Ainsi, cette famille de blocs présente une masse volumique moyenne de moyenne 1800 ± 130 kg/m$^3$ et une conductivité thermique **λ** = 0,37 ± 0,05 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$.

- Méthode de mesure en régime permanent et géométrie cylindrique

✓ Influence des verres broyés sur la conductivité thermique

Le Tableau 4.11 présente les valeurs mesurées en géométrie cylindrique, de la conductivité thermique des blocs « BV » d'argile cuits de Zogbodomey et la masse volumique des blocs, en fonction du dosage en verres broyés.

Nous constatons au regard des résultats expérimentaux obtenus que, l'influence du dosage en verres broyés sur la conductivité thermique des blocs « BV » d'argile cuite de Zogbodomey n'est pas marquée.

Ces blocs d'argile cuits de Zogbodomey admettent donc, une valeur moyenne de la conductivité thermique qui vaut 0,32 ± 0,04 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$, quel que soit le dosage en verres broyés.

Tableau 4.11 : Conductivité thermique, en fonction du dosage en verres broyés des blocs « BV » d'argile cuits de Zogbodomey, obtenue par la méthode du flux radial

| Dosage en Verres broyés x(%) | Masse volumique ρ (g/cm$^3$) | Conductivité thermique λ (W m$^{-1}$ K$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 0 | 1,45 | 0,31 |
| 5 | 1,76 | 0,33 |
| 10 | 1,77 | 0,35 |
| 15 | 1,46 | 0,30 |
| 20 | 1,77 | 0,42 |
| 25 | 1,52 | 0,27 |
| 30 | 1,57 | 0,27 |
| Valeur moyenne | 1,61 ± 0,13 | 0,32 ± 0,04 |

4.5.1.3. Étude comparative de la conductivité thermique obtenue par les deux **méthodes d'étude des blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ajout des verres broyés**

Au regard des résultats obtenus par les deux méthodes d'étude, on observe que :

- quel que soit le dosage en verre broyés, la conductivité thermique déterminée par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures des blocs d'argile cuits de Zogbodomey, présente une valeur moyenne de 0,37 ± 0,05 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$ pour des blocs dont la masse volumique moyenne est de 1800 ± 130 g/cm$^3$.
- quel que soit le dosage en verre broyés, la conductivité thermique mesurée par la méthode du flux axial, vaut en moyenne 0,32 ± 0,04 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$ pour des blocs dont la masse volumique est comprise entre 1610 ± 130 g/cm$^3$.

L'étude comparative de ces deux résultats met en exergue l'augmentation de la conductivité thermique avec l'accroissement de la masse volumique des blocs cuits. Les valeurs ainsi obtenues sont donc comparables et l'ensemble de toutes les mesures mesurées donne, une conductivité thermique moyenne de 0,35 ± 0,05 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$ pour des blocs dont la masse volumique vaut 1700 ± 150 kg/m$^3$, aux erreurs probables près.

Par ailleurs, ces valeurs sont peu différentes de celles des blocs incorporant des cendres de bois, et de celle des blocs sans ajout.

Les différents résultats obtenues par rapport à la caractérisation des blocs cuits de Zogbodomey sont alors présentés dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.12 : Propriétés thermophysiques des blocs d'argile cuits de Zogbodomey étudiés

| Propriété | Argile de Zogbodomey sans ajout | Argile de Zogbodomey avec ajout de cendres de bois du Bénin | Argile de Zogbodomey avec ajout de verres broyés | Valeur moyenne des différentes mesures quelle que soit la formulation |
|---|---|---|---|---|
| Conductivité thermique λ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$) | 0,31 ± 0,05 | 0,31 ± 0,05 | 0,35 ± 0,05 | 0,33 ± 0,05 |
| Masse volumique ρ ($kg/m^3$) | 1500 ± 100 | 1500 ± 100 | 1700 ± 150 | 1600 ± 150 |
| Capacité thermique massique c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) | 820 ± 25 | 820 ± 50 | 840 ± 65 | 830 ± 60 |

Au regard des propriétés thermophysiques ainsi obtenues pour les blocs d'argile cuits de Zogbodomey, et de leurs bons comportements physiques et mécaniques, nous évaluerons dans la suite, l'influence de ces propriétés sur le déphasage et l'amortissement thermique.

### 4.5.2. Argile de Sèmè-Podji

Un seul bloc d'argile cuit de Sèmè-Podji avec ajout de 20% de verres broyés « SPV20 » a été étudié. La conductivité thermique mesurée sur cette éprouvette cylindrique de masse volumique 1530 $kg/m^3$ vaut 0,28 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Au regard du nombre limité de mesure pour ces blocs cuits, qui présentaient toutefois un bon comportement mécanique, des études complémentaires devraient être menées afin d'avoir des informations plus fournies s'agissant de leurs propriétés thermophysiques. Ceci permettrait d'effectuer par la suite, une étude thermique d'une paroi intégrant ces matériaux. Cette étude ne fait pas l'objet du présent travail.

### 4.5.3. Argile de Xeuilley

Du fait de leur mauvaise tenue mécanique à la cuisson, les mesures thermiques à l'instar de celles mécaniques, n'ont pas pu être effectuées sur les blocs d'argile cuits de Xeuilley avec ajout de verres broyés. Les blocs d'argile cuits de Xeuilley n'ayant pas présenté un bon comportement mécanique, la simulation de leur comportement au sein d'une paroi de bâtiment, ne fera pas l'objet de la présente étude.

## 4.6. Comportement thermique d'une paroi opaque verticale d'un bâtiment

Les différentes parois constituant l'enveloppe du bâtiment, mais aussi les parois internes de séparation entre locaux sont décrites dans toutes leurs caractéristiques thermiques, qui sont au moins les trois suivantes [69]:

- la conductivité thermique λ
- la masse volumique ρ
- la capacité thermique massique c.

Par ailleurs, en régime variable, le comportement thermique dynamique d'une paroi opaque verticale d'un bâtiment peut être caractérisé à travers les grandeurs que sont : le déphasage et l'amortissement thermique. Or, la détermination de ces grandeurs nécessite la connaissance des propriétés thermophysiques des matériaux mis en œuvre, conformément aux équations :

$$\eta = 1{,}38 \times e \times \sqrt{\frac{\rho c}{\lambda}} \qquad 1.13$$

$$\mu = 2 \times e^{-\sqrt{\frac{\pi e^2}{T\lambda} \times \rho c}} \qquad 1.16$$

Ainsi, l'appropriation des propriétés thermophysiques des matériaux de construction permet alors d'effectuer une étude thermique dynamique pour comparer l'impact de différents choix constructifs.

### 4.6.1. Zone d'étude

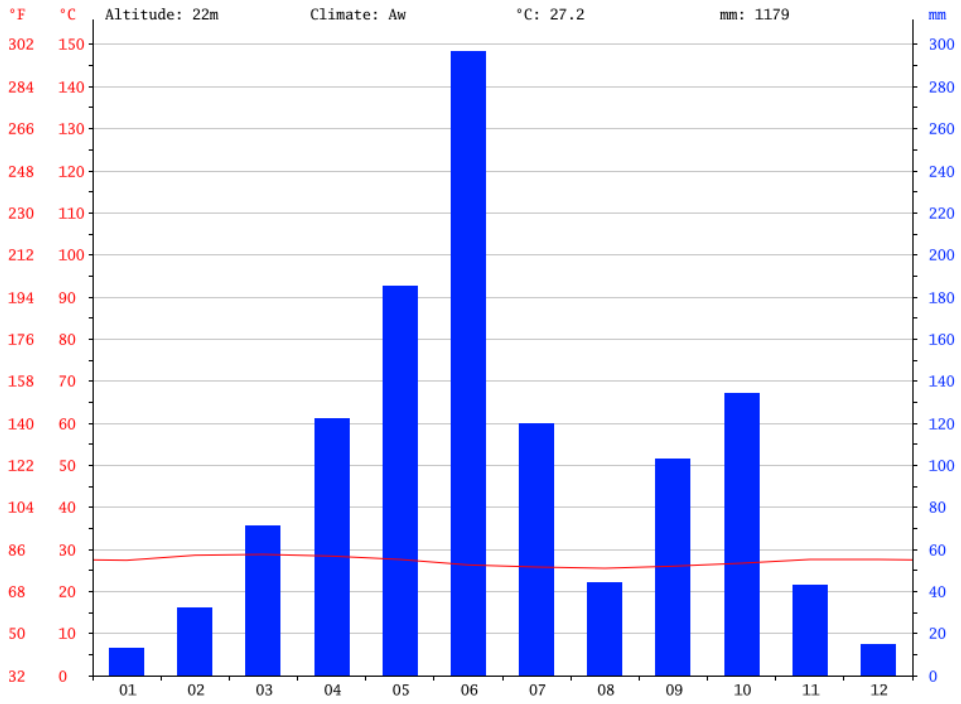



Figure 4.19 : Diagramme climatique Abomey-Calavi (Bénin) [229]

Nous considérons un bâtiment situé dans la zone tropicale humide, au sud du Bénin, dans la commune d'Abomey-Calavi dont les coordonnées géographiques sont :

- latitude 6°26'54'' Nord ,
- longitude 2°21'20'' Est ,
- altitude 11 m.

La commune d'Abomey-Calavi est située à 18 kilomètres au Nord de Cotonou, la capitale économique du Bénin.

L'hiver à Abomey-Calavi se caractérise par des pluies moins importantes qu'en été. D'après Köppen et Geiger, le climat y est classé Aw [229]. Abomey-Calavi affiche 27.2 °C de température en moyenne sur toute l'année. La moyenne des précipitations annuelles atteints 1179 mm. Au mois de Mars, la température moyenne est de 28.8 °C (Figure 4.19). Mars est de ce fait le mois le plus chaud de l'année. 25.5°C font du mois d'Aout le plus froid de l'année. Les précipitations varient de 284 mm entre le plus sec et le plus humide des mois. Sur l'année, la température varie de 3.3 °C [229].

### 4.6.2. Hypothèses de base

Nous étudierons le comportement d'une paroi opaque du bâtiment en fonction du type de maçonnerie.

La paroi est supposée en façade principale, l'orientation des façades principales se fait au Sud et au Nord tel qu'il a été recommandé dans les travaux de Jannot et Djiako [69]. Le pic de température externe est obtenu sur ces façades à 13 heures, heure locale (GMT+1) [230]. Les résultats obtenus à l'issu de la détermination de la capacité thermique massique et de la conductivité thermique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey présentés dans le Tableau 4.12, sont exploités pour estimer le déphasage thermique et l'amortissement thermique qu'induirait ces matériaux.

Par ailleurs, une étude comparative du comportement de la paroi composée des blocs d'argile cuits de Zogbodomey est effectuée par rapport à un mur composé de briques creuses en mortier de ciment. Les briques creuses en mortier de ciment présentent une masse volumique de 1200 $kg/m^3$, une capacité thermique massique de 880 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ et une conductivité thermique égale à 0,40 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [231].

On fait l'hypothèse que ces deux types de matériau satisfassent aux résistances mécaniques minimales exigées, compte tenu des sollicitations auxquelles ils sont soumis. Par ailleurs, les murs sont destinés à rester apparents.

### 4.6.3. Calculs thermiques

Les maçonneries classiques utilisées dans les constructions au Bénin, ont généralement une épaisseur variant de 10 cm à 20 cm. Toutefois, nous faisons varier l'épaisseur de la paroi entre 10 cm et 30 cm afin d'apprécier l'influence sur l'amortissement et le déphasage thermique. Les propriétés thermiques dynamiques des blocs d'argile cuits de Zogbodomey évaluées à partir des valeurs moyennes obtenues, sont présentés dans le Tableau 4.13.

Les calculs montrent que les valeurs moyennes obtenues à l'issue de la caractérisation des blocs cuits de Zogbodomey sont assez représentatives des propriétés du matériau. En effet, la variation de ces différents paramètres $\lambda$, $\rho$ et c, par rapport aux écarts types sur la valeur moyenne des mesures, influence peu le déphasage et l'amortissement thermique.

Tableau 4.13 : Déphasage thermique et amortissement thermique en fonction de l'épaisseur de la paroi et des propriétés des blocs d'argile cuits de Zogbodomey

| Masse volumique ρ (kg/m$^3$) | Capacité thermique massique c (J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$) | Conductivité thermique λ ( W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) | Épaisseur de la paroi e (m) | Déphasage thermique (heures) | Amortissement thermique μ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1450 | 770 | 0,28 | 0,10 | 5 | 0,60 |
| 1450 | 770 | 0,28 | 0,12 | 6 | 0,47 |
| 1450 | 770 | 0,28 | 0,15 | 7 | 0,33 |
| 1450 | 770 | 0,28 | 0,20 | 9 | 0,18 |
| 1450 | 770 | 0,28 | 0,25 | 11 | 0,10 |
| 1450 | 770 | 0,28 | 0,30 | 14 | 0,05 |
| 1600 | 830 | 0,33 | 0,10 | 5 | 0,60 |
| 1600 | 830 | 0,33 | 0,12 | 6 | 0,47 |
| 1600 | 830 | 0,33 | 0,15 | 7 | 0,33 |
| 1600 | 830 | 0,33 | 0,20 | 9 | 0,18 |
| 1600 | 830 | 0,33 | 0,25 | 12 | 0,10 |
| 1600 | 830 | 0,33 | 0,30 | 14 | 0,05 |
| 1750 | 890 | 0,38 | 0,10 | 5 | 0,59 |
| 1750 | 890 | 0,38 | 0,12 | 6 | 0,46 |
| 1750 | 890 | 0,38 | 0,15 | 7 | 0,32 |
| 1750 | 890 | 0,38 | 0,20 | 9 | 0,17 |
| 1750 | 890 | 0,38 | 0,25 | 12 | 0,09 |
| 1750 | 890 | 0,38 | 0,30 | 14 | 0,05 |

Par ailleurs, les blocs d'argile cuits de Zogbodomey assurent un déphasage thermique compris entre 4 et 14 heures, lorsque l'épaisseur de mur considérée varie de 10 cm à 30 cm. Ainsi, le déphasage thermique croit avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi, tandis que l'amortissement diminue. En effet, plus le déphasage thermique créé par un matériau est grand, moins important est son pouvoir d'amortissement thermique et vice versa [230].

- Pour les bâtiments à caractère résidentiel, il est important d'utiliser les matériaux qui présentent un déphasage thermique important, en supposant que ces bâtiments sont occupés en début de soirée, à partir de 19h. Ceci permettrait que le flux emmagasinée au cours de la journée soit transmis de façon naturelle vers l'extérieur du bâtiment, du fait de la baisse de la température extérieure à la nuit tombée. Ainsi une simple ventilation naturelle ou non, pendant quelques heures, permettrait de rétablir le confort. Plus le déphasage est proche de la demi-période de calcul c'est-à-dire de 12 heures, plus la paroi est performante et elle diffusera la chaleur à la demi-période la plus fraîche de la journée qu'est la nuit (1h du matin, heure locale au Bénin).
- Plus le facteur d'amortissement est élevé, plus la paroi est performante pour maintenir le confort le jour, ce qui conviendrait pour les bâtiments à usage administratif, du fait que ces derniers sont occupés pendant toute la journée jusqu'aux environs de 19h.

Ainsi, pour l'enveloppe d'un bâtiment à usage d'habitation, il faudrait mettre en œuvre une paroi d'épaisseur supérieure ou égale à 20 cm qui favorise un déphasage minimale de 9

heures, quels que soient les propriétés des blocs d'argile cuite de Zogbodomey définies au Tableau 4.13. Alors, le pic de température maximale à l'intérieur du bâtiment s'observerait aux alentours de 22 heures. Mais à ce moment, la température à l'extérieure aurait refroidie, et le sens de conduction de la chaleur s'inverserait, favorisant le maintien de l'ambiance thermique pour le bonheur de la famille.

Le Tableau 4.14 présente les valeurs du déphasage et de l'amortissement thermique des briques creuses de mortier de ciment.

Tableau 4.14 : Évolution du déphasage thermique des briques creuses de mortier de ciment en fonction de l'épaisseur de la paroi

| Masse volumique ρ (kg/m$^3$) | Capacité thermique massique c (J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$) | Conductivité thermique λ ( W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) | Épaisseur de la paroi e (m) | Déphasage thermique η (heures) | Amortissement thermique μ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1200 | 880 | 0,40 | 0,10 | 4 | 0,75 |
| 1200 | 880 | 0,40 | 0,12 | 4 | 0,62 |
| 1200 | 880 | 0,40 | 0,15 | 6 | 0,46 |
| 1200 | 880 | 0,40 | 0,20 | 7 | 0,28 |
| 1200 | 880 | 0,40 | 0,25 | 9 | 0,17 |
| 1200 | 880 | 0,40 | 0,30 | 11 | 0,11 |

Les briques creuses de mortier de ciment assurent un déphasage thermique compris entre 4 et 11 heures, lorsque l'épaisseur de mur considérée varie de 10 cm à 30 cm. Ainsi, on observe pour une même épaisseur de paroi, que le déphasage thermique des blocs d'argile cuits de Zogbodomey est plus important que celui des briques creuses de mortier de ciment ; par ailleurs, les briques creuses de mortier de ciment présentent un meilleur amortissement thermique.

En outre, il faudrait mettre en œuvre une paroi d'épaisseur supérieure ou égale à 25 cm pour l'enveloppe d'un bâtiment à usage d'habitation, afin d'obtenir le même déphasage horaire de 9 heures aux alentours de 22 heures, comme observé avec les blocs d'argile cuits de Zogbodomey. Pour cette épaisseur de mur, les deux matériaux présentent le même amortissement thermique.

En conséquence, pour le même niveau de performance thermique, les blocs d'argile cuits de Zogbodomey favorisent une économie de 5 cm d'épaisseur du matériau mis en œuvre comparé aux briques creuses de mortier de ciment : ils seraient donc plus économes lorsqu'il sont mis en œuvre pour la paroi d'un bâtiment à caractère résidentiel .

## 4.7. Synthèse

Ce chapitre a été consacré à l'appropriation des propriétés thermophysiques des matériaux développés dans le cadre de cette recherche. Ainsi, la conductivité thermique et la capacité thermique massique des blocs d'argile cuits élaborés, ont été étudiés. Deux méthodes de mesures ont permis d'accéder à la conductivité thermique des blocs formulés au Bénin ou en France. L'influence des paramètres de formulation tels que le dosage en ajout (cendres de bois ou verres broyés) et la masse volumique des blocs cuits a été appréciée.

L'argile de Xeuilley a été utilisée comme étalon en France, dans le but de maitriser le protocole expérimental de mesure en géométrie cylindrique.

Par ailleurs, seulement quelques mesures sont effectuées pour l'argile de Sèmè-Podji quand bien même, la formulation avec ajout de verres broyés susciterait un grand intérêt, au regard des performances physiques et mécaniques notables obtenues. Une étude spécifique devrait se faire afin de conclure par rapport à l'application de ces blocs d'argile cuits dans le bâtiment.

En outre, l'argile de Zogbodomey était l'objet principal de la caractérisation thermophysique effectuée. Les différentes formulations testées ont donc permis de conclure par rapport à la faible influence du dosage en ajout (cendres de bois, verres broyés) sur la conductivité thermique, comparée à celle de la masse volumique. L'influence des ajouts sur la masse volumique des blocs cuits serait inhibée par la variation de la teneur en eau de confection des blocs.
Par ailleurs, les valeurs de la conductivité thermique de ces blocs cuits, déterminées par la méthode du flux radial en régime permanent, sont comparables à celles obtenues par la méthode du plan chaud à deux mesures de températures, en régime variable.
En définitive, quels que soient le dosage en ajout et le type d'ajout, on peut considérer suffisamment représentatives des propriétés thermophysiques de ces blocs d'argile cuits, les valeurs moyennes de :

- la masse volumique égale à 1600 ± 150 kg/m$^3$ ;
- la capacité thermique massique égale à 830 ± 60 J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$ ;
- la conductivité thermique égale à 0,33 ± 0,05 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$.

Ces résultats expérimentaux sont comparables aux données de la littérature. De plus, les résultats ainsi obtenus montrent que les nouveaux matériaux développés ne modifient pas les propriétés des blocs d'agile cuits sans ajout. Ils peuvent donc être valoriser dans le bâtiment s'ils satisfont aux exigences de tenue mécanique compte tenu de leur destination dans l'ouvrage. En conséquence, les propriétés thermophysiques ainsi déterminées ont permis d'évaluer en fonction de l'épaisseur d'une paroi bien définie, le comportement thermique dynamique des matériaux de construction développés. Les résultats obtenus sont concluants et traduisent l'intérêt de la valorisation des blocs d'argile cuits de Zogbodomey par rapport, aux briques creuses de mortier de ciment, pour les mêmes performances. L'épaisseur du matériau de construction est un paramètre dont dépendent fortement les performances thermiques voir physiques et mécaniques des produits. Ces propriétés devraient alors être conjuguées pour une mise en œuvre efficiente des matériaux dans le bâtiment.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans le but de valoriser des gisements d'argile disponibles en proportion importante et sous-exploités, mais également de promouvoir la valorisation des déchets dans les pratiques de construction au Bénin, nous nous sommes proposés d'étudier la possibilité d'incorporer des cendres de bois et des résidus de verres dans la formulation de blocs d'argile cuits. Ce travail s'inscrit parfaitement dans la politique de promotion des matériaux locaux et de rendre accessible le logement au plus grand nombre de béninois à revenus variables. Il est souhaitable que les nouveaux matériaux satisfassent aux exigences de tenue mécanique compte tenu de leur destination, sans compromettre la consommation énergétique du bâtiment tout au long de son cycle de vie. Dans cette perspective, nous avons réalisé des études dans les laboratoires de recherche au Bénin (LEMA) et en France (LERMAB), sur les argiles de Sèmè-Podji et de Zogbodomey prélevées au Bénin et sur l'argile de Xeuilley prélevée en France. Le travail a été structuré en quatre principaux axes.

L'étude bibliographique nous a permis de comprendre les interactions du bâtiment avec son environnement, et le rôle des matériaux de l'enveloppe du bâtiment sur l'ambiance thermique. Les critères de classification et de choix des matériaux de construction ont donc été abordés. L'étude du processus d'élaboration des briques d'argile cuites a non seulement mis en exergue les propriétés de ces produits mais également, les facteurs limitants. Ainsi, l'apport de certains déchets, notamment les cendres et les verres, dans l'élaboration de ces matériaux de construction a été discuté au regard de la revue de littérature.

Les matières premières sont déterminantes dans le processus de fabrication des briques cuites et l'argile est la principale. Nous avons donc réaliser des études afin d'avoir une meilleure connaissance des argiles. Les essais réalisés concernent essentiellement les essais classiques d'identification des sols (granulométrie, argilosité, propreté, masses volumiques, teneur en eau) et les analyses chimiques, thermiques et minéralogiques (DRX, ATD). Les conclusions issues des essais d'identification classent ces trois matériaux dans la famille des sols fins, A4. Les sols du Bénin sont des argiles très plastiques et le sol de Xeuilley un limon très plastique. En outre, le sol de Zogbodomey est très argileux et renferme majoritairement 40% de kaolinite et 39% de quartz tandis que le sol de Xeuilley contient 20% de smectites, 5% de kaolinite, de la calcite et de la dolomite. Les argiles de Zogbodomey, Sèmè-Podji et Xeuilley avec ou sans ajout de cendres de bois et de verres broyés ont été façonnés en blocs et cuits. Ces différents constituants ont une granulométrie inférieure à 400 µm et leur proportion dans le mélange est définie par rapport à une masse constante du mélange sec total. Les blocs d'argile de Zogbodomey sont étudiés suivant deux modes de compactage et l'influence de la proportion d'eau de confection est également analysée. L'étude physique et mécanique des éprouvettes confectionnés est ensuite effectuée.

L'étude de la formulation optimale des blocs cuits des trois argiles a porté sur les principales propriétés que sont : la perte de masse, le retrait, la masse volumique, la résistance à la traction par flexion trois points, la résistance à la compression.

La cuisson de l'argile de Xeuilley est incomplète et on enregistre également des déformations. Les verres broyés favorisent un accroissement de ces déformations.

Les cendres de bois améliorent la cuisson des blocs d'argile de Xeuilley mais elles diminuent leurs résistances mécaniques. La valorisation de l'argile de Xeuilley dans la formulation des blocs cuits n'est pas possible. La composition minéralogique de cette argile, notamment la présence des minéraux tels que la calcite et la dolomite en seraient la cause.

La cuisson de l'argile de Sèmè-Podji est incomplète. En présence des cendres de bois (Bénin ou France) la cuisson au cœur s'améliore et le retrait est limité. Les cendres de bois ont donc un rôle de fondant et de dégraissant dans la formulation des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji. L'augmentation de la perte au feu de ces blocs induit la diminution de la masse volumique. L'évolution des résistances mécaniques et du module de Young des blocs est corrélée à celle de la masse volumique et le dosage de 5% en cendres de bois présente les résistances maximales à la traction par flexion trois points, quel que soient le type de cendres de bois. L'amélioration de l'aspect physique de ces blocs est indispensable en vue d'envisager toute application. Ainsi, des études complémentaires doivent être menées dans le but d'établir un programme de cuisson appropriée. L'incorporation du dosage en verres broyés favorise la diminution du retrait (séchage et cuisson), de la perte au feu et une meilleure cuisson des blocs aussi bien en surface qu'à cœur. Les verres broyés jouent alors un rôle de dégraissant et de fondant. La masse volumique des blocs croit avec le dosage en verres broyés jusqu'au seuil maximal de 20% au-delà duquel, elle chute. L'évolution des résistances mécaniques est corrélée à celle de la masse volumique et le dosage de 20% se révèle comme le taux optimal de verres broyés, il favorise un accroissement de 55% de la résistance à la traction par flexion trois et de 15% à la compression. La valorisation des verres broyés dans la fabrication des blocs d'argile cuits de Sèmè-Podji est d'un grand intérêt.

Les blocs d'argile cuits de Zogbodomey avec ou sans ajout présentent une cuisson complète et un bel aspect visuel. La perte au feu influence la masse volumique des blocs et les résistances mécaniques sont fortement corrélées à la masse volumique. Pour une même teneur en eau optimale de confection, la masse volumique des blocs cuits diminue avec le dosage de 5% et 10% de cendres de bois. L'influence des cendres de bois sur la masse volumique des blocs est donc marquée lorsque la proportion d'eau est maitrisée. La perte au feu des blocs incorporant des verres broyés diminue proportionnellement au dosage en verres pendant que la masse volumique croit. Quel que soit le mode de compactage, un dosage de 5% en cendres de bois et de 20% en verres broyés favorise un gain de résistance à la traction par flexion trois points ; la résistance à la traction par flexion trois points des blocs incorporant 20% de verres broyés est supérieure à celle des blocs à 5% de cendres. Ces deux formulations présentent également des résistances en compression comparables à celles des blocs sans ajout, quel que soit le mode de compactage des blocs.

Les deux argiles du Bénin (Sèmè-Podji et Zogbodomey) présentent donc un dosage optimal de 5% en cendres de bois et de 20% en verres broyés. La masse volumique et la résistance à la traction par flexion trois points des blocs d'argile de Sèmè-Podji sont supérieures à celles des blocs de Zogbodomey. Pour le dosage de 20% de verres broyés, les deux argiles présentent relativement les même résistances en compression mais la résistance à la compression des blocs de Zogbodomey à 5% de cendres est supérieure à celle de Sèmè-Podji.

La valorisation des cendres de bois et des verres broyés dans la formulation des blocs d'argile cuits du Bénin, est donc bénéfique. La maitrise du procédé d'élaboration de ces matériaux, conditionne donc les performances des produits développés notamment, la masse volumique et les résistances mécaniques.

À l'issu de la caractérisation mécanique, l'intérêt a été porté sur les propriétés thermophysiques des produits élaborés. Les essais thermophysiques effectués sur les blocs cuits ont montré que la capacité thermique massique est relativement constante quelle que soit la formulation. L'influence des ajouts sur la conductivité thermique n'est pas avérée, mais il existe une relation entre la masse volumique et la conductivité thermique. Par ailleurs, les nouveaux matériaux développés ne modifient pas les propriétés du matériau de référence et ces blocs d'argile cuits présentent un meilleur atout comparés aux briques creuses de mortier de ciment. Ainsi, l'utilisation des blocs d'argile cuits permettrait d'assurer un meilleur cadre de vie aux populations béninoises et de réduire les coûts de construction et d'exploitation des bâtiments.

Les travaux effectués dans cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives :

- → l'étude microstructurale afin de mieux expliquer les interactions entre les ajouts (verres broyés et cendres de bois) et la matrice argileuse ;
- → l'étude de l'influence des paramètres de façonnage : réduction du pas de variation des ajouts au voisinage des valeurs obtenues, granulométrie des matières premières, mode de malaxage, pression de compactage, programme de séchage et de cuisson sur les propriétés des produits ;
- → l'étude de la durabilité des produits dans des environnements soumis à des agressions spécifiques : chargements cycliques, perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau, résistance aux variations brusques de température et d'humidité ;
- → la réalisation et la caractérisation des produits à l'échelle réelle.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES


[1] Haut-Commissariat aux Droits de l'Homme et ONU-Habitat, « Le droit à un logement convenable », Nations Unies Droits de l'Homme, Genève - Suisse, Fiche d'information n° 21/ Rev.1.

[2] M. Kaboré, « Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne », Université Lyon 1 Claude Bernard, Université Grenoble Alpes, France, 2015.

[3] M. Faye, « Structure interne et propriétés thermiques macroscopiques, application aux matériaux de construction », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2016.

[4] D. Miraucourt, « Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso », Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées, Burkina-Faso, Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil Architecte, 2017.

[5] B. Laibi, « Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses », Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie, France, 2017.

[6] E. Sagbo *et al.*, « Physico-Chemical-and-Mineralogical-Characterization-of-some-Clays-from-Coastal-Sedimentary-Basin-of-Benin-used-in-Ceramic.pdf », *Res. J. Chem. Sci.*, vol. 5, nº 12, p. 1-19, déc. 2015.

[7] M. Schlaifer, D. Doucouré, G. Lanmafankpotin, et S. Bertin, « Profil Environnemental du Bénin », AETS (Consortium COWI), Contrat Spécifique n°2006/120030 Rapport Final, oct. 2006.

[8] République du Bénin Présidence de la République, *Décret N°2005-482 du 04 Août 2005 portant prise en compte des matériaux locaux dans les constructions publiques*. 2005.

[9] ADEME, « Collecte, tri, recyclage et valorisation des déchets », Feuille de route stratégique, mai 2011.

[10] J.-M. Lessard, « Optimisation des cendres volantes et grossières de biomasse dans les bétons compactés au rouleau et dans les bétons moulés à sec », Université de Sherbrooke Faculté de génie Département de génie civil, Sherbrooke (Québec) Canada, Mémoire de maîtrise Spécialité : génie civil, mai 2016.

[11] M. Cheriaf, J. C. Rocha, et J. Péra, « Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash », *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, nº 9, p. 1387-1391, sept. 1999.

[12] A. Karouite, « Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction - », Ecole HASSANIA des Travaux publics, 2003.

[13] İ. B. Topçu et M. Sarıdemir, « Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic », *Comput. Mater. Sci.*, vol. 42, nº 1, p. 74-82, mars 2008.

[14] E. Tkaczewska et J. Małolepszy, « Hydration of coal-biomass fly ash cement », *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, nº 7, p. 2694-2700, juill. 2009.

[15] P. Rossi, L. Gavois, et G. Raoul, « Utilisation des sous-produits industriels – Les cendres volantes - Origine, production et caractéristiques », *Tech. Ing. Constr. Trav. Publics Constr. Responsab.*, nº C5373 V1, p. 27, août 2009.

[16] P. Adamiec, J. C. Benzet, et A. Benhassaine, « Relation entre une cendre volante et son charbon », *Poudres Grains 1*, vol. 5, nº 3, p. 35-46, oct. 2005.

[17] F. Ayrinhac, « Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2005.

[18] M. Sarkkinen, K. Kujala, K. Kemppainen, et S. Gehör, « Effect of biomass fly ashes as road stabilisation binder », *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 19, nº 1, p. 239-251, janv. 2018.

[19] L. Chen et D.-F. Lin, « Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement », *J. Hazard. Mater.*, vol. 162, nº 1, p. 321-327, févr. 2009.

[20] N. Savadogo, « Élaboration et caractérisation d'un écociment à base de poudre de mâchefer de charbon », Thèse INSA Rennes, Université Bretagne Loire, France, 2017.

[21] N. Savadogo, A. Messan, K. Hannawi, F. Tsobnang, et P. Agbodjan, « Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger) : absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et attaque acide », p. 12, 2015.

[22] N. Savadogo, A. Messan, F. Tsobnang, et W. Prince-Agbodjan, « Evaluation de la réactivité pouzzolanique des cendres de mâchefer en vue de l'élaboration d'un ciment composé: cas du mâchefer de tefereyre au Niger », p. 9, 2014.

[23] D. Bajare, G. Bumanis, et L. Upeniece, « Coal Combustion Bottom Ash as Microfiller with Pozzolanic Properties for Traditional Concrete », *Procedia Eng.*, vol. 57, p. 149-158, 2013.

[24] R. O. Yusuf, Z. Z. Noor, N. A. Moh'd F. Moh'd Din, et A. H. Abba, « Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete - a review », *Int. J. Glob. Environ. Issues*, vol. 12, nº 2/3/4, p. 214, 2012.

[25] X. Lingling, G. Wei, W. Tao, et Y. Nanru, « Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio », *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, nº 3, p. 243-247, avr. 2005.

[26] K. Dana, S. Das, et S. K. Das, « Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin-quartz-feldspar system », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, nº 10-11, p. 3169-3175, sept. 2004.

[27] L. Chen et D. F. Lin, « Applications of sewage sludge ash and nano-SiO2 to manufacture tile as construction material », *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, nº 11, p. 3312-3320, nov. 2009.

[28] D. Eliche-Quesada, M. A. Felipe-Sesé, S. Martínez-Martínez, et L. Pérez-Villarejo, « Comparative Study of the Use of Different Biomass Bottom Ash in the Manufacture of Ceramic Bricks », *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, nº 12, p. 04017238, déc. 2017.

[29] N. Manal, A. Samdi, K. Elabassi, M. Gomina, et R. Moussa, « Recyclage de déchets industriels, phosphogypse et cendres volantes, dans des matériaux de construction », *MATEC Web Conf.*, vol. 2, p. 8, 2012.

[30] S. G. Akouehou *et al.*, « Fiche Technique : Foyers améliorés recommandés pour des usages domestiques au Bénin de bois au Bénin », MEHU / DGFRN/ Projet d'Appui aux Marchés Ruraux de Bois (PAMRB), Bénin, Dépôt légal N° 6181 du 19 juillet 2012, 3ème trimestre 2012, Bibliothèque National (BN) du Bénin ISBN : 978-99919-70-12-7, juill. 2012.

[31] H. Faouzi, « L'exploitation du bois-énergie dans les arganeraies : entre soutenabilité et dégradation (région des Haha, Haut-Atlas Occidental, Maroc) », *Cah. D'Outre-Mer*, vol. 66, nº 262, p. 155-182, avr. 2013.

[32] B. Dossou, « Stratégies de gestion rationnelle du bois énergie pour lutter contre la déforestation et les effets des changements climatiques dans la département du zou au Bénin », présenté à 17ème colloque international en évaluation environnemental, Montréal, Canada, 12-juin-2012.

[33] Du Secrétariat de la Communauté Africaine de Pratiques sur la Gestion axée sur les Résultats de Développement à la Fondation pour le Renforcement des Capacités en Afrique (ACBF),

« Initiative de l'Afrique pour les résultats Technologies propres: leçons du foyer amélioré "Nansu" au Bénin », Etude cas N°36, juin 2016.

[34] S. G. Akouehou, H. Alingo, et C. Kpomalegni, « Approvisionnement en bois-énergie des grands centres urbains de Porto-Novo et de Cotonou au Sud du Bénin : une menace pour les mesures d'adaptation aux changements climatiques », présenté à 16ème colloque international en évaluation environnementale, Forêts, énergie, changement climatique et évaluation environnementale : pour une gestion durable , du global au local, 12-sept-2011.

[35] G. Pajean, « L'élaboration du verre », *Verre-Paris Then Versailles*, vol. 13, nº 5, p. 14, 2007.

[36] J. Decottignies *et al.*, « La collecte, le tri et le recyclage du verre des déchets ménagers et assimilés », Cercle National du Recyclage, nov. 2007.

[37] FAO, « Solutions d'emballage alimentaire adaptées aux pays en développement. », Rome, 2014.

[38] J.-L. Boutonnier, « Verre d'emballage alimentaire », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº F1322 V1, p. 27, mars 2012.

[39] Verre Avenir Le verre nait du verre, « Verre & développement durable Le verre, depuis toujours », Verre Avenir, Dossier thématique N°3, 2013 2012.

[40] « Collecte sélective et recyclage du verre. Premier chantier utilisant du verre recyclé parking du Stade scolaire avenue d'Estrée à Cayenne », CCCL, 2007.

[41] Projet de Gestion des Déchets Solides Ménagers au Bénin – GDSM, « Rapport d'avancement des activités des femmes récupératrices. Volet Valorisation des matières non organiques par les femmes récupératrices », Oxfam-Québec, AFEAS, août 2008.

[42] G. Bertolini, « Recyclage du calcin (verre cassé)Recherche de débouchés alternatifs », *Déchets Sci. Tech.*, nº 13, 1999.

[43] O. Boudlal, M. Khattaoui, M. Djemai, et M. Medani, « Etude du comportement mécanique d'un mélange de granulats naturels et du verre pour une utilisation dans la construction routière (S25) », présenté à 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon, France, 2015.

[44] O. Boudlal, M. Djemai, A. Hamza, et M. Khattaoui, « Valorisation de nouveaux matériaux naturels et recyclés dans la construction routière en Algérie », *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 76, nº 2, p. 523-535, oct. 2016.

[45] A. Imtiaz, « Use of Waste Materials in Highway Construction », School of civil engineering indiana department of transportation, Joint Highway Research Project Final Report FHWA/IN/JHRP-91/3, mai 1991.

[46] C. Lupien, « Projet pilote de valorisation du verre récupéré (non conforme pour le conditionnement) dans la construction de chaussées », Rapport présenté à RECYC-QUÉBEC, juin 2006.

[47] J. H. Woodrow, « Use of waste glass in highway construction (Update-1992) », Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, Technical assistance report, janv. 1993.

[48] R. Idir, M. Cyr, et A. Tagnit-Hamou, « Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars », *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, nº 7, p. 1309-1312, juill. 2010.

[49] B. Arab, R. Mehaddene, et Y. Bouchnab, « Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances », *Déchets Sci. Tech.*, nº N°75, 2017.

[50] Z. P. Bazant, G. Zi, et C. Meyer, « Fracture Mechanics of ASR in Concretes with Waste Glass Particles of Different Sizes », *J. Eng. Mech.*, vol. 126, nº 3, p. 226-232, mars 2000.

[51] İ. B. Topçu et M. Canbaz, « Properties of concrete containing waste glass », *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 2, p. 267-274, févr. 2004.

[52] S. B. Park, B. C. Lee, et J. H. Kim, « Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate », *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 12, p. 2181-2189, déc. 2004.

[53] M. J. Terro, « Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures », *Build. Environ.*, vol. 41, nº 5, p. 633-639, mai 2006.

[54] R. Idir, M. Cyr, et A. Tagnit-Hamou, « Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Etude des propriétés des bétons de verre. », vol. 16, nº 5/6, p. 70-77, déc. 2010.

[55] M. Behim et T. Ali Boucetta, « Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants », *Déchets Sci. Tech.*, nº 65, 2013.

[56] M. Serifou, « Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation », p. 191.

[57] S. A. Djomo, H. C. Kouakou, C. K. Kouadio, O. M. Boffoue, et E. Emeruwa, « Détermination d'une formulation de carreaux monocouche avec une incorporation de tessons de bouteille de verre », *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 17, nº 1, p. 269-274, juill. 2016.

[58] D. Ürge-Vorsatz et A. Novikova, « Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings », *Energy Policy*, vol. 36, nº 2, p. 642-661, févr. 2008.

[59] Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement de l'Hérault, « L'habitat individuel à qualité environnementale en méditerranée. Pour une construction bioclimatique et innovante dans l'Hérault », Conseil Général de l'Hérault, France, Carnet 3 Habiter sans s'étaler, mars 2013.

[60] M. H. Benzaama, « Etude du confort thermique dans l'habitat par des procédés géo-héliothermiques », Thèse en cotutelle Doctorat de 3ème cycle LMD, Université de Reims Champagne Ardenne & Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), France, 2017.

[61] P. Chalmers, « Changement climatique : Répercussions sur les bâtiments », Buildings_Briefing_FR_Web.pdf, juin 2014.

[62] J.-C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, et P. Walker, « Building houses with local materials : means to drastically reduce the environmental impact of construction », *Build. Environ.*, vol. 36, nº 10, p. 1119-1126, déc. 2001.

[63] S. Gaye, « Caractérisation des propriétés mécaniques, acoustiques et thermiques de matériaux locaux de construction au Sénégal », Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Université Cheihk Anta Diop de Dakar, Sénégal, 2001.

[64] E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo, et A. Messan, « Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment. », *J. Mater. Eng. Struct. «JMES»*, vol. 2, nº 2, p. 68‑76, 2015.

[65] B. Sorgho *et al.*, « Étude des propriétés mécaniques des géomateriaux argileux associant la décoction de Parkia Biglobosa (néré) », *Comptes Rendus Chim.*, vol. 19, nº 7, p. 895-901, juill. 2016.

[66] X. Berger et H. Sari, « A new dynamic clothing model. Part 1: Heat and mass transfers », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 39, nº 6, p. 673-683, juin 2000.

[67] C. Batier, « Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen », Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, 2016.

[68] American Society of Heating Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, « Chapter 9: Thermal Comfort », in *ASHRAE: Fundamentals Handbooks*, 2009e éd., Inch-Pound Edition, p. 9.1-9.27.

[69] Y. Jannot et T. Djiako, « Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale », *Int. J. Refrig.*, vol. 17, nº 3, p. 166-173, 1994.

[70] N. Morel et E. Gnansounou, « Energétique du bâtiment Section de Génie Civil, 4ème/5ème année », Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit / Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, sept-2008.

[71] M. H. Khalissa, « Comportement thermique des bâtiments », Département d'Architecture, Falculté des Sciences et de la Technologie, Université de Biskra.

[72] Y. Jannot et A. Degiovanni, *Mesures des propriétés thermiques des matériaux*, ISTE Editions. 2018.

[73] D. Ramalingom Barbary, « Optimisation topologique des transferts thermiques et massiques dans un canal asymétriquement chauffé », Thèse de Doctorat, Université de la Réunion, France, 2017.

[74] A. A. Djossou, « Etude des variations des propriétés thermophysiques et de la durabilité, en fonction de l'humidité des Eco-matériaux de construction au Bénin. », Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2014.

[75] P. Meukam, « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Doctorat / Ph.D, Université de Yaoundé I, Cameroun, 2004.

[76] M. Laurent et P.-L. Vuillermoz, « Conductivité thermique des solides », *Tech. Ing. Sci. Fondam. Constantes Phys.-Chim.*, nº K420 V2, p. 32, mars 1993.

[77] H. M. Bal, « Modélisation et mesure de propriétés thermiques d'un milieu poreux humide : brique de latérite avec gousse de mil », Thèse de doctorat, l'Université Chekh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 2011.

[78] V. Cérézo, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique », Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2005.

[79] S. O. G. Osséni, « Formulation et caractérisation thermomécanique de mortiers renforcés par des fibres du tronc de bananier », Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2017.

[80] N. Sotehi, « Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation », *Univ Mentouri-Constantine*, 2010.

[81] L. Chahwane, « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.

[82] C. Labintan, « Modélisation thermomécanique de la paroi des greniers de stockage de céréales en banco », Thèse de Doctorat en cotutelle, Université de Lorraine (France) & Université d'Abomey-Calavi (Bénin), France, 2018.

[83] A. Degiovanni, « Conductivité et diffusivité thermique des solides », *Tech. Ing. Mes.-Anal. Mes. Phys.*, nº R2850 V1, p. 19, janv. 1994.

[84] J.-L. Battaglia, A. Kusiak, et Puiggali, *Introduction aux transferts thermiques Cours et exercices corrigés*. Paris: Dunod, 2010.

[85] J. P. Mercier, G. Zambelli, et W. Kruz, *Traité des matériaux 1. Introduction à la science des matériaux*, 3ème édition entièrement revue et augmentée., vol. 1. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 1999.

[86] G. Fantozzi, S. Le Gallet, et J.-C. Niepce, *Science et technologies céramiques*. EDP Sciences, 2011.

[87] M. T. Diatta, « Matières premières argileuses du Sénégal: caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion », Thèse en cotutelle, Université Assane Seck de Ziguinchor et de l'Université de Limoges, Sénégal & France, 2016.

[88] G. Fantozzi, J.-C. Niepce, et G. Bonnefont, *Les céramiques industrielles: Propriétés, mise en forme et applications*. Dunod, 2013.

[89] P. Lefort, « Céramiques - Typologie des produits », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº N4812 V1, p. 22, juin 2018.
[90] M. Kornmann et P. Lafaurie, *Matériaux de construction en terre cuite Fabrication et propriétés*. Paris: Ed. Septima, 2005.
[91] M. Mrad, « Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, France, 2005.
[92] J. Thorez, « L'argile, minéral pluriel », *Bull. Société R. Sci. Liège*, vol. 72, nº 1, p. 19-70, 2003.
[93] M. Le Troedec, « Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques », Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2009.
[94] P. M. Chretien, « Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, France, 2010.
[95] O. Cuisinier, « Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, France, 2002.
[96] M. Kornmann, « Matériaux de terre cuite - Matières de base et fabrication », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº C905 V2, p. 29, 2009.
[97] S. Kadiebu Kandolo, « Elaboration d'éléments de support dans des dispositifs thermoélectriques multicouches », Thèse de Doctorat, Limoges, 2005.
[98] P. Blanchart, « Les céramiques silicatées », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº N4800 V1, p. 23, févr. 2014.
[99] M. Kornmann, « Matériaux de terre cuite - Propriétés et produits », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº C906 V2, p. 19, août 2009.
[100] L. Alviset, « Matériaux de terre cuite », *Tech. Ing.*, nº C905 V1, p. 22, mai 1994.
[101] A. Sirat, M. Belhadri, N. Boudjenane, et T. Bennama, « Extrusion et visualisation des pâtes d'argile au travers des orifices-Application à la céramique (Extrusion and visualization of clay pulp through orifices-Application to the ceramic) ».
[102] D. Wetshondo Osomba, « Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo) », Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 2012.
[103] R. Sokolar et L. Vodova, « The effect of fluidized fly ash on the properties of dry pressed ceramic tiles based on fly ash–clay body », *Ceram. Int.*, vol. 37, nº 7, p. 2879-2885, sept. 2011.
[104] R. Cojean, M. Audiguier, Z. Geremew, S. Laribi, et I. Thénevin, « Contributions d'Armines-Centre de Géosciences », Centre de Geosciences, Mines ParisTech, France, Rapport final Fondation MAIF projet « Aléa et risque sécheresse », janv. 2009.
[105] J. Vignes, « Modélisation de l'étape de façonnage des tuiles en terre cuite », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2014.
[106] M. Samara, « Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2007.
[107] R. Güler, P. Patla, T. R. Hess, R. K. Vempati, et D. L. Cocke, « Properties of fly-ash bricks produced for environmental applications », *J. Environ. Sci. Health Part Environ. Sci. Eng. Toxicol.*, vol. 30, nº 3, p. 505-524, mars 1995.
[108] A. M. Segadães, M. A. Carvalho, et W. Acchar, « Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products », *Appl. Clay Sci.*, vol. 30, nº 1, p. 42-52, août 2005.

[109] R. R. Menezes, H. S. Ferreira, G. A. Neves, H. de L. Lira, et H. C. Ferreira, « Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 25, nº 7, p. 1149-1158, mai 2005.

[110] A. Moropoulou, A. Bakolas, et E. Aggelakopoulou, « The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime », *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, nº 4, p. 633-639, avr. 2001.

[111] K. Elert, G. Cultrone, C. R. Navarro, et E. S. Pardo, « Durability of bricks used in the conservation of historic buildings – influence of composition and microstructure », *J. Cult. Herit.*, vol. 4, nº 2, p. 91-99, avr. 2003.

[112] A. Sridi, « Modélisations thermomécanique et numérique du comportement de maçonneries en briques alvéolées en terre cuite sous chargements mécanique et thermique sévères », Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à CentraleSupélec, Paris-Saclay, France, 2018.

[113] V. S. Burroughs, « Quantitative criteria for the selection and stabilisation of soils for rammed earth wall construction », A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of the Built Environment, University of New South Wales, Australia, 2001.

[114] J. Paulus, « Construction en terre crue : dispositions qualitatives et architecturales - Application à un cas pratique : Ouagadougou », Université de Liège, Belgique, Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master, 2015.

[115] S. Benlahmidi, « Etude du séchage convectif par l'énergie solaire des produits rouges », Doctorat en Sciences en : Génie Mécanique, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2013.

[116] G. Cultrone, C. Rodriguez-Navarro, E. Sebastian, O. Cazalla, et M. J. De La Torre, « Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing », *Eur. J. Mineral.*, vol. 13, nº 3, p. 621-634, mai 2001.

[117] J. Cuevas *et al.*, « Behavior of kaolinite and illite-based clays as landfill barriers », *Appl. Clay Sci.*, vol. 42, p. 497-509, 2009.

[118] A. Khalfaoui et M. Hajjaji, « A Chloritic-illitic clay from Morocco: Temperature-time-transformation and neoformation », *Appl. Clay Sci.*, vol. 45, nº 1-2, p. 83-89, juin 2009.

[119] M. Riccardi, « An approach to the dynamics of clay firing », *Appl. Clay Sci.*, vol. 15, nº 3-4, p. 393-409, oct. 1999.

[120] P. M. Nigay, T. Cutard, et A. Nzihou, « The impact of heat treatment on the microstructure of a clay ceramic and its thermal and mechanical properties », *Ceram. Int.*, vol. 43, nº 2, p. 1747-1754, oct. 2016.

[121] T.-D. Nguyen, « Etude du comportement au Feu des Maçonneries de Briques en Terre Cuite : approche expérimentale et modélisation du risque d'écaillage », Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Laboratoire MSME (FRE3160 CNRS), France, 2009.

[122] V. Sambou, « Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2008.

[123] A. Bouvenot, *Transferts de chaleur*. Paris ; New York: Masson, 1981.

[124] C. Pompeo et C. Gueret, « Conductivité thermique des matériaux », Centre Scientifique et Technique du Bâtiments (CSTB). Le futur en construction. Enveloppes légères et transferts. Division Hygrothermique des Ouvrages, Paris- Marne-La-Vallée -Grenoble - Nantes - Sophia Antipolis, Th-U Fascicule 2/5, déc. 2000.

[125] P.-M. Nigay, « Etude des transformations microstructurales de mélanges argile/biomasse lors de la cuisson et relations avec les propriétés mécaniques et thermiques », Thèse de Doctorat, Université fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées, France, 2015.

[126] R. R. Menezes, G. de A. Neves, et H. C. Ferreira, « O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas », *Rev. Bras. Eng. Agríc. E Ambient.*, vol. 6, nº 2, p. 303-313, 2002.

[127] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, « Réemploi, réparation et réutilisation », Brochure 8499, juin 2015.

[128] RECORD, « Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse. Revue des gisements et des procédés associés », Synthèse n°14-0913/1A, 2016.

[129] C. Bernard, « Caractérisation et Optimisation de la Combustion de Bois Fragmenté en Chaufferies Automatiques », Thèse de Doctorat, Université Henry Poincaré Nancy I, France, 2005.

[130] S. Bouvot et Mauduit, « Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois », ADEME DVNAC, Bureau d'Etudes TRIVALOR, MARCHE N°00 01 026 TC899-011421-CL-PF-LCR-rév. 5, nov. 2001.

[131] « Agendas de l'initiative de l'énergie durable pour tous (SE4ALL) », Ministère de l'Energie, des Recherches Pétrolières et Minières, de l'Eau et du Développement des Energies Renouvelables (MERPMEDER), République du Bénin, Rapport sur les agendas Energie Durable pour Tous au Bénin Période [2015-2020/2030] Version finale, juill. 2015.

[132] H. Kurama et M. Kaya, « Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture », *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, nº 9, p. 1922-1928, sept. 2008.

[133] M. Chen, « Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2012.

[134] A. Olgun, Y. Erdogan, Y. Ayhan, et B. Zeybek, « Development of ceramic tiles from coal fly ash and tincal ore waste », *Ceram. Int.*, vol. 31, nº 1, p. 153-158, janv. 2005.

[135] D. G. Pinatti *et al.*, « Incorporation of the ash from cellulignin into vitrified ceramic tiles », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 26, nº 3, p. 305-310, janv. 2006.

[136] A. Zimmer et C. P. Bergmann, « Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material », *Waste Manag.*, vol. 27, nº 1, p. 59-68, janv. 2007.

[137] M. C. Borlini, « Ceramics prepared from sedimentar clay with addition of ashes of organic matter of garbage and of the cellulignin of the pre-hydrolysis process of biomass: mechanical properties and inertization of heavy metals », *Sc Fac. Eng. Quím. Lorena-FAENQUIL Lorena SP Bras.*, 2002.

[138] C. S. Prasad, K. N. Maiti, et R. Venugopal, « Effect of substitution of quartz by rice husk ash and silica fume on the properties of whiteware compositions », *Ceram. Int.*, vol. 29, nº 8, p. 907-914, janv. 2003.

[139] M. C. B. Borlini, B. C. Santos, R. A. Conte, D. G. Pinatti, C. M. F. Vieira, et S. N. Monteiro, « Influence of the Granulometry of Organic Matter Ashes from Municipal Solid Waste on the Properties of Vitrified Ceramics », *Mater. Sci. Forum*, vol. 498-499, p. 552-557, nov. 2005.

[140] C. M. F. Vieira et S. N. Monteiro, « Incorporation of solid wastes in red ceramics: an updated review », *Matér. Rio Jan.*, vol. 14, nº 3, p. 881-905, 2009.

[141] C. S. Prasad, K. N. Maiti, et R. Venugopal, « Effect of rice husk ash in whiteware compositions », *Ceram. Int.*, vol. 27, nº 6, p. 629-635, janv. 2001.

[142] M. Dondi, G. Ercolani, G. Guarini, et M. Raimondo, « Orimulsion fly ash in clay bricks—part 1 », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 22, nº 11, p. 1729-1735, oct. 2002.

[143] M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo, et I. Venturi, « Orimulsion fly ash in clay bricks—part 2: technological behaviour of clay/ash mixtures », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 22, nº 11, p. 1737-1747, oct. 2002.

[144] M. C. Borlini, H. F. Sales, C. M. F. Vieira, R. A. Conte, D. G. Pinatti, et S. N. Monteiro, « Use of biomass ashes as an addition to red ceramics », in *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*, 2004, p. 2004.

[145] M. C. Borlini, H. F. Sales, C. M. F. Vieira, R. A. Conte, D. G. Pinatti, et S. N. Monteiro, « Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza », *Cerâmica*, vol. 51, nº 319, p. 192-196, sept. 2005.

[146] M. C. B. Gadioli, J. L. C. C. Mendonça, R. A. Conte, D. G. Pinatti, C. M. F. Vieira, et S. N. Monteiro, « Effect of the Particle Size of an Ash from Sugarcane Bagasse in the Properties of Red Ceramics », *Mater. Sci. Forum*, vol. 530-531, p. 538-543, nov. 2006.

[147] M. C. Borlini, J. L. C. da C. Mendonça, C. M. F. Vieira, et S. N. Monteiro, « Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar », *Matér. Rio Jan.*, vol. 11, nº 4, p. 433-441, déc. 2006.

[148] M. Aineto, A. Acosta, et I. Iglesias, « The role of a coal gasification fly ash as clay additive in building ceramic », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 26, nº 16, p. 3783-3787, janv. 2006.

[149] G. Pillet, A. Filhol, et L. Soum, « WACER - Valorisation des cendres de bois dans les céramiques élaborées par voie liquide – Synthèse publique », ADEME Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, Angers, France, juill. 2018.

[150] B.-J. Skrifvars, R. Backman, et M. Hupa, « Characterization of the sintering tendency of ten biomass ashes in FBC conditions by a laboratory test and by phase equilibrium calculations », *Fuel Process. Technol.*, vol. 56, nº 1-2, p. 55-67, juill. 1998.

[151] C. M. F. Vieira, M. C. Borlini, et S. N. Monteiro, « Corporation of ash from sugar cane bagasse into clay bricks », *Ind. Ceram.*, vol. 26, nº 2, p. 107-113, 2006.

[152] J. Phalippou, « Verres - Aspects théoriques », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº AF3600 V1, p. 18, juill. 2001.

[153] J. Barton et C. Guillemet, *Le verre, science et technologie*. Les Ulis: EDP sciences, 2005.

[154] É. Wers, « Élaboration d'un biomatériau poreux à base d'une matrice vitreuse induisant un phénomène d'ostéoconduction », Thèse de Doctorat, Université Rennes 1, France, 2014.

[155] J.-C. Lehmann, « Formulation du verre et produits verriers », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº J2296 V1, p. 18, 2010.

[156] B. Boulard et J.-L. ADAM, « Verres - Propriétés et applications », *Tech. Ing. Matér. Verres Céramiques*, nº AF3601 V2, p. 23, avr. 2018.

[157] J. Perez, *Matériaux non cristallins et science du désordre*. Presses Polytechniques et universitaires romandes, 2001.

[158] J. Wartman, D. G. Grubb, et A. S. M. Nasim, « Select Engineering Characteristics of Crushed Glass », *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, nº 6, p. 526-539, déc. 2004.

[159] N. Su et J. S. Chen, « Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 35, nº 4, p. 259-274, juin 2002.

[160] T. D. Dyer et R. K. Dhir, « Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component », *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 13, nº 6, p. 412-417, déc. 2001.

[161] A. Shayan et A. Xu, « Value-added utilisation of waste glass in concrete », *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 1, p. 81-89, janv. 2004.

[162] G. M. S. Islam, M. H. Rahman, et N. Kazi, « Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice », *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, nº 1, p. 37-44, juin 2017.

[163] J. O. Everhart, « Use of auxiliary fluxes to improve structural clay bodies », *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 36, p. 268-271, 1957.

[164] T. C. Shutt, J. H. Abrahams, et H. H. Campbell, « New building materials containing waste glass », *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 51, nº 9, p. 670-, 1972.

[165] N. M. P. Low, P. Fazio, et P. Guite, « Development of light-weight insulating clay products from the clay-sawdust-glass system », *Ceram. Int.*, vol. 10, nº 2, p. 59-65, avr. 1984.

[166] N. F. Youssef, M. F. Abadir, et M. A. O. Shater, « Utilization of soda glass (cullet) in the manufacture of wall and floor tiles », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 18, nº 12, p. 1721-1727, nov. 1998.

[167] F. Matteucci, M. Dondi, et G. Guarini, « Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles », *Ceram. Int.*, vol. 28, nº 8, p. 873-880, janv. 2002.

[168] A. C. Morelli et J. B. Baldo, « Ceramic slips with soda lime glass reject for maturation in low temperature », *Cerâmica Ind.*, vol. 8, nº 3, p. 42-46, 2003.

[169] S. R. Bragança et C. P. Bergmann, « Traditional and glass powder porcelain: Technical and microstructure analysis », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, nº 8, p. 2383-2388, juill. 2004.

[170] K. O. Godinho, J. N. F. Holanda, et A. G. P. da Silva, « Obtenção e avaliação de propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos à base de argila e vidros reciclados », *Cerâmica*, vol. 51, nº 320, p. 420-429, déc. 2005.

[171] Y. Pontikes, L. Esposito, A. Tucci, et G. N. Angelopoulos, « Thermal behaviour of clays for traditional ceramics with soda–lime–silica waste glass admixture », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 27, nº 2-3, p. 1657-1663, janv. 2007.

[172] Y. Pontikes, A. Christogerou, G. N. Angelopoulos, E. Rambaldi, L. Esposito, et A. Tucci, « Use of scrap soda–lime–silica glass in traditional ceramics », *Glass Technol.*, vol. 46, nº 2, p. 200-206, avr. 2005.

[173] S. Hariharan et G. Jebaraj, « Manufacture of bricks with partial replacement of clay with waste glass power », *Int. J. Res. Comput. Appl. Robot.*, vol. 6, nº 2, p. 1-24, févr. 2018.

[174] Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE), « RGPH4 : Que retenir des effectifs de population en 2013 ? », Direction des études démographiques - Ministère du Développement , de l'Analyse Economique et de la Prospective, République du Bénin, juin 2015.

[175] N. R. Ahoyo Adjovi et E. Guidibi, « Monographie de la commune de Zogbodomey », Mission de décentralisation République du Bénin & Cabinet « Afrique Conseil », Programme d'appui au démarrage des communes, avr. 2006.

[176] O. Akiyo, A. Afouda, I. Yabi, J. Adounkpe, et B. N'Bessa, « Impacts socio-économiques et environnementaux de la promotion des ouvrages ECOSAN dans le développement de la commune de Sèmè-Podji au sud du Bénin », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 7, nº 6, p. 2214, mai 2014.

[177] S. Rolland, « Transfert hydrique dans des sols argileux gonflants: influence du confinement », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Université de Lorraine, France, 2002.

[178] H. Nowamooz, « Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, France, 2007.

[179] H. Guiras-Skandaji, « Déformabilité des sols argileux non saturés : étude expérimentale et application à la modélisation », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, France, 1996.

[180] P. Tabani, « Transfert hydrique dans des sols déformables », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, France, 1999.

[181] H. Celik, « Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry », *Appl. Clay Sci.*, vol. 50, nº 2, p. 245-254, oct. 2010.

[182] F. El Fgaier, « Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2013.

[183] AFNOR, « NF P94-050 Sols: reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage ». sept-1995.

[184] AFNOR, « NF EN 1097-3 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire ». août-1998.

[185] AFNOR, « NF P94-054 Sols: reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau ». oct-1991.

[186] E. Sagbo *et al.*, « Characterization of Clay of the Benin Used in Ruminale Feeding. Complete Determination of the Smectites Contained in These Clays », *J. Environ. Prot.*, vol. 06, nº 11, p. 1322-1336, 2015.

[187] J.-P. Troalen, « Aptitude au compactage et comportement mécanique de mélanges vase-limon », in *Vèmes Journées, Toulon*, 1998, p. 407-416.

[188] E. Alonso, « Compactage et comportement de sols fins humides », *Rev. Fr. Géotechnique*, nº 111, p. 33-43, 2005.

[189] M. Ltifi et J. P. Tisot, « Étude expérimentale de l'effet du vieillissement sur la résistance non drainée d'un limon argileux », p. 6, 2007.

[190] R. Auvray, S. Rosin-Paumier, A. Abdallah, et F. Masrouri, « Etude de la fissuration due à la dessiccation des sols gonflants », p. 6, 2013.

[191] AFNOR, « NF P94-056 Sols: reconnaissance et essais. Analyse Granulométrique des sols - Méthode par tamisage à sec après lavage ». mars-1996.

[192] AFNOR, « NF P94-057 Sols: reconnaissance et essais. Analyse Granulométrique des sols - Méthode par sédimentation ». mai-1992.

[193] G. B. J. de Boer, C. de Weerd, D. Thoenes, et H. W. J. Goossens, « Laser Diffraction Spectrometry: Fraunhofer Diffraction Versus Mie Scattering », *Part. Part. Syst. Charact.*, vol. 4, nº 1-4, p. 14-19, 1987.

[194] O. Duval, H. Gaillard, et Y. Le Bissonnais, « Utilisation de la granulométrie à diffraction laser pour la caractérisation des matériaux-sols et des sédiments », in *Livre des résumés- Publications ASF*, 2001, vol. 36, p. 117.

[195] AFNOR, « NF P94-051 Sols: reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau ». mars-1993.

[196] AFNOR, « NF P11-300 Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d´infrastructures routières ». sept-1992.

[197] AFNOR, « NF P94-048 Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en carbonate. Méthode du calcimètre ». oct-1996.

[198] E. Wirth, F. Guitteny, et C. Mathonat, « Thermogravimétrie », *Tech. Ing. Mes. - Anal. Tech. Anal.*, nº Réf. : P1260 V3, p. 29, juin 2014.

[199] Y. S. Tankpinou Kiki, « Caractérisation minéralogique, thermique et microscopique des sols fins en technique routière », Thèse en cotutelle, Université de Bordeaux et Université d'Abomey-Calavi, France, 2016.

[200] Z. G. Yigzaw, « Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques: rôle de la microstructure », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2009.

[201] F. Hubert, « Modélisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré. Implications minéralogique et pédologique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2008.

[202] L. Bouna, « Fonctionnalisation des minéraux argileux d'origine marocaine par TiO2 en vue de l'élimination par photocatalyse de micropolluants organiques des milieux aqueux », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2012.

[203] AFNOR, « NF P94-093 Sols : reconnaissance et essais: Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié ». oct-1999.

[204] A. P'kla, « Caractérisation en compression simple des Blocs de Terre Comprimée (BTC) : application aux maçonneries "BTC-mortier de terre" », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2002.

[205] Y. Atlan, « Catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechnique d'Orléans », Département génie géologique / Ministère de l'industrie, de l'artisanat et du commerce, France, 78 SGN 178 GEG, mars 1978.

[206] G. Alves de Azeredo, « Mise au point de procédures d'essais mécaniques sur mortiers de terre, application à l'étude de leur rhéologie », Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2005.

[207] O. Izemmouren, K. Gadri, et A. Guettala, « Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée », avr. 2014.

[208] J.-C. Morel, A. P'kla, et H. Di Benedetto, « Essai in situ sur blocs de terre comprimée: Interprétation en compression ou traction de l'essai de flexion en trois points? », *Rev. Fr. Génie Civ.*, vol. 7, nº 2, p. 221-237, févr. 2003.

[209] M. Olivier et A. Mesbah, « Introduction à la construction en terre ». avr-2016.

[210] C. Bories, « Étude des caractéristiques d'un "porogene" d'origine biosourcée et mécanismes mis en œuvre pour l'obtention d'une brique de construction micro poreuse à haute performance thermique et mécanique », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2015.

[211] C.-H. Weng, D.-F. Lin, et P.-C. Chiang, « Utilization of sludge as brick materials », *Adv. Environ. Res.*, vol. 7, nº 3, p. 679-685, mai 2003.

[212] M. L. Martínez, D. Eliche, N. Cruz, et F. A. Corpas, « Utilización de bagazo de la industria cervecera para la producción de ladrillos para construcción », *Mater. Constr.*, vol. 62, nº 306, p. 199-212, juin 2012.

[213] H. Mekki, M. Anderson, M. Benzina, et E. Ammar, « Valorization of olive mill wastewater by its incorporation in building bricks », *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, nº 2-3, p. 308-315, oct. 2008.

[214] AFNOR, « NF EN 196-1 Méthodes d'essai des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques ». août-1995.

[215] ASTM Standard, « D 695-02a Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics ». oct-2002.

[216] D. Eliche-Quesada, F. A. Corpas-Iglesias, L. Pérez-Villarejo, et F. J. Iglesias-Godino, « Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing », *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, p. 275-284, sept. 2012.

[217] J. Lamon, « La rupture des céramiques », *Rev. Métallurgie*, vol. 92, nº 2, p. 265-284, févr. 1995.

[218] C. H. Kouakou et J. C. Morel, « Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder », *Appl. Clay Sci.*, vol. 44, nº 1-2, p. 27-34, avr. 2009.

[219] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, et N. Meunier, « Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth », *Mater. Struct.*, vol. 42, nº 8, p. 1101-1116, oct. 2009.

[220] Dr Fatih Birol, Directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), « COP24 : le secteur du bâtiment et de la construction, un potentiel inexploité (PNUE) », 2013.

[221] S. Gauthier, « Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3w », PhD Thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2012.

[222] F. D. Ponte et S. Klarsfeld, « Conductivité thermique des isolants », *Tech. Ing. Mes.-Anal. Mes. Phys.*, nº R2930 V2, p. 24, juin 2002.

[223] Y. Jannot, « Théorie et pratique de la métrologie thermique », Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Université Nancy, France, 2011.

[224] V. Cardinali, « Matériaux lasers dopés à l'ion ytterbium: Performances lasers en pompage par diodes lasers et étude des propriétés thermo-optiques à des températures cryogéniques », Ecole Polytechnique ParisTech, France, 2011.

[225] S. O. G. Osséni, C. Ahouannou, E. A. Sanya, et Y. Jannot, « Hot Plate Method with Two Simultaneous Temperature Measurements for Thermal Characterization of Building Materials », *Int. J. Thermophys.*, vol. 38, nº 6, p. 81, juin 2017.

[226] S. O. G. Osséni, C. Ahouannou, E. A. Sanya, et Y. Jannot, « Investigation on the use of cement motar containing banana fibers as thermal insultator in building », *Int. J. Adv. Res.*, vol. 4, nº 11, p. 1142-1152, nov. 2016.

[227] J. D. Carlson, R. Bhardwaj, P. E. Phelan, K. E. Kaloush, et J. S. Golden, « Determining Thermal Conductivity of Paving Materials Using Cylindrical Sample Geometry », *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, nº 2, p. 186-195, févr. 2010.

[228] Vincent Félix, « Caractérisation thermique de matériaux isolants légers. Application à des aérogels de faible poids moléculaire », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, France, 2011.

[229] Climate-Data.org, « Climat Abomey-Calavi », 08-sept-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.climate-data.org/afrique/benin/atlantique/abomey-calavi-59587/. [Consulté le: 08-sept-2019].

[230] S. Obahoundje, C. A. Houngan, A. A. Djossou, S. M. Djikou, M. Anjorin, et A. Vianou, « Revue de littérature sur l'influence de l'inertie thermique des matériaux locaux de construction sur le confort thermique des occupants : cas du Bénin », in *CIFEM2018 Conference Proceedings*, Cotonou, Bénin, 2018, p. 236.

[231] Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie (IEPF), « Efficacité énergétique de la climatisation en zone tropicale humide Tome 1 : Conception des nouveaux bâtiments », Agence Intergouvernementale de la Francophonie, Ministère de la Région Wallone, Québec Canada.

## TITRE DE LA THÈSE EN FRANÇAIS : VALORISATION DE REBUTS DE BOUTEILLES EN VERRE ET DES CENDRES DE BOIS DANS LA FABRICATION DE BRIQUES EN ARGILE CUITE


## RESUME

L'argile est une ressource locale, abondante mais peu valorisée au Bénin. Le recyclage des déchets constitue de nos jours, un enjeu majeur au niveau mondial. Les briques d'argile cuite sont des matériaux à fort tonnage de production capables d'absorber différents produits considérés comme des déchets. Cette thèse vise d'une part la valorisation des matériaux de construction localement disponibles au Bénin, notamment l'argile et d'autre part, le recyclage des déchets en construction. Ainsi, nous nous proposons de valoriser des bouteilles en verre non recyclés et des cendres issues de la combustion du charbon de bois lors de la préparation des repas au Bénin, dans la matrice argileuse destinée à l'élaboration de briques cuites. Le but est de ressortir les formulations idéales des produits qui présentent des propriétés physiques et mécaniques suffisantes. Les études ont montré que le dosage de 5% des cendres de bois du Bénin et 20% de verres broyés favorise un gain de résistance à la traction par flexion trois points sans modifier la résistance à la compression des blocs d'argile cuits de Zogbodomey et de Sèmè-Podji. En outre, le dosage en ajout ne modifie pas les propriétés thermiques des blocs cuits. L'utilisation des cendres de charbon de bois et des déchets de verre comme matières premières secondaires dans la fabrication de briques cuites constitue alors un grand atout pour l'amélioration du cadre de vie des béninois.



Mots clés : argile cuite, cendres de bois, verres broyés, propriétés, construction.


## TITLE OF THESIS IN ENGLISH: VALORIZATION OF CRUSHED GLASS BOTTLES AND WOOD ASHES IN THE MANUFACTURE OF FIRED CLAY BRICKS


## ABSTRACT

Clay is a local resource, abundant but little valued in Benin. Waste recycling is nowadays a major issue at the global level. The fired clay bricks are high production tonnage materials capable of absorbing different products considered as waste. This thesis aims on the one hand the valuation of building materials locally available in Benin, including clay and secondly, the recycling of waste under construction. Thus, we propose to valorize nonrecycled glass bottles and ashes from the burning of charcoal during the preparation of meals in Benin, in the clay matrix for the preparation of cooked bricks. The goal is to highlight the ideal formulations of products that have sufficient physical and mechanical properties. Studies have shown that the 5% Benin wood ashes content and 20% crushed glass content increase the tensile strength by three-point bending without modifying the compressive strength of the Zogbodomey fired clay blocks from Seme-Podji. In addition, the addition dosage does not modify the thermal properties of the fired blocks. The use of wood ashes and glass waste as a secondary raw material in the manufacture of fired bricks is an effective alternative to land and environmental conservation, and it can be a sustainable and cost-effective solution for the building industry. These materials are then a great asset for improving the living environment in Benin.



Keywords: fired clay, wood ashes, crushed glass, properties, building