

Université de Liège

Faculté des Sciences

École doctorale du Département de Géologie

Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences

par **Lavie Arsène Mango Itulamya**

Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée

Thèse soutenue le 29 mai 2019 devant le jury composé de :

Frédéric BOULVAIN (Président, ULiège)

Nathalie FAGEL (Promoteur, ULiège)

Frédéric COLLIN (Secrétaire, ULiège)

Johan YANS (UNamur)

Pascal PILATE (INISMa)

Nicolas COECKELBERGHS (Bureau d'architecture BC materials)

Thierry JOFFROY (Université Grenoble-Alpes, France)

Aubin NZEUKOU NZEUGANG (MIPROMALO, Cameroun)

Remerciements

Le cœur rempli de reconnaissance et de gratitude, je voudrais rendre grâce d'être arrivé au bout de ce travail. Je remercie de tout cœur ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Je remercie de manière spéciale Madame Nathalie Fagel de m'avoir permis de réaliser ce projet, et pour son encadrement.

Je remercie Fabienne Courtejoie, Pascal Pilate et Frédéric Collin qui ont suivi durant 3 années l'état d'avancement de ce projet au sein du comité de thèse.

Je remercie Thomas Granier, Martin Rauch, Sophie Bronchart, Géry Despret, Laetitia Fontaine, Laura Marcheggiano, Aurélien Nonet, Milly Caudron et Jonathan Michel qui m'ont aidé dans la construction de ce projet par leurs conseils.

Je remercie Michaël Maertens, Laure Vandemeulebroeke, Hilde Chambart, Georges Borremans, Yolande Jorissen, Arnaud Hins, Francis Deboever, Deroose Marleen, Philippe Delporte, Kevin Meessen, Lambert Mayers, Solange Hermans-Charlier, Brecht Embo, Frederic Duquenois, Pierre Flament, Jean-Benoît Collee et Alain Nicolas qui m'ont aidé dans la collecte des échantillons en Belgique en me donnant accès à leurs argilières.

Je remercie Anne Vergari et Julien Delbecq qui m'ont fourni les granulats.

Je remercie Dominique Wetshondo Osomba, Ntombi, Musao Kalombo, Cédric Matuatambula Kua Nzambi, Christophe Côte, Jada Zibika, William Mokuwa Kanku, Hodrine Mambuene, Édouard Mahema, Jeanine Kuva, Adonis Galemba Ngal et Giscard Rukomeza qui m'ont accueilli et accompagné lors de mon séjour à Kinshasa et au Kongo Central.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé dans les différentes analyses. Je pense tout particulièrement à Joël Otten, Delmelle Nicolas, Amaury Daras, Véronique Szepegiuk, Monique Denotte et Jean-Paul Cullus.

Je remercie l'INISMa et son directeur général Jacques Renotte pour l'accès au laboratoire.

Je remercie Meriam El Ouahabi, François Fontaine, Élisabeth Pleuger, Jemaa Amakrane, Nadia Bekkouch et Safae Oumnih, mes collègues de laboratoire, pour le soutien qu'ils m'ont apporté.

Je remercie tout le personnel du Département de Géologie de l'Université de Liège que j'ai côtoyé ces 3 dernières années, pour la bonne humeur.

Je remercie Hervé Blandin, qui m'a permis de participer à une auto-construction en terre.

Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire CRAterre-ENSAG qui m'a accueilli et m'a guidé tout au long du stage effectué dans le cadre de cette thèse, qui m'a fourni de la documentation et m'a orienté dans mes recherches. En particulier Arnaud Misse, Bakonirina Rakotomamonjy, Hugo Gasnier, Alexandre Douline, Majid Hajmirbaba, François Streiff, Martin Pointet, Patrick Ribet, Basile Cloquet, Eugénie Crete, Patrice Doat, Christian Belinga Nko'o, Sébastien Moriset, Thierry Joffroy, Philippe Garnier, Romain Anger, Alba Ribeiro Olmos, Nathalie Sabatier, David Gandreau, Christophe De Grave et Anne Collin.

Je remercie ceux qui, par leurs encouragements m'ont motivé à aller au bout de ce travail, en particulier mes parents, mon frère et mes 4 sœurs.

Je remercie tous mes amis qui m'ont apporté leur aide d'une quelconque façon. Je pense particulièrement à Christian Cirhuza, Marie Sangwe, Barbara Krzonkalla, Dricyl Angama-Latchimy, Bernadette Cunin et Anne-Sophie Mreyen.

Je remercie Frédéric Boulvain, Johan Yans, Nicolas Coeckelberghs, Thierry Joffroy et Aubin Nzeukou Nzeugang qui ont accepté de se joindre au jury de cette thèse.

Je vous remercie d'avance vous tous, mes amis, qui viendrez me soutenir à ma défense publique.

Je vous remercie également vous tous qui lirez ce travail et qui y porterez un quelconque intérêt.

Résumé

Le matériau « terre » représente une ressource naturelle répandue dans les sols et les formations sédimentaires superficielles. Il constitue une alternative pour construire des logements durables à faible coût environnemental et pour les pays en développement à faible coût économique à condition de sélectionner des terres adéquates et/ou prétraiter des terres inadéquates. Cette thèse apporte une contribution sur la production des matériaux de construction économiques et écologiques pour d'une part répondre aux défis de logement dans les régions de Kinshasa et du Kongo Central et d'autre part promouvoir le développement des matériaux en terre crue en Belgique. La thèse comporte deux objectifs spécifiques. Le premier objectif spécifique consiste à évaluer l'aptitude des formations argileuses superficielles pour la conception des Blocs de Terre Comprimée (BTC). Le second objectif vise à augmenter la durée de vie de ces blocs.

Le matériel argileux étudié (167 échantillons) a été prélevé dans 62 sites répartis dans 21 formations et membres argileux en Belgique et en RDC. Ces échantillons ont été caractérisés par la mesure de paramètres minéralogiques (minéralogie totale et fraction argileuse), chimiques (éléments majeurs) et géotechniques (granulométrie, limites de consistance, perte au feu, retrait longitudinal de séchage et nature), principaux tests pour sélectionner les terres propices à la construction en BTC. Les résultats de ces tests ont montré que ces échantillons peuvent être utilisés, moyennant ou non des prétraitements, dans la construction en BTC.

Des échantillons représentatifs ont été sélectionnés pour étudier cinq paramètres affectant la durée de vie des BTC. L'influence de la nature des minéraux argileux a été étudiée en utilisant 5 formations argileuses de composition minéralogique différente. L'influence de la taille des particules a été testée en ajoutant 3 types de granulats de dimensions différentes (i.e., 0/2, 0/4 et 0/6,3 mm). L'influence de la pression de mise en forme a été évaluée en compactant les BTC avec 3 pressions (i.e., 100, 200 et 300 kN). L'influence de la quantité d'eau a été évaluée en ajoutant de 3 à 10 % d'eau. L'influence de la stabilisation a été faite en ajoutant, en différentes proportions, soit des substances minérales (granulat rocheux, sable alluvionnaire), soit des déchets agricoles bruts (bagasse de canne à sucre) ou prétraités (cendre issue de la combustion de la bagasse).

Des BTC et des éprouvettes ont été produits et caractérisés par leur retrait de séchage, leur résistance à l'abrasion, leur résistance à la compression et à la flexion, les essais d'absorption d'eau par capillarité, d'immersion complète, d'égouttement accéléré et enfin de gel-dégel. La caractérisation des BTC et éprouvettes montre que les résistances à l'absorption d'eau par capillarité, à l'égouttement accéléré et au gel-dégel augmentent avec le pourcentage du stabilisant granulat ajouté. Les résistances à la compression, à la flexion et à l'abrasion n'augmentent pas avec l'ajout de stabilisant pour toute formation argileuse. La résistance à l'immersion complète diminue avec l'ajout de granulat. L'ajout des différents stabilisants réduit le retrait dû au séchage. L'ajout de fibre augmente la résistance à la flexion. La résistance à la compression diminue avec la quantité d'eau ajoutée. L'augmentation de la pression de mise en forme permet d'augmenter la résistance en compression.

Cette étude démontre que les gisements argileux sélectionnés permettent de produire des BTC à faibles coûts environnemental. En Belgique, les formations argileuses testées permettent de produire des BTC avec une bonne performance mécanique, pouvant être utilisés à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment. En RDC, ces matériaux de construction répondent à des normes de résistance à la détérioration et sont compatibles avec les cultures constructives locales. De plus, ces matériaux représentent une alternative économique pour les pays en développement comme la RDC.

Mots clés : Bloc de Terre Comprimée, Formation argileuse, Kinshasa, Kongo Central, Belgique, Durabilité, Terre crue.

Abstract

"Earth" material represents a natural resource that is widespread in soils and superficial sedimentary formations. It is an alternative to build sustainable housing on the condition of selecting suitable earth and/or pretreating inadequate earth. Moreover in developing countries it also represents an economic alternative for construction material. This thesis contributes on one hand to produce economic and ecological building materials to meet housing challenges in Kinshasa and Kongo Central regions and on another hand to promote the development of earth materials in Belgium. The thesis is built on two main specific aims. The first aim is to evaluate the ability of surface clay formations to produce Compressed Earth Block (CEB). The second aim is to increase the lifetime of these blocks.

The material studied (167 samples) was collected from 62 sites in 21 clay formations and clay members in Belgium and DRC. These samples were characterized by the measurement of mineralogical (bulk powder and clay fraction), chemical (major elements) and geotechnical (granulometry, plasticity, loss on ignition, longitudinal drying shrinkage and nature) parameters; the main tests to select the earth suitable for CEB construction. The results of these tests showed that these samples can be used, with or without pre-treatments, in CEB construction.

Representative samples were selected to study five parameters affecting the lifetime of CEB. The influence of the nature of the clay minerals was studied using 5 clay formations with different mineralogical composition. The influence of particle size was tested by adding 3 types of aggregates with different sizes (i.e., 0/2, 0/4 and 0 / 6.3 mm). The influence of the formatting pressure was studied by compacting CEB with 3 pressures (i.e., 100, 200 and 300 kN). The influence of the quantity of water was evaluated by adding 3 to 10% water. The influence of the stabilization was differentiated by adding, in different proportions, either mineral components (rock aggregate, alluvial sand) or vegetal raw (sugarcane bagasse) or pretreated (bagasse ashes) wastes.

CEB and test pieces were produced and characterized by drying shrinkage, abrasion resistance, compression test, bending test, capillary water absorption test, complete immersion test, accelerated drip test and freeze-thaw test. The characterization of CEB and test pieces shows that the resistance to water absorption by capillarity, accelerated drip and freeze-thaw increase with the percentage of aggregate stabilizer added. Compressive, flexural and abrasion strengths however do not increase with the addition of stabilizer for any type of clay formation. Further, resistance to full immersion decreases with the addition of aggregate. Next the addition of stabilizers reduces drying shrinkage and the addition of sugarcane bagasse increases the flexural strength. Additionally, the compressive strength decreases with the percentage of water added. Lastly, the increase of the formatting pressure allows to increase the compressive strength.

This study enhances that selected clay deposits can produce CEB with low environmental costs due to the use of local and natural materials. In Belgium, the tested clay formations allow to produce CEB with good mechanical performance, which can be used inside or outside the building. In DRC these building materials meet standards of resistance and are compatible with local constructive cultures. In addition the local studied clay materials represent an interesting economic alternative to meet the demand for housing in developing countries like DRC.

Key words: Compressed Earth Block, Clay Formation, Kinshasa, Kongo Central, Belgium, Durability, Raw earth.

Table des Matières

I. Introduction.....	9
I.1 Introduction générale.....	9
I.2 La construction en terre crue.....	14
I.2.1 Historique.....	14
I.2.2 Avantages de la terre crue.....	15
I.2.3 Techniques de construction en terre crue.....	16
I.2.4 Bloc de Terre comprimée.....	18
I.3 Le matériau terre.....	23
I.3.1 Généralités.....	23
I.3.2 Propriétés des terres.....	25
I.3.3 Stabilisation.....	29
I.4 La terre crue en Belgique.....	32
I.4.1 Généralités.....	32
I.4.2 Patrimoine terre crue en Belgique.....	33
I.4.3 Les produits de terre crue en Belgique.....	36
I.4.4 Les acteurs de la terre crue en Belgique.....	37
I.5 La terre crue à Kinshasa et du Kongo Central.....	38
I.6 Synthèse.....	40
II. Méthodes expérimentales.....	42
II.1 Analyse des terres et des argiles.....	42
II.1.1 Analyse chimique par Fluorescence X (FX).....	42
II.1.2 Caractérisation minéralogique (DRX).....	42
II.1.3 Analyse granulométrique.....	43
II.1.4 Limites de consistance.....	44
II.1.5 Perte au feu.....	44
II.1.6 Retrait longitudinal de séchage.....	45
II.1.7 Nature (classification des terres).....	46
II.2 Fabrication des Blocs de Terre Comprimée (BTC).....	48
II.2.1 Presse manuelle.....	48
II.2.2 Barrettes.....	48
II.2.3 Presse hydraulique.....	49
II.3 Caractérisation des Blocs de Terre Comprimée (BTC).....	49
II.3.1 Retrait volumique de séchage.....	49
II.3.2 Essai de flexion.....	49

II.3.3	Résistance à la compression	50
II.3.4	Résistance à l'abrasion.....	51
II.3.5	Capillarité	52
II.3.6	Essais relatifs à la résistance à l'eau	53
II.3.7	Essai relatif à la résistance aux cycles de gel-dégel	54
II.3.8	Test de durabilité mouillage/séchage	54
II.4	Synthèse	55
III.	Résultats expérimentaux.....	56
III.1	Échantillonnage et propriétés des échantillons prélevés en Belgique	56
III.1.1	Introduction : les argiles belges, synthèse de la bibliographie.....	56
a)	Argiles du Quaternaire	56
b)	Argiles du Tertiaire	59
c)	Argiles du Secondaire	65
d)	Les argiles liées aux paléaltérations.....	67
III.1.2	Argiles échantillonnées en Belgique.....	71
a)	Argiles du Quaternaire	Erreur ! Signet non défini.
b)	Argiles du Tertiaire	Erreur ! Signet non défini.
c)	Argiles du secondaire	Erreur ! Signet non défini.
d)	Argiles liées aux paléaltérations	Erreur ! Signet non défini.
III.1.3	Résumé des caractéristiques minéralogiques et géotechniques des argiles belges .	72
III.2	Échantillonnage et propriétés des échantillons prélevés en R.D.Congo	81
III.2.1	Description de la région d'étude	81
a)	Géologie régionale	81
b)	Sols.....	85
III.2.2	Sites étudiés	85
a)	Kwilu Ngongo.....	85
b)	Mbanza Ngungu.....	94
c)	Nkamba.....	96
d)	Kasangulu	97
e)	Lukala	99
III.2.3	Résumé des propriétés des matériaux argileux de Kinshasa et du Kongo Central	100
III.3	Formulations des matériaux à partir des échantillons collectés en Belgique	102
III.3.1	Influence de la nature des granulats sur le comportement des BTC.....	102
a)	Réalisation des mélanges	102
b)	Caractérisations des BTC.....	103

III.3.2 Influence de la taille des granulats sur le comportement des BTC	107
a) Réalisation des mélanges	107
b) Caractérisation des mélanges	112
III.4 Formulations des matériaux à partir des échantillons collectés à Kinshasa et au Kongo Central	123
III.4.1 Formulation en terre-bagasse	123
III.4.2 Formulation terre – cendre de bagasse – chaux	125
III.4.3 Formulations terre-sable et terre-concassé.....	127
III.4.4 Test de durabilité mouillage/séchage	129
III.5 Synthèse	130
IV. Discussion et recommandations	132
V. Conclusion et perspectives	137
Références	140
Annexes	213
I. Analyse chimique	215
II. Retrait de séchage.....	216
III. Perte au feu	219
IV. Limites d’Atterberg	223
V. Granulométrie Laser	237
VI. Résistance à la flexion	240
VII. Résistances à la compression des BTC	243
VIII. Résistance à la compression des éprouvettes cubiques.....	253
IX. Diffractogrammes	255
IX.1 Fraction argileuse.....	255
IX.2 Poudre totale	312
X. Rapport de séjour RDC	380
XI. Rapport de stage	386
XII. Résumés et publications	397

I. Introduction

I.1 Introduction générale

Objectifs de la recherche

Face aux défis environnementaux actuels liés aux changements climatiques et à l'épuisement des ressources (Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2016), le secteur du bâtiment doit rénover ses pratiques et méthodes de conception tout en tenant compte de critères économiques, sanitaires et de confort. ONU Habitat estime que 3 milliards d'êtres humains seront mal logés à l'horizon 2030. Vu sa disponibilité, la terre crue constitue une alternative viable dans le secteur de la construction afin de répondre aux besoins de la population mondiale (Magniont, 2010, Niroumand et al. 2017). Cependant des études scientifiques doivent être menées sur ce matériau afin de définir des conditions de fabrication à l'échelle industrielle, les précautions de mise en œuvre et de maintenance. En effet, malgré ses nombreux avantages écologiques, thermiques et économiques, la terre crue présente l'inconvénient de se détériorer sous l'effet des conditions climatiques. Il est donc essentiel de prendre des précautions afin d'accroître sa durabilité.

L'objectif global de cette thèse est de contribuer à l'amélioration et au développement des matériaux de construction locaux élaborés à partir des Blocs de Terre Comprimée (BTC). Spécifiquement, cette étude vise à :

- 1) définir les propriétés des matériaux argileux pour la conception des BTC ;
- 2) améliorer les performances et augmenter la durée de vie des BTC.

Deux zones cibles ont été choisies pour étudier les potentialités de la terre crue dans le domaine de la construction. En Belgique, le secteur de la construction en terre crue est encore jeune et peu connu du grand public. Son développement est confronté à un nombre de freins : le coût élevé de mise en œuvre, le manque de standardisation, le manque professionnel pour la mise en œuvre et une faible connaissance du matériau terre pour la construction en terre crue. Ces freins conduisent à un manque de marché des produits en terre crue en Belgique (LOCI, 2016). Certaines initiatives développées récemment ont été arrêtées pour cette raison (e.g., la société ARGIO à Tubize qui a abandonné la production des briques de terre crue en 2016 et la société ARGIBAT à Wanlin qui a fait faillite en 2018). La Belgique a été choisie pour améliorer la connaissance des produits en terre crue, notamment en caractérisant des matériaux argileux belges et en développant des procédés d'amélioration des produits en terre crue.

La région de Kinshasa et du Kongo Central a été choisie pour répondre au défi du développement en R.D. Congo. Cette région connaît en effet une forte expansion spatiale et démographique avec comme conséquence le développement d'une région périurbaine dans laquelle la qualité de l'habitat est un problème crucial (Lateef et al., 2010 ; Mango-Itulamy, 2015 ; Halleux et al., 2016).

Ce projet de recherche enrichira la base de données qui sert de support au démarrage de projets d'exploitation industrielle ou semi-industrielle de matériaux argileux locaux. Il devrait aboutir à l'élaboration d'un protocole opératoire pour la production de briques de terre crue, qui pourra être appliqué dans d'autres régions.

Projet de recherche

Pour répondre aux objectifs spécifiques précités, l'étude comporte 2 volets complémentaires. Le premier volet vise à caractériser les ressources argileuses des 2 zones cibles. Le second volet consiste en la fabrication de briques de terre crue à partir des matériaux argileux locaux selon

la technique de Bloc de Terre Comprimée (BTC). Les performances mécanique et hygrométrique, ainsi que la durée de vie des BTC ont été améliorées par l'ajout en proportions variables de différents stabilisants. Les stabilisants testés varient dans les 2 zones cibles. En Belgique, nous avons opté pour l'ajout de granulats. Parmi les différents granulats commercialisés (calcaire, porphyre, grès, graviers alluvionnaires ou recyclage de démolition) et généralement utilisés comme matériaux de construction (FEDIEX, 2018), nous en avons testé 3 qui se distinguent par leurs compositions et leurs comportements mécaniques. Le premier est un granulats calcaire issu d'une roche sédimentaire constituée essentiellement de carbonate de calcium (75%). Le second granulats correspond à un porphyre, il s'agit d'une roche d'origine magmatique constituée essentiellement de plagioclase (43 %) et de quartz (30 %). Le troisième granulats est un grès ou roche sédimentaire riche en mica (44 %), en quartz (19 %) et en feldspath (16 %).

Dans la région de Kinshasa et Kongo Central, les stabilisants testés sont la bagasse de canne à sucre (déchet agricole), la cendre issue de la combustion de la bagasse, le sable alluvionnaire, et les fines concassées de broyage d'une roche gréseuse. Le sable alluvionnaire, et le concassé de broyage sont largement présents et utilisés dans près de 83 % de nouvelles constructions à Kinshasa (PNUD, 2009a). La bagasse de canne à sucre est un déchet largement présent dans plusieurs régions rurales du Kongo Central. Les propriétés géotechniques des briques crues obtenues sont comparées afin de retenir les formulations qui offrent la meilleure durabilité des briques de terre crue.

Environnement de travail

La recherche a été réalisée dans l'unité de Recherche Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs) à l'Université de Liège (ULiège). Le comité de thèse est constitué d'une géologue (Nathalie Fagel, promotrice de la thèse, laboratoire AGEs, ULiège), d'un ingénieur civil des constructions (Frédéric Collin, laboratoire des Géotechnologies, GeO³ ULiège), d'une architecte (Fabienne Courtejoie, ULiège) et d'un ingénieur en chimie des matériaux (Pascal Pilate, BCRC, Mons). Leur collaboration a permis une approche globale et pluridisciplinaire de la construction en terre crue.

Les laboratoires impliqués entretiennent une collaboration via des projets de recherche communs et ont apporté des expertises complémentaires et les infrastructures requises à la réalisation du projet de thèse.

L'Unité de Recherche Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs) du Département de Géologie de l'ULiège possède une expertise reconnue dans la caractérisation des argiles naturelles et dispose des infrastructures pour l'étude des matériaux argileux avec en particulier un appareil de diffraction des rayons X performant (i.e., D8-Eco) permettant l'interprétation qualitative et semi-quantitative des minéraux argileux. Depuis 2013, 4 mémoires et 3 thèses, concernant la thématique de la valorisation des géoressources argileuses ont été réalisées au sein de ce laboratoire. AGEs a également participé à la thématique des ressources naturelles développée au travers de la plateforme Afrique Centrale mise en place à Kinshasa par le Centre pour le Partenariat et la Coopération au Développement (PACODEL, ULiège) dans le domaine des territoires périurbains.

Le Laboratoire des Géotechnologies (GeO³, Département ArGEnCo) possède le matériel nécessaire pour réaliser une identification géotechnique des matériaux argileux et caractériser leur comportement hydro-mécanique. Il s'est spécialisé dans la modélisation du comportement

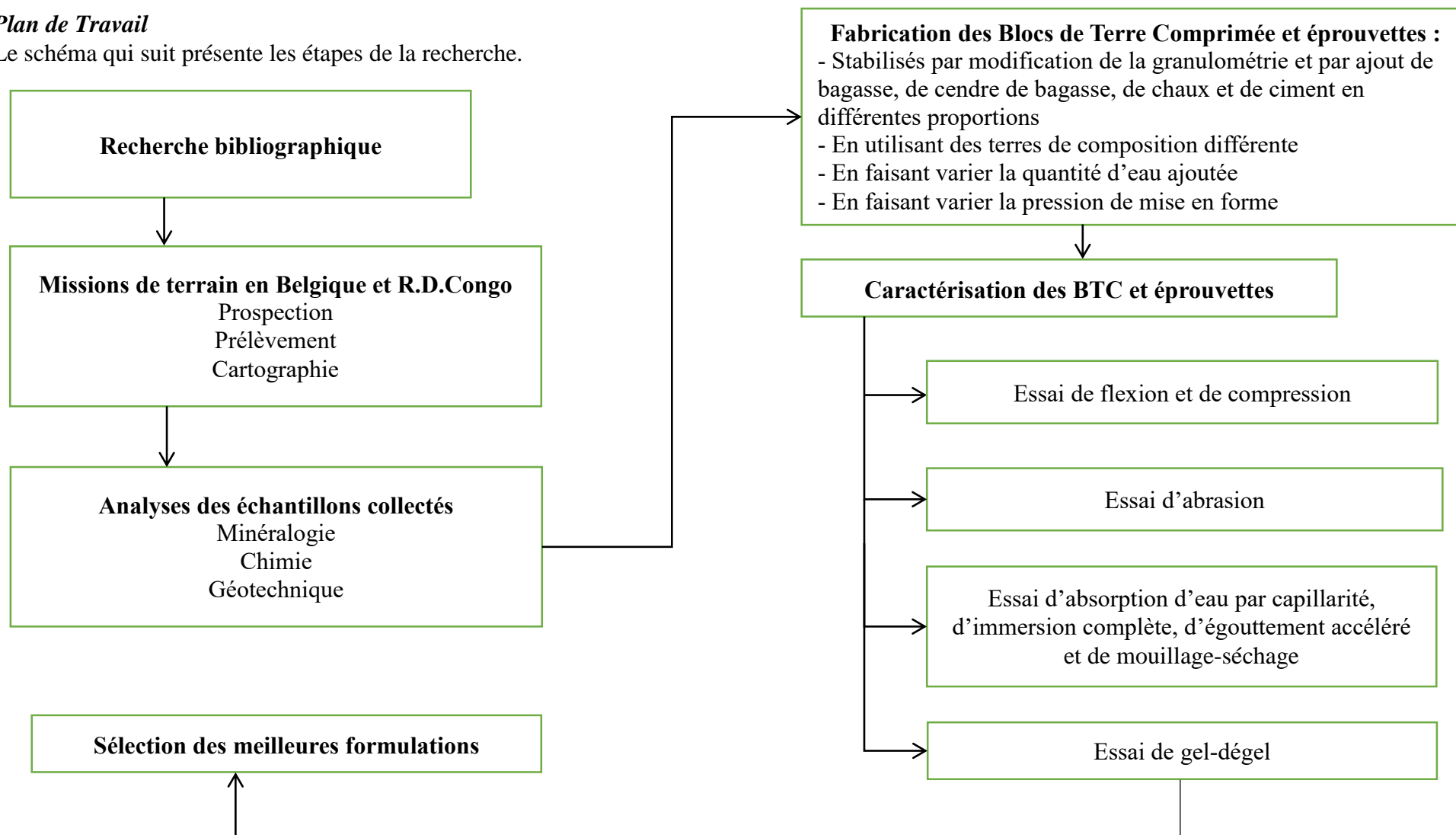
des matériaux argileux, et participe à plusieurs projets sur des essais classiques de mécanique de sols.

Le Belgian Ceramic Research Centre (BCRC) possède une grande expertise dans le développement et les applications des matériaux, dans l'investigation et la caractérisation des sols et dans les problématiques liées à l'environnement. Il dispose des laboratoires et équipements pour tout type de réalisations et tests portant sur les matériaux de construction.

En complément, le projet a bénéficié de l'expertise de Fabienne Courtejoie qui a participé à la mise en place de la plateforme Afrique Centrale à Kinshasa ainsi qu'à plusieurs projets sur l'architecture en zones périurbaines.

Plan de Travail

Le schéma qui suit présente les étapes de la recherche.



La recherche bibliographique a été orientée sur le matériau terre afin de définir ses propriétés d'usage dans la construction en BTC ; les analyse des cartes géologiques afin de repérer les lieux des gisements potentiels contenant des dépôts argileux ; et l'identification éventuelle des principaux acteurs de la filière terre crue.

Les missions de terrain en Belgique et en RDC ont consisté en la prospection, le prélèvement d'échantillons représentatifs. De plus en RDC 2 sites sur lesquels se développe une forte activité de valorisation des matériaux argileux ont été cartographiés.

La caractérisation des échantillons collectés en laboratoire a porté sur les principaux tests qui permettent de sélectionner les terres propices à la construction en BTC.

Pour répondre au premier objectif spécifique d'améliorer la durée de vie des BTC, la caractérisation des BTC s'est faite par des tests de durabilité. La durabilité d'un BTC est sa résistance à la détérioration au fil du temps, i.e. la résistance à l'action de l'eau, la résistance à l'abrasion, la résistance au gel-dégel ou encore la résistance aux contraintes mécaniques (NZS, 1998). Il existe plusieurs mesures de la durabilité d'un BTC (essai d'égouttement, essai d'abrasion, essai de pulvérisation, rapport des résistances humide et sèche, etc., Ogunye et Boussabaine, 2002a ; NZS, 1998). Il s'agit pour la plupart de mesures strictes transposées des matériaux industriels (Bui et al. 2014). Plusieurs auteurs ont tenté de développer différents types de tests de durabilité sur des BTC: test de précipitation (Ogunye et Boussabaine, 2002b), chambre de simulation climatique (Hall, 2005), test d'absorption d'eau par capillarité, d'immersion complète et de gel-dégel (Guerin, 1985), test d'égouttement (Heathcote, 1995), test de vieillissement (Guettala et al., 2006), etc. Dans notre étude, la durabilité a été mesurée grâce aux tests d'abrasion, d'absorption d'eau par capillarité, d'immersion complète, d'égouttement, de mouillage-séchage et de gel-dégel. Ces tests ont été choisis car il s'agit de tests essentiels pour mesurer la durabilité d'un BTC face à l'action de l'eau, à l'abrasion et au gel/dégel ; et que ces tests de durabilité nécessitent peu d'outils pour être réalisés. La caractérisation des BTC par le test de compression a été choisie car il s'agit du principal test cité dans les normes de production des BTC.

Plusieurs paramètres influencent la durabilité d'un BTC: la masse volumique de la terre (Patty, 1936), la composition de la terre (Heathcote, 2002; Crowley, 1997), la nature du stabilisant utilisé (Heathcote, 2002), le degré de compactage (Crowley, 1997), les précipitations, les cycles gel-dégel et mouillage-séchage (Moevus et al., 2012), l'âge des échantillons en terre (Heathcote, 2002), la texture de surface (Crowley, 1997), etc. Dans ce travail on a étudié 5 paramètres pouvant affecter la durabilité des BTC : la nature des minéraux argileux présents dans la terre, la taille des particules, la pression de mise en forme, la quantité d'eau ajoutée et le pourcentage du stabilisant. La granulométrie et la plasticité sont les 2 paramètres principaux pour déterminer la convenance d'une terre (Jiménez et Guerrero, 2007). Nous avons donc choisi d'étudier les effets de la nature des minéraux argileux présents dans la terre et de la taille des particules. L'étude de l'effet du pourcentage du stabilisant sur la durabilité d'un BTC consiste à répondre à l'objectif de valoriser les granulats et les déchets végétaux dans la construction en terre. L'étude des effets de la pression de mise en forme et de la quantité d'eau ajoutée vise à montrer s'il est possible d'augmenter la durée de vie des BTC sans avoir recours à l'ajout de stabilisants.

1.2 La construction en terre crue

1.2.1 Historique

La « terre » est utilisée comme matériau de construction depuis onze millénaires sur tous les continents (Anger et al. 2011). Ce terme désigne un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols et les sédiments qui résulte de l'altération physique (fragmentation sans modification de la nature des minéraux), chimique et biologique d'une roche mère sous l'action du climat, de l'érosion ou des organismes vivants (Pesson, 1971 ; Soltner, 1992). Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'Humanité. D'après l'UNESCO, 20% du nombre de sites enregistrés comme patrimoine mondial sont entièrement ou partiellement construits en terre (Anger et al. 2011). Ceci témoigne du riche patrimoine architectural en terre crue.

Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'Homme. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds (Anger et al. 2011). La ville syrienne de Tell Feres de plus de 7000 ans ainsi que la Citadelle d'Ulug Dêpé de plus de 5000 au Turkménistan sont quelques exemples (Fig. 1). À l'Antiquité et au Moyen-Age, plusieurs constructions en terre ont été réalisées telles que la cité antique de Volubilis au Maroc, ou le grand Kyz Kala à Merv au Turkménistan (Moriset, 2018, Fig. 1).



Fig. 1. Exemples anciens de constructions en terre. De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Feres en Syrie, citadelle d'Ulug Dêpé au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala au Turkménistan (Moriset, 2018).

Plusieurs constructions modernes en terre réparties aux quatre coins de la planète montrent la persistance de l'intérêt pour la construction en terre (Fig. 2). Dans des régions rurales d'Amérique Latine, d'Asie ou d'Afrique, la terre a été et est toujours utilisée comme un matériau de construction privilégié. Par contre, en Europe, comme dans d'autres pays industrialisés, la terre crue a perdu de plus en plus d'importance avec l'industrialisation au XIXe siècle. Il s'en est suivi une perte des savoir-faire (Casel, 2000). Suite à la crise énergétique des années 1980, la terre crue a peu à peu regagné l'intérêt des architectes. Mais la terre crue doit encore retrouver sa place dans la gamme des matériaux de construction existants.

Dans les pays en voie de développement, la terre crue est souvent considérée comme symbole de pauvreté. La construction en terre est remplacée par des constructions en béton, tôle et parpaing, considérées comme modernes et durables (CRAterre et al., 1979 ; Anger et Fontaine, 2009 ; Anger et al., 2011).

Dans le bâtiment, la terre peut être utilisée comme isolant associé à la paille ou pour la rénovation, réparateur des bâtiments construits en terre, couche de finition intérieure, mur porteur, enduit intérieur (Ecoconso, 2017).

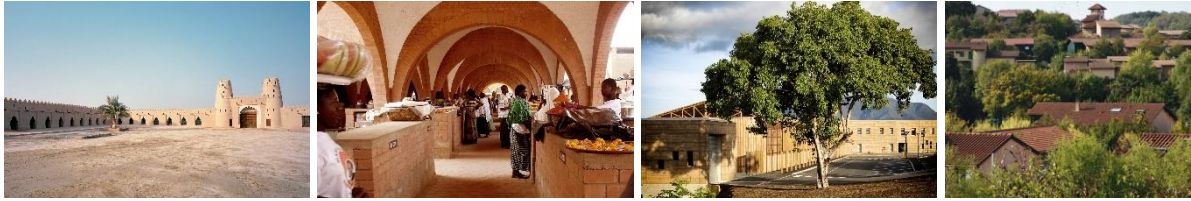


Fig. 2. Exemples récents de constructions en terre. De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili, Al Ain à Abou Dhabi aux Emirats arabes unis créé en 1891 et restauré en 2008 ; le marché de Koudougou au Burkina-Faso construite en blocs de terre comprimée au début des années 2000 ; une école en pisé à Koné en Nouvelle Calédonie construite en 2017 ; quartier de 65 logements construit en 1985 principalement en blocs de terre comprimée et pisé à L'Isle-d'Abeau en France (TerraLyon, 2016).

1.2.2 Avantages de la terre crue

Face aux préoccupations environnementales actuelles, la terre crue revient à l'honneur grâce à ses nombreux avantages. La terre crue peut être utilisée en construction neuve, en rénovation et pour la réhabilitation tant de manière traditionnelle que contemporaine. La terre crue présente des nombreuses qualités et constitue un matériau d'avenir (AsTerre, 2016).

- La terre est issue d'une ressource locale ; ce qui réduit les problèmes liés au transport. Elle nécessite peu d'énergie d'extraction, de transformation et de production. Son utilisation « crue » ne contribue pas à la déforestation comme c'est le cas dans certaines régions du monde où l'on utilise le bois pour la terre cuite (Aguarwal, 1981 ; Houben et Guillaud, 1989, Mango-Itulamy, 2015).
- Sa transformation est peu coûteuse et fait souvent appel à une main d'œuvre locale. La fabrication se prête à l'auto-construction. La terre ne nécessite que des outils simples et largement accessibles pour son extraction, sa transformation et sa mise en œuvre (La maison écologique, 2004 ; Pignal, 2005).
- La terre joue un rôle d'amortissement acoustique et régule la température et l'humidité ambiante. La terre crue purifie l'air ambiant en filtrant certains polluants et en absorbant les odeurs (Fontaine et Anger, 2009 ; Ecologik, 2010).

Malgré ces nombreux avantages, la terre crue présente quelques inconvénients. D'une part, dans les régions à climat tempéré comme en Belgique, la pluie et le gel diminuent ses propriétés mécaniques et limitent sa durabilité. D'autre part, dans les régions à climat équatorial comme en R.D.Congo, les variations importantes d'humidité rendent les matériaux en terre crue instables. Ils s'érodent à chaque saison. Sans liant stabilisateur, le matériau dégage de la poussière. La terre se dégrade au contact de l'eau et de l'humidité, ce qui rend son emploi délicat (Agarwal, 1981 ; Kurf et al., 1998 ; AsTerre, 2016).

Dans plusieurs régions, les habitants ont développé des traditions architecturales basées sur plusieurs styles et systèmes de constructions en terre (Fig. 3) pour protéger le mur de l'érosion (Bolle, 2017).

La pyramide est une construction en damier qui alterne des blocs de terre plus sableux et des blocs plus argileux. Les blocs sableux permettent un écoulement plus rapide de l'eau, les blocs argileux donnent la stabilité à la structure (Daneels et Guerrero, 2011). Une évolution de ce système consiste à insérer dans le mur en terre des bandes horizontales d'un matériau plus résistant à l'érosion (terre cuite, mélange terre chaux ou terre ciment). Ces bandes ralentissent la vitesse d'écoulement de l'eau. Cette technique est surtout utilisée dans les constructions en

pisé (Baur, 2012). Le revêtement à base d'enduit d'origine végétale ou animale est une tradition millénaire pour lutter contre l'érosion des structures en terre (Daneels, 2008). La technique la plus employée pour préserver un mur de terre de l'érosion liée à l'eau consiste à protéger sa base et son sommet. Comme le dit un dicton, un mur en terre nécessite « un bon chapeau et de bonnes bottes » (Heitz, 2014). Cela consiste à protéger le mur d'un toit débordant qui évite au mur d'être trempé par la pluie, et d'un soubassement en pierre, brique cuite, béton de ciment, qui empêche toute remontée capillaire.



Fig. 3. Illustration de quelques moyens de lutte contre la détérioration d'une construction en terre crue. De gauche à droite : vestige de la pyramide en terre crue de La Joya au Mexique (1^{er} siècle) ; vestige d'un mur enduit à Dja'de el Mughara en Syrie (9^{ème} siècle av. J.-C) ; maison en pisé avec un toit débordant et un soubassement en béton de ciment construite en 2018 à Villefontaine en France (Daneels, 2008 ; Moriset, 2018).

En outre, plusieurs obstacles ralentissent l'usage de la terre crue à grande échelle. Dans les pays industrialisés, le manque des professionnels formés aux techniques de construction en terre crue, le manque de normes constructives en terre crue, le manque de diffusion auprès du grand public, du soutien institutionnel et des collaborations interprofessionnelles sont les principaux freins (TerraLyon, 2016). La nécessité de main d'œuvre importante pour sa mise en œuvre constitue également un important frein d'ordre économique. Ce frein est peu ou pas présent dans les pays en développement : la construction en terre représente une alternative de construction intéressante (Adam et Agib, 2001). Cependant la terre est parfois considérée comme un matériel de mauvaise qualité et de ce fait rejetée par les populations locales (Njoya et al., 2015 ; Bogaert et Halleux, 2015).

1.2.3 Techniques de construction en terre crue

Il existe différentes techniques de construction en terre crue selon les contextes géographiques, les modes de vie, les coutumes locales, le climat ainsi que les matériaux disponibles. Houben et Guillaud (1989) ont répertorié 12 techniques principales de construction en terre crue (Fig. 4 et Tableau 1). Les cinq techniques de construction les plus répandues dans le monde sont présentées ci-dessous, à savoir le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et le bloc de terre comprimée (BTC, Anger et Fontaine, 2009 – Tableau 2).

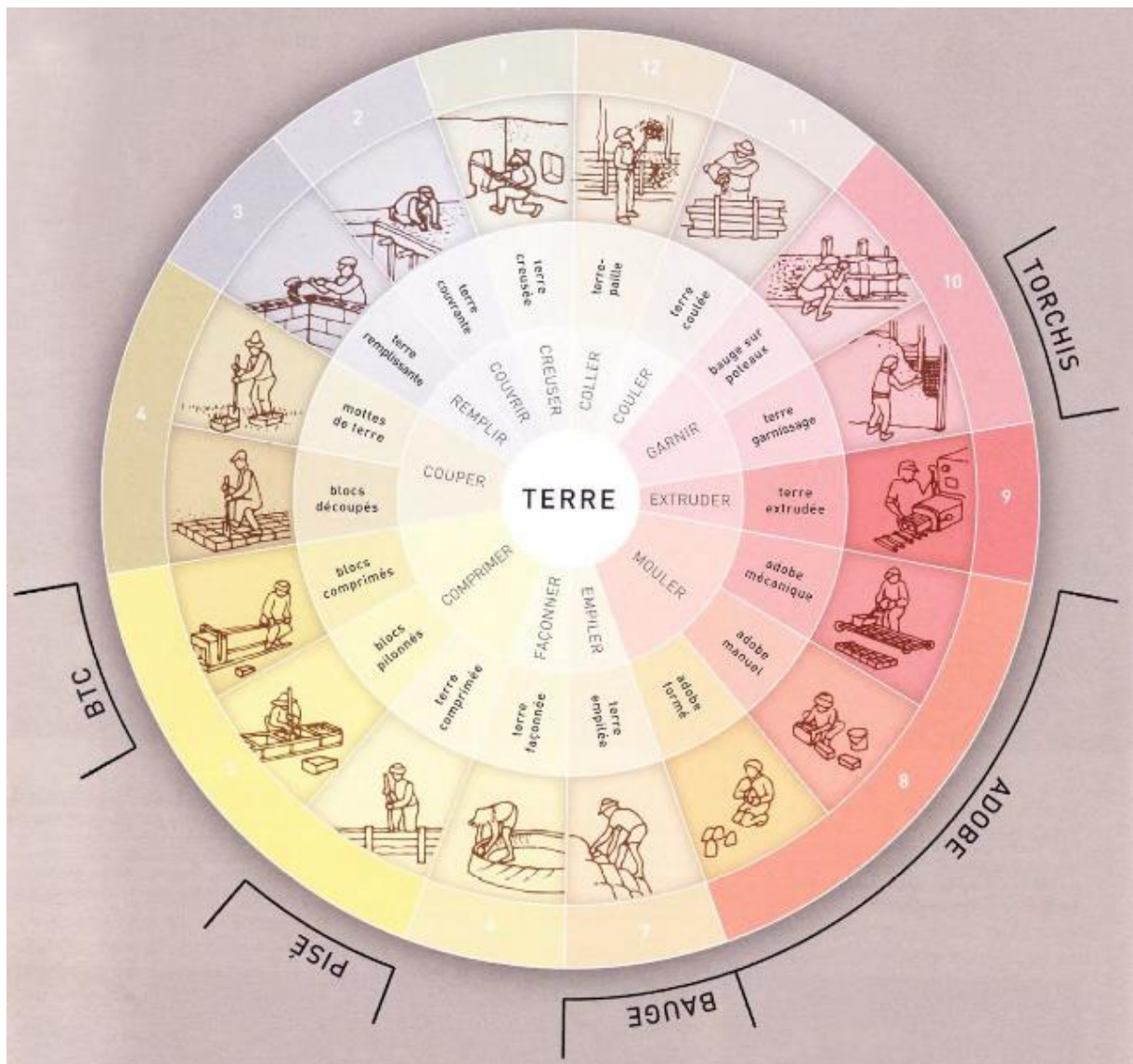


Fig. 4. Techniques de construction en terre (Anger & Fontaine, 2009).

Techniques	Description
Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol
Terre recouvrante	Terre qui recouvre une structure construite avec un autre matériau
Terre remplissante	Terre qui remplit une enveloppe faite de matériaux creux
Terre découpée	Blocs de terre directement découpés dans le sol
Terre comprimée	Terre comprimée dans des moules ou des coffrages
Terre façonnée	Terre façonnée à l'état plastique à la main
Terre empilée	Boules de terre empilées en murs épais
Terre moulée	Terre moulée dans des moules de formes diverses
Terre extrudée	Terre extrudée à l'aide d'une machine
Terre coulée	Terre coulée dans un coffrage ou un moule
Terre-paille	Matériau léger constitué d'une barbotine argileuse liée aux fibres
Terre garnissante	Terre mélangée aux fibres qui garnit en couches minces un support

Tableau 1. Différentes techniques de construction en terre (Houben et Guillaud, 1989).

Techniques courantes	Pisé	Bauge	Torchis	Adobe ou brique crue	Terre Comprimée
Description	Le pisé est un procédé de construction qui consiste à compacter de la terre disposée dans un coffrage en couches successives peu épaisses à l'aide d'un pilon (Houben et Guillaud, 1989).	La construction en bauge consiste à façonner des murs massifs et épais à l'aide d'une terre mise en œuvre à l'état plastique, généralement sans l'aide de coffrage (Houben et Guillaud, 1989).	Le torchis est une technique de remplissage d'ossature avec un mélange de terre fibrée (CRAterre et al., 1979).	Les adobes sont des briques de terre crue moulées sans compactage et séchées au soleil. Leur taille et leur forme varient selon les moules utilisés (Houben et Guillaud, 1989).	Le Bloc de Terre Comprimée (BTC) est une évolution de l'adobe. La terre, généralement stabilisée, est compactée à l'aide de presse manuelle ou mécanique (Houben et Guillaud, 1989).
Terre à utiliser	La terre à pisé est un mélange hétérogène de particules de terre de grosseurs variables allant de cailloux (< 6 cm) aux argiles (< 2µm) (Houben et Guillaud, 1989 ; Anger et Fontaine, 2009).	La terre à bauge est généralement très argileuse, avec du sable, des graviers, ainsi que des fibres végétales (Houben et Guillaud, 1989).	La terre limono-argileuse est une des meilleures terres pour la construction en torchis. Cependant, différentes recettes existent pour fabriquer le torchis (Babylas et al. 2012).	Les terres constituées de sable, de limon et d'argile seraient les plus aptes à la fabrication de l'adobe (CRAterre et al., 1979).	La brique de terre comprimée est produite à partir de la même terre que le pisé, mais débarrassée par tamisage de grains > 2 cm (Houben et Guillaud, 1989).

Tableau 2. Principales techniques de construction en terre crue.

1.2.4 Bloc de Terre comprimée

Le Bloc de Terre Comprimée (BTC) est une évolution de la terre moulée ou adobe. L'idée de compacter la terre afin d'améliorer sa résistance serait apparue au XVIII^e siècle. Les premiers BTC étaient alors faits par pilonnage manuel dans un moule en bois. C'est à partir des années 1950 que sont apparues les premières presses pour BTC. La Cinva-Ram fut la première presse manuelle développée en 1952 par Raul Ramirez à Bogota (Rigassi, 1995).

La production des BTC nécessite une organisation industrielle, semi industrielle ou artisanale souvent en 6 étapes, ce qui fait du BTC un matériau largement accessible.

(1) Extraction de la terre.

- (2) Préparation de la terre : séchage, broyage, tamisage.
- (3) Mélange avec l'eau et éventuellement stabilisation.
- (4) Pressage et démoulage.
- (5) Séchage, précédé d'une cure lorsque le BTC contient un stabilisant hydraulique.
- (6) Stockage.

Les BTC sont des éléments de maçonnerie dont le type et les dimensions varient selon le moule utilisé (Fig. 5). Les dimensions les plus courantes sont 29,5 x 14 x 9 cm et 20 x 20 x 9 cm (L x l x h) et les types les plus courants sont les blocs pleins, les blocs évidés, les blocs alvéolaires et les blocs à emboîtement (Rigassi, 1995). Une maçonnerie en BTC est constituée de blocs liés par un joint de mortier. Le mortier est généralement un mélange de sable et de liant hydraulique (ciment ou chaux). Il permet en plus de lier les blocs, de transmettre les efforts entre les éléments et de les distribuer sur tous les éléments, et de contribuer à l'esthétique du bâtiment (Rigassi, 1995 ; P'Kla, 2002).

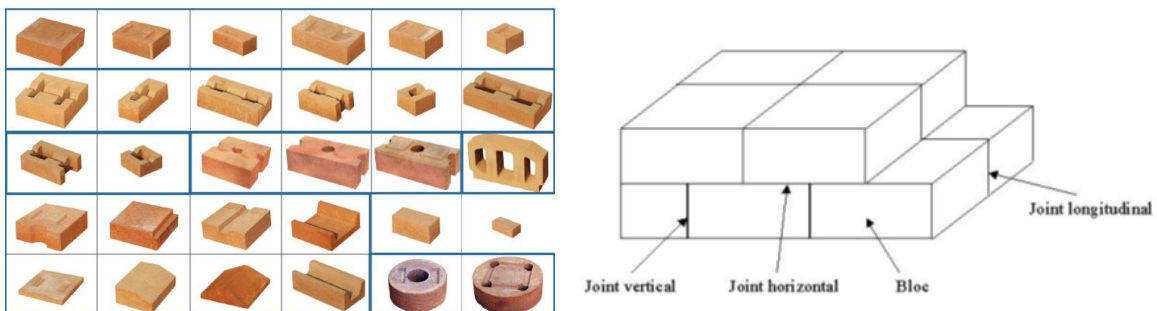


Fig. 5. À gauche, différents formats des BTC, à droite désignation des joints (P'Kla, 2002).

Les BTC peuvent être utilisés comme murs porteurs, cloisons, voûtes, arc, coupôles, fours à pain, poêles, etc. (P'Kla, 2002) tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment. Depuis son apparition, plusieurs constructions se sont multipliées aux quatre coins de la planète (Fig. 6)



Fig. 6. Quelques réalisations en BTC. De gauche à droite : la Mosquée Al Medy à Ryad en Arabie Saoudite ; un chantier en BTC à Lubumbashi en R.D. Congo ; une maison en BTC à L'Isle-d'Abeau en France (Anger et Fontaine, 2009 ; Caritas Lubumbashi, 2011).

La comparaison des BTC par rapport à d'autres matériaux de construction a été faite par plusieurs auteurs et est résumée dans le Tableau 3.

Caractéristiques	BTC	Adobe	Pisé	Brique cuite	Bloc de béton
Aspects <i>Surface</i> <i>Esthétique</i>	Lisse Moyen à bon	Irrégulière Pauvre	Rugueuse à lisse Bon à excellent	Rugueuse à lisse Bon à excellent	Rugueuse Moyen
Performances <i>Résistance en compression (MPa)</i> <i>Dilatation thermique (%)</i> <i>Isolation thermique (W/m°C)</i> <i>Masse volumique (kg/m³)</i> <i>Durabilité</i>	1 à 4 0,02 à 0,2 0,81 à 1,04 1700-2200 Faible à très bonne	0 à 5 0,4 à 0,8 1200 à 1700 Faible	0,5 à 3 1,05 1900 Faible à très bonne	0,5 à 6 0 à 0,02 0,7 à 1,3 1400 à 2400 Faible à excellente	0,7 à 5 0,02 à 0,05 1 à 1,7 1700 à 2200 Faible à très bonne
Emploi en maçonnerie	Porteur	Porteur	Porteur	Porteur	Remplissage
Coût au m ² (euros) : exemple à Kinshasa	100 à 180*			20 à 50	20 à 35
Coût au m ² (euros) : exemple en Belgique	250 à 500		500 à 700	50 à 140	60 à 90

Tableau 3. Comparaison entre le BTC et d'autres matériaux de construction (Rigassi, 1995 ; Caritas Lubumbashi, 2011 ; Chirhalwirwa Mwilarhe, 2008 ; Moles et al. 2009 ; CRAterre et Urbaplan, 2010 ; Prix-construction, 2019).

* Ce coût est à prendre avec précaution étant donné qu'il a été calculé sur des projets réalisés par des ONG qui ne sont pas habituées à ce système constructif.

Malgré le fait que le BTC soit un matériau accessible, construire en BTC reste cher, surtout dans les pays développés, car sa mise en œuvre demande généralement plus de temps. Cependant ce temps plus élevé est souvent lié à un manque de professionnels formés à cette technique de construction. Les BTC sont en général plus lourds et demandent plus de précautions lors de la mise en œuvre s'ils ne sont pas stabilisés (chantier à l'abri des intempéries, Chirhalwirwa Mwilarhe, 2008 ; CRAterre et Urbaplan, 2010). Le prix plus élevé des matériaux en BTC par rapport aux matériaux industriels est généralement dû au fait que ces derniers bénéficient d'un marché plus important, d'une production à grande échelle, et d'automatisation des procédés de production plus importante (LOCI, 2016 ; Bolle, 2017).

Le choix du BTC dans cette étude se justifie par :

- la rapidité de production et de mise en œuvre par rapport à d'autres techniques de construction en terre crue ;
- la régularité des matériaux obtenus, ce qui facilite leur comparaison ;
- sa longue durée de vie obtenue grâce au compactage ;
- le stockage plus facile, car les blocs directement produits peuvent être empilés et ont une durée de séchage plus rapide ;
- la faible technologie nécessaire à la production ;
- l'intérêt des architectes et des populations pour ce matériau par rapport à d'autres techniques de construction en terre crue.
- la fabrication contrôlée à l'échelle industrielle qui permet également d'assurer la reproductibilité et favorisera la standardisation et une utilisation plus généralisée.

Les normes concernant l'usage des BTC trouvées dans la littérature concernent principalement la résistance à la compression. Il existe en effet depuis quelques années dans certains pays, des normes d'utilisation des BTC en construction. Ainsi, on peut citer ARS (Afrique), ASTM E2392M-10 (Amérique), NBR (Brésil), NTC 5324 (Colombie), UNE 41410 (Espagne), KS 02-1070 (Kenya), IS 1725 (Inde), NT (Tunisie), NZS (Nouvelle-Zélande), XP P13-901 (France), SLS 1382 (Sri Lanka), NMAC 147.4 (Nouveau-Mexique). Ces normes sont variables d'un pays à l'autre. La Fig. 7 illustre un exemple de cette différence basée sur la résistance en compression minimale admissible.

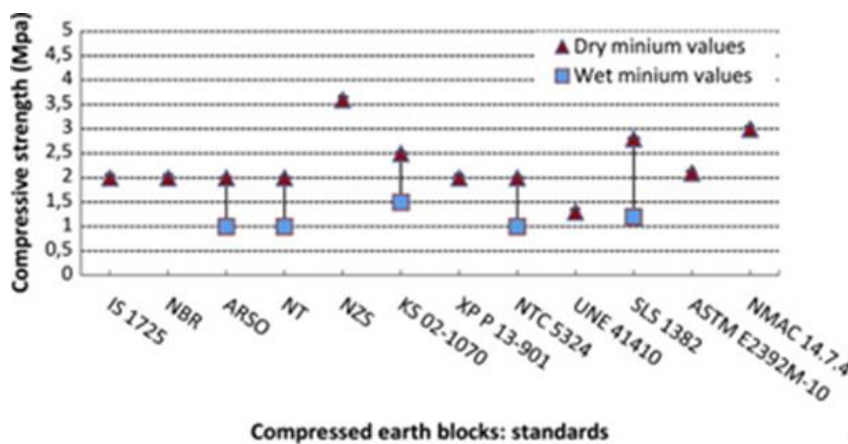


Fig. 7. Résistances à la compression minimales admises pour les BTC (Cid-Falceto et al., 2012).

La plupart de ces normes (NZS, NBR, NTC 5324) concernent les BTC stabilisés au ciment, fabriquées à l'aide d'une presse manuelle (Cid-Falceto et al. 2011). Notons également que ces normes encouragent la stabilisation au ciment et recommandent l'usage d'un enduit protecteur pour augmenter la durabilité des murs en terre (Bruce King, 2006).

Les conditions de test varient également d'une norme à l'autre. C'est pourquoi les valeurs obtenues doivent être comparées avec précaution. Seules les données avec les mêmes conditions de test (e.g., dimension des BTC, pression de mise en forme) peuvent être comparées (Bruce King, 2006). La Fig. 8 illustre le mode opératoire de détermination de la résistance à la compression des BTC selon certaines normes. Les informations obtenues dans la bibliographie témoignent d'un manque de consensus sur la méthode à utiliser pour caractériser les BTC.

Certaines normes donnent des recommandations sur la durabilité ou la résistance à la flexion des BTC et sur leur usage (Tableau 4).

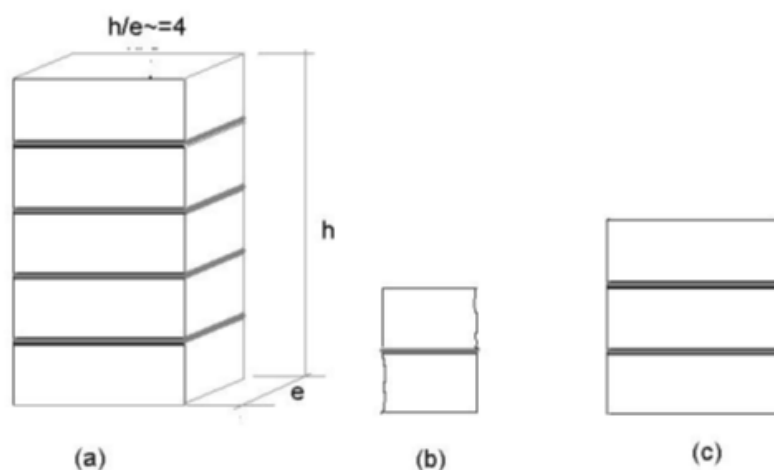


Fig. 8. Normes de détermination de la résistance à la compression. a) norme [CYT 93] Pérou, Brésil et Cuba ; b) norme Afrique ORAN [NOR 98] ; c) norme [VEN 92] Inde. Il s'agit de blocs 29,5x14x9,5 cm (Lxlxh, d'après P'kla,2002).

Région	Durabilité	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Mise en œuvre
Afrique [NOR 98]			> 2 (compression 2 demi blocs, h/e = 1,3)	
USA [CID 91]	Capillarité < 4% après 7 jours ^b	> 0,34 (essai de flexion 3 points)	> 2 (compression d'un bloc entier)	Construction limitée à 2 étages, élancement h/e = 10
Pérou, Brésil, Cuba			0,2 ^a ; 2 ^b (compression simple sur maçonnerie)	
Inde [VEN 92]			2 ^{a,b} (compression 3 blocs maçonnés)	
Australie Bull. 5	Taux d'érosion < 1mm/min ^b		≥ 2 (compression sur bloc h = 1,3 à 2 fois e)	Mur extérieur ou intérieur
Nouvelle Zélande [NZS 4298]			3,5 ^b (compression d'un bloc entier)	
OIA 1970	Test d'érosion ^b		≥ 2,1	

Tableau 4. Normes propres aux BTC (P'kla, 2002 ; Jiménez et Guerrero, 2007). h = hauteur, e = épaisseur, a = non stabilisé, b = stabilisé au ciment.

D'autres normes donnent la valeur de l'épaisseur du mur en terre en fonction de la résistance à la compression (Tableau 5, données concernant la technique du pisé).

Pays	Norme	Épaisseur minimale du mur extérieur (mm)	Épaisseur minimale du mur intérieur (mm)	Résistance à la compression (MPa)
Australie	CSIRO Bull. 5 4th ed. (1995) et EBAA (2004)	200	200	0,7-1
Allemagne	Lehmbau Regein (2009)	400	400	0,3-0,5
Inde	IS : 2110 (1998)	300	200	1,4
Kirghizstan	PCH-2-87 (1998)			0,63-3,6
Nouvelle Zélande	NZS 4297-9	250		0,5
Suisse	Regein Zum Bauen mit Lehm (1994)	300		0,3-0,5
USA	14.7.4 NMAC (2006)	457	305	1,725-2,07
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	300		1,5 -2

Tableau 5. Normes concernant l'épaisseur du mur en fonction des résistances à la compression pour le pisé (TotalBoox et TBX, 2012).

1.3 Le matériau terre

1.3.1 Généralités

On parlera ici de « terre » pour désigner un matériau sédimentaire naturel utilisé pour la construction. Ce matériau résulte de l'altération d'une roche mère. La terre peut être résiduelle (i.e., sol) ou avoir été transportée par l'eau ou le vent (i.e., dépôt sédimentaire). Ce matériau sédimentaire est principalement constitué d'une fraction solide inorganique constituée de particules de taille variable (i.e., gravier > 2mm, sable > 63 µm, limon ou silt 63-2 µm, argile < 2 µm (Tucker et Hardy, 1988) et de constituants organiques (matière organique fraîche et/ou transformée). Outre la fraction solide, la terre contient également une phase aqueuse et gazeuse présente dans les pores du matériel (Soltner, 1992). Dans les sols, seuls les niveaux situés sous les couches riches en matière organique (horizons O et A, Delecour, 1981) peuvent être utilisés comme matériau de construction (Guérin, 1985 ; Fig. 9).

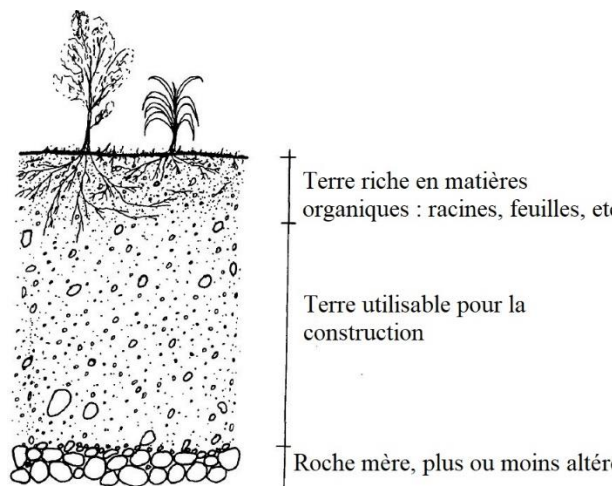


Fig. 9. Coupe dans la couche de terre (Guérin, 1985, modifié).

L'importance relative des éléments constitutifs influence les propriétés physiques (plasticité, pouvoir absorbant) et conditionne les applications techniques de chaque type de terre (Rigassi, 1995).

Les graviers ($2 \text{ mm} \leq D < 64 \text{ mm}$) et **les sables** ($0,063 \text{ mm} \leq D < 2 \text{ mm}$) constituent les éléments grossiers de la terre à bâtir. Ils constituent le squelette et augmentent la perméabilité à l'eau de la terre. En outre, la fraction sableuse limite le gonflement et le retrait de la terre (Houben et Guillaud, 1989).

Les limons ont une granulométrie comprise entre 0,063 et 0,002 mm. Ils possèdent une grande friction interne, une faible cohésion en présence d'eau et une grande perméabilité (Rigassi, 1995).

Les argiles sont définies soit par leur granulométrie (i.e., particules de taille inférieure à 2 micromètres), soit par leur minéralogie (i.e., famille des phyllosilicates, Weaver, 1989). Les minéraux argileux sont des silicates ayant une structure cristalline en couches (i.e., *phyllo* signifie *feuille* en grec). Cependant tous les phyllosilicates ne sont pas des argiles (Moore et Reynolds, 1989). Un grain d'argile est donc un ensemble de feuillet, plus ou moins épais, avec des liaisons plus ou moins fortes entre feuillets. Le feuillet est un édifice de moins d'un nanomètre d'épaisseur, composé de trois ou quatre plans d'anions tels que l'oxygène O^{2-} ou l'hydroxyle OH^- entre lesquels s'insèrent de petits cations principalement de silicium, d'aluminium et de magnésium. La charge nette du feuillet dépend des proportions d'anions et de cations. L'empilement de feuillets correspond à une couche et l'ensemble de couches constitue le cristal. Les feuillets sont formés par une combinaison de plans constitués par les atomes agencés en tétraèdre SiO_4^- . Dans les phyllosilicates, six tétraèdres s'agencent en se partageant les oxygènes pour former des feuillets (Fig. 10 - Brindley et Brown, 1980 ; Moore et Reynolds, 1989 ; Bouchet et al, 2000 ; Anger, 2011)

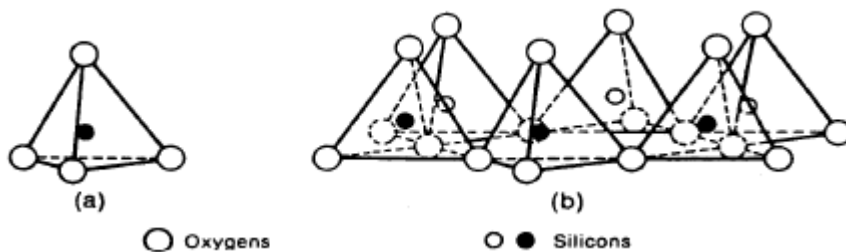


Fig. 10. Éléments structuraux : les tétraèdres. a. Tétraèdre de silice b. tétraèdres de silice arrangés dans un réseau hexagonal (in Eslinger et Peaver, 1988).

Les tétraèdres (T) s'agencent à des feuillets octaédriques (O) pour former des couches. Le feuillet octaédrique comprend un cation central (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+}) et 6 OH^- (Fig. 11). Les couches peuvent être neutres ou chargées négativement. Ces charges négatives sont compensées par des cations qui se logent dans l'espace entre les couches (espace interfoliaire). La charge de la couche dépend des substitutions de cations dans les feuillets T ou O (Moore et Reynolds, 1989 ; Bouchet et al, 2000 ; Anger, 2011).

Propriétés	Unités	Terre comprimée
Teneur en argile	%	5 à 30
Indice de plasticité IP	%	5 à 30
Teneur en eau initiale W_{in}	%	5 à 15
Masse volumique sèche ρ	kg/m ³	1600 à 2200
Teneur en eau ambiante w	%	0 à 5
Retrait de séchage	%	1 à 3
Coefficient résistance à la vapeur μ		5 à 20
Module de Young E	GPa	1,0 à 6,0
Résistance compression R_c	MPa	0,4 à 3,0
Résistance traction R_t	MPa	0,1 à 0,5
Capacité thermique massique c	J/kg.K	600 à 1000
Capacité thermique volumique C	kJ/m ³ .K	960 à 2200
Conductivité thermique λ	W/m.K	0,5 à 1,7

Tableau 7. Synthèse des principales propriétés de la terre comprimée (Moevus et al., 2012).

La **granulométrie** et la plasticité (limites d'Atterberg) constituent les paramètres principaux pour déterminer la convenance d'une terre (Jiménez et Guerrero, 2007). La granulométrie influence l'aptitude au façonnage et au séchage de la terre. Des terres qui n'ont pas la granulométrie requise pour des matériaux en BTC peuvent cependant donner des bons résultats en ajoutant des stabilisants adéquats (Moevus et al. 2012). Il existe plusieurs outils de mesure de la granulométrie : tamisage, sédimentométrie, imagerie, diffraction laser, microscopie. En l'absence de ces outils, des mesures peuvent être réalisées directement sur terrain.

- Les tests de la vue et du toucher de la terre (sèche ou humide) permettent d'identifier les graviers, les sables grossiers et les sables fins (> 100 μm).
- Le test de lavage de main consiste à se frotter les mains avec une terre liquide, puis à les rincer doucement avec l'eau. Si le lavage des mains est difficile, cela confirme qu'il s'agit d'une terre argileuse.
- Le test de la bouteille mesure les proportions des grains. On remplit une bouteille transparente de 1/4 de terre et 3/4 d'eau, on l'agite puis on la laisse décanter jusqu'à ce que l'eau soit claire. On note les proportions des différents constituants après sédimentation : le gravier et le sable se retrouvent au fond, le silt et l'argile au sommet (Houben et Guillaud, 1989).

La **plasticité** est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans rupture (Peltier et Rumpler, 1959). La terre a un comportement élasto-plastique. Elle présente une déformation élastique réversible et une déformation plastique irréversible. La plasticité d'une terre dépend de la teneur en argiles et de leur nature (et donc de leur capacité d'adsorption d'eau). Les limites d'Atterberg, i.e. limites de liquidité W_L et de plasticité W_P , sont les indicateurs de plasticité couramment employés (Moevus et al. 2012). Le test du cigare permet de mesurer la plasticité de la terre sur terrain. Il consiste à fabriquer un cigare de 3 cm d'épaisseur et le pousser doucement dans le vide. Si le cigare ne se brise pas au-delà de 20 cm, il s'agit d'une terre argileuse et plastique (CRAterre et al., 1979).

La **teneur en eau initiale** est un paramètre essentiel. En effet, l'eau renforce la cohésion naturelle de la terre en intensifiant l'interaction entre les particules d'argiles. Sans eau, il serait impossible de construire un mur en terre (Fontaine et Anger, 2009).

La **teneur en matière organique** est généralement considérée comme néfaste dans les constructions en terre crue car sa décomposition augmente la porosité et diminue leur résistance

(CRAterre et al., 1979). Il est déconseillé d'utiliser une terre contenant plus de 2% de matière organique. Certains stabilisants tels que la chaux peuvent réduire l'influence néfaste de la matière organique (CRAterre et al., 1979). Une identification de la présence de la matière organique peut être faite sur terrain en humidifiant la terre. Si la terre humide sent l'humus, il s'agit d'une terre riche en matières organiques (Houben et Guillaud, 1989).

L'**analyse chimique** donne les principaux groupes d'atomes exprimés en pourcentage massique d'oxydes présents dans l'échantillon. Ces éléments justifient plusieurs propriétés des argiles dont la couleur, le degré d'interaction avec des liants, etc. Aucune recommandation sur la teneur en pourcentage d'oxydes pour une terre crue n'a été trouvée dans la littérature.

Les minéraux argileux donnent au sol sa cohésion et l'essentiel de sa résistance mécanique en agissant comme liant entre les éléments plus grossiers qui constituent le squelette. L'argile garde sa cohésion lorsque la teneur d'eau est inférieure à la limite de liquidité. Pour des teneurs d'eau élevées, les argiles perdent toute cohésion et acquièrent une consistance liquide (CRAterre et al., 1979). La nature des argiles dans l'échantillon de terre va influencer les propriétés de gonflement, de fissuration de la terre crue ainsi que la quantité d'eau nécessaire à ajouter (Tardy, 1993 ; Andrate et al., 2011). Le Tableau 8 illustre les principaux **constituants minéraux** de la terre et leurs propriétés physiques. Aucune recommandation sur la nature des minéraux argileux pour une terre propice à la fabrication des BTC n'a été trouvée dans la littérature.

Désignation	Principaux composants	Propriétés physiques
Sable siliceux	Quartz	Sans cohésion, abrasif
Mica	Muscovite	Sans cohésion
Carbonates	Calcite, dolomite	Susceptible d'influencer le pH
Sulfates	Gypse	Susceptible d'attaquer certains ciments
Argiles	Kaolinite	Pas de gonflement, plasticité faible Peu de cohésion
	Illites et micas partiellement dégradés	Gonflement Plasticité moyenne
	Smectites	Très gonflante, Très plastique
	Chlorite, vermiculite	Gonflement limité
Matière organique	Débris végétaux, racine	Dégradation rapide

Tableau 8. Principaux constituants inorganiques (minéraux) ou organique des sols et leurs propriétés physiques (CRAterre et al., 1979).

Le **réseau poreux** détermine les phénomènes d'adsorption-désorption d'eau et de transport de vapeur d'eau. La quantité d'eau dans la terre correspond à une valeur de succion qui détermine les forces capillaires au sein de la microstructure. La présence d'eau influence les propriétés mécaniques et thermiques de la terre (Moëvus et al. 2012).

La **consistance** de la terre à la mise en œuvre dépend de la teneur en eau. Lorsqu'elle augmente, on atteint la limite plastique. La pâte devient de plus en plus malléable jusqu'à la limite liquide. Au-delà, la pâte ne peut plus être modelée (Andrade, 2011). Dans le cas des BTC, la teneur en eau optimale de la terre peut être obtenue par essai Proctor et correspond à la densité maximale pour une énergie de compaction donnée (Proctor, 1933).

Les propriétés hygrométriques, mécaniques et thermiques de la terre dépendent de la porosité totale, la distribution et la taille des pores, la teneur en argiles, la surface spécifique des argiles et leur capacité d'échange cationique, l'empilement granulaire (Heathcote, 2002 ; Moevus et al. 2012).

La terre est un matériau qui permet de réguler l'hygrométrie dans une pièce. Si l'air ambiant est humide la terre va se charger en humidité. Par contre si l'air ambiant est sec, la terre va s'assécher. Cela participe au confort intérieur de la pièce (Jaquin 2009 ; Allinson et Hall, 2010). L'hygrométrie d'une terre dépend de plusieurs propriétés :

- de l'humidité relative et de la température ;
- de la taille, de la forme et du nombre de pores ;
- de l'affinité des argiles avec l'eau;
- du chemin hydrique parcouru (mouillage/démouillage, Moevus et al. 2012).

Dans les conditions d'une humidité relative inférieure à 70 %, la teneur en eau de murs en terre est généralement comprise entre 0,5 et 5%. Elle peut être supérieure en présence d'argiles gonflantes et de granulats contenant des micropores et micro-rugosités (Moevus et al. 2012). Il existe plusieurs **mesures hygrométriques** :

1. La capacité d'absorption de la vapeur d'eau définit la quantité de vapeur que peut stocker un mur en terre dans des conditions de température et d'humidité données. Elle peut être établie par les isothermes de sorption ou les courbes de rétention d'eau (Jaquin, 2009).
2. La perméabilité à la vapeur d'eau d'une terre renseigne sur sa capacité d'échange hygrométrique entre l'intérieur et l'extérieur d'une construction. Plus elle est élevée, plus les échanges entre l'air extérieur et l'air intérieur se font facilement, et plus l'équilibre hygrométrique est atteint rapidement (Moevus et al. 2012).
3. La diffusivité hydrique capillaire permet de décrire l'aptitude d'une terre à absorber l'eau par capillarité. Lorsqu'un échantillon de terre est mis en contact avec de l'eau, celle-ci va pénétrer le matériau par remontée capillaire dans les pores fins, sous l'action de la succion. La diffusivité hydrique capillaire s'exprime en m^2/s (Allinson et Hall, 2010).

Le **retrait** de la terre crue dépend de sa composition et de son squelette granulaire. Celui-ci peut être modifié par stabilisation granulaire, i.e. ajout de sable graviers ou de paille. Le retrait dépend également de la proportion d'argiles et de leur nature, de la porosité totale et de la quantité d'eau à la mise en œuvre. Le retrait d'une terre à partir de son état à la mise en œuvre peut varier entre 0,05 et 20% (Moevus et al, 2012).

La principale **propriété mécanique** de la terre est la résistance à la compression. La résistance à la compression uniaxiale de la terre influence le dimensionnement des ouvrages. Plus elle est élevée, plus l'épaisseur des murs pourra être faible pour une hauteur de bâtiment donnée. Les paramètres qui améliorent la résistance à la compression sont entre autres une densité élevée et une teneur en eau faible (Andrate et al., 2011).

Les **propriétés thermiques** intrinsèques du matériau terre sont la capacité thermique, la conductivité, la diffusivité et l'effusivité.

- La conductivité thermique définit la capacité d'un matériau à transmettre ou à retenir la chaleur. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique de la terre dépend essentiellement de sa masse volumique et de sa porosité. Utilisée seule, la terre n'est pas un isolant, elle le devient par l'ajout de fibres (Speyer, 1994).

- La capacité thermique ou chaleur spécifique indique la quantité de chaleur à fournir à 1 m³ de matériau pour élever sa température de 1°K (Brown, 2001).
- La diffusivité thermique exprime la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période de temps donnée. Elle exprime la capacité du matériau à transmettre une variation de température. La température à l'intérieur s'élève d'autant plus rapidement que la conductivité de la paroi est élevée et que sa capacité thermique est faible (Jannot et Degiovanni, 2018).
- L'effusivité thermique représente la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie avec son environnement. Un matériau absorbe d'autant plus de puissance que sa conductivité est élevée, et que sa chaleur volumique est élevée (Speyer, 1994).

La **durabilité** d'un matériau est sa résistance à la détérioration au fil du temps. Elle dépend des propriétés du matériau et des agressions extérieures (e.g., impact des gouttes de pluie, cycles de mouillage/séchage, cycle de gel/dégel, retraits et expansions). Il existe 3 types d'essais pour évaluer la durabilité des matériaux en terre crue dans le temps :

- les essais indirects consistent à réaliser des tests qui ont peu ou pas de rapport avec les mécanismes de dégradations réels, mais où la propriété mesurée a un indicateur fiable de durabilité ;
- Les essais accélérés consistent à appliquer des phénomènes réels avec une intensité plus forte durant un laps de temps réduit ;
- les essais de simulation consistent à soumettre les échantillons à une sollicitation similaire à celle qu'ils peuvent subir en conditions réelles (Heathcote, 2002).

Plusieurs paramètres influencent la durabilité d'un BTC :

- La masse volumique de la terre (Patty, 1936).
- La composition de la terre. Heathcote (2002) montre que la durabilité augmente avec la teneur en argiles. Crowley (1997) montre que les sables argileux et les argiles ont une meilleure durabilité que les silts argileux.
- La nature du stabilisant utilisé (Heathcote, 2002).
- Le degré de compactage qui augmente la durabilité de façon exponentielle (Crowley, 1997).
- Les précipitations, le cycle gel-dégel et le cycle mouillage-séchage (Moevus, 2012).
- L'âge des échantillons en terre car l'érosion du BTC est généralement plus rapide au début de sa vie (Heathcote, 2002).
- La texture de surface, les BTC à surface rugueuse seraient plus érodables que les BTC à surface lisse (Crowley, 1997).
- Le revêtement de surface par un enduit protecteur améliore la durabilité (Patty, 1936 ; Crowley, 1997 ; Heathcote, 2002).

1.3.3 Stabilisation

Les constructions en terre présentent une vulnérabilité élevée face aux phénomènes d'érosion liés aux pluies, vents ou gels. L'enjeu est donc de les préserver en utilisant des techniques de stabilisation. La stabilisation a pour objectif d'améliorer la dureté (i.e., résistance aux chocs et aux frottements, réduction de l'effritement) et l'imperméabilité. Cependant un stabilisant ne remplace pas l'action du liant principal qui est l'argile (Rigassi, 1995).

La stabilisation de la terre consiste à lui donner des propriétés physiques « irréversibles ». Elle se fait en fonction de la conception du bâtiment, de l'économie du projet, de la durabilité et de la qualité du matériau. Il existe plus d'une centaine de produits stabilisants de la terre à bâtir. À chaque variété de terre correspond le(s) stabilisant(s) approprié(s) (Rigassi, 1995).

Il existe 3 procédés de stabilisation.

- La stabilisation mécanique consiste à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure et plus particulièrement sur sa porosité, perméabilité, densité et compressibilité (Houben et Guillaud, 1989). Au niveau de la porosité, la stabilisation réduit le volume des vides entre les particules ainsi que les variations de volume du matériau (gonflement-retrait à l'eau). En ce qui concerne la perméabilité, la stabilisation agit en colmatant les vides. Cela améliore la résistance à l'érosion (du vent et de la pluie). La stabilisation améliore les liens entre les particules, ce qui augmente la résistance à la compression (Rigassi, 1995).
- La stabilisation physique consiste à modifier la texture de la terre en mélangeant des grains de tailles différentes (Rigassi, 1995).
- La stabilisation chimique consiste à mélanger la terre à d'autres matériaux ou des produits chimiques (Rigassi, 1995).

La stabilisation n'est pas une obligation. Elle n'est, par exemple, pas nécessaire lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau. Elle a en outre un coût important sur le prix de revient du matériau. Elle doit de ce fait tenir compte « *des propriétés de la terre à stabiliser, des améliorations à envisager, de l'économie du projet et des délais de réalisation, de la maintenance et de son coût, des techniques de construction mises en œuvre* » (repris dans Houben et Guillaud, 1989).

Il existe plusieurs moyens de stabiliser la terre :

- une manipulation mécanique permet d'évacuer l'air. Elle se fait en pétrissant la terre pour la rendre plus homogène et en la comprimant ;
- un ajout de fibres animales, végétales, synthétiques permet de donner une armature à la terre. Ce moyen de stabilisation améliore la résistance à la traction et au cisaillement, et réduit le retrait du matériau terre en créant un réseau de fibres omni-directionnel ;
- un ajout de « liant » à la terre. Celui-ci agit en enrobant les grains et en empêchant leurs mouvements. C'est généralement le ciment portland ou certaines colles et résines ;
- un ajout d'une matrice qui interagit avec la fraction argileuse. En fonction des charges positives ou négatives des argiles ou de leur composition chimique, certains stabilisants chimiques (polymères, flocculants, quelques acides) peuvent lier les plaquettes argileuses entre elles ou jouer le rôle de catalyseur de cette liaison. D'autres stabilisants tels que la chaux interagissent avec les particules argileuses par réaction pouzzolanique. Ils réagissent avec l'argile en formant un nouveau matériau insoluble et inerte par précipitation. La cinétique de cette dernière réaction dépend de la quantité et de la qualité d'argile ;
- une imperméabilisation de la matière en remplissant les pores et les fissures par une matière insensible à l'eau telle que le bitume, ou par une matière gonflante comme la bentonite qui au contact avec l'eau va s'expanser et empêcher l'accès aux pores ;
- un ajout des produits chimiques (acides, amines, résines) pour réduire la sensibilité des plaquettes d'argile à l'eau (CRAterre et al., 1979 ; Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995).

Il existe plusieurs « stabilisants » de la terre à bâtir :

Les sables et graviers permettent de structurer la terre trop argileuse en donnant un squelette au matériau. L'argile joue alors le rôle de liant. L'ajout de sable ou de gravier à la terre est donc un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre afin d'améliorer sa compacité (GATE, 1994). Il permet également d'utiliser moins d'argile et ainsi d'épargner les gisements.

Les fibres sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale (poils et crins de bétail), végétale (les pailles, les balles de céréales, le chanvre, les fibres de noix de

coco, de palmier, ...) ou synthétique (acier, fibres de verre, cellophane). La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle s'adapte à l'état plastique, visqueux, et même à la compression. Elle réduit la fissuration au séchage et augmente la résistance à la traction. Elle contribue à la résistance de la terre à l'échelle du grain, mais n'interagit pas directement avec les plaquettes d'argile, à l'échelle microscopique (Houben et Guillaud, 1989).

L'ajout des fibres permet :

- « d'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- d'accélérer le séchage grâce aux canaux de fibres qui agissent comme un drainage de l'humidité vers l'extérieur. Inversement la présence de fibres augmente l'absorption d'eau;
- d'alléger le matériau en allégeant sa masse volumique et en améliorant ses propriétés d'isolation ;
- d'augmenter la résistance à la traction » (repris dans Houben et Guillaud, 1989).

L'efficacité de la stabilisation aux fibres dépend des caractéristiques de la terre et des interactions entre les fibres et la terre. La terre stabilisée aux fibres présentera une bonne résistance à la fissuration, au cisaillement, et à la compression, et une meilleure capacité d'absorption d'énergie sismique (Houben et Guillaud, 1989 ; Galán-Marín et al., 2010). Certains paramètres sont néfastes à la stabilisation aux fibres (Houben et Guillaud, 1989). Il convient d'éviter, une quantité trop importante de fibres pour ne pas diminuer les points de contact entre les fibres et la terre et diminuer donc la résistance du matériau. L'orientation des fibres est importante : les fibres doivent être placées dans toutes les directions.

Le bitume est un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Il doit être mélangé à des solvants (gasoil, kérosène, naphta) ou à l'eau pour être utilisé comme stabilisant. Il permet d'imperméabiliser en entourant les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et fissures. L'emploi du bitume comme stabilisant reste limité (Houben et Guillaud, 1989).

Les résines dérivent souvent de substances végétales comme par exemple de résidus du traitement du bois au cours de la fabrication de la pâte à papier. La résine est un hydrophobant qui réduit la sensibilité de la terre à l'eau (Houben et Guillaud, 1989).

Le ciment est considéré comme un liant inorganique, et le meilleur stabilisant des BTC (Houben et Guillaud 1989). Le ciment permet d'enchaîner : il crée une liaison inerte qui s'oppose à tout mouvement. Il améliore la résistance à l'eau en créant des liens entre les particules de sables et graviers. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses (Rigassi, 1995). Cinq ou 6% de ciment suffiraient pour avoir des résultats satisfaisants (Rigassi, 1995). La stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait et du gonflement et nécessite peu d'eau. Le ciment diminue cependant la conductivité thermique de la terre. Plus il y aura de ciment dans un bloc de terre, plus la conductivité thermique se rapprochera de celle du ciment (Baffoue et al. 1997; Agridoc, 2004). L'inconvénient du ciment demeure son coût de production élevé et la nécessité des gisements calcaires.

La présence d'oxydes de fer (i.e., terres latéritiques) qui favorisent les réactions pouzzolaniques ou un indice de plasticité faible < 20 % (i.e., terres sableuses) sont des paramètres d'efficacité pour l'utilisation du ciment. Par contre, la matière organique, une eau chargée en sel, la présence des sulfates ou une terre trop argileuse (> 20 % d'argile) seraient des paramètres néfastes à l'utilisation du ciment comme stabilisant (Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995).

La chaux permet de former des liaisons chimiques stables entre les particules d'argiles. La chaux aérienne vive (CaO) ou la chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sont utilisées pour les travaux routiers. Elles réagissent positivement avec les terres argileuses et nécessitent une teneur en eau relativement élevée qui dépend de la quantité de chaux utilisée. La chaux interagit avec les argiles et peu avec les sables. En général, la chaux ne convient pas pour la stabilisation des BTC qui nécessitent peu d'eau et des terres sableuses (GATE, 1994). La chaux aérienne diminue le retrait et le gonflement, augmente la résistance à la compression, diminue la sensibilité à l'eau, la masse volumique sèche et la plasticité (GATE, 1994 ; Rigassi, 1995). La chaux nécessite des gisements calcaires mais demande moins d'énergie que le ciment pour sa fabrication.

Il existe un dosage optimal pour chaque terre. La quantité de chaux pour stabiliser la terre est de l'ordre de 6 à 12 % en général (Rigassi, 1995 ; Agridoc, 2004). Une terre argileuse (jusqu'à 70%) est favorable à l'utilisation de la chaux. Par contre, la présence des sulfates ou de matière organique est néfaste (Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995).

1.4 La terre crue en Belgique

1.4.1 Généralités

En Europe, plusieurs pays (e.g., Allemagne, France et Pays-Bas) développent activement la production de terre crue depuis les années 1980 pour faire face à la demande croissante de son utilisation (Anger et Fontaine, 2009). En Belgique les exemples de l'architecture de terre sont plutôt rares et le potentiel de cette architecture reste ignoré du grand public. Après l'industrialisation au début du 19e siècle, la Belgique a connu une généralisation rapide des matériaux provenant de la production industrielle (béton, terre cuite, pierre et métal). Cela a modifié profondément le patrimoine monumental.

La construction en terre crue a connu un regain en Belgique à partir de 1990, lorsque plusieurs professionnels, constructeurs et architectes, ont formé une association appelée TerraMorpho, et introduit en Belgique la technique de construction argile-paille (i.e., remblayage d'un cadre en bois avec un mélange d'argile et de paille – Bronchart et Bavay, 2011). Actuellement, la filière terre crue en Belgique concerne 3 familles de matériaux de construction complémentaires : les briques de terre crue naturelles ou stabilisées, les enduits (de corps, de finition, décoratifs) et dans une moindre mesure d'autres produits en vrac (e.g., terre à pisé). Suite au regain d'intérêt pour ces produits, on assiste à l'émergence de producteurs locaux (e.g., Argio, Lebailly). Leur offre est complétée par celle des sociétés qui préparent des enduits et autres matériaux en vrac (e.g., Hins, Comptoir des Argiles, Morpha Minera). Ces entreprises offrent des alternatives locales à l'importation de produits étrangers, principalement ceux de Claytec (Allemagne), Argilus (France) et Tierrafino (Pays Bas). Récemment, la technique de l'argile-paille semble avoir été abandonnée en faveur des matériaux qui permettent une meilleure portée et des meilleures performances énergétiques (LOCI, 2016).

On rencontre en diverses régions de la Belgique des formations argileuses importantes, utilisées pour la fabrication de briques, corps creux, tuiles et poteries et aussi dans l'industrie du ciment. Les principaux gisements d'argile exploités en Belgique sont les argiles des polders, l'argile de la Formation de Boom, les argiles de Campine, les argiles du Groupe d'Ypres, les argiles du Groupe du Hainaut, les limons de couverture et d'alluvions et les shales altérés (Gulinck, 1958). Ces formations argileuses constitueront la matière première essentielle à la réalisation de ce projet.

I.4.2 Patrimoine terre crue en Belgique

L'architecture en terre en Belgique trouve ses sources dès le Moyen Age et s'épanouit entre 1650 et 1800 (Bavay, n.d., Fig. 12). Les témoins de cette architecture sont rares aujourd'hui (Pereira-Goncalves, 2017).

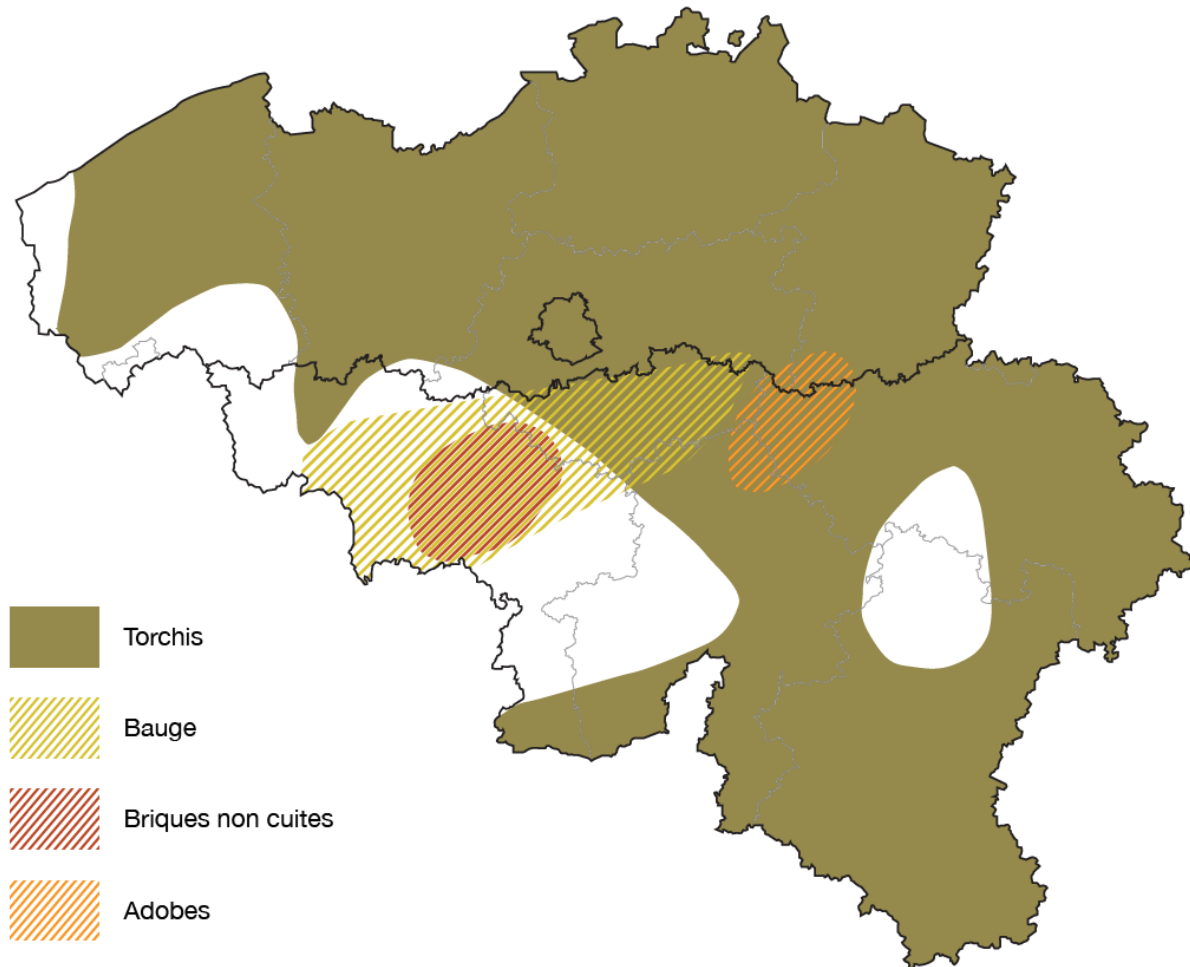


Fig. 12. Répartition des techniques de construction en terre crue présentes en Belgique (Pereira-Goncalves, 2017).

a) Le Pisé en Belgique

La technique du pisé date de l'époque préromaine. Elle atteint l'Europe à partir du VII^e siècle avec l'expansion de l'Islam, d'abord autour du bassin de la Méditerranée, ensuite dans nos régions (Anger et Fontaine, 2009).

En Belgique, la technique du pisé est peu développée (Lemaire, 1984). Lemaire (1984) note quelques exemples historiques à Halle-Booienhoven (Dormaalstraat, Dorpsstraat), à Tirlemont et dans le Limbourg. En Wallonie, des témoignages de cette technique ont été observables dans le Hainaut (De Francesco, 2015). Dans les années 1920, plusieurs maisons expérimentales ont été construites en pisé à Ypres dans un projet de reconstruction après la Première Guerre mondiale (Fig. 13, Van Hoecke, 1924).

Cependant le pisé n'est pas encore ancré dans la culture constructive belge. Ce patrimoine reste modeste et difficile à répertorier, les façades étant, dans la plupart des cas recouvertes d'un enduit (De Francesco, 2015). Néanmoins, un renouveau du pisé est observable en Belgique

depuis une dizaine d'années : la tour d'observation de Negenoord, le mur intérieur du musée Source O Rama à Chaufontaine ou encore un pavillon de chasse à Alost (Fig. 14). Des bureaux d'étude et des entrepreneurs (BC architects & studies, De Gouden Liniaal Architecten, Eva Gheysen & Lef Spincemaille, Camimo, Hermans Marc) s'intéressent à nouveau à ce mode constructif (De Francesco, 2015).



Fig. 13. Maison en pisé à Ypres, 1920 (Van Hoecke, 1924).



Fig. 14. Exemples des constructions récentes en pisé en Belgique. De gauche à droite : tour d'observation de Negenoord, mur intérieur du musée Source O Rama à Chaufontaine, pavillon de chasse à Alost (Claytec, 2004 ; Inhabitat 2016a et 2016b).

b) La bauge en Belgique

Dans nos régions, cette technique date dans sa grande majorité du 18^e et 19^e siècle. En France, cette technique constructive a été observée lors de fouilles archéologiques depuis l'époque gauloise ainsi que dans des édifices du 16^e siècle (Bronchart et Bavay, 2011). La technique de la bauge n'a pas fait l'objet de beaucoup d'attention en Belgique. Jusqu'au milieu des années 1970, le patrimoine bâti en bauge est resté ignoré. Des anciennes constructions s'observent aujourd'hui surtout dans le Hainaut et à l'ouest du Brabant, dans les régions de Braine-Le-Comte, de Roisin et de Meurain (granges, maisons, étables, fours à pain) (Fig. 15, De Francesco, 2015).



Fig. 15. Étable (à gauche) et grange (à droite) en bauge à Braine-le-Comte (Pereira-Goncalves, 2017).

c) Le torchis en Belgique

Le torchis est la technique la plus présente en Belgique. Dans nos régions, la construction en torchis a connu son apogée au Moyen Age et fut utilisée jusqu'au début du XIXe siècle en zone rurale. Cette technique de construction a résulté de l'abondance des ressources forestières (en particulier dans les Ardennes), de l'importance des sols argileux, ainsi que de son faible coût. L'abandon du torchis coïncide avec la diminution des constructions en pan-de-bois dès le début du XVIIe siècle due à la déforestation intempestive et à la promulgation de règlements urbains interdisant l'utilisation du pan-de-bois afin de diminuer les risques d'incendie (Babylas et al. 2012).

En Belgique, les constructions de torchis deviennent rares. On dénombre actuellement quelques dizaines d'édifices au patrimoine monumental wallon. Ils sont essentiellement situés en Ardenne, Fagne, Famenne et sur le plateau hennuyer (LOCI, 2016, Fig. 16).



Fig. 16. Exemples de construction en torchis. À gauche la maison espagnole à Groupont (XVIème siècle), à droite une grange à Saint-Sauveur (XIXème siècle) (Pereira-Goncalves, 2017).

d) L'adobe ou brique de terre en Belgique

En Belgique la brique de terre est restée rare. Elle consistait à utiliser des briques destinées à être cuites ou façonnées selon des gabarits spécifiques pour les plafonds, cheminées, murs intérieurs ou en façade (Bavay, n.d. ; Pereira-Goncalves, 2017, Fig. 17).



Fig. 17. Mur intérieur d'habitation du XIXème siècle à Estinnes (à gauche) et Remise à Wasseiges (à droite) en adobes (Pereira-Goncalves, 2017).

I.4.3 Les produits de terre crue en Belgique

Actuellement en Belgique, la terre crue est utilisée dans la réhabilitation énergétique (pour améliorer la performance énergétique des bâtiments) et dans l'éco-construction (i.e., construction répondant aux défis du développement durable).

Les produits en terre crue disponibles sur le marché belge actuellement sont de 6 types décrits ci-dessous.

1. Les briques de terre crue sont réalisées par pressage mécanique ou hydraulique, elles sont soit 100% naturelles ou stabilisées. Elles ont des teintes, formats et formes variables. Les briques de terre crue peuvent être utilisées en intérieur ou en extérieur pour des murs porteurs ou non (Lebailly, 2019 ; Ecobati, 2019 ; Druwig, 2019 ; Ecomat, 2019).

2. Les mortiers sont prévus pour le maçonnerie des briques de terre crue. Ils ont une granulométrie adaptée à l'épaisseur des joints choisis (Hins, 2019).

3. La barbotine correspond à une argile broyée préparée pour servir d'accroche (sur murs en paille par exemple) (Hins, 2019).

4. Le revêtement de surface est composé de gypse, d'une pâte d'argile et généralement stabilisée à la chaux. Ils sont de revêtement ou de dallage à utiliser uniquement pour des surfaces intérieures (Stuc-and-staff, 2019 ; Argio, 2019).

5. Les enduits d'argile en terre crue connaissent depuis quelques années un développement très important. Le terme enduit décrit une ou plusieurs couche(s) (différentes) appliquées successivement sur un support. Son application tient compte de la nature et de la qualité du support : e.g., mur ou plafond, fonction et fréquentation de la pièce, texture de surface). Différentes nomenclatures sont utilisées pour les différentes couches de l'enduit.

- L'enduit de base est une couche qui rectifie et homogénéise la surface à enduire et qui est destinée à recevoir une ou plusieurs couches de finition.
- L'enduit de finition est une couche qui apporte la planéité et qui empêche les fissures. Il peut être recouvert d'un enduit de décoration ou d'une peinture.
- L'enduit monocouche est un enduit qui s'apparente à un enduit de finition lorsqu'il est appliqué sur un support stable et homogène. Il s'applique alors en une seule couche et apporte la planéité et parfois même la texture de surface et la couleur.

- L'enduit de décoration est un enduit de finition très mince (de deux à trois mm), généralement à base d'argiles colorées et de sables fins. Il est utilisé en dernière couche pour donner une couleur spécifique et une finition soignée à un enduit en terre.

Outre les différentes couches, les enduits peuvent contenir des fibres animales ou végétales qui doivent empêcher la fissuration. Les enduits de terre peuvent également être stabilisés par un liant hydraulique (e.g., chaux hydraulique, ciment, plâtre, laitier) (Hins, 2019 ; Ecobati, 2019 ; Druwig, 2019 ; Ecomat, 2019).

6. Les produits de prêts à l'emploi sont la terre pour la réalisation de torchis, du pisé, et d'autres terres de remplissage des cloisons et plafonds (Ecobati, 2019 ; Druwig, 2019 ; Ecomat, 2019 ; BCmaterials, 2019).

1.4.4 Les acteurs de la terre crue en Belgique

Le matériau « terre crue » présente un réel regain d'intérêt et est plus que jamais d'actualité. En effet, la terre crue est parfaitement adaptée à la démarche de construction à haute qualité environnementale et celle du développement durable. La liste ci-dessous énumère les principaux acteurs de la filière terre crue en Belgique. Elle fait suite aux travaux faits par Loréa (2014), De Francesco (2015) et Pereira-Goncalves (2017).

Les artisans

Sont des maçons, ébénistes, spécialistes de la construction en paille ou architectes exerçant soit en tant qu'indépendants, soit sous forme de petites structures pluridisciplinaires. Ils sont les principaux acteurs de la filière terre crue en Belgique.

Les architectes

Des bureaux d'étude et des architectes s'intéressent de plus en plus à la construction en terre crue : BC architects & studios, De Gouden Linaal Architecten, Eva Gheysen & Lef Spincemaille, Camimo, Hermans Marc sont quelques exemples.

Les producteurs industriels et semi-industriels

Se composent de briquetiers, exploitant avant tout la brique de terre comprimée et extrudée et de producteurs d'enduits et de torchis locaux prêts à l'emploi, et travaillent principalement à l'échelle régionale.

Nous avons répertorié 2 producteurs de la brique crue en Belgique : LEBAILLY S.A et BC materials. Deux autres entreprises ont produit des briques de terre crue : la société ARGIO S.A. à Tubize et la société ARGIBAT à Wanlin. La première a abandonné la production des briques de terre crue en 2016, la seconde a fait faillite et cessé toute activité en mai 2018.

La société LEBAILLY est située pour l'ensemble de son activité (usines et carrière) dans l'entité de Saint-Ghislain (Hainaut, Belgique), à environ 15 km à l'ouest de Mons. Créée en 1842, la Firme Emile LEBAILLY est devenue en mars 2005 LEBAILLY S.A. et fabrique des produits réfractaires et crus. Les produits de terre crue sont les briques de terre crue, les mortiers, les enduits de terre et la barbotine. La société Lebailly exploite dans la carrière Le Danube et dans celle du Bois du Prince les dépôts fluviaux et estuariens du Wealdien, argiles du Groupe du Hainaut. La S.A Lebailly exploite également quelques mètres d'argiles sableuses de la Formation de Tielt (Yprésien supérieur) à Saint-Ghislain (Lebailly, 2019).

BC materials est un producteur de matériaux de construction en terre crue de 3 types : BTC, enduits et mélanges de terre pour le pisé. Basé à Bruxelles depuis début 2018, BC materials utilise comme matière première des terres issues de déblai. BC materials possède également

une usine mobile qui se déplace sur les chantiers pour une production in situ des matériaux de constructions en terre (BCmaterials, 2019).

Outre les producteurs de briques en terre crue, il existe 3 autres producteurs de prêts à l'emploi pour la réalisation de torchis, du pisé ou d'enduits :

1. Les argilières Hins

Situées à Saint-Aubin, ils sont un ensemble d'exploitations d'argile dont la première fut créée en 1962. Depuis 1982, la s.p.r.l. Argilières Hins exploite trois argilières, dans deux types de gisement localisés dans l'Entre-Sambre-et-Meuse. Le premier résulte de l'altération *in situ* de shales paléozoïques famenniens, le second correspond à l'accumulation de résidus d'altération au sein de dépressions karstiques qui ont criblé à l'Eocène les calcaires dinantiens (Nicaise, 1998 ; Poty et Chevalier, 2014). La terre de ces trois argilières convient pour l'artisanat (argile fine pour potiers, modelers, sculpteurs, etc.) et aussi pour la réalisation de briques, de produits réfractaires et de carrelages. La société Hins propose des mélanges prêts à l'emploi pour la réalisation d'enduits, de pisé ou de torchis.

2. Stuc & Staff

Implantée à Courtrai, Stuc & Staff est une entreprise de préparation de mélanges prêts à l'emploi pour enduits intérieurs utilisés pour revêtement de sols, murs, les façades.

3. Argio/DécoSystème

Anciennement TERRACO Group S.P.R.L, Argio S.A. est né à Tubize après un premier dépôt de brevet, en 2010, portant sur un bloc de terre crue stabilisé (i.e., le bloc ARGIO). L'entreprise a depuis été reprise par la société DécoSystème en 2016 et a abandonné la production du bloc ARGIO et développé la gamme des enduits de finition et des revêtements de surfaces de type « granito ».

D'autres entreprises étrangères distribuent leurs produits en Belgique :

1. La société Tierrafino est implantée à Amsterdam depuis 1994, elle produit des enduits d'argile, de la terre à pisé et des stucs d'argile. En Belgique, le distributeur officiel des produits Tierrafino est Ecomat, situé à Zoersel dans la province d'Anvers.

2. Claytec a été créée en 1984 à Viersen près de Düsseldorf en Allemagne. Cette société produit des enduits d'argile, des stucs d'argile, des panneaux d'argile, des briques de terre crue, des matériaux spécifiques à la restauration de colombage et des prêts à l'emploi pour le torchis, la bauge et le pisé (dalles et murs). L'importateur officiel pour la Belgique est la société Druwid située à Gueuzaine, dans la province de Liège.

3. Créée en 2009, la société Argilus est implantée en Vendée dans l'Ouest de la France. Elle produit des briques de terre crue, des enduits sur briques de construction, des sols de finition, des bétons de remplissage, des enduits de finition. Les produits Argilus sont distribués en Belgique à Arlon, Bruxelles, Herstal, Namur, Sprimont, Tournai et Wavre par Ecobati.

1.5 La terre crue à Kinshasa et du Kongo Central

Les régions de Kinshasa et du Kongo Central contiennent une abondance de matières premières argileuses (terres) dans plusieurs localités (Mango-Itulamy, 2015). Ainsi, 6 localités contenant d'importants gisements argileux ont été sélectionnées : Kwilu Ngongo, Kinshasa, Mbanza Ngungu, Nkamba, Kasangulu et Lukala. Les matières argileuses de ces 6 régions ont été échantillonnées et certaines d'entre elles ont servi à la confection des briques de terre crue.

La terre est un matériau de construction largement utilisé dans cette région. Son exploitation dans le domaine de la construction est généralement artisanale. Les terres extraites sont en grande partie utilisées pour la fabrication des briques non cuites ou cuites chauffées au bois, avec les problèmes qui en découlent, notamment, la déforestation (Schure et al. 2011 ; Wetshondo, 2012). Ces activités sont fondées et gérées par des sociétés familiales et des artisans (Wetshondo, 2012). Un autre matériau de construction largement utilisé dans la région est le bloc de ciment ou parpaing. Depuis le début des années 1990, et la faillite de la Briqueterie de Kinshasa, l'abandon de la construction en matériaux en terre cuite a été quasi systématique à Kinshasa. La quasi-totalité de la population s'est tournée vers un matériau local, i.e. le bloc de ciment. Il s'agit d'un bloc fait par compression manuelle ou mécanique en mélangeant des fines concassées de broyage d'une roche gréseuse (le grès de l'Inkisi) appelée localement « poussière », de sables alluvionnaires (alluvions du fleuve Congo ou des rivières Mbinza, Kalamu, Ndjili etc.) et de ciment. Le concassé est obtenu par concassage et broyage mécanisé (Fig. 18) ou manuelle du grès de l'Inkisi. Le sable est prélevé directement le long du fleuve Congo ou des rivières (Fig. 19). Trois sociétés implantées dans la province voisine du Kongo Central fournissent du ciment de bonne qualité. Un sac de 50 kg coûte en moyenne 9 euros, et permet la fabrication de 30 à 50 blocs selon le dosage.



Fig. 18. Usine de concassage et broyage des grès de l'Inkisi.



Fig. 19. Plaine du fleuve Congo. Zone d'extraction de sable et de concassage manuel du grès de l'Inkisi. Cette zone n'est accessible que durant la saison sèche, période de décrue.

Ces blocs de ciment de 10, 15 ou 20 kilos coûtent en moyenne 0,9, 1,2 et 1,7 euros le bloc. Malgré ce coût élevé pour la plupart de ménages, l'architecture en blocs de ciment est la plus développée à Kinshasa (Tableau 9). Planter un mode de construction en terre crue est un travail difficile à réaliser et nécessite une démarche plus conséquente pour les deux principales raisons citées ci-dessous :

(1) Les briques de terre (même cuites) sont considérées comme matériaux du pauvre et matériaux non durables. Les gens préfèrent les grosses briques de béton, qu'ils considèrent comme étant plus esthétiques et plus solides.

(2) Le manque de maçons formés pour la construction avec d'autres types de matériaux. Les briques de béton sont faites suivant les mêmes formats. Ce qui fait que les maçons ne maîtrisent qu'une seule façon de mise en œuvre.

Nous avons néanmoins tenté de proposer un autre matériau de construction (brique de terre crue terre-sable, terre-concassé et terre-concassé-ciment), en espérant susciter un intérêt auprès de la population kinoise.

Types de matériaux	Kinshasa	Kongo Central
Torchis	0,9%	4,8%
Adobe	5,4%	47,3%
Bloc de ciment	83,1%	13,5%
Brique cuite	6,5%	29,6%

Tableau 9. Types de matériaux pour mur utilisés dans les provinces de Kinshasa et du Kongo Central (PNUD, 2009a et 2009b).

1.6 Synthèse

La construction en terre crue est une technique ancestrale, qui consiste à utiliser la terre non cuite, mais simplement séchée. Elle peut être mise en œuvre selon plusieurs techniques. L'adobe, le pisé, la bauge, le torchis et le Bloc de Terre Comprimée (BTC) sont les techniques de mise en œuvre les plus courantes. Au fil du temps, la terre crue d'abord privilégiée par l'Homme, comme en témoignent un grand nombre de vestiges (e.g., Fig. 1), a été progressivement abandonnée dans plusieurs régions suite à l'industrialisation.

Cependant, la terre présente des avantages écologiques et économiques qui font qu'elle regagne peu à peu l'intérêt des architectes et des entrepreneurs. Son développement doit tenir compte de multiples critères techniques et économiques afin de s'intégrer harmonieusement dans le cadre architectural local et d'être accepté par les populations locales comme une alternative de construction. D'un point de vue technique, la qualité du matériau terre et la mise en œuvre architecturale doivent garantir sa durabilité dans le temps en fonction, en particulier, des conditions climatiques locales. D'un point de vue économique, le produit confectionné en terre crue doit apporter une plus-value par rapport aux matériaux de constructions classiques et/ou satisfaire les contraintes du marché en termes de disponibilité et/ou de coût de la main d'œuvre.

La terre à bâtir est constituée de gravier, sable, limon, argile, matière organique, eau et air. Le gravier et le sable constituent le squelette de la terre alors que les argiles assurent sa cohésion. Toutes les terres ne sont pas à utiliser telles qu'elles sont prises sur le terrain pour produire des BTC. Il existe des normes qui permettent de sélectionner les terres propices à la construction en BTC. Ces normes sont principalement basées sur des critères de granulométrie et plasticité des terres. Cependant d'autres critères tels que la nature de la terre, la teneur en matière organique ou la cohésion sont également recommandés. Il s'agit de critères de sélection non restrictifs parce qu'une terre peut toujours être modifiée. Le principal moyen de modifier une terre est la stabilisation. Celle-ci se fait en ajoutant à la terre d'autres composants tels que sable, gravier, fibres, bitume, résines, chaux, ciment.

En Belgique, les témoins de l'architecture ancienne en terre crue sont rares. Quelques traces de pisé, de bauge, de torchis et d'adobe sont encore visibles dans le paysage belge. À partir des

années 1990, la terre crue a connu un regain en Belgique. Ceci s'est traduit par l'apparition d'acteurs et de produits en terre. Ces acteurs sont des artisans, architectes et producteurs industriels et semi-industriels. Les produits en terre crue présents sur le marché belge sont les briques de terre crue naturelles ou stabilisées, les mortiers, la barbotine, le revêtement de surface, les enduits et les produits en vrac.

L'architecture en terre crue est de plus en plus absente dans la région de Kinshasa où moins de 6 % des constructions sont encore en terre crue. Par contre, dans le Kongo Central, 52 % des constructions seraient encore en terre crue, principalement dans les zones rurales. La terre crue demeure un matériau connu par les populations locales de ces 2 régions. Cela représente un avantage pour renforcer son usage dans ces régions.

II. Méthodes expérimentales

II.1 Analyse des terres et des argiles

II.1.1 Analyse chimique par Fluorescence X (FX)

La détermination des éléments majeurs par spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX) a été faite à l'aide d'un spectromètre de marque ARL™ PERFORM'X du laboratoire de pétrologie sédimentaire (PETROSED) de l'Université de Liège.

L'échantillon est séché à 40°C, broyé et tamisé à 250 µm. Ensuite il est chauffé à une température de 1000 °C pendant 2 heures. Il est ensuite décomposé par un broyage manuel, puis mélangé à une proportion de 11 fois sa masse avec du borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et environ 0,002 gr de LiBr. Ces composés ont pour propriété de baisser la température de fusion. Le mélange est ensuite soumis à la fusion. La dernière étape consiste à réaliser des perles qui seront analysées.

En bombardant de la matière avec des rayons X, celle-ci réémet de l'énergie sous la forme de rayons X, dont le spectre est caractéristique de la composition de l'échantillon. En analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire (les concentrations massiques en éléments. Adler, 1966 ; Lachnitt, 1983).

Les concentrations élémentaires ont été obtenues en réalisant une calibration par rapport à des standards (Adler, 1966 ; Müller, 1972 ; Lachnitt, 1983).

II.1.2 Caractérisation minéralogique (DRX)

Une analyse minéralogique sur poudre totale et sur la fraction argileuse a été réalisée sur chaque échantillon. Les échantillons ont été préparés selon le protocole du laboratoire Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires de l'Université de Liège (AGEs) (Fagel, 2010), adapté selon Moore et Reynolds (1989).

La minéralogie de la *poudre totale*, a été déterminée après que les échantillons soient séchés à l'étuve à 40°C, broyés manuellement dans un bol en agate, puis tamisés à 250 µm. On a ensuite constitué des pastilles à l'aide des supports métalliques pour la diffractométrie.

Pour la *fraction argileuse*, une petite portion de l'échantillon est séchée et placée dans un berlin où elle est mélangée à l'eau distillée, puis homogénéisée par agitation sur une plaque magnétique. S'en suit un tamisage humide à 63 µm. Le tamisat est récupéré et laissé au repos pendant 50 minutes pour que la sédimentation s'effectue. On récupère enfin à l'aide d'une pipette de 1,5 cc à la profondeur de 1 cm la fraction inférieure à 2 µm. L'analyse par DRX des minéraux argileux étant basée sur la connaissance des distances réticulaires (001), on cherche à renforcer les réflexions (001) en orientant les particules (Moore et Reynolds, 1989). La fraction inférieure à 2 µm prélevée est posée sur une lame de verre de 25 x 25 mm et laissée sécher pendant au moins 12 heures. Les lames orientées obtenues pour chaque échantillon sont analysées au diffractomètre pour fournir les diffractogrammes à l'état normal (N).

Certaines argiles ont des distances inter-réticulaires voisines et sont donc difficiles à différencier sur un diffractogramme orienté à l'état normal. C'est pourquoi, toutes les lames orientées à l'état normal ont subi 2 nouveaux traitements. Ces traitements modifient la distance inter-réticulaire de manière spécifique et permettent de différencier les espèces argileuses entre elles :

- la solvatation à la vapeur d'éthylène-glycol (EG) se fait sous cloche et a pour conséquence de faire gonfler les feuillettes de certains minéraux argileux ;
- la chauffe à 500°C permet de déshydrater les minéraux argileux.

L'échantillon est soumis à des rayons X obtenus en bombardant une anode de cuivre par un faisceau d'électrons accélérés dans le vide. Au contact avec l'échantillon, ces rayons X sont réfléchis par chaque cristallite de l'échantillon selon une orientation dans l'espace. Les rayons X réfléchis interfèrent entre eux avec diverses intensités (Tucker et Hardy, 1988). On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ (deux-thêta) du faisceau. La courbe obtenue s'appelle diffractogramme ou spectre DRX. En analysant les spectres DRX obtenus, il est possible de déterminer les phases minérales qui constituent la poudre. En effet, pour certains angles de déviation 2θ du faisceau, on détecte des rayons X. Ce sont les « pics » du diffractogramme. Ces angles de déviation sont caractéristiques de l'organisation des atomes dans la maille cristalline. Dans les autres directions, on ne détecte pas de rayon X, c'est la ligne de fond du signal (Tucker et Hardy, 1988). Si l'on calcule les directions dans lesquelles on a du signal, on s'aperçoit que l'on obtient une loi très simple ou loi de Bragg (Tucker et Hardy, 1988)

$$2.d.\sin(\theta) = n.\lambda$$

où θ est la moitié de l'angle de déviation, n représente un nombre entier appelé « ordre de diffraction », λ est la longueur d'onde des rayons X et d la distance entre les plans d'alignement des atomes.

Le logiciel EVA a été utilisé pour lire les diffractogrammes et permettre d'identifier les phases minérales, grâce au paramètre d .

II.1.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de classer les grains d'un échantillon selon leurs tailles, et donne une répartition du pourcentage de chaque classe par rapport au poids total de l'échantillon. La mesure de la distribution granulométrique des échantillons a été réalisée selon deux méthodes : tamisage et granulométrie laser par voie humide. Le tamisage a été réalisé au Laboratoire de Géotechnologies de l'Université de Liège ; la granulométrie laser a été réalisée dans le Laboratoire de Chimie Structurale de l'Université de Liège, utilisant l'analyseur granulométrique Malvern Mastersizer 2000.

L'échantillon à classer est passé dans une série de tamis emboîtés ayant des diamètres d'ouverture croissants du bas vers le haut : 0,075 mm ; 0,150 mm ; 0,250 mm ; 0,500 mm ; 1,180 mm ; 2,36 mm et 4,75 mm. L'échantillon est placé dans le tamis supérieur et le classement se fait par vibration manuelle. Le refus récupéré dans chaque tamis est alors pesé et le pourcentage déterminé.

La granulométrie laser a permis de classer les particules dont le diamètre est compris entre 900 μm et 0,05 μm . Sa durée d'analyse courte, sa précision, la reproductibilité des mesures, la calibration simple, la plage de mesures étendue et la grande souplesse opératoire, sont des nombreux avantages par rapport à la technique par tamisage et par sédimentométrie.

La granulométrie laser est une technique basée sur la diffraction de la lumière. Lorsqu'un faisceau laser entre en contact avec une particule considérée sphérique, on observe une diffraction dont l'intensité du rayonnement et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules (Mie, 1908). Le granulomètre laser mesure l'intensité en fonction de l'angle. La position angulaire permet de déterminer le diamètre des particules par comparaison avec les diffractogrammes calculés par la théorie de Mie. L'intensité donne le volume cumulé des particules pour chaque classe granulométrique (Rawle, 2001).

Un gramme d'échantillon préalablement séché est mis dans un pilulier rempli d'eau. Celui-ci est secoué sur une table d'agitation pendant quelques heures afin de désagréger l'échantillon. L'échantillon est ensuite versé dans la cuve du granulomètre laser. Avant les mesures, un blanc

a été réalisé. Chaque échantillon est analysé 3 fois et la moyenne est calculée. Le résultat est présenté sous forme d'une courbe granulométrique.

II.1.4 Limites de consistance

Les limites de consistance ou limites d'Atterberg servent à classer les échantillons et à prévoir leur comportement lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement. Elles correspondent aux proportions en eau pour lesquelles le matériau argileux passe d'un comportement semi-liquide à un comportement plastique (limite de liquidité, WL) et ensuite d'un comportement plastique à un comportement semi-solide (limite de plasticité WP – Peltier et Rumpler, 1959). Les limites d'Atterberg ont été réalisées sur un matériau dont la taille de particule est $< 425\mu\text{m}$ à l'aide de la coupole de Casagrande selon la norme NF P 94-051 (Fig. 20). Les limites d'Atterberg ont été réalisées dans le Laboratoire de Géotechnologies de l'Université de Liège.



Fig. 20. Coupole de Casagrande.

Pour déterminer la limite de liquidité on utilise 200 gr de matériaux de granulométrie inférieure à $425\mu\text{m}$. On y ajoute de l'eau distillée pour former une pâte argileuse. Celle-ci est étalée ensuite dans une coupelle et on trace une lèvre calibrée. Ensuite l'échantillon est agité sur l'appareil de Casagrande et on note le nombre de coups correspondant à la fermeture de la lèvre sur 10 mm. On s'efforce à avoir toujours un nombre de coups compris entre 15 et 35. Il faut au moins 4 mesures. Les mesures sont reportées dans un graphique teneur en eau-nombre de coups. La limite de liquidité correspond à la teneur en eau lorsque le nombre de coups est de 25 (AFNOR, 1999)

Pour déterminer la limite de plasticité, on utilise la pâte argileuse pour former un petit boudin de 3 ou 4 cm de long, puis on le roule sur une surface plane jusqu'à ce qu'il atteigne une longueur d'environ 10 cm de long et 3 mm de diamètre à sa rupture. La limite de plasticité correspond à la teneur en eau du boudin à sa rupture. On répète la manipulation 3 fois et la limite de plasticité correspond à la valeur moyenne de ces 3 mesures (AFNOR, 1999).

Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de plasticité. Elle s'obtient par la différence entre la limite de liquidité et de plasticité : $I_p = WL - WP$. Elle caractérise l'intervalle où le matériau argileux demeure plastique ou façonnable.

II.1.5 Perte au feu

La perte au feu (LOI, Loss-On-Ignition en anglais) est la diminution du poids de l'échantillon par processus de déshydratation successifs liés à l'élimination de l'humidité résiduelle et de l'eau de constitution des minéraux et la disparition de la matière organique.

L'échantillon est chauffé pendant 24 heures à 105°C dans un four afin d'être déshydraté. La teneur en eau est obtenue en mesurant la différence des pesées entre l'échantillon non chauffé et chauffé. La teneur en matière organique est obtenue par la suite en chauffant environ 1,5 gr d'échantillon, placé dans un récipient en céramique d'environ 10 ml, pendant 4 heures à 550°C dans un four. La matière organique est éliminée sous forme de cendre et de CO₂ (Dean, 1974 ; Heiri et al., 2001). Les mesures ont été réalisées au laboratoire AGEs de l'ULiège. La teneur en eau est calculée selon l'équation suivante :

$$Teneur\ en\ eau = \frac{(masse\ humide - masse\ sèche)}{masse\ humide} * 100$$

La densité sèche peut être déduite de la teneur en eau suivant la relation suivante :

$$Densité\ sèche = \frac{100 - teneur\ en\ eau}{100} * densité\ du\ grain.$$

La densité est fonction du type de grain en g/cm³ : calcite 2,71 ; quartz 2,65 ; argiles 1,8-2,2 ; opale 1,4 (Malinverno, 2008). Cette formule considère que l'échantillon contient de l'eau et des particules sédimentaires.

La teneur en matière organique est calculée selon la perte au feu à 550 °C suivant l'équation (Tucker et Hardy, 1988) :

$$LOI\ 550 = \frac{masse\ sèche - masse_{550}}{masse\ sèche} * 100$$

II.1.6 Retrait longitudinal de séchage

Lors du séchage de la terre, l'évaporation de l'eau engendre de la succion entre les particules et provoque un retrait linéaire et volumique du matériau (Fig. 21).



Fig. 21. Retrait de séchage d'une boue argileuse (Flament, 2013).

Ce retrait est préjudiciable et dépend de la nature argileuse et de la technique de fabrication (Molard et al. 1987). De par la compression de la terre, la fabrication d'un BTC nécessite une quantité réduite d'eau. Par conséquent, le retrait est limité contrairement aux mises en forme plastiques (torchis, bauge), et généralement compris entre 1 et 3 % (Moëvus et al., 2012). La reprise d'eau dans le temps d'une terre provoque le délitement et l'érosion de la matière (Molard et al., 1987 ; Hall et Djerbib, 2006 ; Bui et al., 2009).

Pour les mesures de retrait longitudinal de séchage, nous avons réalisé à partir des pâtes argileuses à teneur en eau comprise entre les limites de liquidité et de plasticité, et à taille de particule inférieure à 425 µm, des éprouvettes dans un petit moule aux dimensions 9 x 6,5 x 2,3 cm (longueur x largeur x épaisseur). Les éprouvettes ont été placées sous une atmosphère de 21°C (+/- 2°C) et 50% HR (+/- 5%). Le retrait longitudinal a été mesuré sur 7, 14 et 21 jours. Pour les différents temps de séchage (t = 0, t = 7 jours, t = 14 jours et t = 21 jours), on mesure la longueur sur la face supérieure suivant la diagonale (Fig. 22). Le retrait longitudinal de séchage se calcule suivant la formule (e.g., Walker, 1995 ; El Ouahabi, 2013) :

$$\text{Retrait longitudinal \%} = 100 * \frac{l_0 - l_t}{l_0}$$

avec l_0 = longueur de la diagonale de l'échantillon avant séchage ; l_t = longueur de la diagonale de l'échantillon après séchage à l'instant t. Les mesures ont été réalisées au laboratoire AGES de l'ULiège.

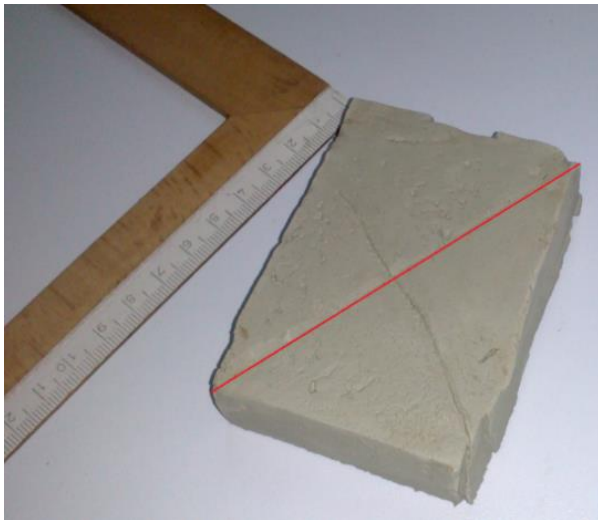
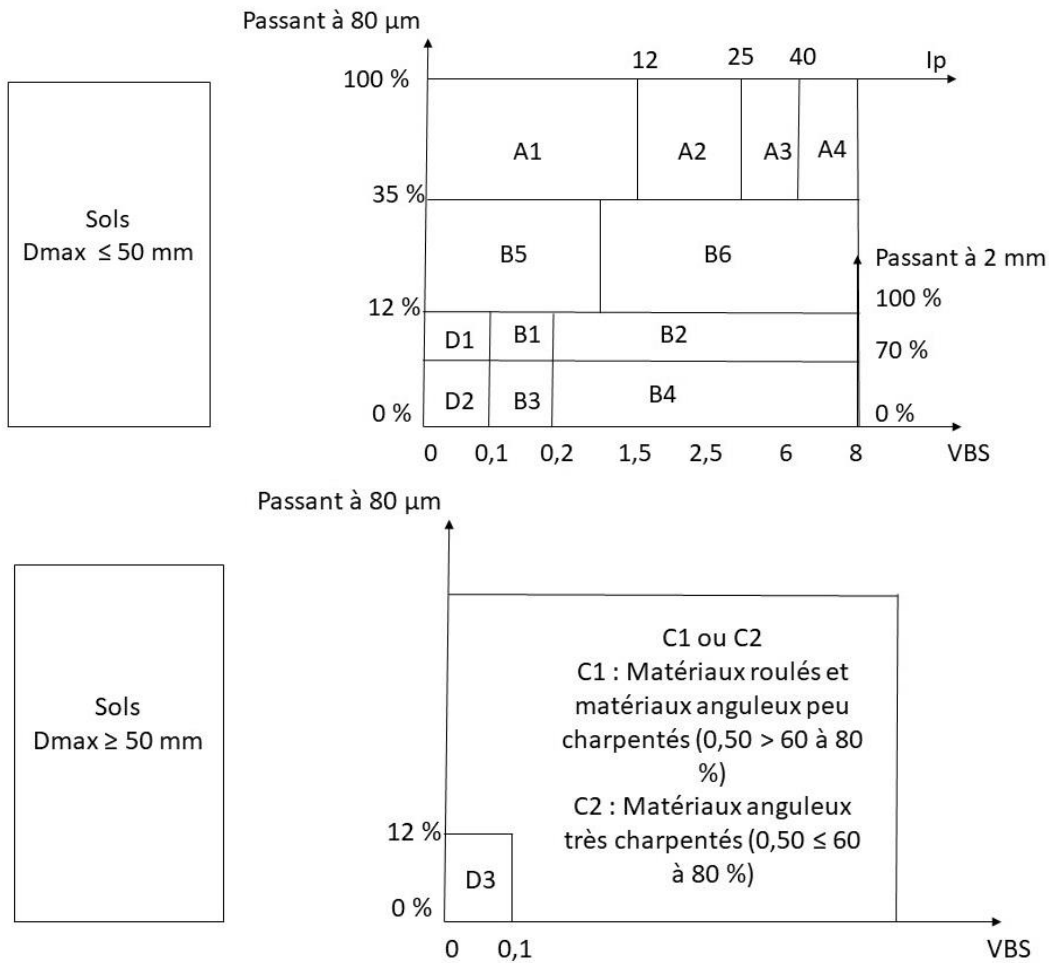


Fig. 22. Mesure de la longueur de la diagonale (ligne rouge).

II.1.7 Nature (classification des terres)

La nature des terres est déterminée par la combinaison des valeurs issues des essais de granulométrie, plasticité et valeur de bleu de méthylène (Fig. 23). La valeur de bleu de méthylène (VBS) sert à déterminer l'abondance de la fraction argileuse. L'essai au bleu de méthylène est réalisé en ajoutant une solution de bleu de méthylène $C_{15}H_{18}C_1N_5S_2.nH_2O$ dans une suspension argileuse placée dans l'eau distillée. Une goutte de la suspension est prélevée périodiquement et déposée sur un papier chromatographique. La quantité d'argile présente dans l'échantillon est évaluée par la forme de la goutte prélevée (AFNOR, 2013). Les tests ont été réalisés au laboratoire de Géotechnologies de l'ULiège.



R : Matériaux rocheux (Roches sédimentaires, roches magmatiques et métamorphiques)

F : Matériaux particuliers (sols organiques et sous produits industriels)

Fig. 23. Classification des terres selon leur nature (AFNOR, 2001). A1 : matériau acceptable mais ayant un peu trop de fines. A2 : matériau acceptable mais ayant trop de fines. A3 : matériau acceptable mais demandant une attention particulière car relativement actif. A4 : matériau délicat à utiliser car très actif. B1 : matériau sableux demandant un rajout de fines pour être acceptable. B2 : matériau acceptable ayant un léger déficit de fines. B3 : matériau sableux demandant un rajout considérable de fines pour être acceptable. B4 : matériau acceptable ayant un déficit de fines. B5 : matériau acceptable mais manquant un peu de fines. B6 : matériau acceptable mais manquant un peu de fines. C1 : matériau trop graveleux, doit être criblé pour changer sa nature. C2 : matériau trop graveleux, doit être criblé pour changer sa nature. D1 : matériau sableux demandant un rajout de fines pour être acceptable. D2 : matériau sableux demandant un rajout considérable de fines pour être acceptable. D3 : matériau graveleux demandant un criblage pour changer sa nature et un rajout considérable de fines pour être acceptable. R : matériaux qui ne conviennent pas (matériaux rocheux). F : matériaux qui demandent des essais d'identification poussés notamment en ce qui concerne leur analyse chimique et les essais mécaniques avant de pouvoir déterminer leur convenance.

II.2 Fabrication des Blocs de Terre Comprimée (BTC)

II.2.1 Presse manuelle

Cinq échantillons prélevés en Belgique ont été choisis pour concevoir des BTC. Ces échantillons ont été séchés à 40°C dans un séchoir. Ils ont également été broyés à l'aide d'un broyeur à meule pendant 20 à 30 minutes pour désagréger les concrétions d'argiles. Les BTC ont été faits par pressage, à l'aide d'une presse manuelle de type TERASTARAM (Fig. 24). Cette dernière effectue la compression et le démoulage. Le rendement est de l'ordre de 1 brique toutes les 2 minutes. Cette presse a permis de réaliser des blocs pleins de dimensions correspondant au moule utilisé avec une pression de mise en forme de l'ordre de 2 à 3,6 MPa selon la force de l'opérateur. Après démoulage, les briques sont pesées et mesurées avant d'être séchées à l'air libre ($21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) pendant 72 heures, puis mises à 40°C dans un séchoir jusqu'à séchage complet. Le séchage complet a été atteint lorsque la masse mesurée entre 2 jours consécutifs ne change pas. Les BTC fabriqués sont de format 29,5 x 14 x 9,5 cm.



Fig. 24. Presse TERASTARAM (Appro-techno, 2019).

La fabrication des BTC a été réalisée au laboratoire de Géotechnologies de l'ULiège.

II.2.2 Barrettes

Les tests réalisés sur les échantillons prélevés dans la région de Kinshasa et Kongo Central ont porté sur les barrettes (éprouvettes). Les mélanges ont été réalisés selon différentes proportions entre la terre et les stabilisants. Un mélangeur de type Hobart a permis d'homogénéiser le mélange. Les barrettes confectionnées correspondent aux dimensions 4 x 4 x 16 cm³. Les mélanges ont été placés dans les moules en respectant les étapes suivantes :

1. Verser l'échantillon et les stabilisants mélangés dans le bol du mélangeur,
2. Verser l'eau, dont la quantité permet d'assurer un état humide,
3. Mélanger pendant 1 minute,
4. Racler les parois du bol,
5. Re-mélanger pendant 1 minute,
6. Placer le mélange dans les moules préalablement huilés, en le damant en plusieurs couches.
7. Araser les moules afin d'obtenir des surfaces planes.
8. Démouler immédiatement les barrettes, et les placer sur une grille aérée.

La confection des éprouvettes a été réalisée au laboratoire de Géotechnologies de l'ULiège.

Les éprouvettes ont été conservées durant 14 jours en atmosphère contrôlée, dans une pièce dont la température est maintenue en permanence à $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et l'humidité relative à $60 \pm 10\%$. Les propriétés mécaniques sont estimées grâce à des essais de flexion et de compression sur

des barrettes de 14 jours d'âge conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm² (AFNOR, 2001).

II.2.3 Presse hydraulique

D'autres éprouvettes ont été produites en utilisant une presse hydraulique de type Max Voggenreiter mavo press LPP 150-500/100 (Fig. 25). L'échantillon est placé dans le moule de la presse, puis comprimé à l'aide d'un piston (Fig. 25). La pression de compression variait entre 100 et 300 kN. On obtient des éprouvettes cubiques de dimensions 7 x 7 cm (longueur x largeur) et une hauteur de 6 à 9 cm selon la formulation de l'éprouvette. Ces éprouvettes ont été réalisées au laboratoire BCRC (Belgian Ceramic Research Centre) à Mons.



Fig. 25. Presse hydraulique utilisée (à gauche) ; Moule et piston de la presse hydraulique (à droite).

II.3 Caractérisation des Blocs de Terre Comprimée (BTC)

II.3.1 Retrait volumique de séchage

Lors du séchage de la terre, l'évaporation de l'eau engendre la succion entre les particules et provoque un retrait linéaire et volumique du matériau. Le retrait pendant le séchage n'est pas important dans le cas des BTC. Seules les dimensions des blocs à l'état sec intéressent les bâtisseurs, ainsi que le retrait à partir de la mise en œuvre qui est de l'ordre de 1 à 3 %. Cependant la terre à fort retrait de séchage est susceptible d'avoir des fortes variations dimensionnelles au cours du temps si elle n'est pas stabilisée (Moëvus et al. 2012).

Le retrait volumique a été mesuré sur les BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm et correspond à la variation de volume avant et après le séchage exprimé en pourcentage selon la formule :

$$\text{Retrait volumique de séchage (\%)} = 100 * \frac{V_o - V_f}{V_o}$$

où V_o : volume initial, V_f : volume final.

II.3.2 Essai de flexion

La résistance en flexion est déterminée par l'essai 3 points sur les éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³. L'éprouvette est supportée par deux appuis espacés de 100 mm et chargée en son centre (Fig.

26). La résistance à la flexion est alors définie à la rupture. La vitesse de mise en charge lors de l'essai de flexion est de 300 N/min (AFNOR, 2001).

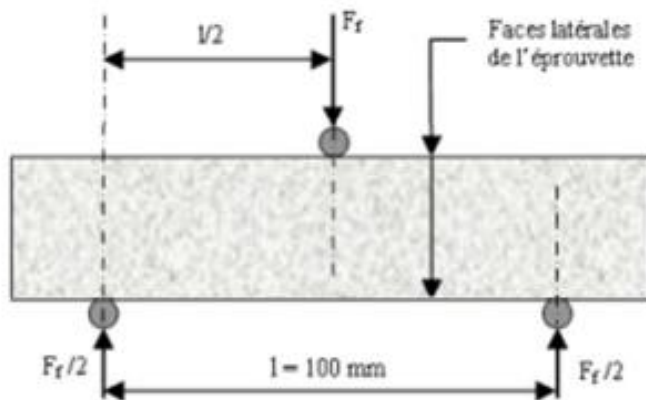


Fig. 26. Schéma et dispositif de l'essai de flexion 3 points.

II.3.3 Résistance à la compression

a) Résistance à la compression des BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm

Il existe plusieurs procédures pour déterminer la résistance à la compression. La résistance à la compression des BTC est mesurée soit sur une unité de maçonnerie (bloc et joint), sur un demi-bloc ou sur un bloc entier (unité individuelle, Morel et al., 2007). Dans cette étude, la résistance à la compression a été mesurée selon la méthode développée par Walker (2000) sur un bloc entier. On charge à vitesse constante (0,02 mm/s) jusqu'à obtenir la rupture du bloc. Deux plaques de fer ont été placées sur les deux surfaces du bloc avant l'application de la charge, comme indiqué sur la Fig. 27. La résistance à la compression correspond à la charge maximale rapportée à la surface.



Fig. 27. Test de résistance à la compression.

b) Résistance à la compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm

Après rupture de l'éprouvette par flexion, les 2 morceaux sont récupérés et soumis séparément à la compression (Fig. 28). La résistance à la compression est déterminée à la rupture. La vitesse de mise en charge lors de l'essai de compression est de 14,4 kN/min (AFNOR, 2001).

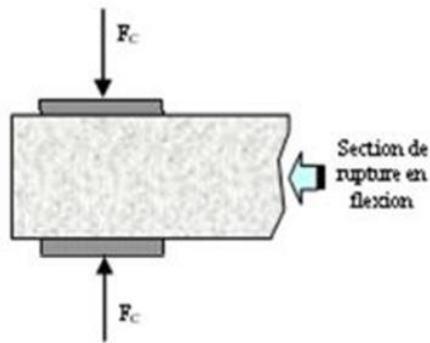


Fig. 28. Schéma et dispositif de l'essai de compression.

c) Résistance à la compression des éprouvettes cubiques

La résistance à la compression des éprouvettes cubiques a été faite au laboratoire BCRC utilisant un appareil TONIUNIVERSAL (Fig. 29). La résistance à la compression correspond à la charge maximale rapportée à la surface (Fig. 29).

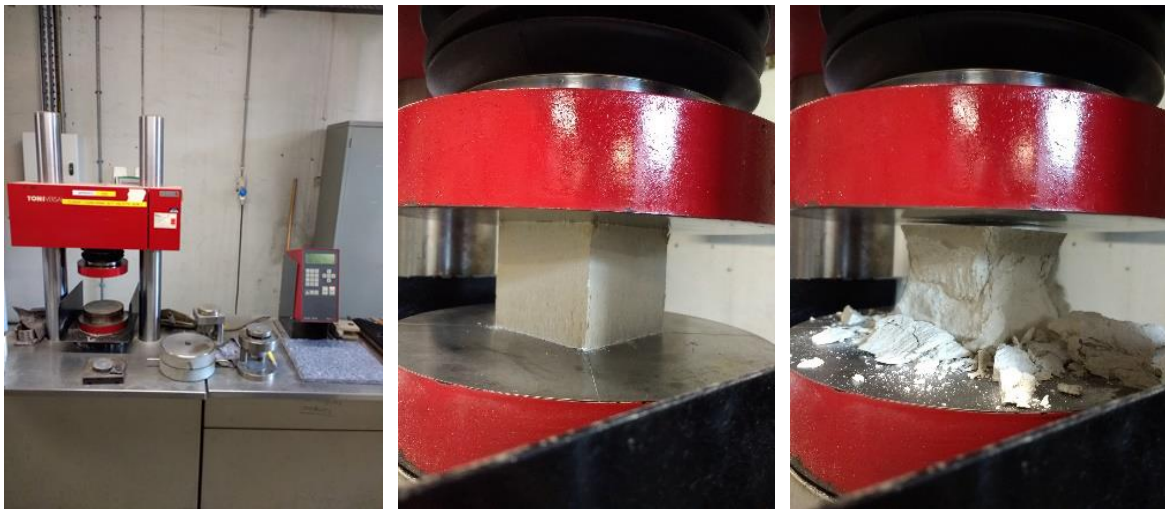


Fig. 29. Dispositif de l'essai de compression (à gauche) ; compression de l'échantillon (au centre) ; rupture de l'échantillon à droite).

II.3.4 Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion ne s'applique qu'à des BTC destinés à être exposés au risque d'abrasion résultant de l'activité humaine (AFNOR, 2001). La résistance à l'abrasion est évaluée par la perte en poids d'un échantillon soumis à une abrasion simulée par l'essai à la brosse, selon le test détaillé dans la norme AFNOR XP P 13-901 (AFNOR, 2001). Ce dernier consiste à broser la surface du bloc à l'aide d'une brosse métallique, à raison d'un aller-retour par seconde pendant une minute sans appliquer de force verticale sur la brosse (Fig. 30). À la fin du broyage, le bloc est nettoyé des éléments qui s'en sont détachés puis à nouveau pesé. La résistance à l'abrasion a été mesurée sur les BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm.

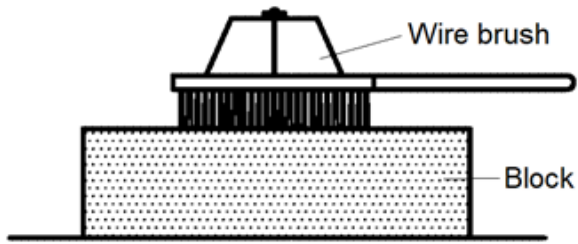


Fig. 30. Dispositif d'essai d'abrasion (AFNOR, 2001).

Le coefficient d'abrasion Ca (en Cm^2/g) est conventionnellement exprimé par la formule (AFNOR, 2001) :

$$Ca = \frac{S}{m_0 - m_1}$$

où S : surface brossée (cm), m_0 : masse du bloc avant le brossage (g), m_1 : masse du bloc après brossage (g).

II.3.5 Capillarité

La capillarité est mesurée sur les BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm par le test détaillé dans la norme AFNOR XP P 13-901 (Fig. 31, AFNOR, 2001). Il consiste à immerger une face du bloc dans une fine couche d'eau (5 mm) pendant 10 min et à observer la masse prise. Le coefficient d'absorption d'eau C_b issu de cet essai est donné par la formule (AFNOR, 2001) :

$$C_b = \frac{100 M}{S\sqrt{t}} = \frac{100 (P_1 - P_0)}{S\sqrt{10}} \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}\text{)}$$

où

M : masse d'eau absorbée par le bloc pendant l'essai (g)

S : surface immergée du bloc (cm^2)

t : temps d'immersion du bloc dans l'eau (min)

P_1 : poids du bloc après immersion dans l'eau (g)

P_0 : poids du bloc avant immersion dans l'eau (g)

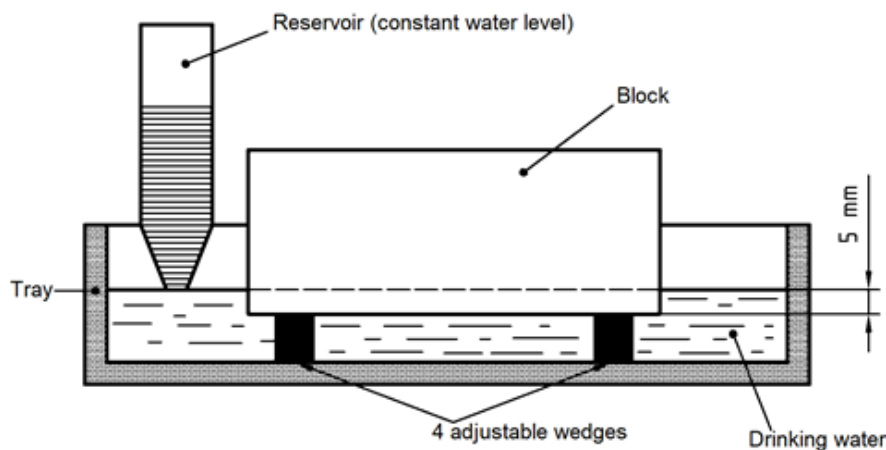


Fig. 31. Schéma de l'essai d'absorption capillaire (AFNOR, 2001).

II.3.6 Essais relatifs à la résistance à l'eau

Ces tests ont été faits sur les éprouvettes cubiques et permettent d'apprécier la résistance des éprouvettes en présence d'eau. À défaut de normes, le test d'**Absorption d'eau par capillarité** est réalisé en suivant le protocole proposé par Guerin (1985). Les éprouvettes sont placées dans un récipient d'eau. La hauteur d'immersion est de 3 mm (Fig. 32). L'essai consiste à mesurer la hauteur à laquelle l'eau est montée dans l'éprouvette après 5', 10', 20', 40', 1h, 2 h, 4h, 8h, ... jusqu'à ce que l'eau atteigne le dessus de la brique. La durée du test est de 7 jours. On veille à protéger les briques pendant le test de l'évaporation (grâce à un sac plastique), et à ce que le niveau d'eau ne descende pas.



Fig. 32. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

Le **Test d'immersion complète** a été développé par Guerin (1985). Il consiste à immerger complètement une éprouvette pendant 8 heures. Pour être utilisables en milieu extérieur, les éprouvettes ne doivent pas s'être désagrégées, n'avoir que peu ou pas de variations dimensionnelles et absorber l'eau le plus lentement possible (Guerin, 1985).

Le **Test d'égouttement accéléré** consiste à libérer de l'eau en continu sur des éprouvettes qui sont inclinées à un angle de 27° par rapport à l'horizontal, durant une période de 10 minutes, en raison de 1 l/min (17,7 ml/s – Weisz et al. 1995, Heathcote, 2002). L'échantillon est placé à 1 m du réservoir d'eau (Fig. 23). Après le test, la profondeur du trou creusé par l'eau sur la face de l'éprouvette (D) est mesurée (Fig. 33). Le test permet de classer l'échantillon testé en 4 catégories (Tableau 10).



Fig. 33. Test d'égouttement accéléré (à gauche) et trou formé par l'égouttement accéléré (à droite).

Classification	Profondeur du trou (mm)
Excellent (Non érodable)	$0 < D \leq 10$
Bon (Légèrement érodable)	$10 < D \leq 20$
Limite (Érodable)	$20 < D \leq 30$
Pauvre (Très érodable)	$D > 30$

Tableau 10. Classification des briques en terre à partir du test d'égouttement accéléré (Weisz et al., 1995).

II.3.7 Essai relatif à la résistance aux cycles de gel-dégel

Ce test a été fait sur les éprouvettes cubiques. À défaut de normes, ce test a également été réalisé en suivant le protocole proposé par Guerin (1985). Il consiste à soumettre l'éprouvette à l'absorption d'eau selon le test d'absorption d'eau par capillarité (voir ci-dessus) jusqu'à ce que l'eau atteigne la face supérieure de l'éprouvette. L'éprouvette humide est ensuite soumise au gel à -18°C durant vingt-quatre heures ensuite au dégel à 40°C jusqu'à séchage complet. On répète ce cycle cinq fois. À la fin de chaque cycle on mesure les variations des dimensions. Moins ces variations sont élevées, et plus l'échantillon est résistant au gel-dégel.

II.3.8 Test de durabilité mouillage/séchage

Le but de l'essai de durabilité est d'évaluer l'aptitude du matériau à résister à l'action de l'eau. Le principal inconvénient de la construction en terre crue est sa moindre résistance à l'action de l'eau. Pour pallier à cela nous avons testé l'ajout de 6% de ciment sur 3 mélanges faits à partir des matériaux collectés à Kinshasa et au Kongo Central. Les 3 nouveaux mélanges avec ciment ont ensuite été soumis à un test de durabilité. Ce dernier a été fait par l'essai d'humidification/séchage ou cycle de mouillage/séchage alterné (ASTM, 2003). Les échantillons sont soumis à 6 cycles de mouillage/séchage. Ils sont immergés pendant 25 minutes puis séchés à 70°C , 40% humidité relative pendant 36h. Lors du dernier cycle, les résistances à la compression des échantillons « vieillis » sont comparées à celles d'échantillons « sains ». Le coefficient de résistance à l'humidité (C_{rh}) est défini par le rapport de la résistance à l'écrasement après 6 cycles mouillage/séchage alterné R_{msa} sur la résistance à la compression à sec R_{sec} ($C_{rh} = R_{msa}/R_{sec}$).

II.4 Synthèse

Ce chapitre décrit les différents outils utilisés pour caractériser les échantillons argileux et pour produire et caractériser les Blocs de Terre Comprimée (BTC).

La caractérisation échantillons argileux pour la construction en BTC peut être faite *in situ* sur le terrain par les tests de lavage de main, de la bouteille, du cigare ou de l'humidification. Dans notre étude, cette caractérisation s'est faite en laboratoire par la caractérisation minéralogique par diffraction des rayons X (DRX), la caractérisation chimique par fluorescence X, la détermination de la teneur en matières organiques par la perte au feu, le retrait de séchage, les limites de consistance par le test d'Atterberg, l'analyse granulométrique par tamisage et par diffraction laser et la nature des terres grâce au test au bleu de méthylène.

Une presse manuelle de type TERASTARAM a été utilisée pour produire des BTC de dimensions 29,5 x 14 x 9,5 cm (L x l x h). Ces BTC ont d'abord été caractérisés par retrait volumique de séchage en mesurant la variation de volume avant et après le séchage. Ensuite par la résistance à la compression et à l'abrasion. La première s'est faite par compression uniaxiale d'un bloc entier, suivant la surface de pose. La seconde s'est faite en brossant la surface du bloc à l'aide d'une brosse métallique et en mesurant la perte en poids. Enfin les BTC ont été caractérisés par capillarité en immergeant le bloc dans une fine couche d'eau de 5 mm et en mesurant la masse d'eau absorbée.

La caractérisation de BTC s'est faite également par un test de flexion 3 points, d'absorption d'eau par capillarité, d'immersion complète, de gel-dégel suivant les tests de Guerin (1985), de mouillage/séchage d'après le test ASTM (2013), d'égouttement accéléré, suivant le test de Weisz et al. (1995). Ces tests ont été faits sur des éprouvettes produites dans un moule 4 x 4 x 16 cm (l x h x L) et sur des éprouvettes 7 x 7 cm (L x l) produites à l'aide d'une presse hydraulique de type Max Voggenreiter mavo press LPP 150-500/100.

III. Résultats expérimentaux

III.1 Échantillonnage et propriétés des échantillons prélevés en Belgique

III.1.1 Introduction : les argiles belges, synthèse de la bibliographie

Nous utiliserons ici le mot « argile » pour désigner les formations ou membres géologiques composés principalement de fines particules (i.e., < 2 microns). Il existe beaucoup d'informations sur les argiles belges. Les principaux gisements argileux exploités en Belgique peuvent être groupés suivant l'ordre stratigraphique décrit ci-dessous.

a) Argiles du Quaternaire

Les principales formations argileuses quaternaires sont les argiles poldériennes, les limons, les argiles de la Campine et des plaines alluviales. Ces argiles sont toujours exploitées dans la plaine campinoise pour la briqueterie (Marechal et Tavernier, 1971 ; Jacobs et al, 2004).

a1) Argiles des polders et du Bas-Escaut

Elles représentent une couche déposée au cours des dernières invasions marines quaternaires (Jacobs et al. 2004, Fig. 34).

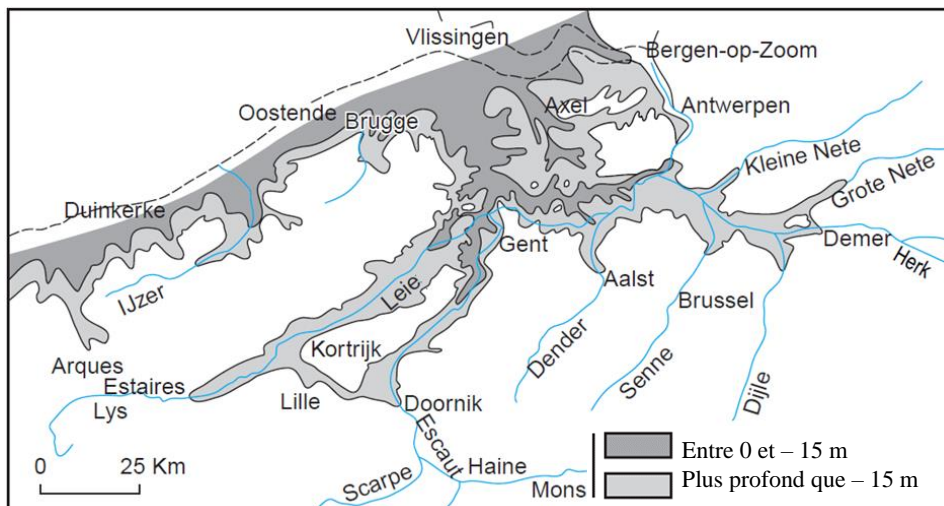


Fig. 34. Morphologie de la vallée flamande. Vue générale de la profondeur des dépôts quaternaires dans la vallée flamande (Jacobs et al. 2004).

L'argile de la plaine maritime s'étend sur une vingtaine de kilomètres à l'intérieur des terres. Elle est également présente dans le bas-Escaut en aval d'Anvers (Calembert, 1947 ; Gulinck, 1958). L'argile inférieure est grise, très compacte et plastique et renfermant souvent des concrétions calcaires (Tavernier et De Moor, 1974). Elle ne conviendrait pas pour la fabrication des briques et est par conséquent peu exploitée. L'argile supérieure située dans des polders anciens donne des briques d'excellente qualité (Tavernier et Gulinck, 1947).

Ces argiles ont largement été exploitées à Furnes, Nieuport, Ramskapelle, Dixmude, Ostende, Breedene, Westcapelle, pour la brique (Calembert, 1947 ; Tavernier et Gulinck, 1947).

Le polder côtier est une bande en cours de formation parallèle à la côte et d'environ 10 kilomètres de large. Il est un domaine essentiellement plat où l'altitude varie de 1 m à 4,5 m (Jacobs et al., 2004). Les argiles des polders sont des dépôts quaternaires qui s'étendent du Pléistocène Moyen à l'Holocène. Gullimp et de Moor (2001) subdivisent les dépôts marins et estuariens des polders en 3 unités stratigraphiques :

- Formation de Herzele déposée au Pléistocène Moyen, elle se compose de sables et d'argiles avec des intercalations de couches de tourbe.
- Formation d'Oostende se compose de sables tidaux et subtidaux émiens (Pléistocène supérieur).
- Formation de Flandre se compose de sables et argiles tidaux avec des horizons de tourbes post-glaciaires de l'Holocène. Il est subdivisé en Membres de Calais, Dunckerque, De Haan et De Panne.

Les argiles de l'Escaut appartiennent au Groupe de l'Escaut (Gullentops et al., 2001). Cette dernière est constituée des dépôts fluviatiles des bassins de l'Escaut et de l'Yser. Ces dépôts sont des dépôts de terrasse du Pléistocène inférieur au Pléistocène supérieur (Paepe et Vanhoorne, 1976 ; Gullentops et al., 2001). Le Groupe de l'Escaut regroupe tous les sédiments fluviatiles du bassin de l'Escaut jusqu'aux périodes tardiglaciaires : Formations de Rozebeke, Kruishoutem, Meulebeke, Melle, Adegem, Oostwinkel et de Eeklo (Bogemans, 2007). Ces formations sont constituées de graviers, dont de graviers de silex avec ou sans intercalations sableuses et argileuses, suivis des sédiments plus fins vers le sommet allant du sable à l'argile (Bogemans, 2007).

Les limons de crue de la vallée de l'Escaut entre Audenarde et Termonde sont exploités depuis longtemps pour la fabrication des briques (Tavernier et Gulinck, 1947).

a2) Les limons de couverture

Ils sont d'origine très diverses : fluviatile, de pente, glaciaire ou éolienne. La Moyenne Belgique et des régions de la Haute Belgique sont recouvertes d'un manteau continu ou de placages de limon d'origine essentiellement éolienne (Fig. 35). Le limon éolien typique (*loess*) est très carbonaté mais l'action des eaux pluviales l'a superficiellement transformé en un limon connu sous le nom de « terre à briques ». C'est à partir de ce limon lessivé que d'innombrables exploitations (environ 400) temporaires ont produit les « briques cuites de campagne ». Dans certaines régions, en particulier dans le sud de la Flandre Orientale, les limons de couverture peuvent être exploités sur plus de 10 mètres d'épaisseur (Calembert, 1947 ; Gulinck, 1958).

Parmi les limons d'origine alluviale, on classifie les alluvions des rivières. Les alluvions de l'Escaut, de la Lys, de la Basse-Meuse ont été jadis exploités (Tavernier et Gulinck, 1947).

Les caractéristiques de certains limons de couverture peuvent être obtenues dans les publications de Camerman (1939) et de Thorez et Bourguignon (1973).

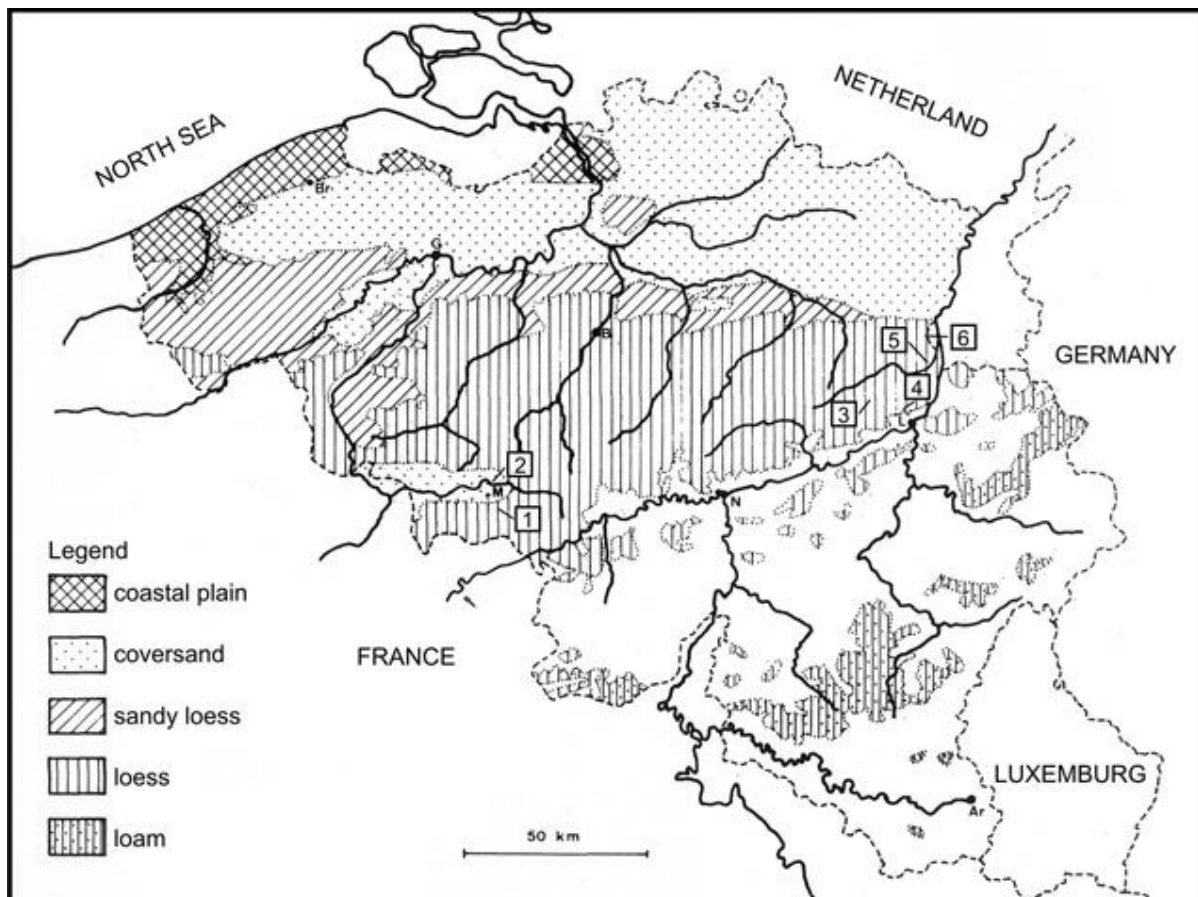


Fig. 35. Répartition des dépôts de couverture et localisation des principales localités types de la ceinture de loess. 1 : Harmignies ; 2 : canal de Maisières ; 3 : Remicourt ; 4 : Rocourt ; 5. Eben-Emael ; 6 : Kesselt et Veldwezelt (d'après Bogemans et al., 2017).

a3) Les argiles du Groupe de Campine

Elles sont un ensemble de dépôts d'estuaires de la Meuse, du Rhin et de l'Escaut du début du Quaternaire (Pléistocène inférieur). Il s'agit des formations constituées par des argiles et des sables fins compris entre les sédiments sableux et limoneux de l'Holocène, et les sables marins de Merksplas (Bogemans, 1997). Les argiles du Groupe de Campine peuvent atteindre une épaisseur de plus de quarante mètres (Bogemans, 1994, 1997, 1998).

Les argiles du Groupe de Campine sont délimitées à l'ouest par un escarpement de la rivière Escaut (*Scheldt*) et au sud par la micro-cuesta de Campine. La limite orientale est formée par les failles occidentales du Graben Central (Fig. 36). Elles se prolongent au Nord aux Pays-Bas, où elles correspondent aux Formations de Tegelen et de Kedichem.

Dans la classification lithostratigraphique belge, les argiles du Groupe de Campine sont comprises dans les Formations de Weelde et de Malle sous-jacente. La première est composée par les Membres de Turnhout, Beerse et Rijkevorsel. La seconde comprend les Membres de Vosselaar et de Brasschaat (Bogemans, 1997). Le Membre de Turnhout est constitué d'argile gris bleuâtre, avec à sa base une alternance d'argile et de couches de sable (De Weerd et al. 1998). Le Membre de Beerse est composé de sable périglaciaire et de tourbes (Dricot, 1962 ; Kasse, 1993). Le Membre Rijkevorsel sous-jacent est constitué d'argiles gris bleuâtres avec une fraction élevée d'argile (Kasse, 1988). Le Membre de Vosselaar est composé de sables fins et le Membre de Brasschaat sous-jacent comprend des sables gris fins et moyens. Les Membres

valorisés pour l'extraction des argiles au sein du Groupe de la Campine sont ceux de Turnhout et de Rijkevorsel (De Weerd et al. 1998).

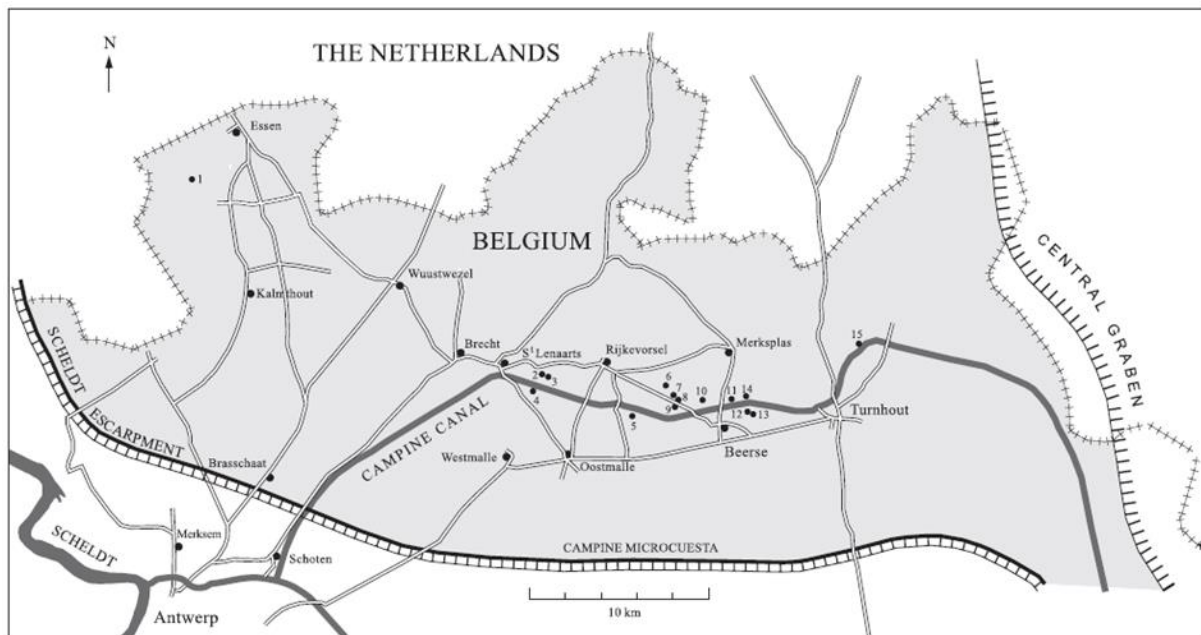


Fig. 36. Distribution des argiles de la Campine (Mostaert, 1993).

Les argiles du Groupe de Campine constituent un gisement important, exploité entre Westmalle et Turnhout, dans une région desservie par le canal de la Campine. Le gisement est irrégulier, constitué de lentilles d'argiles intercalées dans des dépôts plus sableux (Tavernier et Gulinck, 1947). Ces argiles conviennent pour la fabrication des briques mais aussi des tuiles et des poteries (Calembert, 1947). Une partie de l'argile extraite est utilisée dans les cimenteries de la région de Beerse et du Limbourg méridional. Les exploitations les plus importantes ont été à St-Lenaarts, Rijkevorsel, Vlimmeren, Merxplas, Beerse, Turnhout, Ravels, Esschen (Tavernier et Gulinck, 1947).

Pour plus d'information sur les propriétés des argiles du Groupe de Campine, on peut se référer à l'étude de De Weerd et al. (1998) qui ont caractérisé les Membres de Rijkevorsel et Turnhout dans la région entre Beerse, Rijkevorsel et Merksplas.

b) Argiles du Tertiaire

b1) Argiles d'Andenne et du Condroz

Les terres plastiques du Condroz datent du Miocène. Elles sont localisées dans les paléokarsts formés dans les carbonates du Givétien, du Frasnien, du Tournaisien et du Viséen. (Calembert, 1945 et 1947 ; Dosogne, 1942, 1943 et 1945 ; Thorez et Bourguignon, 1984 Nicaise et Dupuis, 1997 ; Dupuis et al. 1996) de la région comprise entre Andenne et Dave (Fig. 37). Ces poches de dissolution pouvant atteindre 100 mètres de profondeur représentent d'anciens lacs karstiques qui ont été colmatés au Miocène par les produits d'altération des shales environnants. Ces gisements sont très irréguliers, et composés de sables, argiles et lignites (Dupuis et al. 1996).

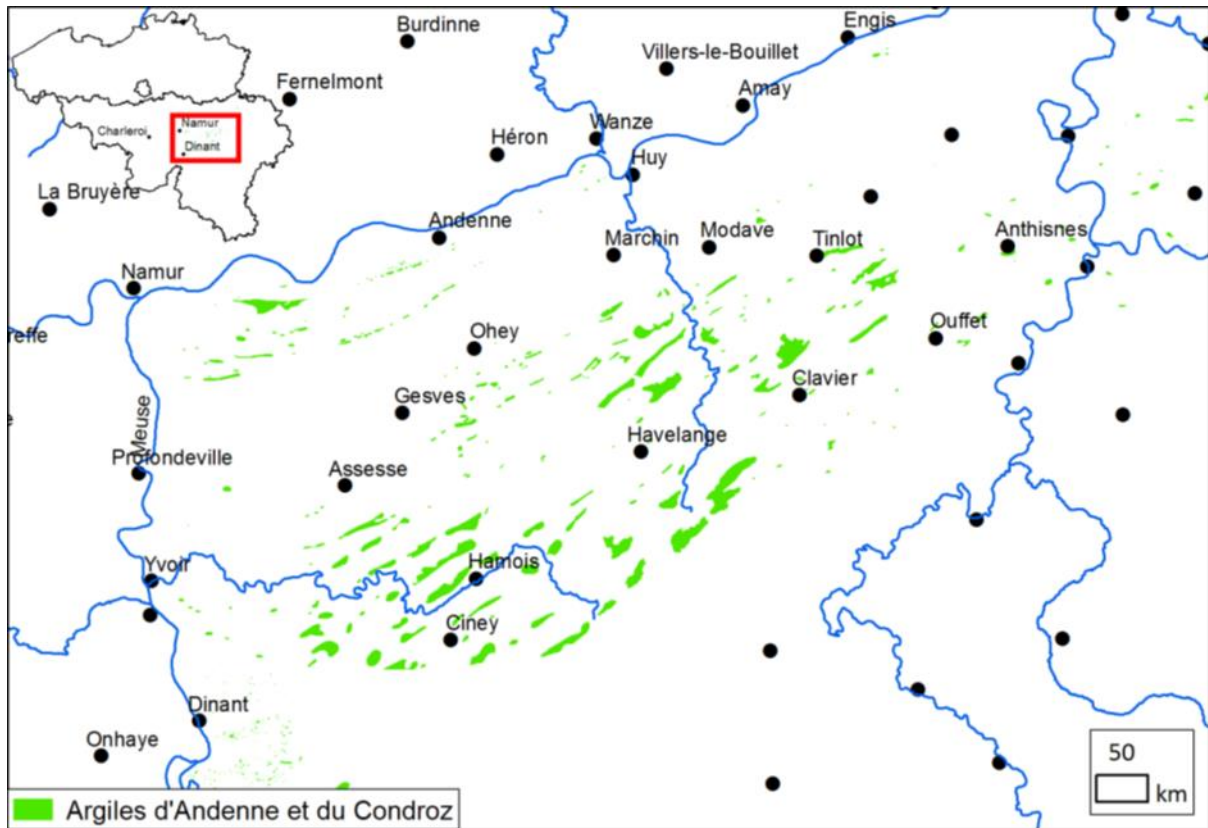


Fig. 37. Localisation des argiles d'Andenne et du Condruz (d'après Rekk, 2014).

Dans le Condruz, ils ont généralement été exploités par puits et galeries. Elles furent utilisées pour la fabrication de poteries, de la céramique et de produits réfractaires. L'activité extractive des terres plastiques du Condruz a débuté à la fin du Moyen âge, a connu son apogée au XIXème siècle et a cessé définitivement dans les années soixante (Pacyna et Denayer, 2010).

Les caractéristiques des argiles d'Andenne et du Condruz peuvent être obtenues dans les publications de Calembert (1945) et Thorez et Bourguignon (1973).

b2) Argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse

Les argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse occupent des poches de dissolution situées dans les bandes calcaires du Dinantien ou du Dévonien (Fig. 38). Les gisements de l'Entre-Sambre-et-Meuse (Hanzielle, Florennes, Silenriex, Matagne, Oret, Bioul, Biesme, Morialmé, Onhaye, Saint-Aubin, etc.) ont été exploités dans des carrières ouvertes, d'où l'on tirait des terres plastiques et des sables divers (sables kaolineux et sables meubles). Ces argiles présentent une grande valeur industrielle pour la fabrication de la poterie, des grès, de la céramique, de la faïencerie et des produits réfractaires destinés à la métallurgie et la verrerie. Leur hétérogénéité empêche cependant leur mise en valeur (Gulinck, 1958).

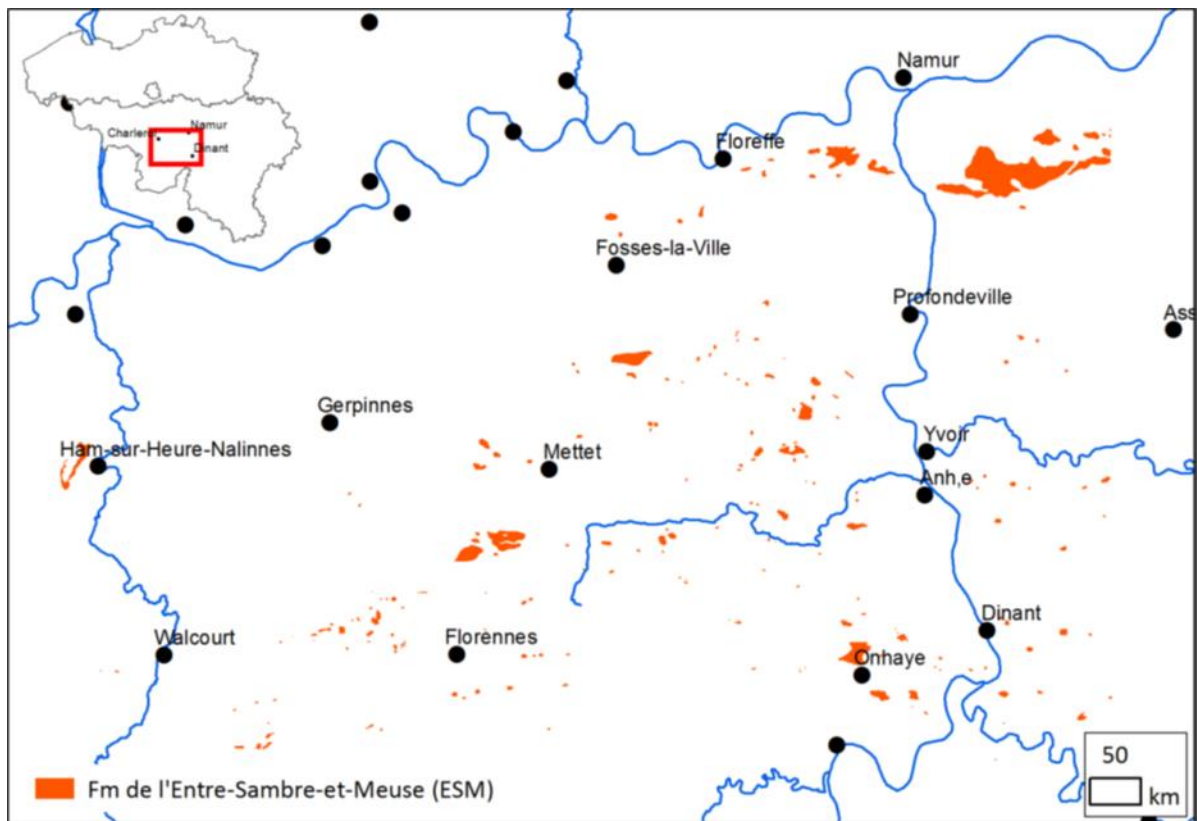


Fig. 38. Zones d'affleurement de la Formation de l'Entre-Sambre-et-Meuse (Rekk, 2014).

Quelques caractéristiques des argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse peuvent être obtenues dans l'étude de Marcoen et al. (2000).

b3) Argile de la Formation de Boom

L'argile de Boom appartient à la Formation géologique de Boom, du Groupe de Rupel. La Formation de Boom est considérée comme la seconde réserve d'argile encore disponible en Belgique (Wouters et Vandenberghe 1994).

L'argile de Boom constitue un dépôt détritico marin du Rupélien (Oligocène inférieur, 33,9 à 28,4 Ma). Elle se trouve principalement dans le bassin de Campine, et affleure le long de l'Escaut, du Rupel, de la Durme et dans la région d'Hasselt le long du Démer. Elle présente un pendage de 1° à 2° vers le N-NE et une épaisseur qui peut atteindre plus de 100 m (Van Simeays et Vandenberghe, 2006). La Fig. 39 illustre la distribution géographique de la Formation de Boom.

L'argile de Boom comprend une alternance de couches d'argiles silteuses et de couches plus argileuses (Vandenberghe et al., 1997, Wouters et Vandenberghe, 1994), ainsi qu'une variation de couleur suivant la nature lithologique des couches (De Craen et al., 1999). La division lithostratigraphique de l'Argile de Boom comprend quatre membres : le Membre de Belsele-Waas caractérisé par une granulométrie plus grossière et des couches plus épaisses ; le Membre de Terhagen, moins silteux, le Membre de Putte caractérisé par des couches riches en matière organique et le Membre de Boeretang plus silteux (Vandenberghe et al., 1997 ; Mertens et Wouters, 2003).

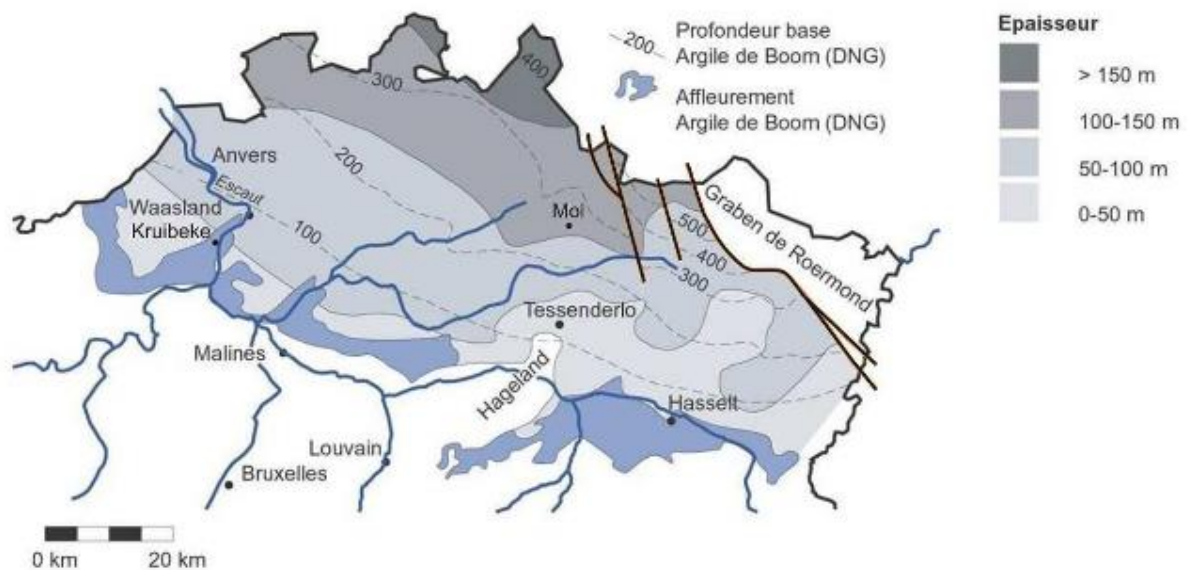


Fig. 39. Localisation de l'Argile de Boom. Affleurements présents le long du Rupel et au Nord de Tongres (d'après ONDRAF/NIRAS, 2001).

L'argile de Boom est exploitée depuis de longues années pour l'industrie des matériaux réfractaires (Decler et al., 1983 ; Decler et Viaene, 1993). Dans la région de Boom, il y a eu des nombreuses exploitations notamment à Terhaegen, Rumst, Hemixem, Wilrijk, Contich, Niel, Boom, Burght, Duffel, Lierre (Tavernier et Gulinck 1947).

Plusieurs études ont été réalisées sur les propriétés de l'Argile de Boom ces trente dernières années. Les propriétés de ces argiles peuvent être trouvées dans les publications de Gens (2012) et de Yu et al. (2012).

b4) Argiles de Hénis

Les argiles de Hénis sont des argiles verdâtres ou noirâtres d'origine marine déposées lors de la transgression de l'Oligocène. Cette argile est bien développée dans la région de Tongres et Bilzen où elle atteint une épaisseur de 8 m (Calembert et Gulinck, 1954).

Les argiles de Hénis appartiennent au Groupe de Tongres et à la Formation de Looz (Borgloon en néerlandais, Fig. 40). Elles comprennent une assise inférieure (Horizon de Neerrepén) et une assise supérieure (Vieux Joncs ou Oude Biezen). L'assise inférieure est composée d'une alternance de couches d'argile grise et verte, de couches d'argile lignitique noire, de couches de nodules calcaires et de cristaux de gypse, et de couches argileuses et sableuses. L'assise supérieure est formée de sable blanc jaunâtre, moyen à grossier, alternant avec 2 à 3 couches d'argile compacte gris blanc avec des couches d'argile noire (Laga, 1988).

Les argiles de Hénis ont été exploitées principalement dans la partie orientale du Limbourg pour des tuiles, céramiques grossières et briques à Bilzen, (tuilerie), à Tongres, Hénis (tuilerie) et Boutersem (Calembert et Gulinck, 1954).

b5) Argiles d'Assche

Les argiles d'Assche appartiennent à la Formation de Maldegem (Lutétien et Bartonien) et à la Formation de Zelzate (Groupe de Tongres, Fig. 40). Il s'agit d'argiles en alternance avec des sables d'origine deltaïques et intertidaux (Jacobs, 1995).

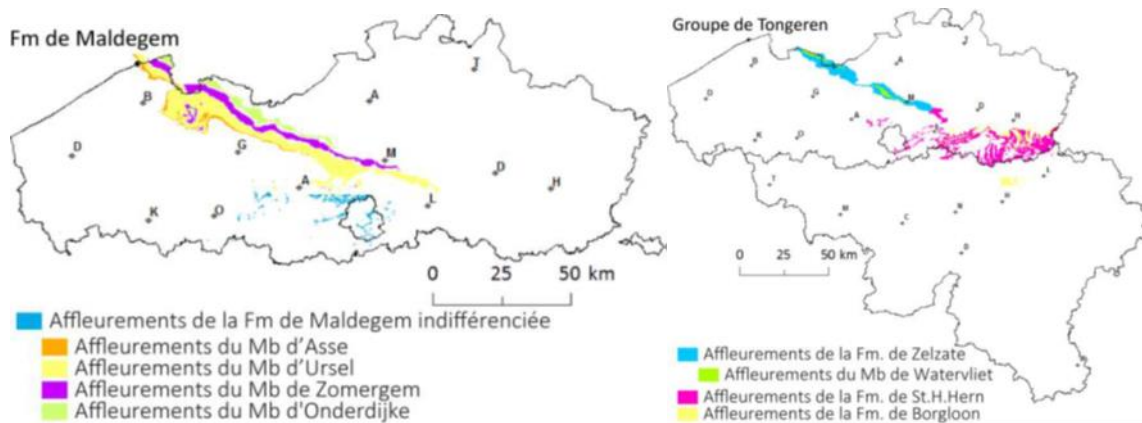


Fig. 40. Localisation des zones d'affleurement de la Formation de Maldegem (à gauche) et des zones d'affleurement du Groupe de Tongres (à droite – Rekk, 2014).

Les argiles d'Assche sont présentes dans la région comprise entre Eecloo et Gand. Elles ont été exploitées à Ursel, Knesselaere, Odelem, Balegem, Laken, Gijzenzele, Never-over-Heembeek, Hekelgem et Gand (Tavernier et Gulinck, 1954).

b6) Argiles du Groupe d'Ypres

Les argiles du Groupe d'Ypres se sont déposées lors de la transgression yprésienne qui inonda la Flandre, le Hainaut et le Brabant. Ces dépôts sont essentiellement marins et constitués à leur base de graviers auxquels succèdent des sables et des argiles plastiques. Il s'agit des Formations de Courtrai (Kortrijk en néerlandais), Mons-en-Pévèle, Tielt, Hyon et Gentbrugge (Vanneste et Henneberg, 2005, Steurbaut et al. 2016).

Les argiles du Groupe d'Ypres affleurent en Flandre, Brabant et Hainaut (Fig. 41). Elles sont la principale réserve d'argile encore exploitable en Belgique (Thorez et Monjoie, 1973 ; Maréchal et Laga, 1988 ; Maréchal, 1993 ; Dupuis et al. 1998 ; Steurbault 1998, Laga et al. 2001). Plusieurs briqueteries ont exploité ces argiles dans toute la partie méridionale de la Flandre Orientale et en quelques endroits du Hainaut et du Brabant pour la brique, la tuile, le drain, etc. (Taverier et Gulinck, 1954).

Des études sur les argiles du Groupe d'Ypres ont été menées ces dernières années. Van Marcke et Laenen (2005) ont fait un bilan des propriétés de ces argiles.

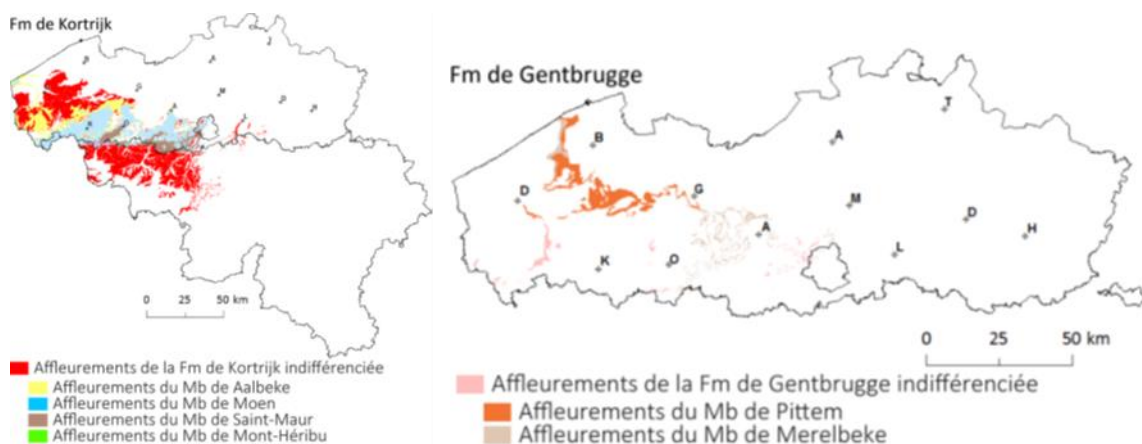


Fig. 41. Localisation des zones d'affleurement des Formations de Kortrijk et Gentbrugge (Rekk, 2014).

b7) Argiles du Groupe de Landen

Il s'agit des dépôts de la transgression thanétienne (Paléocène supérieur) formés de gravier, sable, argile sableuse et cailloutis (Hennebert et Doremus, 1995).

Les argiles du Groupe de Landen (Formations de Hannut et de Tienen, Fig. 42) ont été exploitées dans la région de Tirlemont (Wommersom, Hakendover), dans le Brabant méridional et le Hainaut pour la fabrication de briques (Taverier et Gulinck, 1954).

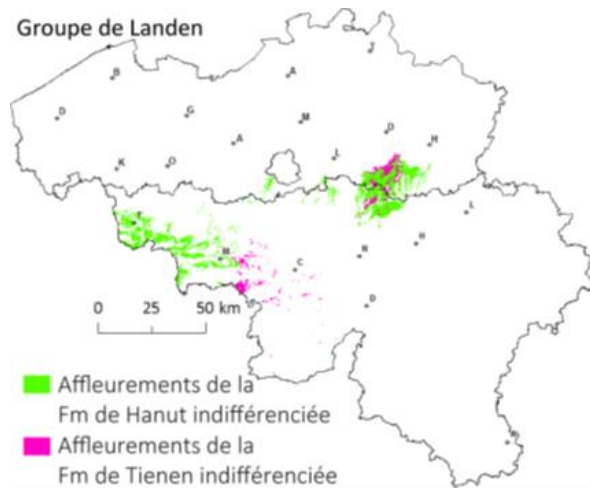


Fig. 42. Localisation des zones d'affleurement des Formations de Hannut et de Tienen (Rekk, 2014).

c) Argiles du Secondaire

c1) Argiles de Herve

Les argiles de Herve constituent un dépôt marin continental accumulé dans le Pays de Herve lors de la transgression crétacée de l'Albien au Maestrichtien (Marlière, 1954, Fig. 43). Il s'agit des argiles de la Formation de Vaals, encore parfois nommée « Smectite de Herve » (Barchy et Marion, 2000). La Formation de Vaals a une composition très hétérogène. Elle débute par un niveau graveleux suivi par une argile glauconifère décalcifiée ou par un niveau de sable vert, ensuite par une masse d'argiles carbonatées, gris bleu à verdâtre glauconifère, et au sommet une siltite sableuse grise, glauconifère. Son épaisseur varie de quelques mètres à plus de 30 mètres (Thorez et Monjoie, 1973 ; Barchy et Marion, 2000).

La smectite de Herve a été exploitée à Herve, Petit-Rechain, Hallembaye, Loën. Elle a été utilisée dans l'industrie textile, comme liant pour l'agglomération du poussier de houille, comme apport argileux dans les cimenteries et comme couche imperméable dans certaines décharges (Barchy et Marion, 2000). La minéralogie de l'argile de Herve comprend des contenus variables en minéraux argileux (smectite, illite) et des passées plus glauconieuses (Marcoen et al., 2000).

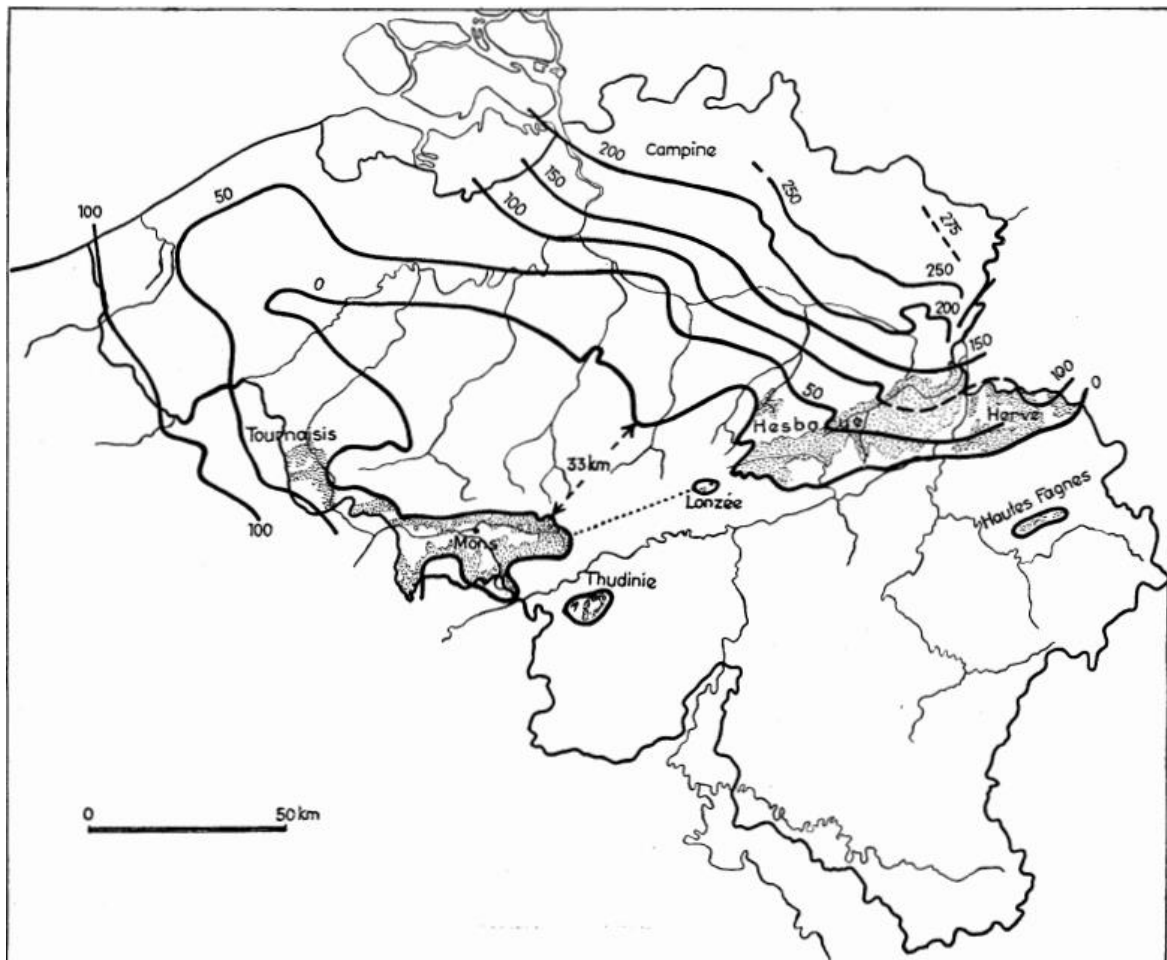


Fig. 43. Distribution géographique des dépôts marins crétacés en Belgique et lignes isopaques. Les pointillées représentent les principales zones d'affleurement (d'après Legrand, 1952, in Marlière, 1954).

c2) Argiles d'Aix-la-Chapelle

Il s'agit des dépôts marins continentaux accumulés dans le Pays de Herve (Fig. 43) lors de la transgression crétacée de l'Albien au Maestrichtien, et faisant partie de la Formation d'Aachen. L'origine du nom de ces argiles provient de la région d'Aix-la-Chapelle, en Allemagne, où leur épaisseur est la plus grande (> 100 m) (Laloux et al., 1996). La Formation d'Aachen est constituée de sables jaunes et blancs à niveaux argileux d'une épaisseur comprise entre 5 et 15 m et qui peut atteindre 20 à 30 m vers l'est (Barchy et Marion, 2000).

Les argiles d'Aix-la-Chapelle ont été exploitées dans la région du nord d'Eupen, et dans la partie orientale du pays de Herve (Raeren, Hergenrath, Moresnet, Herbesthal) en briqueterie (Vandenbergh, 1983). Sa minéralogie est constituée d'argiles silto-sableuses riches en smectite et kaolinite, et des sables silteux et argileux de quelques dizaines de mètres d'épaisseur (Spagna et al. 2006).

c3) Argiles du Groupe du Hainaut

Les argiles du Groupe du Hainaut sont comprises dans un ensemble de dépôts sédimentaires accumulés dans le bassin de Mons (Fig. 43, Marlière, 1954). Ces derniers résultent probablement de l'érosion des manteaux d'altération du Massif du Brabant et des shales namuriens du nord du Hainaut durant les transgressions marines du Crétacé (Albien et Cénomaniens) (Yans et al. 2002). Elles affleurent principalement le long du bord nord du Bassin de Mons sur une quarantaine de kilomètres entre Hautrage et Thieu (Marlière, 1934 ; Druart 1997 ; Yans et al. 2002). Elles sont également piégées dans des karsts de l'entre Sambre et Meuse et le Synclitorium de Namur (Legrand 1968 ; Vergari et Quinif, 1997).

Dans la classification lithostratigraphique actuelle, les argiles du Groupe du Hainaut sont décrites comme étant des argiles noires ou grises de décalcification, plastiques, avec ou sans lignite, d'intercalations sableuses et des cailloutis, avec parfois des débris de végétaux et de sable dolomitique brun (Hennebert, 1999 ; Marcoen et al., 2000).

Il s'agit d'argile riche en kaolinite, illite, smectite et interstratifiés chlorite-smectite. Ces argiles offrent comme particularité de présenter une plasticité élevée, d'où le nom de « terres plastiques du Hainaut ».

Elles ont été valorisées depuis le Moyen-âge pour la fabrication de poteries, de céramique, dans l'industrie du ciment blanc et des matériaux réfractaires du fait de leur haute teneur en alumine (Spagna et al. 2006). Elles ont été exploitées dans de nombreuses petites carrières à ciel ouvert et par puits temporaires dans le Hainaut autour de Saint-Ghislain (Villerot, Hautrage, Sirault, Baudour), au nord de Mons (Saint-Denis) et à La Louvière (La Louvière sud, Saint-Vaast – Pacyna et Denayer, 2010).

c4) Argiles d'Ethie et d'Arlon

Les argiles d'Ethie sont situées dans un ensemble de dépôts sédimentaires qui résultent des périodes de transgression et de régression successives d'est en ouest qui ont marqué le jurassique de la Lorraine belge (Boulvain, 2016, Fig. 44).

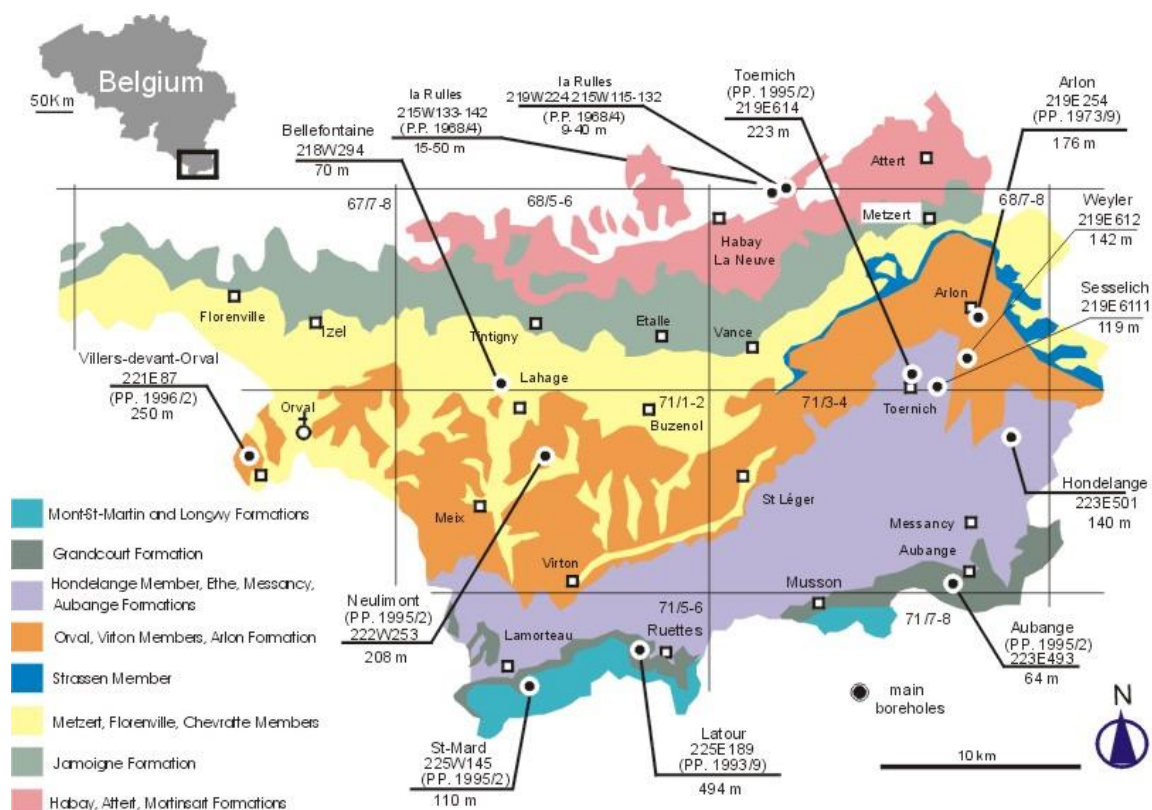


Fig. 44. Localisation des Formations d’Ethe et d’Arlon sur la carte géologique simplifiée de la Lorraine belge et des principaux sondages (Boulvain et al. 2000).

La nature argilo-silteuse des argiles d’Ethe caractérise un net approfondissement du bassin (Boulvain, 2016). Les argiles d’Ethe appartiennent à la Formation d’Ethe. Cette dernière est constituée des argilites, des argilites silteuses très finement micacées et de l’argile carbonatée ou marne (Boulvain et al. 2000).

La Formation d’Arlon est principalement constituée de marne, de marne sableuse et de grès calcaire argileux en proportion variable (Boulvain et al. 2000). Elle comprend les Membres du Trité (TRT), de Strassen (STR), de la Posterie (POS) et de Hondelange (HON). Les Membres de Strassen et de la Posterie sont constitués d’argilite carbonatée grise. Le Membre de Hondelange est représenté par des alternances de grès calcaire bleu charbonneux et d’argile à argile sableuse grise (Dumont, 1842 ; Dormal, 1894).

Les argiles de la Formation d’Ethe et d’Arlon ont servi à la fabrication de tuiles, de drains, de briques et pour amender les sols (Calembert, 1947 ; Belanger et al. 2002).

d) Les argiles liées aux paléaltérations

Il s’agit principalement des argiles provenant de l’altération in situ des massifs schisto-gréseux et des argiles piégées dans les paléokarsts résultant de la dissolution d’un substrat carbonaté (Calembert, 1946). Outre les argiles continentales d’Andenne et du Condroz, et du Sillon Sambre-et-Meuse, il existe d’autres argiles provenant de l’altération (Tableau 11).

Système	Sous-système	Série	Argiles	Age de l’altération
Carbonifère	Silésien (Houiller)	Stephanien	Altération du Houiller	
		Westphalien		
		Namurien		

	Dinantien	Viséen Tournaisien	ESM, Andenne et Condroz		Néogène
Dévonien	Supérieur	Framennien	Morialmé		Paléocène
			Wanlin		
		Frasnien	Strée		
	Moyen	Givétien	ESM, Andenne et Condroz		Paleogène Néogène
		Eifélien			
	Inférieur	Emsien	Kaolin		
		Praquien			
Lochkovien		Andenne		Tertiaire ou Crétacé inf.	
Silurien					
Ordovicien					
Cambrien		Rocroi		Permien au Paléogène inf.	

Tableau 11. Position stratigraphique des principales argiles liées aux paléo-altérations. ESM = Entre Sambre-et-Meuse (Calembert, 1946 ; Spagna, Russo, 1991 ; Nicaise et Dupuis 1997 ; Ertus, 1998 *In* Spagna et al. 2006).

d1) L'altération des massifs schisto-gréseux

Une dizaine de briqueteries ont exploité des produits d'altération de shales de natures diverses (namurien, famennien, frasnien, virtonien). Ceux-ci peuvent être recouverts de limon éolien ou avoir été mélangés avec ceux-ci (Spagna et al. 2006).

Les shales houillers s'altèrent en argile plastique. Ces argiles ont été exploitées à Montegnée, à Amay, à Wierde, à Hergenrath, à Flönnes, etc. pour la céramique ou la briqueterie (Firket 1874). Dans la région de Morialmé on a exploité un regolithe argilisé d'âge anté-éocène développé sur les grès famenniens de la Formation de Ciney (Boulvain et Marion, 1994). Dans la région de Wanlin, on a extrait pour la confection des briques des roches argilisées formées aux dépens des pélites et grès du Frasnien et du Famennien (Gullentops, 1952 ; Seret, 1957 ; Paepe, 1969 ; Spagna et al. 2006). Dans la région de strée on a exploité une argile résiduelle verte pour la brique (argile de Strée, Groupe de Marbaix-la-Tour – Delcambre et Pingot, 2000).

d2) Les kaolins

Ce sont des argiles obtenues par lavage des produits d'altération des shales et arkoses. Ils sont présents dans les massifs de Rocroi et Stavelot (Voisin 1995) et sur les hauts plateaux de l'Ardenne (Jérome, 1907 ; Dupuis et al. 1997, Demoulin et al. 2017, Fig. 45).

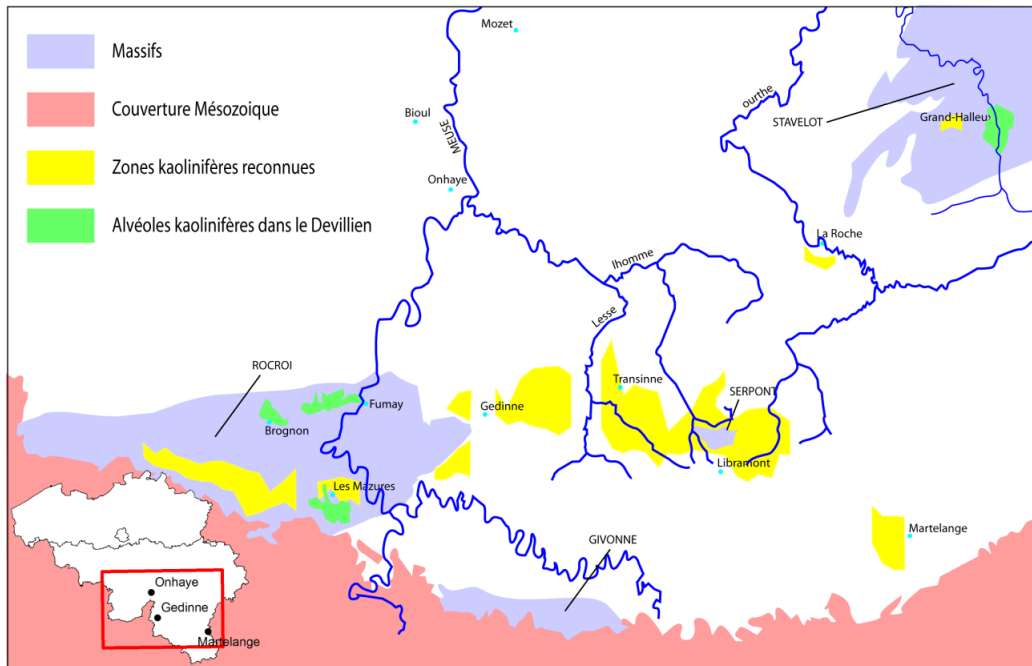


Fig. 45. Répartition des gisements des kaolins (Rekk, 2014).

Il s'agit d'un kaolin pauvre car il contient parfois 30 % de séricite (mica), 60% de kaolinite, ainsi que du quartz et d'illite (Gulinck, 1958).

Il a été utilisé depuis le début du 20e siècle pour les papeteries, la porcelaine, les savons, dans la fabrication de ciment blanc, de céramiques et faïences, comme matière de charge et produit colorant (Asselberghs, 1920 ; Remacle, 2003). Les gisements exploités aujourd'hui sont situés dans la région de Libin-Transinne. Plusieurs gisements de kaolin ardennais sont abandonnés par manque de rentabilité (Yans et al, 2003).

Le Tableau 12 résume les principaux gisements argileux exploités en Belgique dans l'ordre stratigraphique.

Ère	Système	Série	Étage	Argile		Formation		Membre	Âge (Ma)
				Polder	Læss	Flandre	Gent		
Cénozoïque	Quaternaire	Holocène		Polder	Læss	Flandre	Gent		0,0117
			Supérieur			Herzele	Gembloux Veldwezelt		
			Moyen						0,781
		Pléistocène	Calabrien	Escaut		Escaut (Groupe)			1,806
			Gélasien	Campine	Weelde		Turnhout		
							Beerse		
							Rijkevorsel		
					Malle		Vosselaar		
					Braasschaat	2,588			
	Néogène	Pliocène	Plaisancien	Andenne et Condroz, Entre Sambre-et-Meuse	Entre Sambre-et-Meuse			3,6	
								5,333	
			Miocène		Messinien		7,246		
Tortonien						11,62			
Serravallien						13,82			

Tableau 12. Stratigraphie des principales formations argileuses belges. Les argiles liées aux paléoaltérations des massifs schisto-gréseux ne sont pas repris.

Mésozoïque	Paléogène		Serravallien				13,82	
			Langhien				15,97	
			Burdigalien				20,44	
			Aquitaniens				23,03	
		Oligocène	Chattien					28,1
			Rupélien	Boom	Boom	Putte Terhagen Belsele-Waas		33,9
		Éocène	Priabonien	Hénis	Looz (Borgloon)	Hénis		38,0
			Bartonien	Assche	Zelzate			41,3
			Lutétien		Maldegem			47,8
			Yprésien	Ypres	Gentbrugge	Vlierzele		56,0
						Pittem		
						Merelbeke		
						Kwatrecht		
		Hyon			Mont-Panisel Egem			
		Tielt			Egemkapel Kortemark			
	Kortrijk			Aalbeke				
				Roubaix				
				Orchies				
				Mont-Héribu Het Zoute				
	Paléocène	Thanétien	Landen	Tienen Hannut			59,2	
		Sélandien					61,6	
		Danien					66,0	
	Crétacé	Supérieur	Maastrichtien				72,1	
			Campanien	Herve	Vaals		83,6	
			Santonien	Aix-la-Chapelle	Aachen		86,3	
			Coniacien				89,8	
			Turonien	Wéaldien	Hainaut		93,9	
			Cénomaniens				100,5	
		Inférieur	Albien					113,0
			Aptien					125,0
			Barrémien					129,4
			Hauteriviens					132,9
			Valanginiens					139,8
Berriasien							145,0	
Jurassique			Supérieur	Tithonien				152,1
				Kimméridgien				157,3
		Oxfordien					163,5	
		Moyen	Callovien					166,1
			Bathonien					168,3
			Bajociens					170,3
	Aaléniens						174,1	
	Inférieur	Toarciens					182,7	
		Pliensbachien	Ethe + Arlon	Ethe + Arlon			190,8	
		Sinémuriens	Arlon	Arlon			199,3	
Hettangiens						201,3		

Tableau 12 (suite). Stratigraphie des principales formations argileuses belges. Les argiles liées aux paléoaltérations des massifs schisto-gréseux ne sont pas repris.

III.1.2 Argiles échantillonnées en Belgique

L'objectif de l'échantillonnage était d'évaluer l'aptitude des argiles belges à la confection des blocs de terre comprimée. Les 56 sites échantillonnés correspondent à des sites répertoriés comme en activité ou potentiellement exploitables, ainsi que des sites ayant été exploités par le passé. Seuls quelques sites sont des zones d'affleurement non exploités. Les données sur ces sites sont principalement extraites de l'« *Inventaire des ressources du sous-sol et perspectives des besoins à termes* » réalisé par Poty (2010) et communiquées par le SPW-DGO4 Jambes, le 17/05/2016. D'autres données proviennent de la Fédération Belge de la Brique et de l'analyse des cartes géologiques. Les noms des lieux d'échantillonnage correspondent aux noms des communes. Ils sont repris dans l'ordre stratigraphique des dépôts.

III.1.3 Résumé des caractéristiques minéralogiques et géotechniques des argiles belges

La réalisation des terrains en Belgique a consisté en des missions de prospection des gisements d'argiles et le prélèvement d'échantillons représentatifs. Le critère d'échantillonnage était basé sur la variabilité des matériaux et la représentativité des faciès. L'exploration et la description des affleurements ont été faites en utilisant les méthodes classiques de prospection (sondages à la tarière manuelle, prélèvement sur front de taille). Un total de 19 formations et membres argileux et 56 sites ont été échantillonnés (Fig. 76) pour 135 échantillons prélevés.

La caractérisation des échantillons s'est basée sur des études minéralogiques (minéralogie totale et minéralogie des argiles par DRX) et des analyses géotechniques (matière organique, bleu de méthylène, limites d'Atterberg, granulométrie et retrait de séchage). Ces analyses ont permis la sélection des argiles pour concevoir des briques de terre crue. Des Blocs de Terre Comprimée ont été confectionnés et leurs propriétés de résistance en compression et à l'abrasion ont été analysées, ainsi que leur absorption d'eau. Le Tableau 68 résume les propriétés des formations et membres échantillonnés.

Texte manquant

Contactez l'auteur

mangoarsene@gmail.com

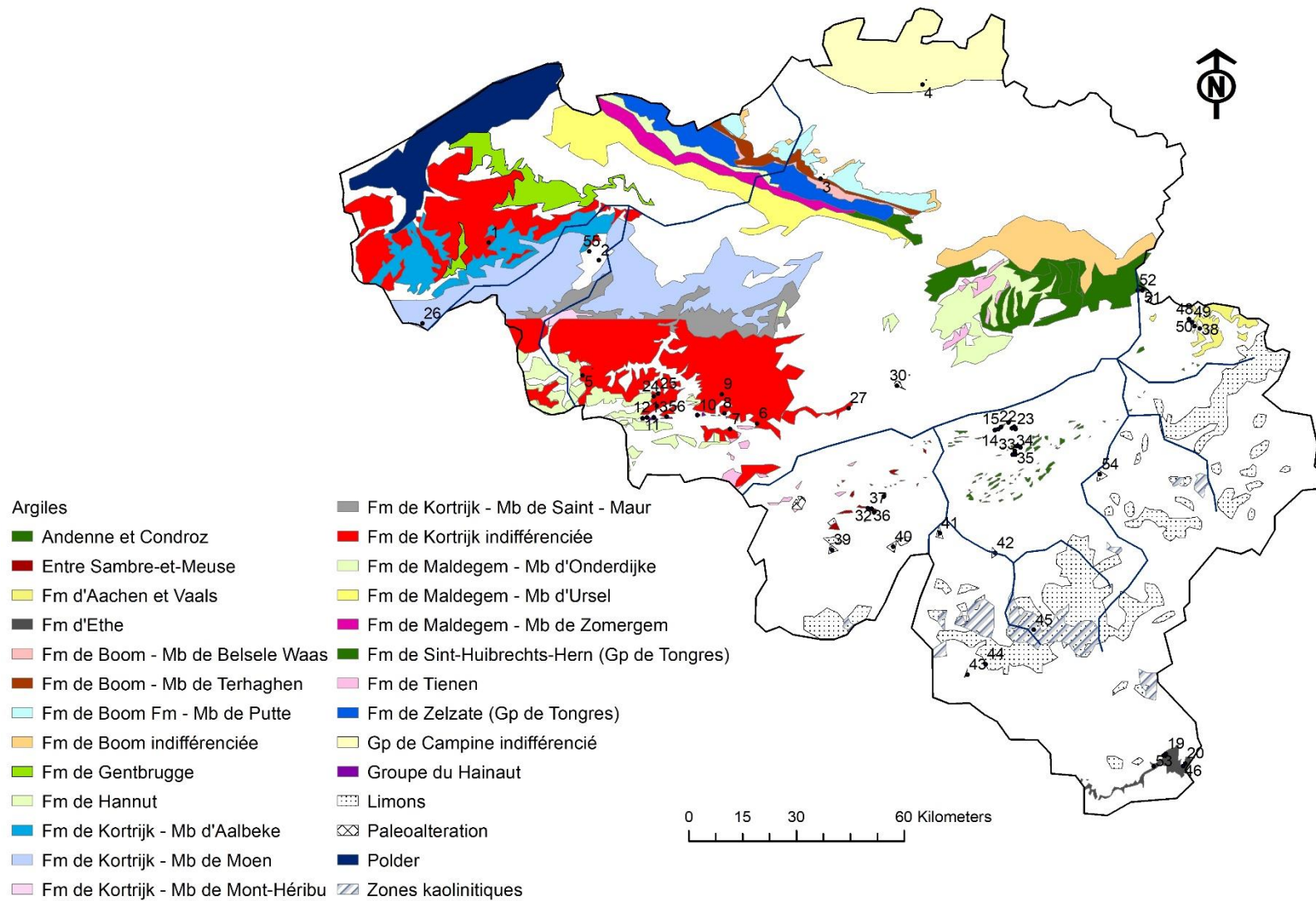


Fig. 76. Localisation des sites échantillonnés sur la carte des formations argileuses belges (modifié d'après Albon, 2009 ; Rekk, 2014 ; Bogemans et al. 2017).

Toutes les terres naturelles ne sont pas adaptées à la technique de construction en BTC.

D'après Rigassi (1995), une terre recommandée pour la fabrication des BTC sans stabilisant contient 0 à 40% de gravier ; 25 à 80% de sable, 10 à 25% de limon et 8 à 30% d'argiles (Fig. 77). Cependant, des terres qui ne s'inscrivent pas dans la zone recommandée peuvent donner de bons résultats, en fonction des stabilisants utilisés. Cette zone sert de guide à l'utilisateur et non de spécification rigide (Rigassi, 1995). La granulométrie n'est donc pas un critère de sélection restrictif.

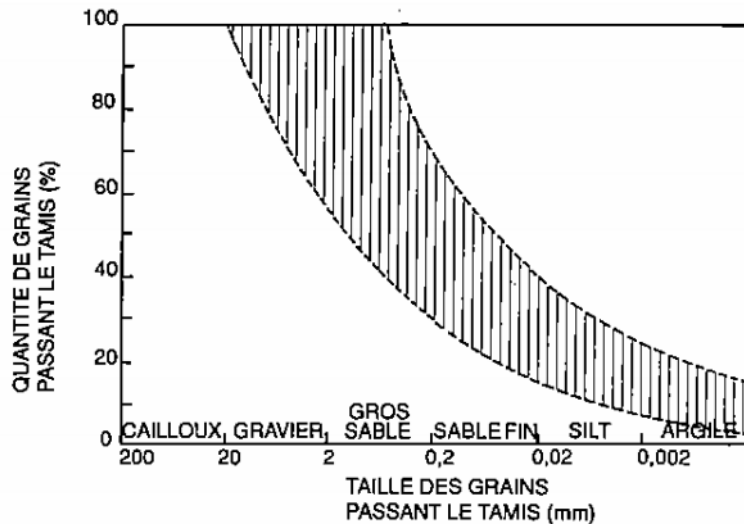


Fig. 77. Domaine granulométrique conseillé par Rigassi (1995) pour construire en BTC.

Pour la fabrication des BTC, Guérin (1985) et AFNOR (2001) recommandent un indice de plasticité compris entre 3 et 28 ; une limite de liquidité comprise entre 25 et 50 et une limite de plasticité comprise entre 10 et 25 (Fig. 78). Sur base des limites d'Atterberg, une majorité des échantillons analysés (soit 111 échantillons) entrent dans ce fuseau.

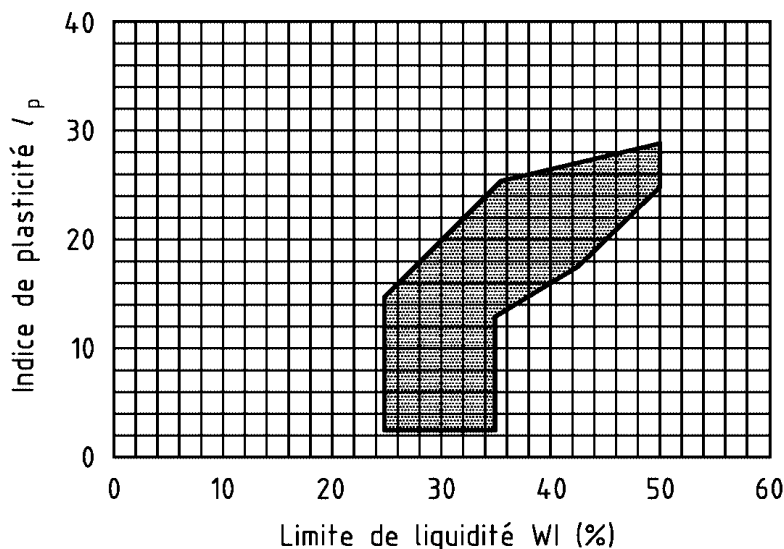


Fig. 78. Fuseau du diagramme de plasticité des terres (AFNOR, 2001).

La teneur en matière organique (estimée par la valeur de la perte au feu) ne doit pas dépasser les 2% (Rigassi, 1995). Sur base de ce critère la plupart de nos échantillons seraient à exclure. Cependant ce paramètre n'est pas retenu comme critère de sélection. En effet la teneur en matière organique varie fortement au sein d'un même profil.

Seules les dimensions des blocs à l'état sec intéressent les bâtisseurs, ainsi que le retrait à partir de la mise en œuvre qui est de l'ordre de 1 à 3% pour le BTC. Le retrait pendant le séchage n'est pas important dans le cas des BTC, puisqu'il est possible de produire des BTC avec des terres à fort retrait sans risque de fissuration (Moevus et al. 2012). La valeur de retrait n'est donc pas un critère de sélection restrictif. Cependant la terre à fort retrait de séchage est susceptible d'avoir des fortes variations dimensionnelles au cours du temps si elle n'est pas stabilisée. Les terres à fort retrait de séchage contiennent généralement une forte teneur en argile (Moevus et al. 2012).

Sur base des résultats obtenus les formations et membres échantillonnés peuvent être classés en 3 catégories (Tableau 69) :

- formations/membres pouvant être utilisés tels quels pour faire des BTC (catégorie A) ;
- formations/membres qui conviennent à la fabrication des BTC mais exigeant une modification préalable par addition de particules grossières comme du sable ou du gravier (catégorie B) ;
- formations/membres qui conviennent à la fabrication des BTC s'ils sont mélangés à d'autres terres pour leur donner une meilleure consistance, et éventuellement des particules grossières (sable, gravier) (catégorie C).

Catégories	Formations	Description
A	Argile de la Campine (Formation de Weelde, Membre de Turnhout) Argile liée à l'altération des shales famenniens	Matériau acceptable, bonne distribution de la taille des particules et bonne consistance.
B	Argile du Groupe de l'Escaut Argile de la Campine (Formation de Weelde, Membre de Rijkevorsel) Argile d'Andenne et Condroz Argile de l'Entre Sambre-et-Meuse Argile de la Formation de Boom (Membre de Putte) Argile du Groupe d'Ypres (Formation de Tielt) Argile du Groupe d'Ypres (Formation de Kortrijk) Argile du Groupe d'Ypres (Formation de Carnières) Argile du Groupe de Landen (Formation de Hannut) Argile de Herve (Formation de Vaals) Argile de la Formation d'Aachen Argile du Groupe du Hainaut Argile de la Formation d'Ethe	Matériau acceptable mais contenant trop de particules fines, nécessitent l'ajout de particules grossières (sable, gravier).
C	Limons Argile liée à altérations des shales et grès dévoniens Argile liée à l'altération des shales ordoviciens Kaolin ardennais	Matériaux avec une consistance faible. Ils nécessitent d'être mélangés avec d'autres matériaux (argiles, sables, graviers) pour être utilisés dans la production de BTC.

Tableau 69. Classification des formations argileuses.

Les matériaux de 5 sites ont été choisis pour la fabrication des BTC. Ces matériaux ont été choisis sur base de leur diversité (i.e., appartenance aux 3 catégories - Tableau 69). Environ 300 kg de matériaux ont été prélevés dans chacun des 5 sites.

1. L'argile liée aux paléoaltérations des shales ordoviciens à Gembloux.

L'argile échantillonnée provient de l'altération des shales ordoviciens, probablement de la Formation de Rigenée qui se compose de shales et siltites noirs à gris-bleu avec des niveaux gréseux. Il s'agit d'une argile gris-bleuâtre, contenant des résidus de shales. Cette argile est surmontée d'une couverture limoneuse (Fig. 80). L'épaisseur de l'altération est d'une dizaine de mètres.



Fig. 79. Argilière de Grand-Manil à Gembloux.

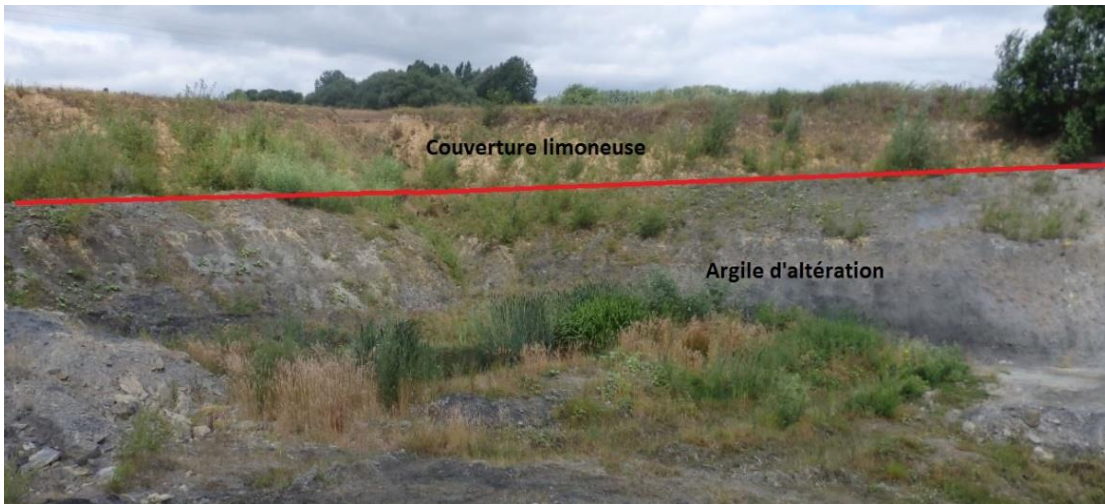


Fig. 80. Section à travers la carrière de Grand-Manil à Gembloux.

2. L'argile de la Formation de Boom (Membre de Putte) à Rumst



Fig. 81. Vue sur l'argilière Wienerberger à Rumst.

La division lithostratigraphique de la carrière comprend les Formations d'Eigenbilzen (sable) et de Boom (argile, Fig. 82). Cette dernière est représentée par les Membres de Putte et de

Terhagen. Le premier est composé d'argile noire et grise. Il comprend une couche supérieure plus argileuse d'une épaisseur d'environ 3 mètres et une couche inférieure plus silteuse d'environ 6 mètres d'épaisseur. Le second est formé d'argile gris pâle pauvre en carbonates et possède une épaisseur d'environ 15 mètres. Il comprend une couche supérieure plus argileuse. L'argile échantillonnée provient du Membre de Putte et de la couche supérieure.

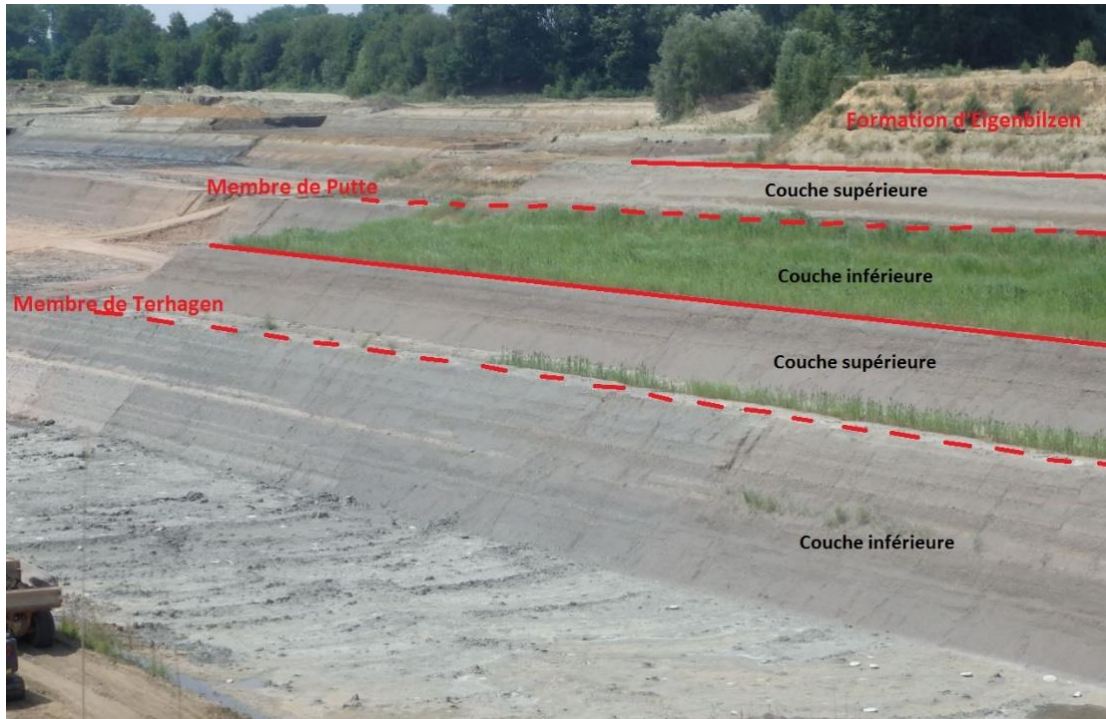


Fig. 82. Subdivision lithostratigraphique de l'argilière Wienerberger à Rumst.

3. Argiles du Groupe de Campine (Membre de Turnhout) à Beerse

L'échantillon prélevé provient de la Formation de Weelde et du Membre de Turnhout. Il s'agit d'une argile sableuse gris bleuâtre (Fig. 84).



Fig. 83. Vue sur le site d'extraction de Beerse.



Fig. 84. Vue sur l'argile du Membre de Turnhout.

4. L'argile du Groupe d'Ypres (Formation de Kortrijk, Membre d'Orchies) à Tournai

Elle a été échantillonnée dans l'argilière de Barry, située à hauteur de la briqueterie de Ploegsteert (Fig. 85). Active depuis 2014, la briqueterie exploite les argiles du Membre d'Orchies (Formation de Courtrai). Ce dernier comprend, sur une épaisseur de 20 à 30 mètres, une argile plastique gris bleuâtre à bleue à la base et une argile plus sableuse au sommet (Fig. 86). L'argile sableuse échantillonnée provient de la couche supérieure.



Fig. 85. Vue sur l'argilière de Barry



Fig. 86. Section à travers l'argilière de Barry montrant les différentes couches argileuses.

5. L'argile d'altération des shales dévoniens à Libin (kaolin ardennais)

L'échantillon a été prélevé dans la carrière de Libin. La carrière active depuis 2004 contient des niveaux de kaolin blanc et coloré (Fig. 87) sur environ 30 mètres d'épaisseur (Nicolas, 2017).



Fig. 87. Vue sur la carrière de kaolin de Libin.

Le Tableau 70 résume les propriétés des 5 argiles sélectionnées. Les diffractogrammes de ces échantillons sont présentés à la Fig. 88.

Texte manquant
Contactez l'auteur
mangoarsene@gmail.com

III.2 Échantillonnage et propriétés des échantillons prélevés en R.D.Congo

III.2.1 Description de la région d'étude

La région d'étude est située à l'ouest de la RDC. Elle comprend la province du Kongo Central et celle de Kinshasa (Fig. 89). D'une superficie de 53.920 km² soit 2,3% de la superficie du territoire national, la province du Kongo central a une population estimée à près de 5 millions d'habitants. Avec une superficie de 9.965 km², la ville province de Kinshasa occupe environ 0,4% de la superficie du pays. Sa population est estimée à 13 millions d'habitants.



Fig. 89. Carte de localisation des zones d'échantillonnage : 1. Kwilu Ngongo ; 2. Mbanza Ngungu ; 3. Nkamba ; 4. Kasangulu ; 5. Lukala.

a) Géologie régionale

La région est située dans la **ceinture de l'Ouest Congo** aussi appelée super-groupe de l'Ouest Congo. Cette dernière s'est mise en place à l'orogénèse panafricaine¹. Le Super-groupe Ouest Congo comprend 3 groupes néoprotérozoïques : le Zadinien, le Mayumbien et l'Ouest-Congolien, (Tack, 2001). L'ensemble repose sur un sous-sol polymétamorphique (Super-groupe Kimezien) daté d'environ 2,1 Ga et entrecoupé d'intrusions granitiques hyperalcalines (Noqui) post-panafricaines. Il s'étend sur environ 1400 km, parallèlement à la côte Atlantique, du sud-ouest du Gabon au nord-ouest de l'Angola (Figs 90 et 91).

¹ L'orogénèse panafricaine correspond à un événement tectonique dû à la collision entre le craton de Sao Francisco, ancien craton situé dans la partie est de l'Amérique australe, et celui du Congo. Cette collision s'est produite du Néoprotérozoïque au début du Paléozoïque, avant l'ouverture de l'Océan Atlantique (Pedro, 2012). À l'ouest de l'Afrique, elle est à l'origine de la ceinture Ouest Congo, et au Brésil, elle a causé la formation de la ceinture Araçuaí (Pedrosa-Soares et al., 2001 ; Frimmel et al., 2006).

- Le **Groupe Zadinien** comprend la Formation de Palabala (quartzites, schistes à biotite avec quelques conglomérats), suivie des roches siliciclastiques continentales et métasédimentaires. Les métasédiments sont recouverts par une épaisse succession de roches volcaniques mafiques (métabasaltes de Gangila) (Hoffman, 1999 ; Frimmel et al., 2006).

- Le **Groupe Mayumbien** comprend des roches volcaniques felsiques, des roches volcano-sédimentaires et des intercalations sédimentaires recoupées par endroits de divers granitoïdes cogénétiques de composition monzogranitique à syénogranitique et de granites alcalins feldspathiques. L'âge de la mise en place ces granitoïdes est d'environ 920 Ma (Tack, 2001).

- Le **Groupe de l'Ouest-congolien** comprend de la base vers le haut 6 Formations :

- Le **Sous-groupe du Sansikwa** correspond à une succession siliciclastique, associée à des conglomérats, suivie d'argilites, de quartzarénites et d'arkoses. Ce dernier est recouvert par une diamictite (Lepersonne, 193).

- La **Formation de la Tillite inférieure** se compose de diamictite associée à un épisode de coulée de laves basaltiques en coussin (De Paepe et al., 1975).

- Le **Sous-groupe du Haut Shiloango** est une succession variée de conglomérats, d'argilites, de calc-pélites, quartzarénites, calcarénites (Kampunzu et al., 1991).

- La **Formation de la Tillite supérieure** est une diamictite (Frimmel et al., 2006).

- Le **Sous-groupe Schisto-Calcaire** correspond à une séquence de carbonate de rampe et de plate-forme d'une épaisseur de 1200 mètres. Il comprend 4 unités qui sont de la base vers le sommet :

- L'Unité de Kwilu (CI) possède une épaisseur de ± 600 m d'épaisseur. Elle est subdivisée en trois formations : C1 ou Formation des Dolomies Roses : 0 à 15 m de carbonates rosés ou gris, avec une alternance de dolomite et de fins lits de schiste violacés au sommet ; C2 ou Formation de Bulu : ± 400 m de calcaire généralement argileux et sableux, de calcpélites, de pélites argileuses ou sableuses et C3 ou Formation de Luanza : ± 200 m de calcaires oolithiques (Tack, 2001 ; Delpomdor et al. 2016).

- L'Unité de Lukunga (CII) ou Formation C4, constituée de ± 300 m de dépôts plus clastiques à la base, d'une alternance de schistes, de calcpélites ou de grès marqués d'ondulations. La sédimentation a évolué vers des calcaires argileux ou dolomitiques, de calcaires stromatolitiques ou oolithiques, et se termine par des dépôts de schistes, calcpélites, grès calcaires contenant des lits ou nodules de cherts (Alvarez et al., 1995 ; Tack, 2001 ; Delpomdor et al. 2016).

- L'Unité de Bangu (CIII) ou Formation C5, d'une épaisseur de ± 265 m, est caractérisée par une succession de carbonates, avec des oolites, cherts, schistes et calcpélites. La présence de matière organique suggère un épisode régressif. Les lithologies indiquent une sédimentation dans des conditions lagunaires (Tack, 2001 ; Delpomdor et al. 2016).

- L'Unité de Ngandu (CIV). En RDC, l'unité de Ngandu possède 90 m d'épaisseur et contient, de la base au sommet (1) des calcaires argileux gris clair à grisâtres, parfois dolomitiques, avec une brèche lenticulaire et des niveaux de cherts foncé, (2) des lits de calcaire rougeâtres à rosâtres et des intercalations de calcaire argileux rouge, (3) une argilite gris-verdâtre avec des cherts, et (4) des calcaires argileux rougeâtres avec des très minces couches de calcaires argileux verdâtres et calcaires rosâtres, évoluant vers des argiles sableuses rougeâtres et des quartzites feldspathiques à grains fins (Delpomdor et al. 2016).

- Le **Sous-groupe du Mpioka** correspond à une succession siliciclastique avec des conglomérats de quartzarénite, d'arkoses, et d'argilites. Elle est interprétée comme un dépôt de molasse fin-orogénique (Tack et al., 2001 ; Frimmel et al., 2006). Sa succession comprend : (1)

une séquence inférieure de siltstones et schistes avec alternance de grès carbonatés, des lits de quartzite feldspathique et de conglomérat (Formation de Vampa) ou de grès et schistes carbonatés, psammites, quartzites feldspathiques avec des lits de conglomérats (Formations de Gidinga et Luvemba), et (2) une séquence de quartzites feldspathiques et de siltites et occasionnellement de schistes et de conglomérats (Formations de Kubuzi et de Liansama) (Tack, 2001 ; Delpomdor et al. 2016).

Le **Sous-groupe/Groupe de l'Inkisi** sus-jacent est interprété comme une molasse tardi-panafricaine déposée dans un bassin d'avant-pays (Nicolini, 1959 ; Alvares et al., 1995). Auparavant considéré comme faisant partie du Groupe Ouest Congo, il a été suggéré qu'il n'aurait rien à voir avec l'orogénèse panafricaine et serait d'âge paléozoïque (Frimmel et al., 2006). Pour cette raison, certains auteurs le considèrent comme une unité lithostratigraphique individuelle. Il correspondrait à un édifice fluvio-deltaïque mis en place dans un bassin en extension découpé par une importante série de faille NE-SO héritées du Panafricain (Alvarez et Maurin, 1991 ; Alvarez et al. 1995). Il comprend du bas vers le haut des arkoses à micas blancs et des lits à galets de grès, d'argilites, de psammites, et de quartz ; des grès siliceux fins, feldspathiques et micacés avec localement des intercalations d'argilites (Cosson, 1955 ; Alvares et al., 1995). Le Sous-groupe de l'Inkisi s'étend à l'Ouest de Brazzaville, à Kinshasa, dans le bassin du Bas-Congo, et jusqu'au nord de l'Angola. Il a une épaisseur de 600 à 1000m (Cosson, 1955 ; Alvarez et al., 1995). Il est recouvert par les dépôts du Karoo¹ d'âge permien en Angola et du Post Karoo en République Démocratique du Congo.

Le **Super-groupe Post Karoo** est caractérisé par des roches gréseuses et carbonatées (Lanfranchi et Schwartz, 1990), déposées lors de la transgression du Crétacé inférieur à l'Eocène supérieur. La transgression marine du sud vers le nord a fait suite à la dislocation du Gondwana à la fin du Jurassique (Alvarez et al.1995). Cette transgression a donné lieu à des dépôts lacustres ou alluviaux (série du Kwango). La série débute par des grès marneux jurassiques, d'une dizaine de mètre d'épaisseur surmontés des grès tendres à sables quartzeux : Formation des Grès tendres du Crétacé. On y observe également un niveau conglomératique à galets de grès et une brèche englobant des cherts (Boissezon et Gras, 1970).

Les dépôts du Cénozoïque sont constitués des grès polymorphes formés de sables éoliens et de lentilles calcaires ou argileuses, souvent cimentés par la silice (**série de Kalahari inférieur**). Ils témoignent d'une période d'aridification. Ils sont surmontés par la série des sables ocres du Néogène, appelés sables Batéké (**série de Kalahari supérieur**). Ces derniers font suite à la fin de l'aridification et au début d'un régime de mousson (Giresse et al., 1990). L'Holocène se caractérise par des dépôts d'alluvions formés principalement de graviers surmontés de limon (Giresse et al., 1982).

¹ Karoo : événement géologique défini en Afrique du sud qui va du Carbonifère supérieur au Jurassique inférieur, marqué par l'existence du Gondwana (Delvaux, 2001).

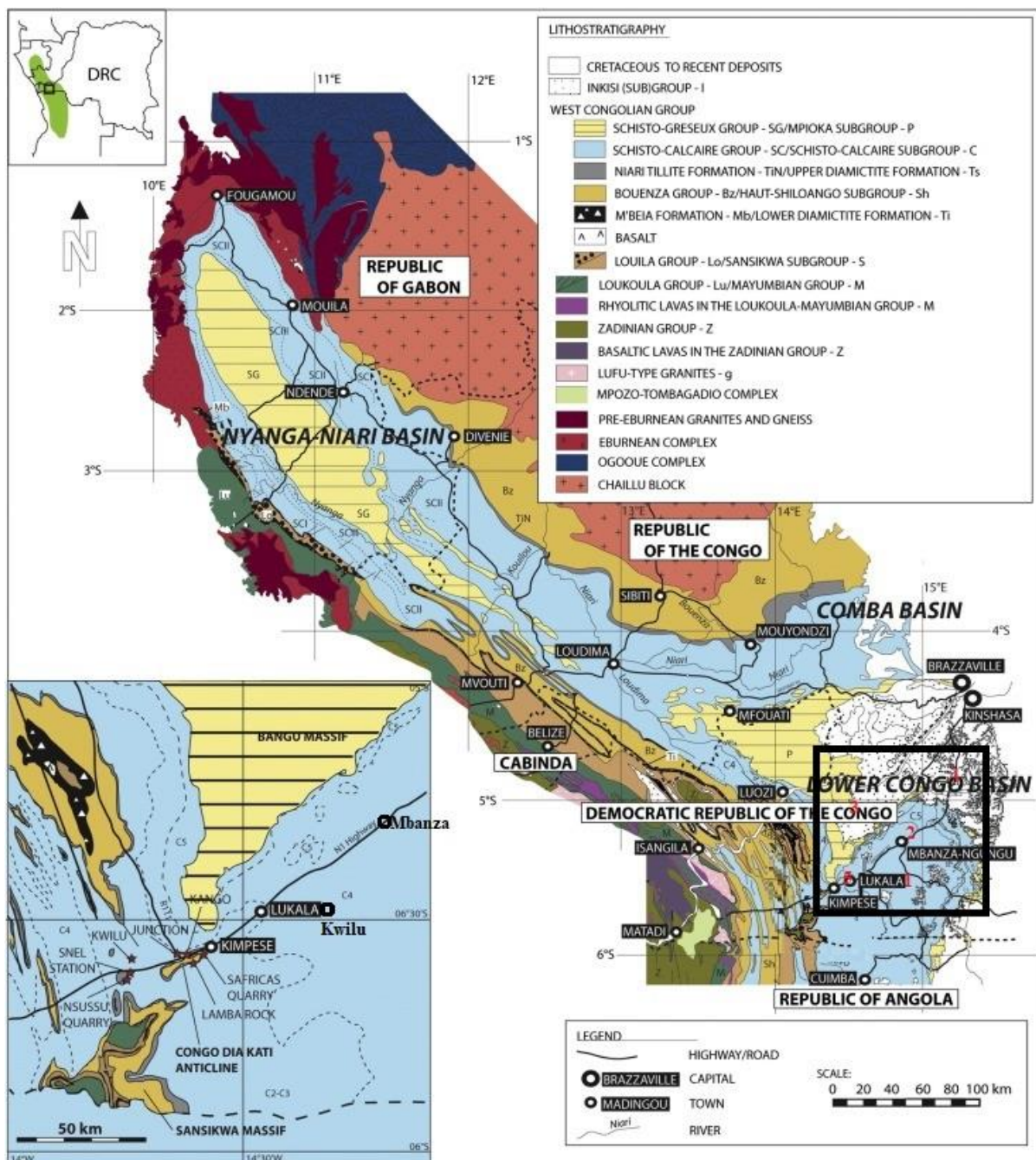


Fig. 90. Carte géologique de la ceinture de l'Ouest Congo montrant les sites d'échantillonnage. 1. Kwilu Ngongo ; 2. Mbanza Ngungu ; 3. Nkamba ; 4. Kasangulu ; 5. Lukala (modifié d'après Delpomdor et al. 2016, modifié d'après Lepersonne 1973).

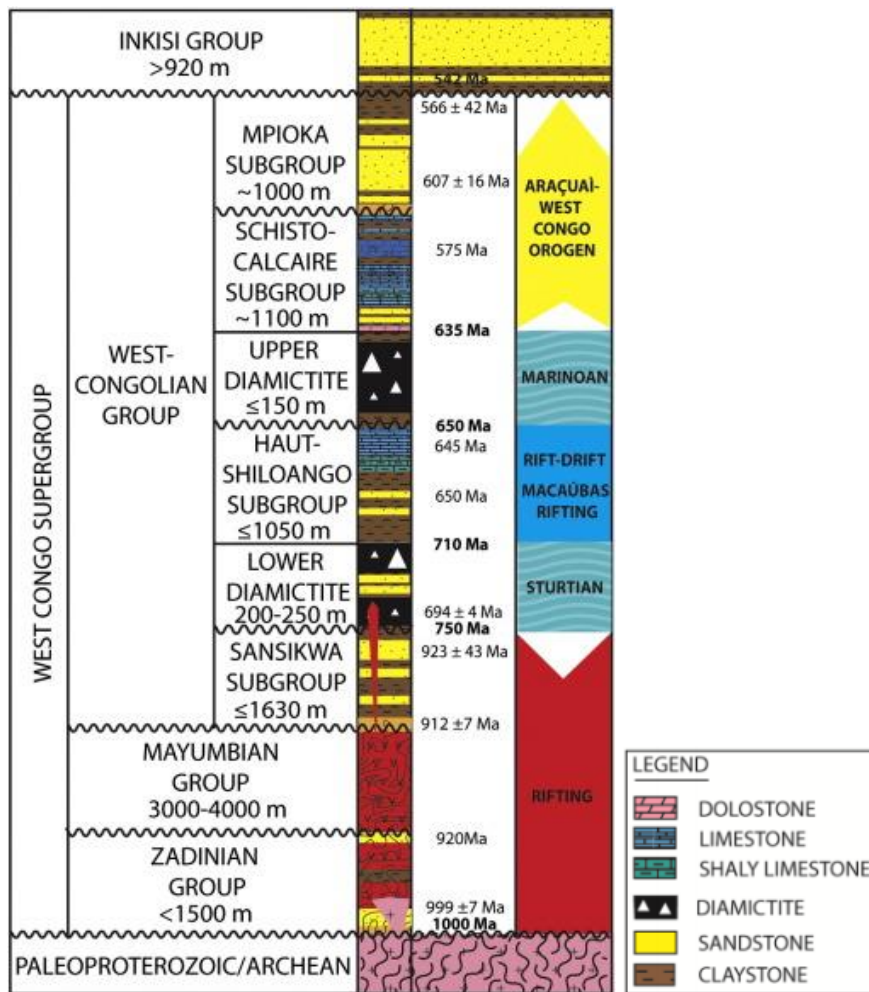


Fig. 91. Subdivision lithostratigraphique du Super Groupe de l’Ouest-Congo dans le Bas-Congo et événements orogéniques (Delpomdor et al. 2016, modifiée d’après Tack et al., 2001).

b) Sols

Les sols du Kongo Central sont essentiellement issus de l’altération des Sous-groupe Schisto-Calcaire, Mpioka et Inkisi. Les roches du Sous-groupe Schisto-Calcaire fournissent des sols argileux jaunes. Les roches gréseuses et mésozoïques des Sous-groupe Mpioka et Inkisi donnent des sols sablo-argileux jaunes ou brun clair (Baeyens, 1934 ; Goedert, 1938).

Les sols de Kinshasa sont de type tropical, développés sous l’action d’un climat chaud et humide. Ils sont généralement pauvres chimiquement et leur acidité est prononcée. Ils comprennent une teneur en argile généralement < 20 % et en certains endroits, ils sont argilo-sableux (Egoroff, 1955).

III.2.2 Sites étudiés

a) Kwilu Ngongo

Du 19 au 24 août et du 18 au 29 septembre 2017 un séjour a été effectué dans la région de Kwilu Ngongo, dans la province du Kongo Central, à l’ouest de la Rép. Dém. du Congo (Fig. 89). Ce séjour s’inscrivait dans un projet plus large qui visait à valoriser les gisements argileux de la région du Kongo Central (R.D.Congo) et à améliorer les matériaux de construction à base de terre. Ce séjour visait un double objectif :

(1) **Contribuer à la connaissance des terres de la région de Kwilu Ngongo** : en décembre 2016, s'est installée à l'est de la cité de Kwilu Ngongo une briqueterie (la Briqueterie de Kwilu Ngongo). Cette dernière extrait de la terre de la région pour ses briques. Il a donc été question de caractériser ces terres en vue de promouvoir leur meilleure utilisation. Pour ce faire, des travaux de prospection et de cartographie ont été menés dans la concession et aux alentours. Un total de 20 échantillons a été prélevé. Ces derniers ont été caractérisés en laboratoire en termes de leur potentiel d'utilisation.

(2) **Mettre en place une formulation de matériaux en terre crue** : la briqueterie voudrait diversifier ses produits en proposant une brique crue pour les populations locales. Il a donc été question de réfléchir sur un produit capable de satisfaire à cette demande. Nous avons décidé d'utiliser des résidus de canne à sucre, largement disponibles, et de les ajouter à la terre comme stabilisant. Ces résidus sont de deux types :

- La bagasse de canne à sucre résulte du broyage de la canne à sucre lors de l'extraction du jus (Fig. 92). Cette bagasse provient de la sucrière de Kwilu Ngongo, située 300 mètres à l'ouest de la briqueterie.



Fig. 92. Tas de bagasse.

- La cendre de bagasse est un résidu obtenu après la combustion de la bagasse de canne à sucre séchée. Pour cuire les briques, la briqueterie utilise la bagasse comme combustible. Cette bagasse n'est pas totalement consommée, et, à la sortie du four, elle fournit une cendre siliceuse (Fig. 93). Cette cendre peut être utilisée comme pouzzolane¹ favorisant la durabilité et la résistance de la terre.

¹ - Les pouzzolanes sont des matériaux n'ayant aucune capacité propre de liant mais pouvant réagir avec de la chaux hydratée Ca(OH)_2 en présence d'eau à température ambiante afin de former des composants du ciment. Ce pouvoir est appelé « activité pouzzolanique ».



Fig. 93. Cendre de bagasse à la sortie du four.

Ces résidus de canne à sucre sont ajoutés à la terre pour faire des Blocs de Terre Comprimée (BTC) qui sont caractérisés par les propriétés mécanique (résistance à la compression) et hygrothermique (essais de durabilité). Les essais de durabilité ont consisté à évaluer les aptitudes du matériau à résister à l'action de l'eau. Ils se font par l'essai de vieillissement.

Les terres de la région de Kwilu Ngongo sont des terres résiduelles formées par altération *in situ* des roches du Sous-groupe Schisto calcaire. Il est difficile de déterminer avec précision la nature des roches mères à l'origine des différentes terres ainsi que leur succession et répartition litho-stratigraphique étant donné la rareté des affleurements dans la région. Dans la région de Kwilu Ngongo, le Sous-groupe Schisto calcaire est représenté par l'Unité de Lukunga (CII) ou Formation C4. Cette dernière est constituée pour l'essentiel de roches calcaires avec des couches de grès ou grès argileux, de calcaire argileux souvent dolomitique, d'argilites et de calcaires gréseux.

L'altération des horizons calcaires et argilo-calcaires donne une terre jaune, avec ou sans résidus de graviers et blocs calcaires selon le degré d'altération (Fig. 94A). L'altération des niveaux gréseux donne une terre mauve pâle violacée (Fig. 94B). L'altération des horizons gréseux argilo-calcaires et calcaires gréseux donne une terre rougeâtre ou jaunâtre à taches rouges avec ou sans graviers de grès et de calcaire selon le degré d'altération (Fig. 94C et 94D). Dans la région de Kwilu Ngongo, on observe essentiellement les terres jaunes avec ou sans résidus de graviers ou blocs de calcaire sur les sommets des crêtes, et la terre à taches rouges dans les dépressions. Ces dernières constituent l'essentiel des terres présentes dans la concession de la briqueterie de Kwilu Ngongo.

Afin de comparer les terres présentes dans la concession de la briqueterie, et les terres présentes sur les collines avoisinantes, des observations et échantillonnages ont été effectués dans la cité de Kwilu Ngongo (voir ci-dessous).

Le gisement exploré est une concession que la sucrière de Kwilu Ngongo a cédée à la briqueterie de Kwilu Ngongo. Il s'agit pour l'essentiel de champs de canne à sucre encore en culture ou abandonnés. Sur le plan géomorphologique, la concession est caractérisée par un relief fait de crêtes (altitude maximale 380 mètres) et de dépressions (altitude minimale de 355 mètres, Fig. 95). Cette géomorphologie est observée dans les différentes parcelles de canne à sucre de la région de Kwilu Ngongo. La concession de Kwilu Brique est délimitée à l'ouest par la rivière Kwilu et traversée d'ouest à l'Est par la rivière Ngongo, affluent du Kwilu.



Fig. 94. A – Aspect des résidus d’altération du calcaire argileux. B – Terre mauve pâle violacé. Il s’agirait d’un produit d’altération d’un calcaire argileux rougeâtre avec des lits d’argilites. C – Aspect de la roche mère. Il s’agit de blocs de grès dans une matrice argilo- calcaire. D – Aspect de la terre. Il s’agit de la terre en majorité présente dans la concession. L’altération de la matrice argilo-calcaire donne cette couleur blanchâtre. L’altération des blocs de grès rouge donne cette couleur rougeâtre.



Fig. 95. Photographie montrant l’allure générale des parcelles de canne à sucre.

La cartographie du sol et du sous-sol a été faite sur base de puits et de zones d’extractions présents dans la zone d’étude et sur base des observations de terrain. Les figures 96 et 97 représentent la carte du sous-sol de la concession de la Briqueterie de Kwilu Ngongo ainsi que les coupes géologiques à travers la concession.

Afin de comprendre l’origine et les propriétés des matériaux de la concession de Kwilu Brique, 10 échantillons ont été prélevés dans la concession au niveau de 4 sites (A, B, C et I) et 8 en dehors dans 5 sites (D, E, F, G et H, Fig. 96) et caractérisés.

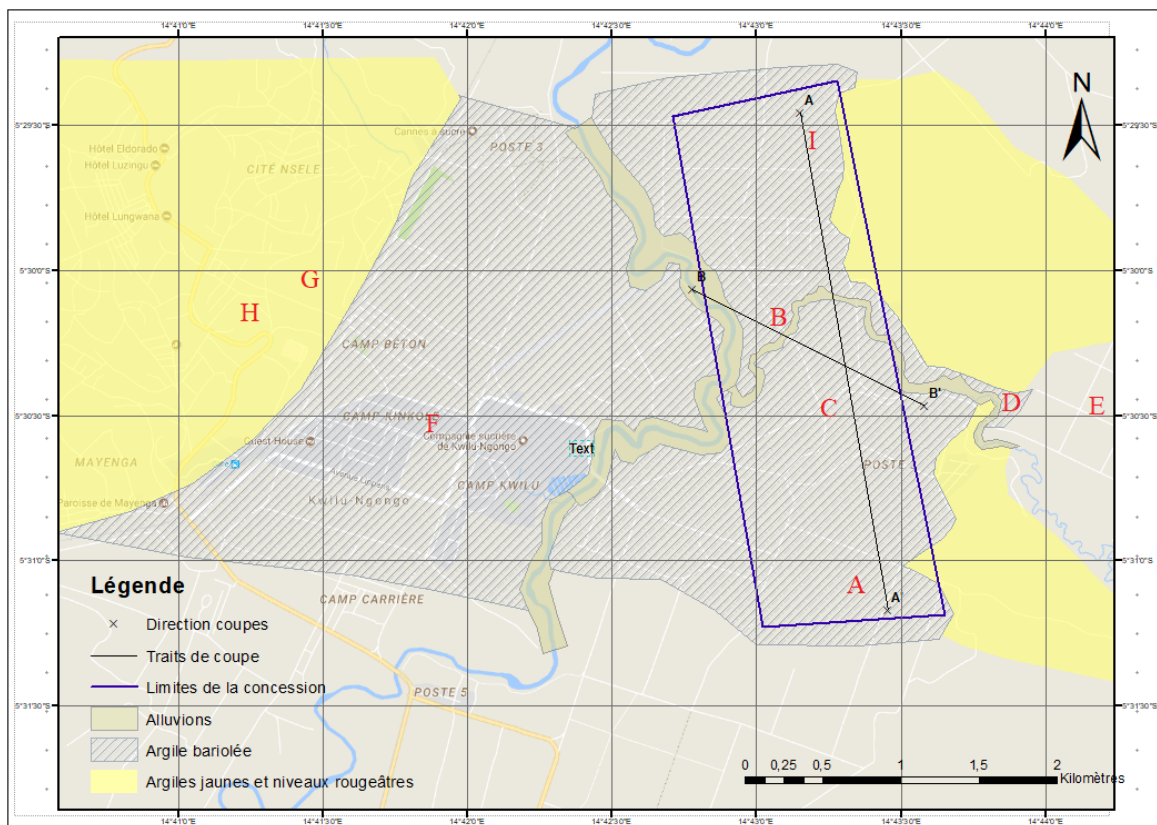


Fig. 96. Carte de couverture de la région de Kwilu Ngongo.

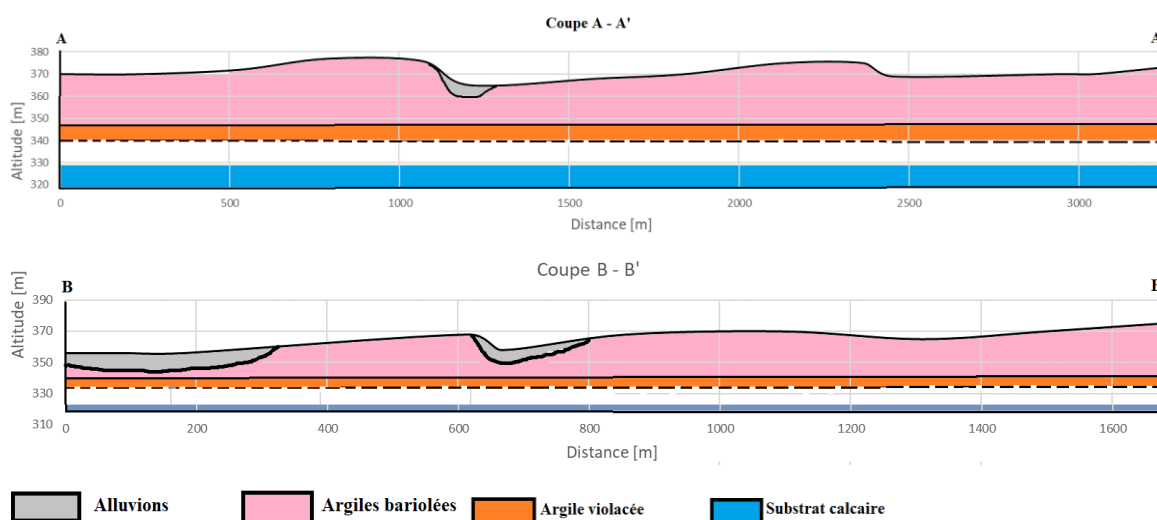


Fig. 97. Coupes géologiques à travers la concession.

Site A

Le site A (5°31'3,6''S 14°43'19,7''E, altitude 370 m) correspond à une zone d'extraction de la briqueterie située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 404). La figure 98 montre les 5 faciès observés du haut vers le bas sur ce site.

1. une couche d'humus d'environ 1 mètre d'épaisseur (couche non échantillonnée)
2. une couche argileuse blanchâtre « argile blanche » (**échantillon A**), dont l'épaisseur est plus importante au milieu de la dépression et diminue vers les sommets des collines avoisinantes.

3. une couche argileuse jaunâtre (**échantillon B**) qui correspond probablement à la couche lessivée. La coloration jaunâtre est observée dans la couche sous-jacente.
4. une couche argileuse rougeâtre avec des taches blanchâtres et jaunâtres, qui comporte des fragments millimétrique à centimétrique de carbonates et de grés (**échantillon C**).
5. une couche argileuse mauve avec des horizons argileux centimétriques de couleur jaune foncée (**échantillon D**).



Fig. 98. Facies observés à la parcelle 406. A : « argile blanche ». B. niveau jaunâtre, C. niveau à taches rouges. Les cercles rouges montrent des niveaux qui contiennent des résidus de carbonates.

Site B

Le site B ($5^{\circ}30'12,8''S$ $14^{\circ}43'4,5''E$ @ 368 m) correspond à une zone d'extraction de la briqueterie située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 406). La figure 99A montre les 4 faciès observés, du haut vers le bas, sur ce site :

1. une couche de graviers probablement de remblai d'environ 50 cm d'épaisseur ;
2. une couche humifère d'environ 60 cm d'épaisseur (non échantillonné). La proximité du site de la rivière Kwilu expliquerait la texture sableuse de cet humus. Ce niveau comprendrait à des alluvions de la rivière Kwilu. Ces alluvions sont principalement constituées de sables et argiles déposés lors des périodes de crue de la rivière ;
3. une couche argileuse brune avec des taches rougeâtres et blanchâtres (**échantillon E**). Ces colorations s'intensifient avec la profondeur ;
4. une couche argileuse avec des taches rougeâtres et blanchâtres (**échantillon F**).

Site C

La zone est située sur une parcelle de la sucrière (Parcelle 407, $5^{\circ}30'28,9''S$ $14^{\circ}43'14,4''E$ @ 370 m). Il s'agit d'un niveau argileux observé sur une épaisseur supérieure à 5,5 mètres, sur le flanc d'une colline de 4 m de haut. Un puits de 1,5 m a été creusé. Le niveau observé sur le flanc de la colline se prolonge en profondeur dans le puits creusé. Il s'agit d'une couche argileuse à taches rougeâtres, blanchâtres et jaunâtres (Fig. 99B). Un seul échantillon a été prélevé sur ce site (**échantillon G**).

Site D

La zone est située en dehors des parcelles de la sucrière (5°30'31.30"S 14°43'48.30"E). Il s'agit d'une colline proche d'une décharge de la sucrière. Le site comprend couche argileuse mauve pâle comprenant des niveaux argileux centimétriques jaunes (**échantillon I**). Ce niveau est surmonté d'un niveau jaune riche en graviers calcaires (**échantillon H**, Fig. 99C).

Site E

La zone est située en dehors des parcelles de la sucrière (5°30'45.30"S 14°44'19.00"E). Il s'agit d'une zone où les habitants extraient de la terre pour une briqueterie artisanale (Poste 4B, Fig. 99D). Le site comprend un niveau argileux brun jaunâtre : **échantillon J**.

Site F

Il s'agit d'une zone sur laquelle sont faits des travaux d'excavation (5°30'35,3''S 14°41'52,1''E @ 379 m). La zone est située tout le long d'une parcelle de la sucrière (parcelle 507), en dehors de la concession de la briqueterie.

La figure 99F montre les 3 facies observés du haut vers le bas sur ce site. :

- 1. une couche d'humus d'environ 60 cm d'épaisseur (couche non échantillonnée)
- 2. une couche argileuse brun jaunâtre. Il s'agit de la couche lessivée : **échantillon K**
- 3. une couche argileuse à taches rouges et blanchâtres avec des résidus de roches calcaires et gréseuses (**échantillon L**).

Site G

La zone, située en dehors des parcelles de la sucrière, correspond à une colline où les habitants extraient de la terre jaune (**échantillon M**) pour une briqueterie artisanale (5°30'4,4''S 14°41'27,3''E @ 402 m, Fig. 99G).

Site H

La zone, située en dehors des parcelles de la sucrière, correspond à une colline où les habitants extraient de la terre pour une briqueterie artisanale (5°30'11,5''S 14°41'17,0''E @ 358 m).

Le facies comprend un niveau argileux mauve pâle violacé (**échantillon N**) avec un niveau argileux jaune foncé d'épaisseur décimétrique à la base (**échantillon O**) et un niveau de concentration de fer sous forme de nodules¹ au sommet (non échantillonné, Fig. 99E).

Site I

La zone est située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 709), et dans la concession de la briqueterie (5°29'35.33"S 14°43'12.99"E). 3 échantillons ont été prélevés dans cette parcelle (**échantillons P, Q et R**). Ces échantillons ont été prélevés dans des puits d'environ 50 cm creusés manuellement.

¹ Il s'agit d'un niveau de concrétion ferrugineuse sous forme de nodules. Ces derniers seraient soit formés en milieu anoxique durant la diagenèse, soit formés en milieu oxydant durant la pédogenèse. Il serait intéressant de s'intéresser à la valorisation de ces nodules. Ils sont utilisés dans la région comme remblai.





Fig. 99. A – Profil du site B. Le cercle rouge indique un niveau de graviers < 3 cm. B – Site d’échantillonnage C. C – Site d’échantillonnage D. E – Site d’échantillonnage H. Le trait continu rouge délimite le niveau graveleux. Le cercle rouge montre le niveau jaune foncé. Les lettres désignent la dénomination des échantillons prélevés. F – Site d’échantillonnage E. G – Facies observé au site F. G – Site d’échantillonnage G.

Les propriétés des différents échantillons sont reprises au Tableau 71.

Propriétés	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Perte au feu (%)	6,0	8,6	10,1	13,3	6,4	8,9	6,3	7,3	7,5	8,0	6,9		9,2	5,4	7,9	3,8	5,8	8,4
Limite d'Atterberg (%)																		
Liquidité	32,9	45,1	44,1	37,0	30,5	31,4	34,4	40	39,1	44,1	36,0	30,4	37,4	41,2	40,7	24,8	17,3	
Plasticité	22,0	36,5	34,0	28,6	22,9	25,1	26,1	28,3	29,2	34,0	21,0	21,7	28,3	29,5	27,4	19,8	12,9	
Indice de plasticité <i>IP</i>	10,9	8,6	10,1	8,4	7,6	6,3	8,3	11,7	9,9	10,1	15,0	8,7	9,1	11,7	13,3	5,0	4,5	
Granulométrie (%)																		
< 2 µm	6,5	14,6	14,6	5,6	4,5	14,1	10,2	3,8	17,8	5,5	26,6	12,4	12,4	3,8	4,3	7,7	8,0	
< 63 µm	85,3	96,9	96,9	95,2	78,5	77,9	85,3	93,1	97,7	90,5	93,4	93,1	84,3	93,1	95,4	76,8	64,2	
< 100 µm	96,6	100	100	100	88,3	88,6	94,2	99,9	100	99,8	95,9	98,6	98,4	99,9	100	91,9	83,5	
< 250 µm	100				95,0	98,7	97,0	100		100	100	99,8	100	100		95,8	99,6	
< 500 µm					98,6	99,9	98,8					100				99,6	100	
< 1 mm					100	100	100									100		
Minéralogie (%)																		
Quartz	65	34	21	30	16	41	53	39	32	41	59	41	37	45	63	52	60	41
Plagioclase	< 1	/	2	1	/	1	<1	/	1	/	1	<1	/	<1	/	<1	<1	<1
Orthose	2	3	/	3	7	3	2	2	2	2	5	1	1	2	/	1	2	1
Goethite	/	8	24	10	26	13	7	14	9	16	7	16	22	8	13	8	4	16
Hématite	/	3	/	2	1	/	/	1	3	1	/	/	1	4	/	<1	/	/
Magnétite	/	/	/	3	6	/	2	3	/	/	2	/	/	/	/	2	2	/
Anatase	/	3	/	/	2	/	1	1	/	/	/	/	/	/	/	1	/	/
Minéraux argileux	32	49	53	51	42	43	35	40	53	40	26	42	39	41	25	35	32	42
<i>Illite</i>	2	22	4	4	16	2	12	11	8	35	7	6	7	20	36	16	4	6
<i>Chlorite</i>	/	1	/	/	/	1	/	1	1	/	/	/	2	1	2	1	1	/
<i>Kaolinite</i>	98	77	96	96	84	97	88	88	91	65	93	94	91	79	62	83	95	94
Chimie (%)																		
<i>SiO₂</i>							69,2						57,6	66,6	61,5			
<i>TiO₂</i>							1,3						1,1	1,2	0,8			
<i>Al₂O₃</i>							17,5						19,9	15,0	19,3			
<i>Fe₂O₃</i>							3,5						10,6	8,8	9,2			
<i>MnO</i>							0,0						0,0	0,1	0,0			
<i>MgO</i>							0,0						0,0	0,0	0,0			
<i>CaO</i>							0,1						0,1	0,1	0,1			
<i>Na₂O</i>							0,0						0,0	0,0	0,0			
<i>K₂O</i>							0,6						0,3	0,7	0,2			
<i>P₂O₅</i>							0,1						0,1	0,1	0,0			
<i>LOI</i>							7,8						10,3	7,6	8,7			

Tableau 71. Propriétés des échantillons prélevés à Kwilu Ngongo.

b) Mbanza Ngungu

La ville de Mbanza Ngungu a été prise comme cas pour comprendre le mode de construction développé sur la grande partie de la province du Kongo Central. La terre est le principal matériau de construction utilisé dans cette province. Il suffit de prendre la Nationale 1 Kinshasa-Matadi, longue de 363 km pour s'en rendre compte. Du 10 au 16 septembre 2017 un séjour a été réalisé à Mbanza Ngungu. Aidé par Mr Cedric Kwanza de l'Université Kongo, les travaux ont consisté à :

- Échantillonner : les matériaux argileux de la région de Mbanza Ngungu sont des produits d'altération des roches du Super groupe Schisto calcaire. Ce dernier est composé principalement de massifs calcaires mais également d'horizons gréseux et argileux. L'altération des horizons gréseux donne une terre rougeâtre. L'altération d'horizons argilo-calcaires donne une terre jaune. Un total de 8 échantillons a été prélevé et caractérisé.
- Étudier le système constructif : le mode constructif rependu dans la région de Mbanza Ngungu est l'auto-construction. La parcelle à construire constitue également l'argilière (Fig. 100). La terre est humidifiée et laissée au repos pendant 12 à 24 heures, moulue pour avoir des briques de type adobes. Celles-ci sont ensuite séchées à l'abri du soleil durant 7 jours en moyenne puis cuites dans des fours traditionnels. Les briques obtenues sont de mauvaise résistance, et s'altèrent vite. Principalement dû au fait qu'elles sont moulues et non compressées, la patte argileuse n'est pas homogène, le four n'atteint pas une température idéale et la température au sein du four n'est pas homogène. Les briques proches de la source du feu sont mieux cuites. La fabrication des briques est une activité qui se fait uniquement en saison sèche.



Fig. 100. Exemple de construction. A. parcelle à construire : il s'agit de la zone d'où a été extraite la terre pour faire les briques. B. Fondation de la nouvelle maison faite de pierre et de sable de la région et du ciment produit dans la province. C. Four traditionnel pour cuire les briques. Ce four utilise le bois comme combustible. D. Bois de combustible.

Dans la région de Mbanza Ngungu, on retrouve les roches de l'Unité de Lukunga (CII) ou Formation C4. Les terres observées dans la région de Mbanza Ngungu sont les mêmes que celles qui ont été observées dans la région de Kwilu Ngongo (Fig. 101).



Fig. 101. Formations observées dans la région de Mbanza Ngungu. A – Terre jaunâtre. B – Terre mauve pâle violacée. C – Roches de la Formation C4 : succession de bancs de calcaire, de grès fins et d’argilites.

Les caractéristiques des sites d’échantillonnage et des échantillons sont présentées aux Tableaux 72 et 73.

Échantillons	Coordonnées géographiques	Description
MV1	5°16'20,53''S 14°51'30,94''E	Terre jaune foncée
MV2 et MV5	5°16'20,87''S 14°51'19,15''E	Terre mauve pâle violacée
MV3	5°16'17,04''S 14°51'24,41''E	Terre mauve pâle violacée
MV4	5°16'20,54''S 14°51'23,16''E	Terre jaunâtre
MK	5°14'59,31''S 14°51'24,85''E	Terre jaunâtre
ML	5°14'39,87''S 14°52'44,31''E	Terre bariolée
MH	5°14'41,90''S 14°52'45,11''E	Terre humifère

Tableau 72. Caractéristiques des sites d’échantillonnage à Mbanza-Ngungu.

Propriétés	MV1	MV2	MV3	MV4	MV5	MK	ML	MH
Perte au feu (%)	2,9	7,1	8,1	5,4	8,8	4,9	7,0	9,5
Atterberg (%)								
Liquidité	15,0	36,9	38,2	25,0	40,3	25,1	28,1	25,4
Plasticité	12,8	27,6	29,3	18,5	31,7	16,0	22,3	20,9
IP	2,2	9,3	8,9	6,5	8,6	9,1	5,8	4,5
Retrait (%)	5,7	2,8	9,4	5,7		10,5	5,7	8,7
Granulo. (%)								
< 2 µm	4,4	12,4	17,8	7,7	5,5	9,0	7,3	11,8
< 63 µm	37,8	84,3	97,7	78,1	90,5	84,6	70,0	86,3
< 100 µm	51,8	98,4	100	92,1	99,8	91,6	87,1	95,2
< 250 µm	83,2	100		97,6	100	99,1	97,1	98,6
< 500 µm	99,0			100		100	99,2	99,8
< 1 mm	100						100	100
Minéralogie (%)								
Quartz	63	44	32	37		46	39	66
Plagioclase	/	/	/	1		<1	<1	<1
Orthose	/	/	/	1		<1	1	1
Goethite	14	14	22	8		19	12	6
Hematite	/	2	/	2		/	<1	<1
Magnétite	1	2	2	/		/	/	2
Anatase	2	/	1	1		1	1	1
Min. argileux	20	38	42	50		34	46	23
<i>Illite</i>	23	12	6	5	37	3	14	8
<i>Chlorite</i>	1	1	4	1	/	3	3	2
<i>Kaolinite</i>	76	87	90	94	63	94	83	90
Chimie (%)								
SiO ₂						61,3	60,6	
TiO ₂						1,0	1,3	
Al ₂ O ₃						15,5	19,2	
Fe ₂ O ₃						7,3	6,2	
MnO						0,0	0,0	
MgO						0,0	0,1	
CaO						0,1	0,1	
Na ₂ O						0,0	0,0	
K ₂ O						0,1	0,6	
P ₂ O ₅						0,1	0,1	
LOI						14,6	11,9	

Tableau 73. Propriétés des échantillons prélevés à Mbanza-Ngungu.

c) Nkamba

Du 14 au 16 août 2017 un séjour a été effectué à Nkamba afin d'effectuer des échantillonnages. Dans la zone échantillonnée, la terre est issue de l'altération *in situ* des roches gréseuses du Sous-groupe de l'Inkisi. Il s'agit d'une terre rougeâtre et jaunâtre. Ces deux niveaux ont été échantillonnés (échantillon NKJ, niveau supérieur jaunâtre et échantillon NKR, niveau inférieur

rougeâtre). La terre a été échantillonnée à un seul endroit (5°1'38,59''S 14°35'30,74''E). Les propriétés des échantillons sont présentées au Tableau 74.

Propriétés	NKJ	NKR
Perte au feu (%)	6,5	8,2
Limite d'Atterberg (%)		
Liquidité	35,5	31,9
Plasticité	24,7	24,3
Indice de plasticité <i>IP</i>	7,8	7,6
Granulométrie laser (%)		
< 2 µm	13,1	8,7
< 63 µm	96,3	82,1
< 100 µm	100	95,9
< 200 µm		96,3
< 250 µm		97,1
< 500 µm		99,8
< 1 mm		100
Minéralogie (%)		
Quartz	28	26
Plagioclase	/	1
Orthose	2	1
Goethite	20	11
Hématite	/	1
Magnétite	/	4
Anatase	/	1
Minéraux argileux	50	55
<i>Illite</i>	15	24
<i>Chlorite</i>	2	2
<i>Kaolinite</i>	83	74
Chimie (%)		
<i>SiO₂</i>	53,7	54,6
<i>TiO₂</i>	1,2	1,2
<i>Al₂O₃</i>	22,0	22,9
<i>Fe₂O₃</i>	9,9	8,7
<i>MnO</i>	0,0	0,0
<i>MgO</i>	0,3	0,5
<i>CaO</i>	0,1	0,1
<i>Na₂O</i>	0,0	0,0
<i>K₂O</i>	1,4	2,1
<i>P₂O₅</i>	0,0	0,0
<i>LOI</i>	11,4	9,9

Tableau 74. Propriétés des échantillons prélevés à Nkamba.

d) Kasangulu

La région de Kasangulu avait déjà été échantillonnée lors de la réalisation de mon mémoire en 2014 (Mango-Itulama, 2015). Du 2 au 8 septembre 2017, un séjour y a été effectué afin d'établir une carte de la répartition spatiale de terres argileuses sur base d'observation faites en surface (Fig. 102). La cité de Kasangulu est limitée à l'est par la plaine de la rivière Lukaya,

affluent de la rivière Ndjili, elle-même affluent du fleuve Congo. Dans cette partie on trouve des alluvions. Il s'agit principalement d'une terre compacte blanchâtre. La partie centrale est occupée par une terre sableuse. Il s'agit de résidus d'altération de la Formation des grès tendres du Crétacé. Dans la partie ouest on retrouve les formations argileuses. Les terres de la région de Kasangulu sont des produits d'altération du grès de l'Inkisi. Il s'agit d'une terre jaunâtre ou rougeâtre selon le degré d'altération (Fig. 103).

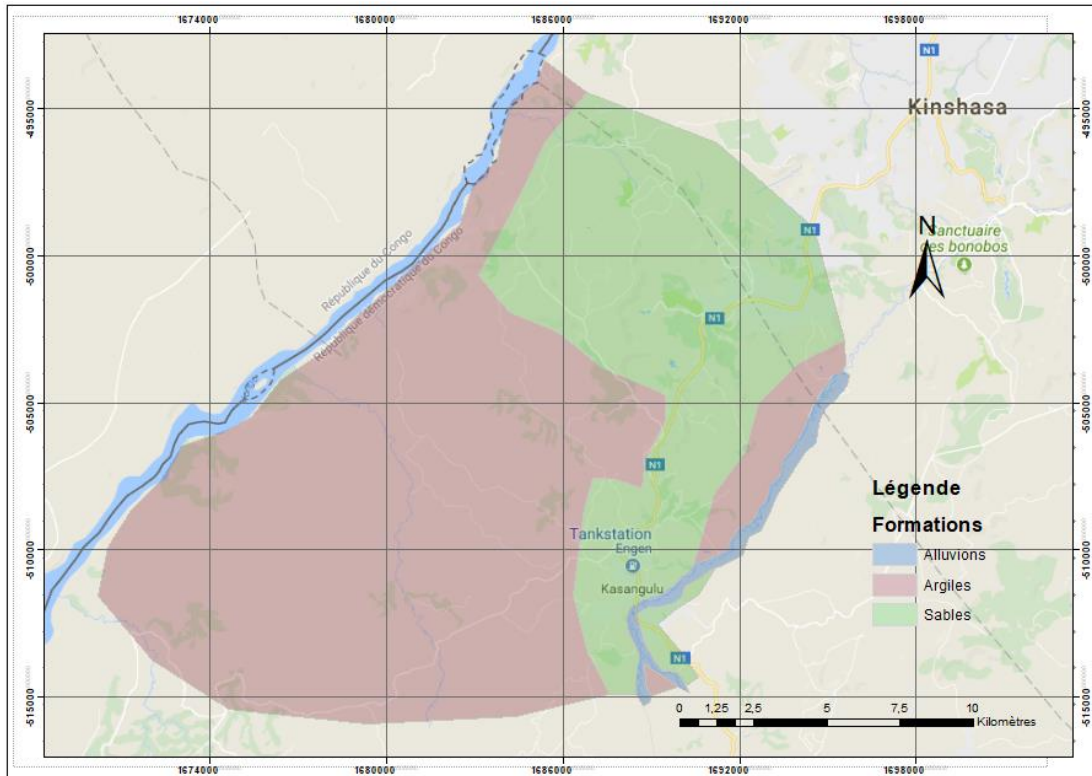


Fig. 102. Carte des formations de couverture de la région de Kasangulu.



Fig. 103. Vue sur la terre issue de l'altération du grès de l'Inkisi. C2 : Latérite, C3 : Saprolite (Wetshondo. 2012).

e) Lukala

La cimenterie de Lukala (CILU) extrait des terres dans quatre argilières se situant au maximum à 8 km de l'usine. Ces terres sont des produits d'altération des roches du Schisto-Calcaire et entrent dans la composition du ciment. Le séjour à Lukala avait comme objectif d'échantillonner les différentes terres utilisées par la cimenterie afin de mettre à jour leurs fiches caractéristiques. Ce séjour devait aussi permettre de mieux comprendre l'origine des terres issues de l'altération des roches du Sous-groupe Schisto-Calcaire, car on retrouve beaucoup d'affleurements dans cette région.

Trois échantillons ont été prélevés dans la région de Lukala :

Le premier échantillon (**LAL**) a été prélevé dans la carrière de calcaire de la cimenterie de Lukala ($5^{\circ}30'51.07''S$ $14^{\circ}31'36.70''E$). Il s'agit d'une terre mauve rougeâtre avec des horizons jaune. Elle surmonte les bancs calcaires de la Formation C3 ou Formation de Luanza. La terre provient de l'altération des horizons de grès et d'argilites de l'Unité de Lukunga (CII) ou Formation C4 (Fig. 104).

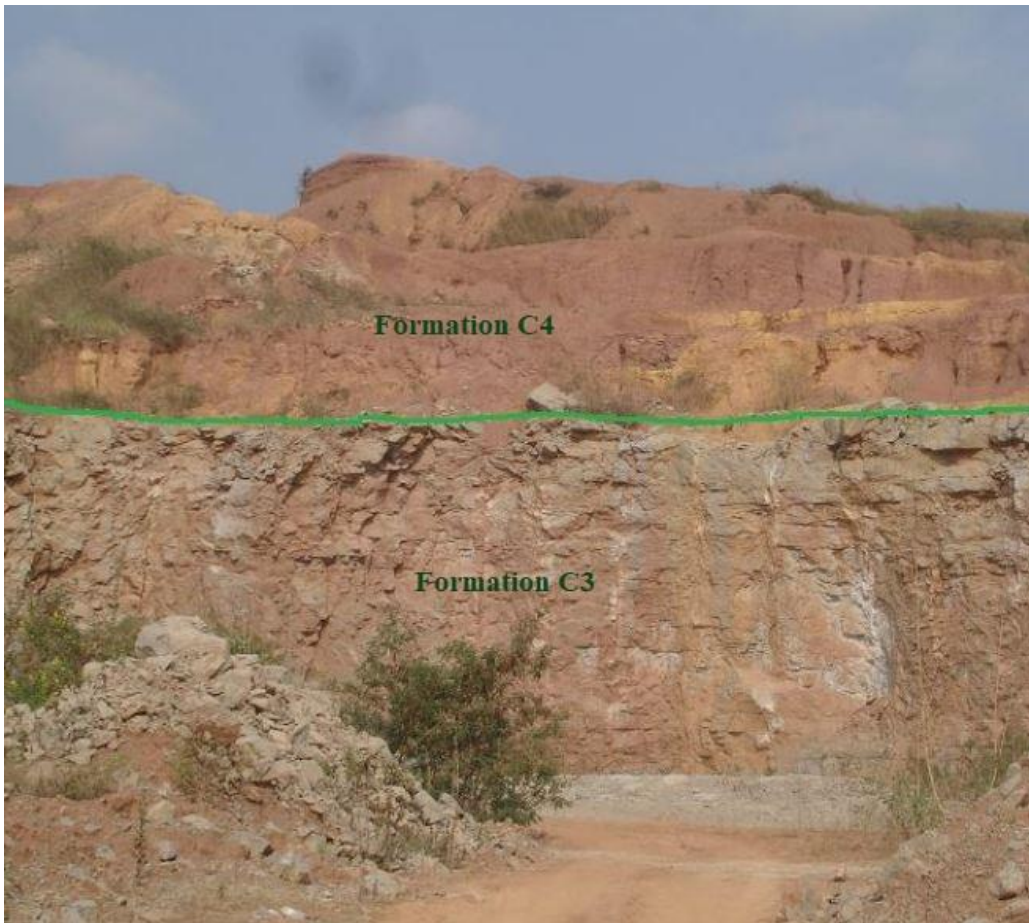


Fig. 104. Contact entre les Formations C3 et C4.

Le deuxième échantillon (**LSI**) a été prélevé 150 mètres au sud-ouest de la carrière précédente ($5^{\circ}30'54,82''S$ $14^{\circ}31'33,34''E$). Il s'agit probablement de la même terre que la précédente.

Le troisième échantillon (**LFE**) a été prélevé à 8 km de la carrière, dans le village de Luzolo. Il s'agit d'une terre riche en concrétions ferrugineuses sous forme de nodules.

Les propriétés des échantillons sont présentées au Tableau 75.

Propriétés	LAL	LSI	LFE
Perte au feu (%)	6,5	6,8	8,8
Limite d'Atterberg (%)			
Liquidité	41,9	23,7	
Plasticité	34,7	16,6	
Indice de plasticité <i>IP</i>	7,2	7,1	
Granulométrie laser (%)			
< 2 µm	5,5	7,7	
< 63 µm	90,5	78,1	
< 100 µm	99,8	92,1	
< 250 µm	100	97,6	
< 500 µm		100	
< 1 mm			
Minéralogie (%)			
Quartz	57	69	41
Plagioclase	<1	/	/
Orthose	2	1	/
Goethite	9	5	24
Hématite	1	/	/
Magnétite	/	1	/
Minéraux argileux	31	24	38
<i>Illite</i>	18	3	1
<i>Chlorite</i>	/	1	/
<i>Kaolinite</i>	82	94	99
Chimie (%)			
SiO ₂	66,6		
TiO ₂	1,2		
Al ₂ O ₃	15,0		
Fe ₂ O ₃	8,8		
MnO	0,1		
MgO	0,0		
CaO	0,1		
Na ₂ O	0,0		
K ₂ O	0,7		
P ₂ O ₅	0,1		
LOI	7,6		

Tableau 75. Propriétés des échantillons prélevés à Lukala.

III.2.3 Résumé des propriétés des matériaux argileux de Kinshasa et du Kongo Central

Les matériaux argileux des régions de Kinshasa et du Kongo-Central sont des produits d'altération des roches du Sous-groupe Schisto-Calcaire (à Mbanza Ngungu, Kwilu-Ngongo et Lukala) ou du Sous-groupe de l'Inkisi (à Kinshasa, Kasangulu et Nkamba). Le Tableau 76 résume leurs propriétés.

Propriétés	Inkisi	Schisto-Calcaire
Perte au feu (%)	6,5 à 10,6	3,8 à 13,3
Limite d'Atterberg (%)		
Liquidité	31,9 à 42,0	15,0 à 45,1
Plasticité	23,0 à 32,3	12,8 à 36,5
Indice de plasticité <i>IP</i>	7,6 à 11	2,2 à 15,0
Retrait (%)		2,8 à 10,5
Granulométrie laser (%)		
< 2 µm	5,5 à 13,1	3,8 à 26,6
< 63 µm	77 à 96,3	37,8 à 97,7
< 100 µm	95,9 à 100	51,8 à 100
< 250 µm	97,1	83,2 à 100
< 500 µm	99,8	98,6 à 100
< 1 mm	100	100
Minéralogie (%)		
Quartz	24 à 42	21 à 69
Plagioclase	0 ou 1	0 ou 1
Orthose	1 ou 2	1 à 11
Goethite	11 à 20	4 à 26
Hématite	0 ou 1	0 à 4
Magnétite	0 à 4	0 à 8
Anatase	0 ou 1	0 à 2
Minéraux argileux	50 à 55	20 à 53
<i>Illite</i>	12 à 24	1 à 36
<i>Chlorite</i>	2	0 à 4
<i>Kaolinite</i>	74 ou 84	62 à 99
Chimie (%)		
<i>SiO₂</i>	53,7 à 54,6	54,6 à 69,2
<i>TiO₂</i>	1,2	0,8 à 1,3
<i>Al₂O₃</i>	22,0 à 22,9	15,0 à 22,9
<i>Fe₂O₃</i>	8,7 à 9,9	3,5 à 10,6
<i>MnO</i>	0,0	0,0
<i>MgO</i>	0,3 à 0,5	0,0 à 0,5
<i>CaO</i>	0,1	0,1
<i>Na₂O</i>	0,0	0,0
<i>K₂O</i>	1,4 à 2,1	0,2 à 2,1
<i>P₂O₅</i>	0,0	0,0
<i>LOI</i>	9,9 à 11,4	7,6 à 14,6

Tableau 76. Propriétés des matériaux argileux de Kinshasa et du Kongo Central.

Une terre recommandée pour la fabrication des BTC 0 à 40% de gravier ; 25 à 80% de sable, 10 à 25% de limon et 8 à 30% d'argiles (Rigassi, 1995 ; Guérin, 1985 ; AFNOR, 2001). Les terres de Kinshasa et du Kongo Central manquent de contenu en particules grossières (sable et gravier) pour le BTC. Il serait judicieux d'en ajouter.

III.3 Formulations des matériaux à partir des échantillons collectés en Belgique

III.3.1 Influence de la nature des granulats sur le comportement des BTC

Dans ce point, nous présenterons les travaux réalisés afin d'augmenter la résistance mécanique, la stabilité à l'eau et la durabilité des BTC par l'ajout de granulats. L'ajout de granulats à la terre est un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre, en mélangeant des grains de tailles différentes (GATE, 1994). Les minéraux argileux, du fait de leurs forces de surface élevées, donnent au sol sa cohésion et l'essentiel de sa résistance mécanique en agissant comme une sorte de liant entre les éléments plus grossiers. Les éléments plus grossiers (granulats) constituent le squelette. Ils agissent comme correcteur de granulométrie en rendant le matériau plus compact (Moevus et al. 2012).

a) Réalisation des mélanges

Des BTC ont été produits à l'aide d'une presse manuelle (voir II.2.1). Les échantillons de cinq sites ont été sélectionnés pour cette étude (voir III.1.3, Tableau 68). L'utilisation d'échantillons différents dans notre étude a pour but de comprendre les interactions entre le liant (l'argile) et les granulats. En effet, l'ajout de granulats modifie les propriétés de l'argile. Celles-ci en fonction du type d'argile (Sitton et al., 2018 ; Moevus et al., 2012).

Trois types de granulats, à savoir le calcaire, le grès et le porphyre, de distribution granulométrique homogène (0/14 mm continue, Fig. 105), ont été incorporés aux échantillons argileux. Les granulats ont été choisis pour obtenir une taille de particule optimisée. Houben et Guillaud (1989) recommandent une gamme de granulométrie convenant à la fabrication des BTC. On peut constater que la distribution granulométrique de nos échantillons ne correspond pas à cette plage (Fig. 105). On mélange les granulats et les matériaux argileux de manière à se situer dans la zone recommandée par Houben et Guillaud (1989).

Un volume d'échantillon est dosé pour être mélangé manuellement avec le stabilisant et l'eau. La quantité d'eau ajoutée est inférieure à la limite de plasticité. La fabrication des BTC a été réalisée à l'aide d'une presse manuelle (voir II.2.1), selon 5 formulations : sans granulats, avec 20%, 33%, 43% et 50% de granulats en volume. Les courbes granulométriques des mélanges sont présentées à la Fig. 106.

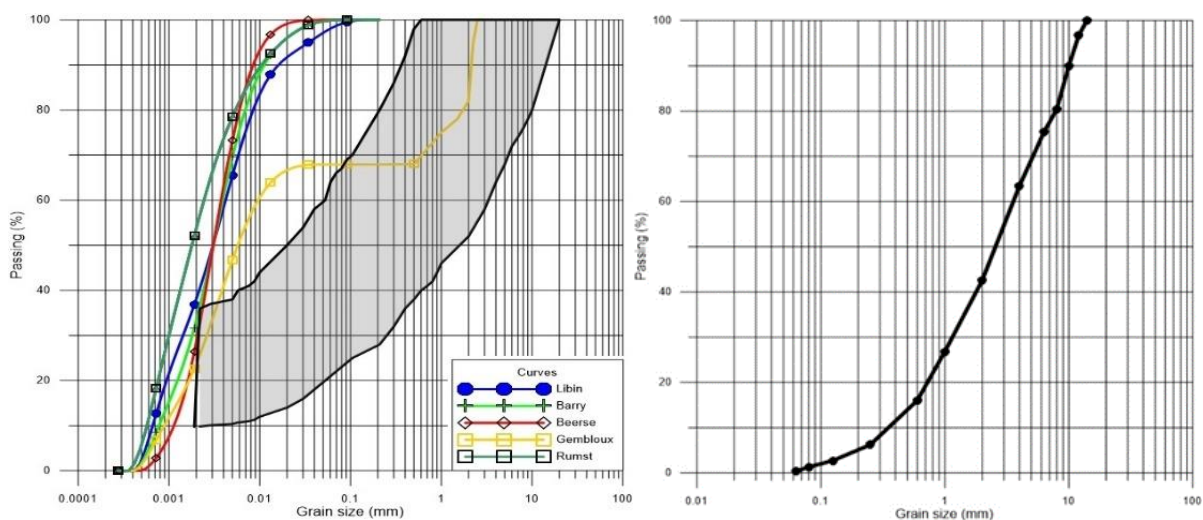


Fig. 105. Courbes granulométriques des échantillons utilisés pour la fabrication des BTC (gauche), la zone grise correspond à la zone granulométrique recommandée par Houben et Guillaud (1989) ; et courbe granulométrique des granulats utilisés (droite).

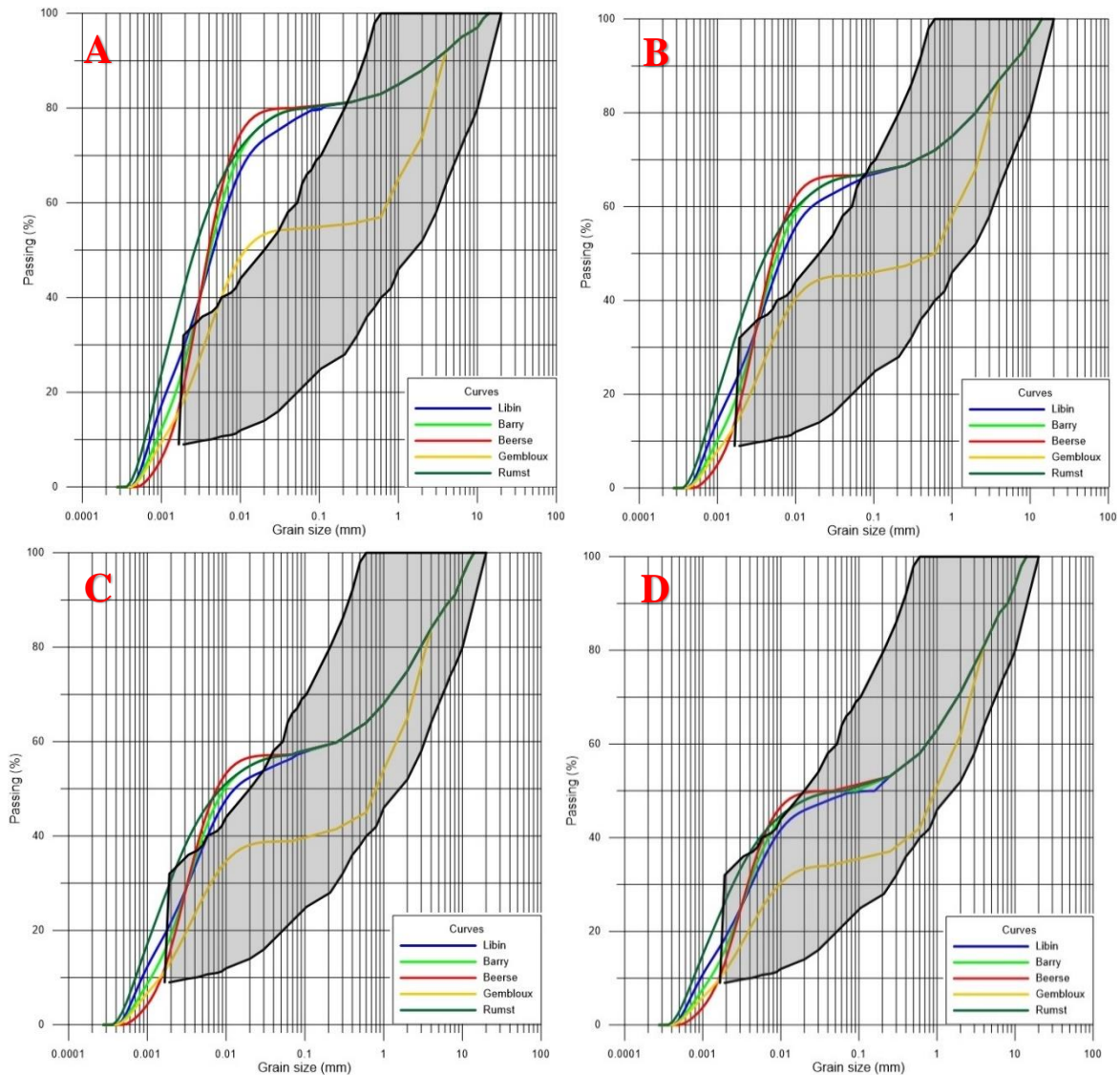


Fig. 106. Courbes granulométriques des mélanges. A – 20% granulats, B – 33% granulats, C – 43% granulats, D – 50% granulats.

b) Caractérisations des BTC

b1) Retrait volumique de séchage

Les valeurs de retrait volumique de séchage sont indiquées sur la Figure 107. L'ajout de granulats diminue le retrait de séchage à mesure que le pourcentage de granulat augmente. Les échantillons avec granulats subiront donc moins de variations de volume dans le temps.

La présence de kaolinite et d'illite dans l'échantillon aura une influence sur les propriétés de retrait. Les cristaux de kaolinite et d'illite contiennent peu de molécules d'eau entre leurs couches en raison de l'étroitesse de leur espace interfoliaire. Par conséquent, ils ont peu de gonflement intercrystallin lorsqu'ils sont immergés dans l'eau. Lors du séchage, les boues de kaolinite ou d'illite ont donc beaucoup moins de retrait que l'argile gonflante de type smectite (Andrade et al, 2011 ; Tardy, 1993). Les échantillons de Gembloux et de Libin ne contiennent que de la kaolinite et de l'illite (voir III.1.3, Fig. 88). Elles ont une valeur de retrait de séchage inférieure aux échantillons de Rumst, Beerse et Barry, qui eux contiennent des argiles gonflantes.

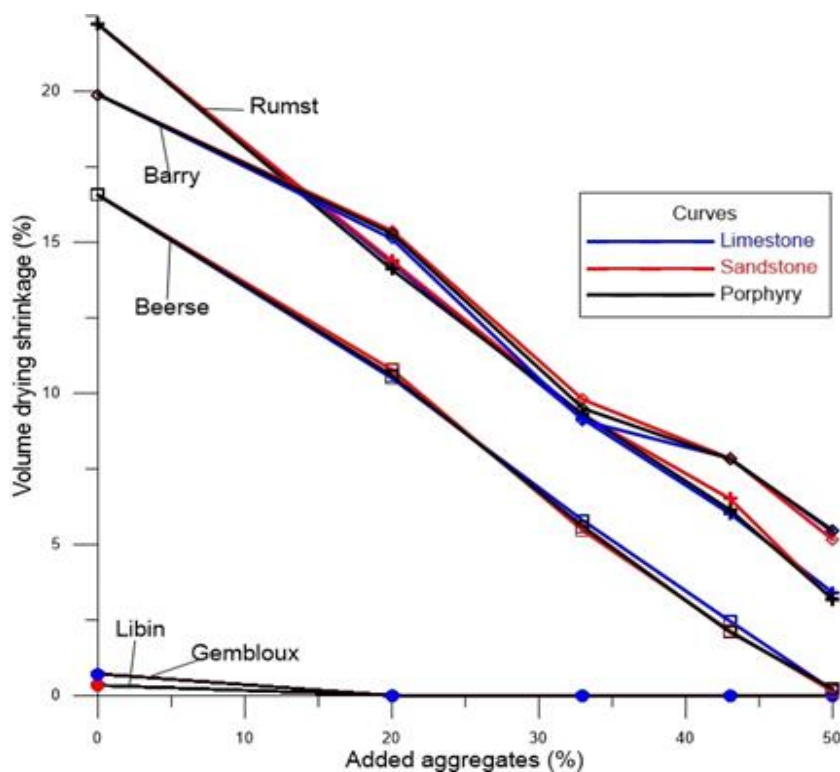


Fig. 107. Évolution du retrait volumique de séchage en fonction du pourcentage de granulat ajouté.

b2) Capillarité

Les valeurs de capillarité sont présentées à la Figure 108. L'ajout de granulats réduit l'absorption d'eau du bloc. Cela peut s'expliquer par le remplacement de l'argile sensible à l'eau par le granulat insensible à l'eau. Kosmatka (1994) montre que des particules de granulats plats proches de la surface du bloc empêchent l'eau d'entrer dans le bloc, contribuant ainsi à la diminution de l'absorption d'eau.

Les échantillons de Libin et de Gembloux contiennent des argiles peu cohésives (kaolonite et illite), ce qui se traduit par une faible plasticité (voir III.1.3 Tableau 70). Ces deux échantillons ont une faible cohésion générale et se lient moins à l'ensemble, créant une porosité résiduelle. Ceci explique leur plus grand coefficient d'absorption d'eau. Le coefficient d'absorption d'eau de l'échantillon de Libin est supérieur à celui de Gembloux, car l'échantillon de Libin est plus riche en kaolinite et donc moins cohésif.

Notons que le coefficient d'absorption d'eau de Barry est supérieur aux coefficients d'absorption d'eau de Rumst et Beerse. L'échantillon de Beerse contient moins d'argiles sensibles à l'eau que ceux de Beerse et Barry. L'échantillon de Rumst a un coefficient d'absorption d'eau inférieur à celui de Barry, alors que ce dernier contient moins d'argile sensible à l'eau. Cela peut être justifié par le fait que l'échantillon de Rumst contient davantage de particules fines qui peuvent boucher les vides et empêcher l'eau de pénétrer dans le bloc.

Selon les seuils définis dans la norme AFNOR XP P13-901, les blocs sont classés faiblement capillaires lorsque la valeur du coefficient d'absorption d'eau est inférieure à 20 (AFNOR, 2001 ; Adam et Agib, 2001). Les blocs testés sont faiblement capillaires à l'exception de ceux de Libin avec moins de 33% de granulats.

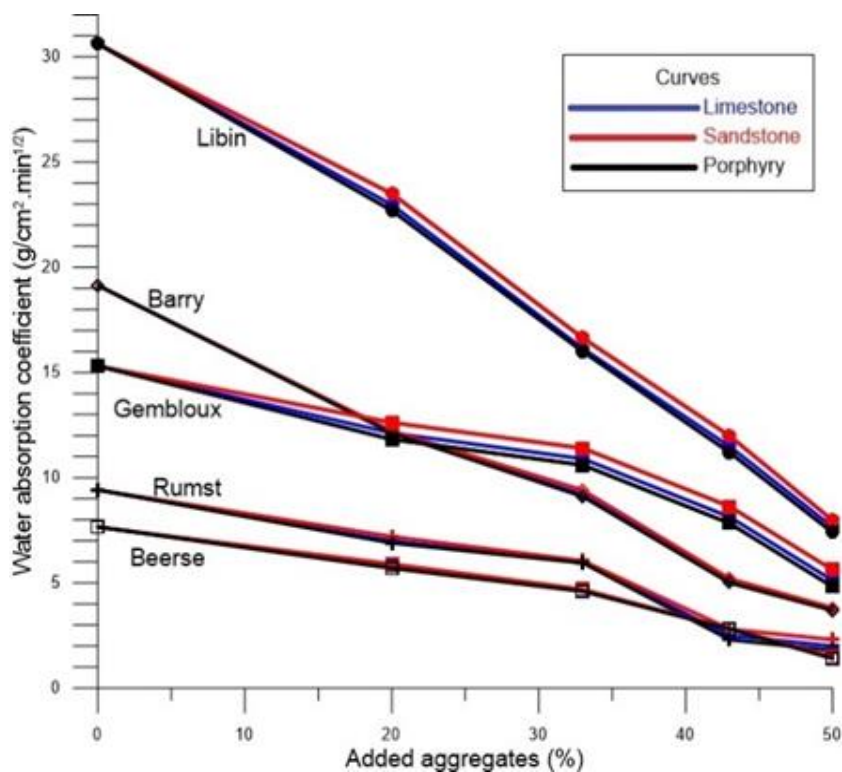


Fig. 108. Évolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du pourcentage de granulat ajouté.

b3) Résistance à la compression

Les valeurs des résistances à la compression sont indiquées sur la Figure 109. La résistance à la compression augmente très légèrement (de 0,12 à 0,33 MPa) avec l'augmentation du pourcentage de granulats ajoutés pour l'échantillon Libin. Les valeurs des résistances à la compression augmentent significativement (de 0,24 à 1,35 MPa) pour l'échantillon de Gembloux.

Le caractère non plastique (indice de plasticité <5) et peu cohésif des échantillons de Libin et de Gembloux se traduit par une faible résistance à la compression. Les granulats constituent un squelette qui améliore la résistance à la compression de ces 2 échantillons.

L'ajout de granulats augmente la résistance à la compression des échantillons de Rumst et de Barry jusqu'à ce que la proportion optimale permettant une bonne cohésion entre les particules fines et les granulats soit dépassée. La résistance à la compression du bloc de Barry diminue au-delà de 43% de granulat ajouté et de 20% de granulat ajouté pour le bloc de Rumst. Ce comportement s'explique par le caractère plus cohésif de la terre de Barry (indice de plasticité plus élevé et moins de kaolinite) que celui de Rumst (voir Tableau 70).

Probablement qu'après le maximum de granulat ajouté, les contacts granulats-granulats augmentent et l'épaisseur de liant entre les granulats n'est plus assez importante pour lier correctement les granulats.

L'ajout de 20% ou plus de granulat à l'échantillon de Beerse diminue sa résistance à la compression. 20% est une proportion trop élevée pour assurer une bonne cohésion entre les particules fines et les granulats de cet échantillon. Cela s'explique par le fait que l'échantillon de Beerse contient moins d'argile que ceux de Rumst et de Barry. L'ajout de granulat diminue plus rapidement la cohésion globale des blocs de Beerse.

Pour un même échantillon et un même pourcentage de granulat, la variation de la résistance à la compression avec des granulats de lithologie différente est très faible. Cette différence est probablement plus due à la forme et à la texture des particules et non à leur lithologie (calcaire, grès et porphyre).

Les granulats de grès utilisés présentaient une angularité et une texture plus lisse, tandis que les granulats de porphyre avaient une forme plus sphérique et une texture plus rugueuse. Des études antérieures ont démontré que la forme et la texture des granulats jouent un rôle dans le comportement du béton frais et du béton durci. Un excès de particules anguleux pourrait réduire la résistance du béton (Galloway, 1994). L'orientation des particules anguleux peut également nuire à la résistance et à la durabilité du béton (Galloway, 1994 ; Popovics, 1979). Les granulats sphériques ou cubiques produisent des résistances plus élevées et un retrait plus faible que les granulats allongés (Shilstone, 1990). L'angularité affecte le vide. Les particules angulaires créent plus de vide que les particules rondes (Kaplan, 1959). De plus, la texture affecte le lien entre les particules. Les particules rugueuses donnent une liaison plus forte que les particules lisses. En conséquence, les particules rugueuses produisent des résistances plus élevées (Kaplan, 1959).

Il a été démontré que, pour garantir une stabilité mécanique minimale, la résistance à la compression du BTC doit être supérieure à 1,3 MPa (Cid-Falceto et al. 2012). L'ajout de granulat a permis d'atteindre une valeur maximale de 4,3 MPa. Néanmoins, l'échantillon de Beerse atteint plus de 5 MPa sans addition de granulat.

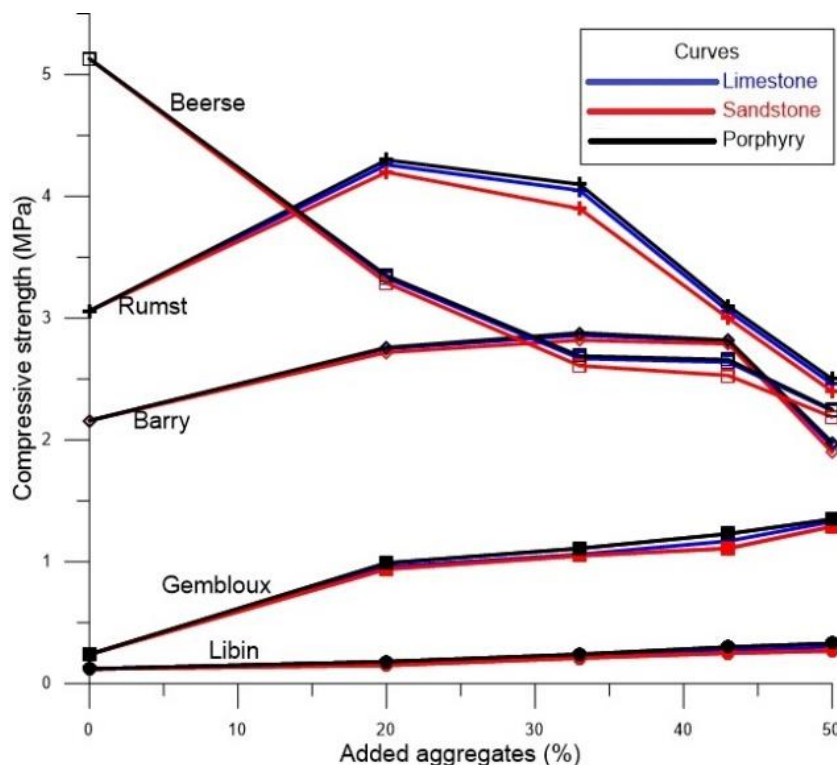


Fig. 109. Évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de granulat ajouté.

b4) Résistance à l'abrasion

Les valeurs de la résistance à l'abrasion sont indiquées sur la Figure 110. Le coefficient d'abrasion est plus élevé pour les mélanges ayant une résistance à la compression plus élevée.

À mesure que la résistance à la compression augmente, la résistance à l'abrasion augmente, et inversement (Wang et al. 2017 ; Rashad et al. 2014). La résistance à l'abrasion diminue lorsque l'adhésion des agrégats sur les fines particules diminue (Yu, 1999 ; Ren et al. 2017). La différence entre les granulats est faible et due à la forme des particules et non à leur lithologie.

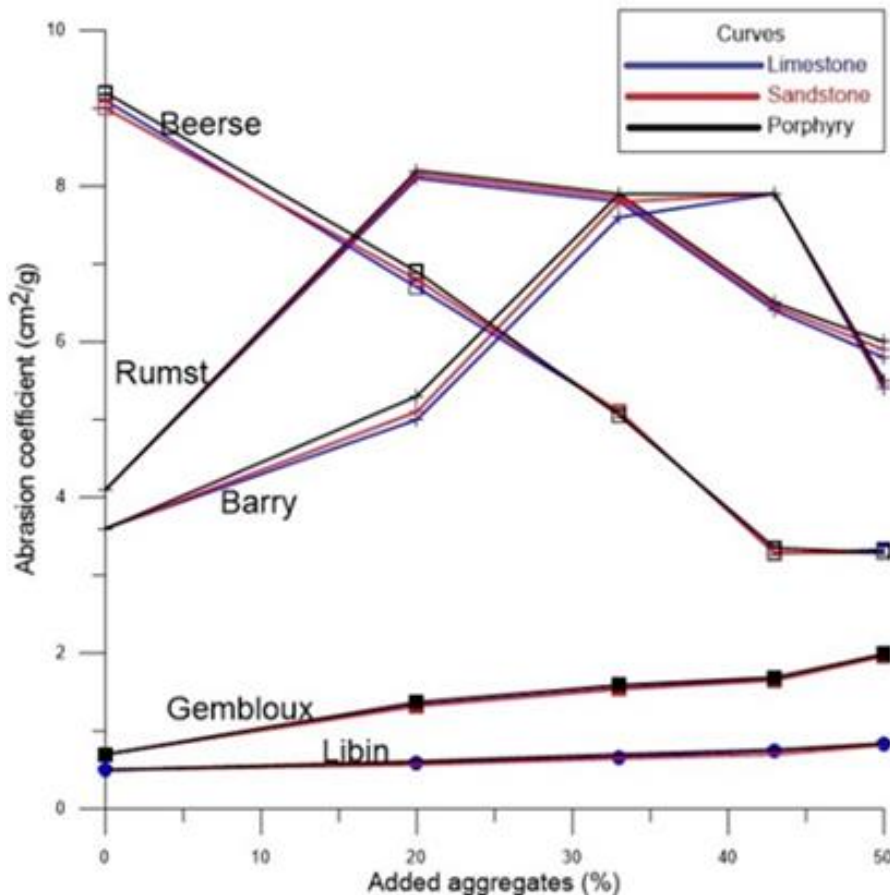


Fig. 110. Évolution de la résistance à l'abrasion en fonction du pourcentage de granulat ajouté.

III.3.2 Influence de la taille des granulats sur le comportement des BTC

a) Réalisation des mélanges

Des éprouvettes ont été produites en utilisant une presse hydraulique Max Voggenreiter mavo press LPP 150-500/100. L'échantillon est placé dans le moule de la presse, puis comprimé à l'aide d'un piston (voir II.2.2).

Nous avons observé au point précédent (III.3.1) que la nature de granulat avait peu d'influences sur les comportements des BTC. Les essais suivants ont été réalisés à l'aide d'un seul granulat (granulat de la roche gréseuse) avec trois distributions granulométriques différentes, à savoir le 0/2, 0/4 et 0/6,3 mm. Les courbes granulométriques de ces 3 granulométries matières premières sont présentées à la Fig. 109.

Trois granulométries du granulat de la roche gréseuse ont été utilisées, à savoir le 0/2, 0/4 et 0/6,3 mm. Les courbes granulométriques de ces 3 granulats sont présentées à la Fig. 111.

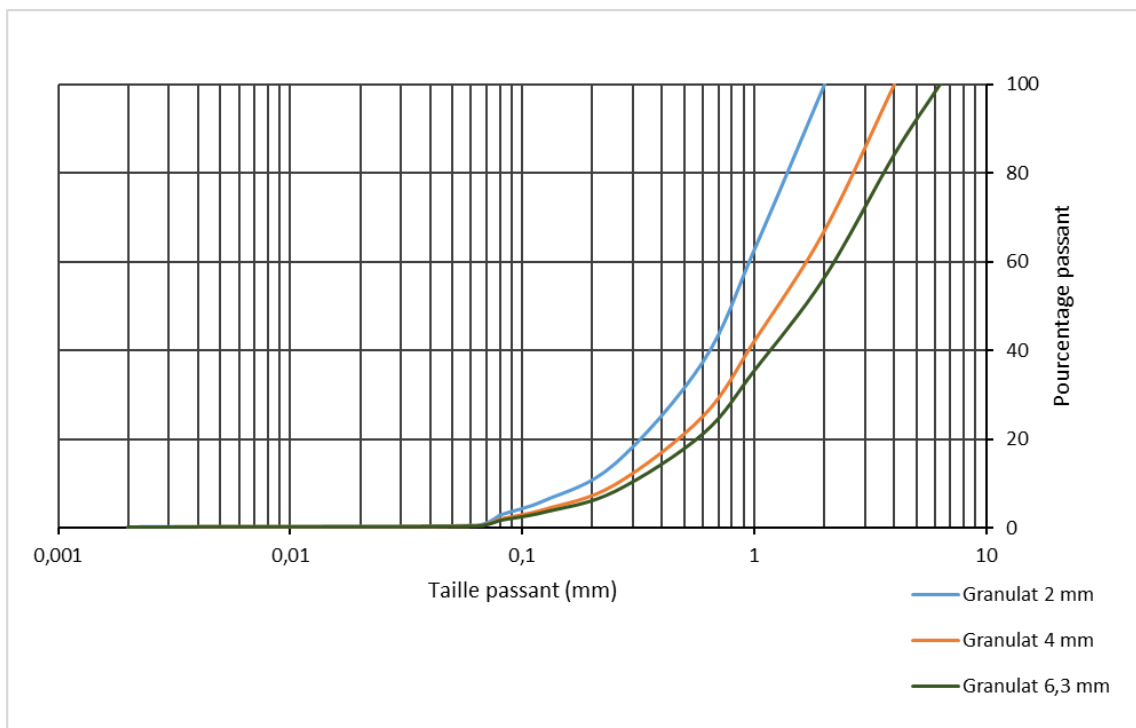


Fig. 111. Courbes granulométriques des granulats utilisés.

Pour chaque taille de granulat, la fabrication des éprouvettes a été réalisée selon 4 formulations : sans granulats, avec 12,5%, 25%, 40% et 60% de granulats en volume. Les courbes granulométriques des mélanges sont présentées à la Fig. 112.

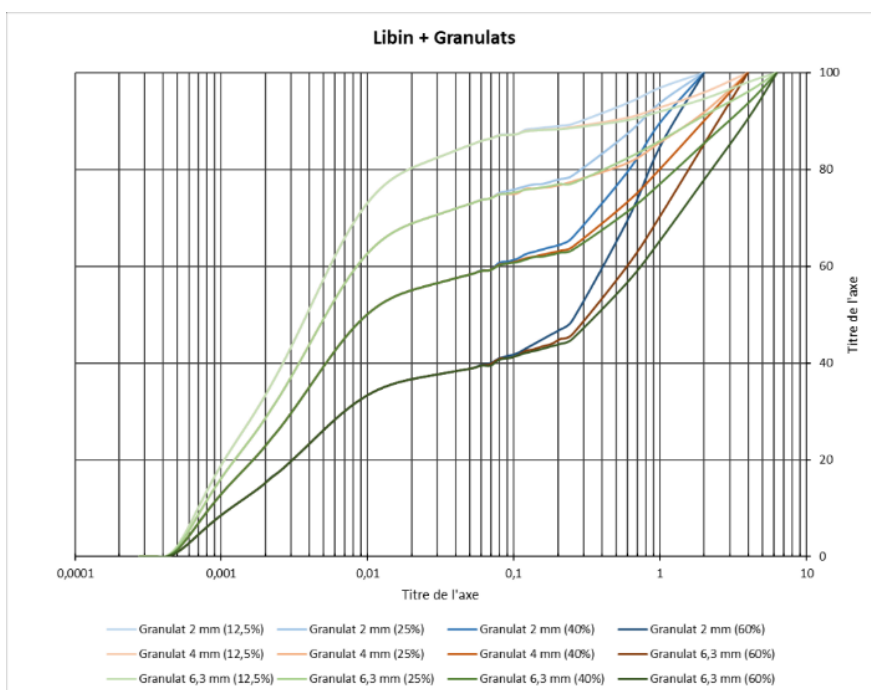


Fig. 112. Courbes granulométriques des mélanges.

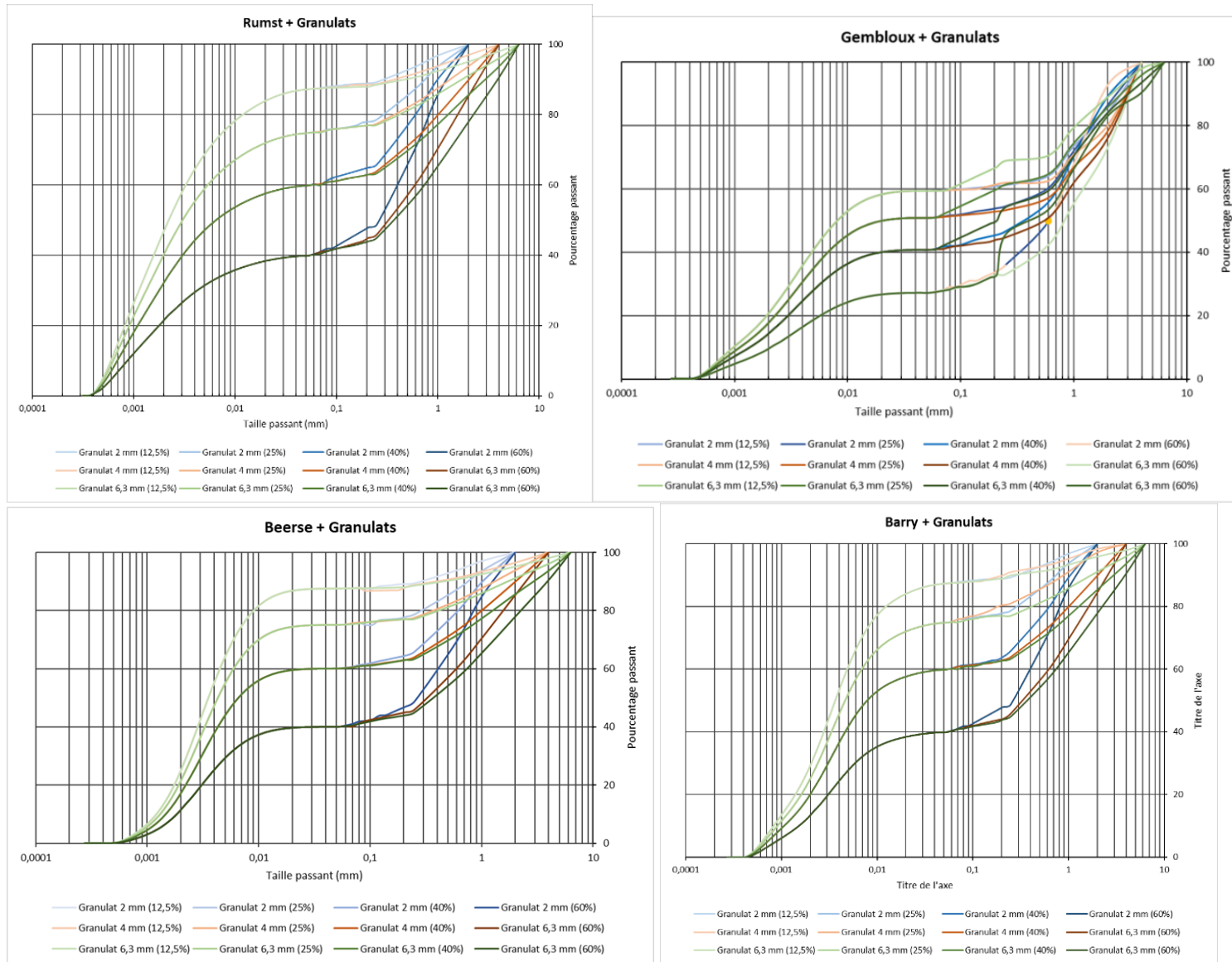


Fig. 112. (Suite). Courbes granulométriques des mélanges.

Nous avons optimisé la quantité d'eau et la pression de mise en forme nécessaires pour assurer les meilleures résistances des éprouvettes produites.

a1) Optimisation de la quantité d'eau ajoutée

L'eau favorise les effets lubrifiants et plastiques des argiles et facilite la compression et le démoulage. Sans l'eau, il était quasi-impossible de retirer l'éprouvette du moule de la presse hydraulique, car la pression de démoulage était trop élevée. La pression de démoulage diminuait avec la quantité d'eau ajoutée.

L'influence de la quantité d'eau ajoutée sur la résistance à la compression des BTC a été évaluée en partant de 3% d'eau ajoutée jusqu'à 10% d'eau, pour deux pressions de mise en forme, i.e., 100 et 200 kN. Les valeurs moyennes des résistances à la compression sont présentées au Tableau 77. Les valeurs moyennes des masses volumiques sont présentées au Tableau 78.

Échantillons	Résistance à la compression moyenne (MPa) pression de mise en forme 100 kN			Résistance à la compression moyenne (MPa), pression de mise en forme 200 kN		
	3 %	6 %	10 %	3 %	6 %	10 %
Libin	0,82	0,71	0,59	0,91	0,91	0,89
Gembloux	2,64	2,62	1,85	2,84	2,54	2,35
Beerse	9,94	9,04	5,10	11,27	8,87	4,45
Barry	10,90	10,31	8,00	14,59	11,08	6,39
Rumst	10,62	10,53	8,17	13,86	12,24	8,38

Tableau 77. Résistances à la compression moyennes (MPa) des différentes éprouvettes en fonction de la teneur en eau (Pression de mise en forme = 100 kN et 200 kN).

Échantillons	Masses volumiques moyennes (gr/cm ³) – Pression de mise en forme = 100 kN			Masses volumiques moyennes (gr/cm ³) – Pression de mise en forme = 200 kN		
	3 %	6 %	10 %	3 %	6 %	10 %
Libin	1,89	1,86	1,86	1,95	1,94	1,94
Gembloux	2,06	2,05	2,05	2,05	2,03	2,03
Beerse	2,07	1,99	1,96	2,18	2,10	1,94
Barry	2,04	1,98	1,88	2,09	2,05	1,93
Rumst	2,0	1,96	1,93	2,09	2,06	1,93

Tableau 78. Masses volumiques moyennes (gr/cm³) des différentes éprouvettes en fonction de la teneur en eau (Pression de mise en forme = 100 kN et 200 kN).

Le sol est composé de particules solides, d'eau et d'air. L'air permet les mouvements d'eau dans le sol. Dans le cas où il y a trop d'eau, il n'y a pas de compactage possible. Par contre, s'il y a trop peu d'eau, le frottement entre les particules est trop important et le compactage est inadéquat (Proctor, 1933).

Drnevich (2007) montre que lorsque la teneur en eau est faible, le sol est rigide et difficile à comprimer. Ainsi, la densité reste faible car la teneur en air reste haute. Lorsque la teneur en eau augmente, l'eau agit en lubrifiant les particules et en leur permettant de se disposer de la façon la plus dense possible. Ce qui diminue la quantité d'air et aboutit à des densités plus élevées. Lorsque la teneur en eau est encore augmentée, l'eau et l'air ont tendance à maintenir les particules du sol séparées, et à empêcher la diminution de la teneur en air et la consolidation,

car une partie importante de l'énergie de compactage est absorbée par l'eau incompressible et n'est donc pas communiquée aux grains de sol.

Les vides totaux augmentent donc avec la teneur en eau et de ce fait la masse volumique sèche du sol diminue. C'est ce que nous remarquons avec les échantillons. La masse volumique diminue avec l'augmentation de la teneur en eau, pour toutes les terres quel que soit l'énergie de mise en forme (Tableau 78). Ce qui se traduit par une diminution de la résistance à la compression (Tableau 77).

Camapum De Carvalho et al. (1987) montrent que les sols ayant une grande plasticité sont peu sensibles à la modification de la teneur en eau par compactage. La diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en eau pour l'échantillon de Beerse > à celui de Barry et > à celui de Rumst, car la plasticité Rumst > plasticité Barry > Plasticité Beerse (voir Tableau 70).

a2) Optimisation de la pression de mise en forme

Nous avons mesuré les résistances à la compression des éprouvettes comprimées à différentes pressions. Les 5 terres seules ont été utilisées. Elles ont été mélangées à 3 % d'eau puis comprimées à 100, 200, et 300 kN. 3 éprouvettes ont été fabriquées pour chaque mesure. Les valeurs moyennes des résistances à la compression et des masses volumiques sont présentées au Tableau 79.

Echantillons	Résistances à la compression moyennes (MPa)			Masses volumiques moyennes (gr/cm ³)		
	100 kN	200 kN	300 kN	100 kN	200 kN	300 kN
Libin	0,82	0,91	1,47	1,86	1,94	1,98
Gembloux	1,54	2,54	3,28	1,99	2,03	2,11
Beerse	9,94	11,27	14,89	2,07	2,18	2,27
Barry	10,90	14,59	18,06	1,98	2,09	2,14
Rumst	10,62	13,86	18,61	1,96	2,09	2,17

Tableau 79. Résistances à la compression moyennes (MPa) et masses volumiques moyennes (gr/cm³) des différentes éprouvettes.

Le compactage permet de densifier le sol en tassant les particules ensemble avec la réduction du volume d'air (Craig, 1987). L'augmentation de la pression de mise en forme de 100 à 300 kN permet d'augmenter la masse volumique et la résistance en compression de tous les échantillons (Tableau 79). Attom (1997) montre que l'augmentation de l'énergie de compaction permet de diminuer la teneur en eau optimale (plus l'énergie de compaction est importante, moins le besoin d'eau pour permettre la lubrification des grains est important) et d'augmenter la masse volumique. L'augmentation de la masse volumique augmente les points de contact entre les grains en diminuant la porosité. Cette augmentation de la masse volumique permet d'augmenter les résistances à la compression.

Les échantillons de Libin et Gembloux (non plastiques et peu cohésifs) ont une Rc plus faibles que les 3 autres échantillons. Pour ces derniers échantillons, la résistance à la compression est d'autant plus élevée que l'échantillon a une teneur élevée en argile (voir Tableau 70).

Dans la suite des tests avec les mélanges, la pression de mise en forme retenue est de 300 kN (Fig. 113), elle est celle qui a donné les meilleurs résultats. Les échantillons de cinq sites ont

été sélectionnés pour cette étude (voir III.1.3, Tableau 70). Un volume d'échantillon a été dosé pour être mélangé manuellement avec le granulat et l'eau. La quantité d'eau ajoutée est de 6%. Les meilleurs résultats d'optimisation de la quantité d'eau ont été obtenus avec 3% d'eau. Cependant nous avons retenu 6% pour les mélanges avec le granulat, car la pression de démoulage avec 3% d'eau était plus élevée et le démoulage plus long.

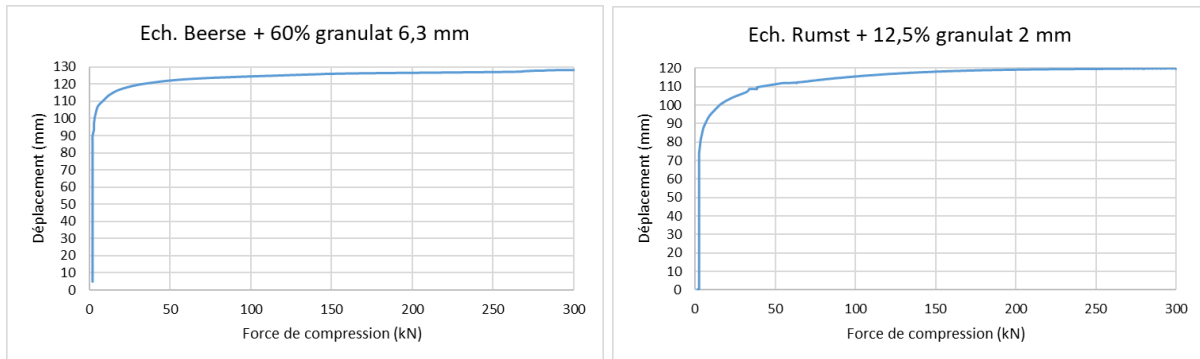


Fig. 113. Exemples de courbes de mise en compression à l'aide de la presse hydraulique.

b) Caractérisation des mélanges

b1) Résistance à la compression

Trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque mélange. Après démoulage, les éprouvettes sont pesées et mesurées avant d'être séchées à l'air libre à $21^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 1 semaine jusqu'à séchage complet. Le séchage complet a été atteint lorsque la masse mesurée entre 2 jours successifs ne change pas. Les masses volumiques des éprouvettes sont présentées au Tableau 80.

La masse volumique des éprouvettes augmente avec l'ajout de granulats pour tous les échantillons. En augmentant la teneur et la taille des granulats on augmente la masse de l'échantillon plus significativement que son volume.

La masse volumique diminue avec le pourcentage d'argile (Proctor, 1933). Zhong-Sen (2015) montre que la masse volumique sèche diminue avec l'augmentation de la limite de liquidité (LL). Les argiles plastiques sont plus compactables. $LL \text{ Rumst} > LL \text{ Barry} > LL \text{ Beerse}$, d'où les masses volumiques $\text{Beerse} > \text{Barry} > \text{Rumst}$.

Les résistances en compression (R_c) des éprouvettes sont présentées au Tableau 81. L'échantillon de Libin atteint une R_c de 1,91 MPa sans ajout de granulat, et atteint une valeur maximale de 3,45 MPa avec 60% de granulats de diamètre 6,3 mm. Nous pouvons conclure que l'ajout de granulat améliore la R_c de cet échantillon. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le granulat 6,3 mm.

L'échantillon de Gembloux atteint une R_c de 2,83 MPa sans ajout de granulat, et atteint une valeur maximale de 3,69 MPa avec 60% de granulats de diamètre 4 mm. L'ajout de granulat 2 mm ne permet pas d'améliorer la R_c . Les meilleurs résultats sont obtenus avec le granulat 4 mm.

Les granulats agissent dans le cas de ces 2 échantillons en donnant un squelette au matériau.

Échantillons	% granulat ajouté	Masse volumique (gr/cm ³)		
		Granulat 2 mm	Granulat 4 mm	Granulat 6,3 mm
Libin	0	2,01		
	12,5	2,05	2,06	2,07
	25	2,10	2,12	2,25
	40	2,18	2,20	2,33
	60	2,22	2,29	2,38
Gembloux	0	2,11		
	12,5	2,25	2,20	2,23
	25	2,27	2,24	2,29
	40	2,31	2,28	2,35
	60	2,35	2,30	2,36
Beerse	0	2,14		
	12,5	2,31	2,23	2,26
	25	2,31	2,30	2,31
	40	2,31	2,31	2,32
	60	2,32	2,31	2,34
Barry	0	2,06		
	12,5	2,22	2,22	2,22
	25	2,24	2,26	2,26
	40	2,28	2,26	2,27
	60	2,29	2,30	2,30
Rumst	0	2,08		
	12,5	2,19	2,23	2,24
	25	2,20	2,24	2,25
	40	2,22	2,26	2,27
	60	2,25	2,30	2,30

Tableau 80. Masses volumiques moyennes des différentes éprouvettes.

Les échantillons de Beerse, Barry et Rumst montrent une augmentation de la Rc avec l'augmentation du pourcentage de granulat par rapport à l'échantillon sans ajout de granulats. Ensuite la Rc diminue en deçà de la valeur de l'échantillon sans ajout de granulats. Les échantillons de Beerse, Barry et Rumst montrent tous une diminution de la Rc avec l'augmentation du pourcentage de granulat de 12,5 à 60 % et du diamètre des granulats de 2 à 6,3 mm. Les meilleurs résultats pour ces 3 échantillons sont obtenus avec les granulats 2 mm.

Pour une même taille et une même quantité de granulat ajouté, l'échantillon de Beerse a une valeur de Rc inférieure à celles des échantillons de Barry et de Rumst, car l'échantillon de Rumst contient plus de sable au départ (voir Tableau 70). Ben Ayed et al. (2011) montrent que la résistance à la compression augmente en fonction du pourcentage d'argile, dû au fait que l'argile s'infiltré dans les pores de la matrice en formant un nombre important de connexions rigides liant les grains plus grossiers.

Échantillons	% Granulat ajouté	Résistance à la compression (MPa)		
		Granulat 2 mm	Granulat 4 mm	Granulat 6,3 mm
Libin	0	1,91		
	12,5	1,72	2,29	2,5
	25	2,23	2,4	2,47
	40	2,04	2,58	2,61
	60	3,25	3,22	3,45
Gembloux	0	2,83		
	12,5	2,1	2,82	2,81
	25	2,23	2,95	3,21
	40	2,25	2,98	3,36
	60	2,74	3,69	3,55
Beerse	0	9,69		
	12,5	11,69	11,29	11,09
	25	10,17	9,66	9,40
	40	8,69	7,78	7,68
	60	7,57	6,42	6,17
Barry	0	8,95		
	12,5	12,53	12,41	11,97
	25	11,39	11,31	10,76
	40	9,88	9,66	8,24
	60	8,23	8,84	7,72
Rumst	0	11,71		
	12,5	14,91	14,79	14,19
	25	13,04	12,7	10,51
	40	11,44	10,56	10,36
	60	10,22	9,53	9,54

Tableau 81. Résistances à la compression moyennes des différentes éprouvettes.

Sarsby (2013) montre que les argiles plastiques donnent une meilleure compacité, et de ce fait une meilleur Rc. Les meilleurs résultats sont dans notre cas obtenus avec l'échantillon de Rumst, plus plastique.

Proctor (1933) a démontré que le compactage est fonction de la granulométrie. Un sol à granulométrie mal classée a une densité plus faible qu'un sol bien classé, car dans ce dernier cas les particules ne peuvent pas remplir tous les vides. La résistance à la compression du sol à granulométrie bien classée sera donc meilleure que celui à granulométrie mal classée. Plus on augmente la taille des granulats et plus on augmente l'étalement de la courbe granulométrique (voir Fig. 112), empêchant les particules fines de combler tous les vides et diminuant ainsi la Rc du matériau (Proctor, 1933 ; Taghiloha, 2013). En d'autres mots, lorsque les pourcentages des grosses particules augmentent dans les mélanges, les échantillons ont davantage de vides. Ceci expliquerait la diminution de la Rc des échantillons de Barry, Beerse et Rumst avec l'augmentation de la taille des granulats.

L'ajout de fines des granulats au sol peut modifier le pH. Cette modification du pH peut conduire à certaines minéralisations (Le Tacon, 1978). Afin de vérifier si l'ajout de granulat n'aboutissait pas à la néoformation de certains minéraux pouvant expliquer l'augmentation de

la résistance à la compression, des analyses minéralogiques par DRX ont été réalisées sur certains mélanges (Fig. 114). Les diffractogrammes des mélanges ont été comparés à ceux des granulats et des 5 échantillons sélectionnés (Fig. 115a, 115b). L'ajout de granulat n'aboutit pas à la néoformation des nouveaux minéraux sur la période testée (7 jours en moyenne).

b2) Résistances à l'action de l'eau

Absorption d'eau par capillarité

4 échantillons ont été testés par absorption d'eau par capillarité (Libin, Gembloux, Beerse et Rumst). De façon générale, la vitesse d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du pourcentage de granulats (la diminution du pourcentage d'argile – Fig. 116). Walker et Stace (1997) justifient cela par le fait qu'une plus grande proportion d'eau est adsorbée par les minéraux argileux et non par les granulats.

Les vitesses d'absorption d'eau sont plus importantes pour les échantillons de Rumst et Beerse riches en argile sensible à l'eau (smectite) que ceux de Gembloux et Libin, plus riches en illite et kaolinite (cfr Tableau 70).

Nous avons également remarqué durant ce test que l'érosion de la surface d'évacuation de l'eau (Fig. 117) était plus importante avec l'augmentation du pourcentage de granulat. En effet, les argiles diminuent l'érosion des particules par lavage Tannous (1995). Cette érosion n'a pas été mesurée.

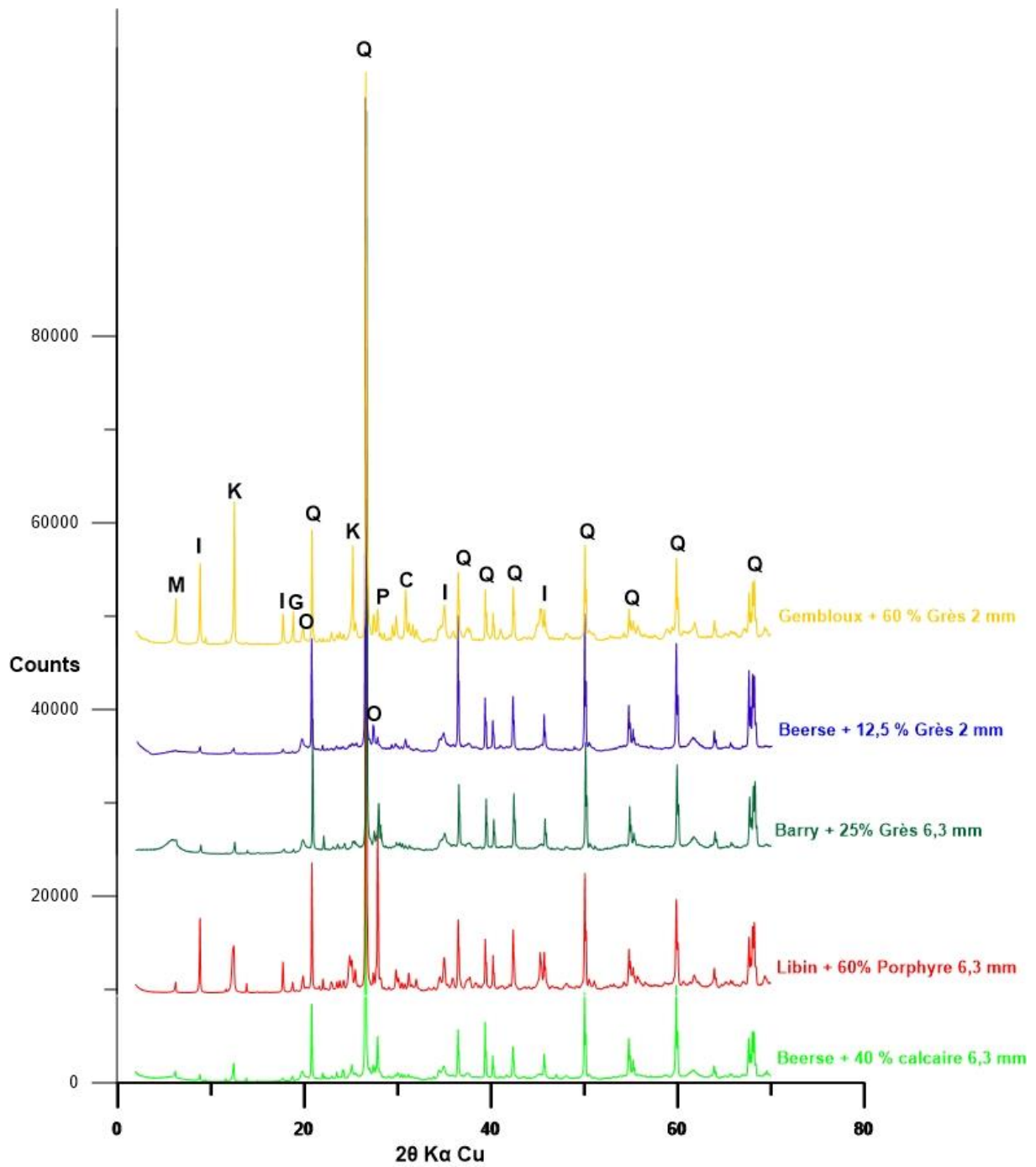


Fig. 114. Diffractogrammes des quelques éprouvettes. O= K-felspath, K= kaolinite, Q= quartz, M= mica, P= plagioclase, C= calcite, G= gypse, I= illite.

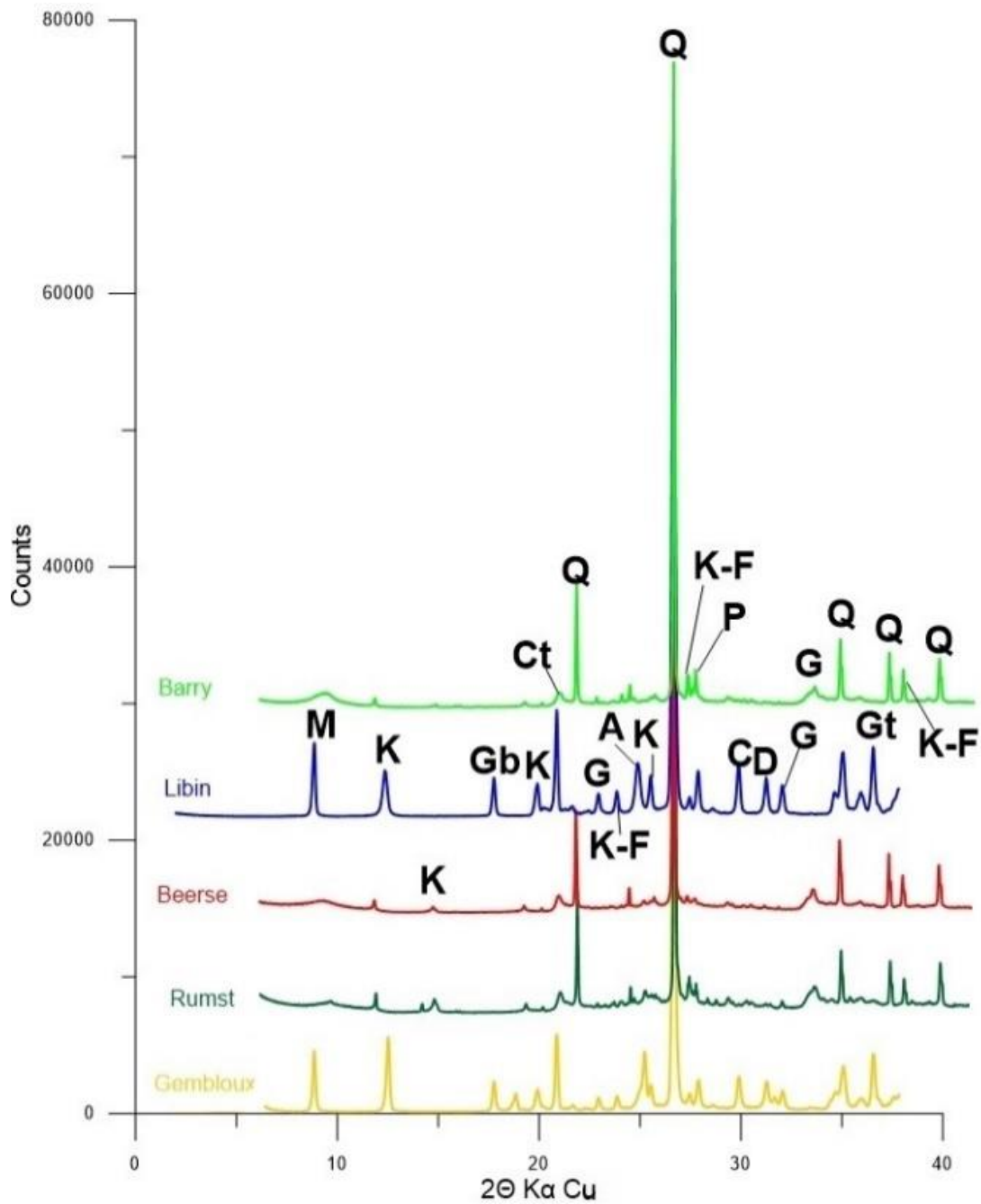


Fig. 115a. Diffractogrammes des échantillons de terre utilisés. Ct= argile totale, K-F=P= K-feldspath, K= kaolinite, Q= quartz, M= mica, P= plagioclase, A= anatase, Gb= gibbsite, C= calcite, D= dolomite, G= gypse.

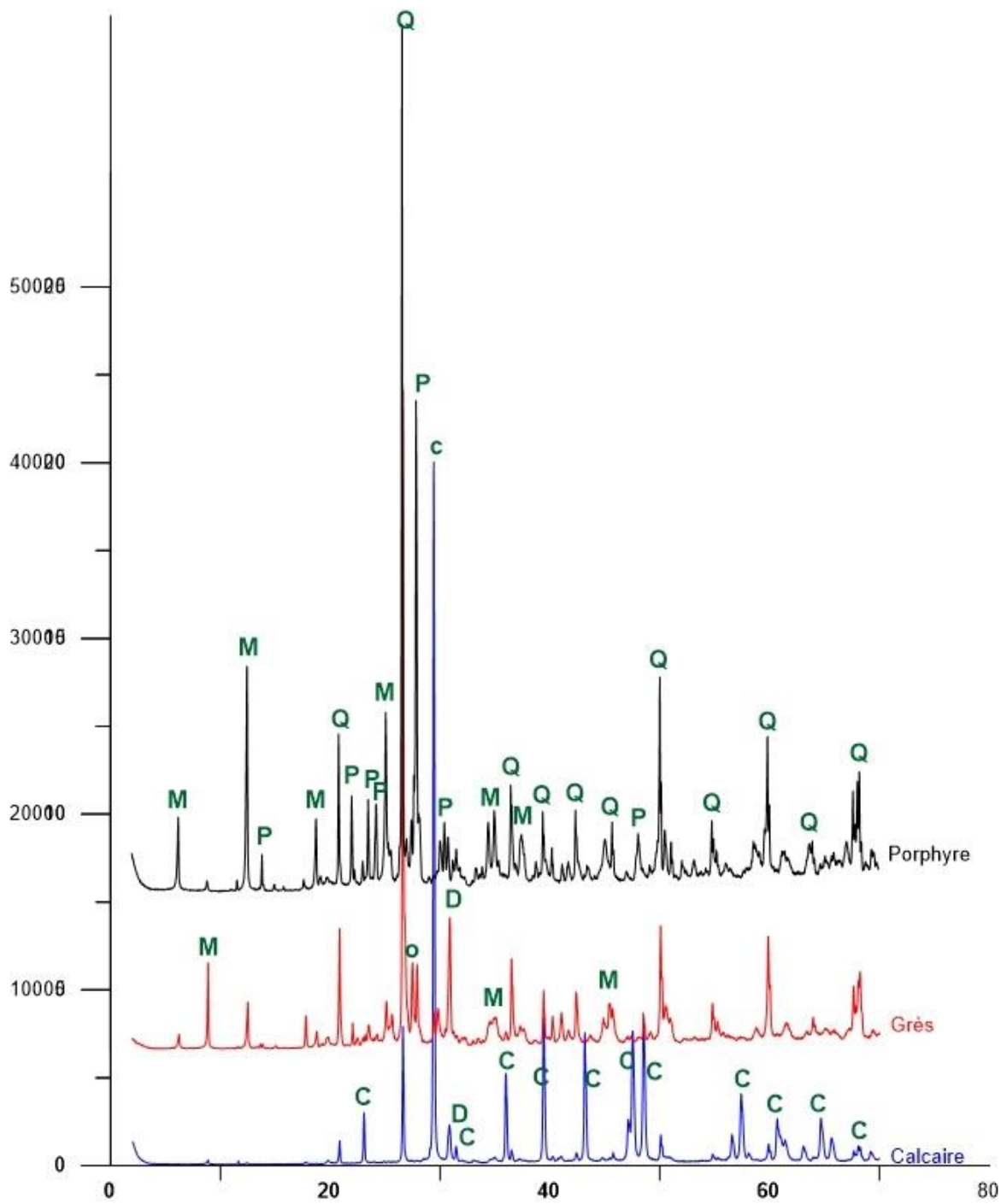


Fig. 115b. Diffractogrammes des échantillons de granulats utilisés. Q= quartz, M= mica, P= plagioclase, C= calcite, D= dolomite.

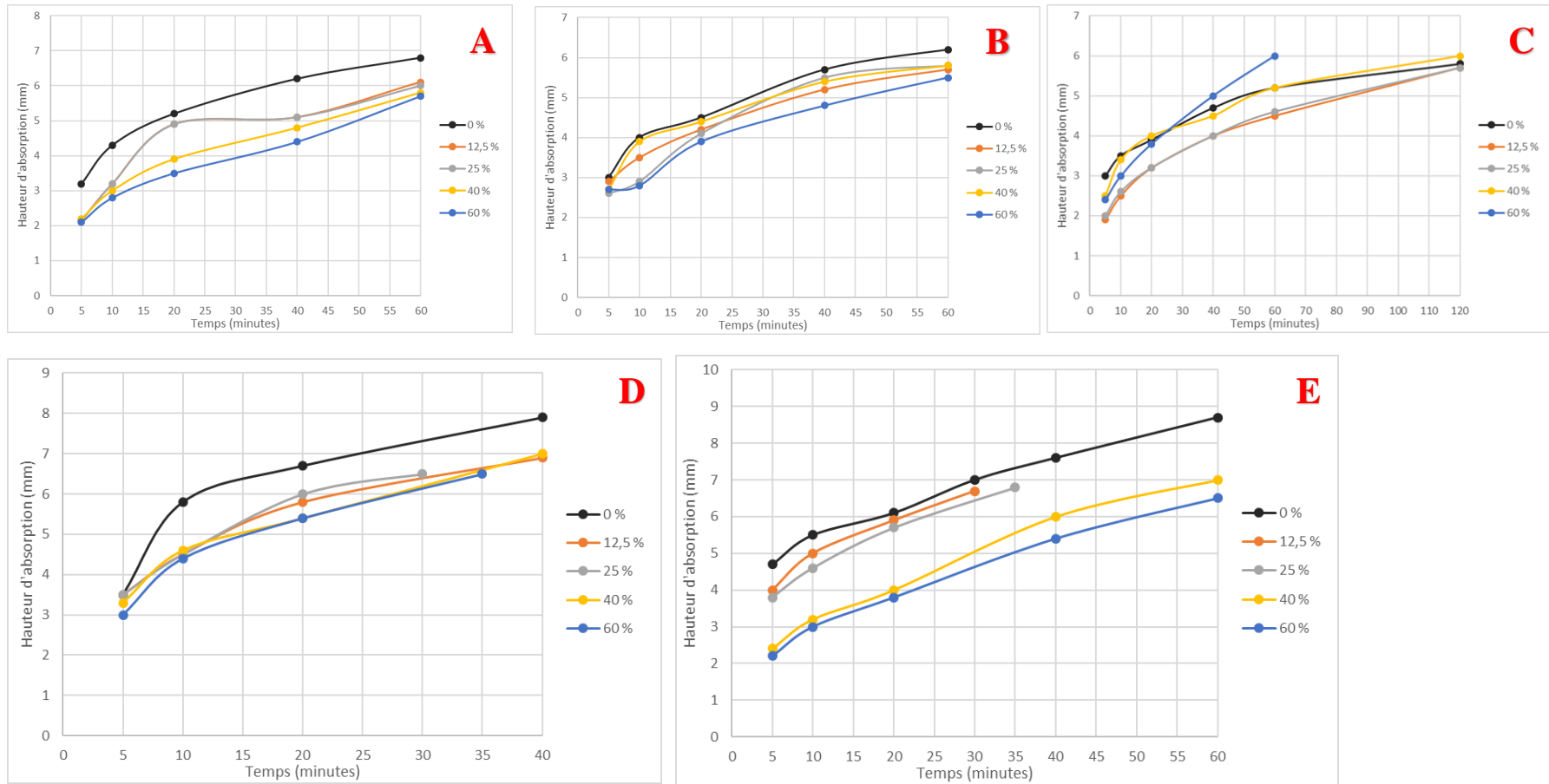


Fig. 116. Résultats des absorptions capillaires. A : Libin + granulats 2 mm ; B : Gembloux + granulats 4 mm ; C : Gembloux + granulats 6,3 mm ; D : Beerse + granulats 2 mm ; E : Rumst + granulats 2 mm.



Fig. 117. Surface d'évacuation d'eau lors du test d'égouttement accéléré.

Test d'immersion complète

Aucun échantillon n'a satisfait à ce test. Toutes les éprouvettes testées se sont désagrégées complètement en moins de 80 minutes. Néanmoins ce test a permis de démontrer que la vitesse de désagrégement du matériau était moins élevée dans l'échantillon plus riche smectite (Rumst) que ceux plus riches en illite et kaolinite (Libin et Gembloux). Et que la vitesse d'érosion par désagrégement augmentait avec l'augmentation du pourcentage de granulat (Tableau 82).

Lorsque l'échantillon est immergé dans l'eau, les argiles absorbent une grande quantité d'eau, en fonction de leur nature. La force de liaison mécanique entre l'argile et les particules grossières (sable, gravier) diminue, entraînant une réduction de la cohésion interne du matériau (Morton et Buckman, 2008). Cela se traduit par un désagrégement du matériau. Cette vitesse de désagrégement est d'autant plus rapide que la cohésion est faible.

ARS (1975) et Evans (1980) indiquent que les terres avec trop peu d'argile ont une faible cohésion et donc une faible stabilité structurale ; qu'une argile sableuse ou une argile constituent les matériaux les plus durables et que le limon argileux est moins durable que le sable argileux.

Échantillons	% granulat 2 mm ajouté	Temps pour se désagréger complètement (minutes)
Libin	0	37
	12,5	30
	25	26
	40	23
	60	22
Gembloux	0	32
	12,5	25
	25	21
	40	18
	60	17
Rumst	0	75
	12,5	56
	25	47
	40	45
	60	35

Tableau 82. Résultat de l'immersion complète.

Test d'égouttement accéléré

Les valeurs de la profondeur de la perforation créée par l'égouttement sont présentées au Tableau 83.

Échantillons	% granulat ajouté	Granulat 2 mm	Granulat 4 mm	Granulat 6,3 mm
Libin	0	56		
	12,5	EP	EP	EP
	25	EP	EP	EP
	40	EP	EP	EP
	60	EP	EP	EP
Gembloux	0	22		
	12,5	n.d	19	21
	25	n.d	16	17
	40	n.d	20	31
	60	n.d	24	27
Beerse	0	12		
	12,5	11	13	n.d
	25	12	12	n.d
	40	11	11	n.d
	60	10	10	n.d
Barry	0	9,5		
	12,5	9	8	9,5
	25	8	7	5,5
	40	6	5	4,5
	60	3	4	4

Tableau 83. Valeurs des profondeurs percées par l'égouttement d'eau (mm). EP : échantillon perforé ; n.d : non déterminé.

De façon générale, la profondeur percée par l'eau sur les éprouvettes diminue avec l'augmentation du pourcentage de granulat. Crowley (1998) a effectué des tests de goutte à goutte sur cinq terres à différents teneurs en argile. Ses résultats ont montré une augmentation de la profondeur du trou percé avec l'augmentation de la teneur en argile. En effet, les particules de granulats à la surface du bloc empêchent l'eau de perforer le bloc, contribuant ainsi à la diminution de l'absorption d'eau.

L'échantillon de Libin n'a pas résisté à ce test, à l'exception du mélange sans ajout de granulat. Cependant ce dernier reste très érodable ($D > 30$ mm). L'échantillon de Barry résiste mieux à l'égouttement que ceux de Beerse, Gembloux et Libin. Danso et al. (2015) suggèrent que les sols avec une plasticité élevée résistent mieux à l'impact des gouttes de pluie que ceux avec une plasticité faible. Car, la plasticité améliore les propriétés de liaison. La plasticité Barry $>$ plasticité Beerse $>$ plasticité Gembloux $>$ plasticité Libin (cfr Tableau 70).

La diminution de la profondeur de la perforation créée par l'égouttement peut s'expliquer aussi par l'augmentation de la densité (cfr Tableau 80). Tannous (1995) a démontré une augmentation exponentielle du temps de pénétration de l'eau dans les BTC avec l'augmentation de la densité.

b3) Résistance aux cycles gel-dégel

Les 5 matériaux argileux sélectionnés contenant les granulats 2 et 4 mm ont été testés. Les échantillons de Barry, Rumst et Beerse n'ont pas satisfait au test de gel-dégel. Dès le premier cycle, toutes les éprouvettes étaient fragmentées. La fragmentation était d'autant plus importante que l'échantillon contenait moins de granulats (Fig. 118). Il n'a donc pas été possible de mesurer les variations dimensionnelles de ces échantillons. Les mélanges produits avec ces 3 terres ne sont donc pas destinés à subir les effets du gel-dégel.



Fig. 118. Aspect de l'échantillon de Beerse après le gel-dégel. À gauche, mélange avec 12,5% de granulats 2 mm, à droite, mélange avec 60% de granulats 4 mm.

Les échantillons de Libin et Gembloux ont mieux résisté aux cycles de gel-dégel. Les échantillons de Libin se sont tous fissurés après 2 cycles de gel-dégel. Alors que les échantillons de Gembloux contenant 40 et 60 % de granulats 4 mm se sont fissurés seulement après 3 cycles de gel-dégel.

Il existe une relation entre la résistance au gel-dégel et l'absorption d'eau. Plus un échantillon est susceptible d'absorber l'humidité, plus il est affecté par le cycle gel-dégel (Kenneth, 2014).

L'échantillon de Beerse (plus riche en smectite) a une vitesse d'absorption d'eau plus importante que l'échantillon de Libin et résiste moins au gel-dégel que ce dernier.

La résistance au gel-dégel plus importante des échantillons de Libin et Gembloux peut s'expliquer par leur teneur plus élevée en minéraux argileux moins sensible à l'eau (kaolinite et illite). Il existe également une relation entre la résistance au gel-dégel et la granulométrie. Par exemple, une terre sableuse présente un risque de gel-dégel inférieur à celui d'une terre argileuse, car les micropores plus gros peuvent tolérer plus facilement l'expansion de l'eau (Minke, 2000). Nous remarquons donc que la résistance au gel-dégel augmente avec l'ajout de granulats.

III.4 Formulations des matériaux à partir des échantillons collectés à Kinshasa et au Kongo Central

Les matériaux argileux des régions de Kinshasa et du Kongo-Central sont des produits d'altération des roches du Sous-groupe Schisto ou du Sous-groupe de l'Inkisi. Leurs propriétés sont résumées au Tableau 76 (voir III.2.3). Ces 2 matériaux ont été utilisés pour ces formulations. Les formulations terre-bagasse et terre – cendre de bagasse – chaux ont été faites avec les matériaux de Kwilu Ngongo. Les formulations terre-sable et terre-concassé ont été faites avec les matériaux de Kinshasa.

Les matériaux prélevés à Kinshasa et au Kongo Central l'ont été en faibles quantités. Ils n'auraient pas suffi pour fabriquer des BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm ou des éprouvettes cubiques. D'où le recours aux éprouvettes 4 x 4 x 16 cm, plus petites.

III.4.1 Formulation en terre-bagasse

Les propriétés de l'échantillon utilisé sont présentées au Tableau 84.

La bagasse de canne à sucre a été utilisée dans la stabilisation de l'échantillon de Kwilu Ngongo. La canne à sucre est une graminée tropicale herbacée. La bagasse est le résidu fibreux de la canne à sucre obtenue après l'extraction du jus. La bagasse de la sucrière est utilisée comme combustible pour la production d'électricité. Les quantités excédentaires sont redistribuées à la briqueterie de Kwilu Ngongo qui l'utilise comme combustible pour cuire les briques. Malgré ces utilisations, il reste un excédent de bagasses. Les fibres de bagasse sont employées dans cette étude afin de déterminer s'il est possible de les revaloriser pour stabiliser des blocs de terre crue.

Propriétés	Unité	Échantillon du Schisto-Calcaire (site B)
Perte au feu	%	6,3
Limite d'Atterberg	%	
Liquidité		29,1
Plasticité		20,9
Indice de plasticité <i>IP</i>		8,2
Granulométrie (laser)	%	
< 2 µm (Argile)		6,2
< 63 µm (Limon)		63,8
< 100 µm (sable très fin)		84,8
< 250 µm (sable fin)		97,6
< 500 µm (sable moyen)		99,5
< 1 mm (sable grossier)		100
Minéralogie	%	
Quartz		55
Plagioclase		1
Orthose		11
Goethite		8
Minéraux argileux		25
<i>Illite</i>		8
<i>Chlorite</i>		/
<i>Kaolinite</i>		92

Tableau 84. Propriétés de la terre utilisée pour la formulation en terre – bagasse.

La composition moyenne de la bagasse est de 45% de fraction fibreuse, 50% d'eau et 5% de fraction inorganique. La composition chimique de la matière fibreuse dépend des variétés de la canne à sucre. Elle est constituée de polymères de lignine (15 à 35%), hémicellulose (25 à 35%) et de cellulose (30 à 50%) (ICIDCA, 1990 ; Cuba9, 1990 ; Dinu, 2006 ; Berndt et Hodzic, 2007). La fraction inorganique soluble se compose de molécules de saccharose résiduel non extraites et de cires (ICIDCA, 1990).

Nous avons effectué des tests de flexion et de compression sur des mélanges de terre et de bagasse. La terre a été mélangée avec 1%, 2,5%, 5% ou 7,5% en poids de bagasse (Tableau 85). Les résistances à la flexion (*Rf*) et à la compression (*Rc*) augmentent avec l'ajout de bagasse. La résistance à la flexion passe de 0,66 MPa sans addition de bagasse à 0,99 MPa avec 7,5% de bagasse dans le mélange. La résistance à la compression augmente d'une valeur initiale de 2,54 à 3,14 MPa avec l'ajout de bagasse. Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'ajout de 7,5% de bagasse (Tableau 85).

Mélanges	Masse échantillon [gr]	Masse bagasse [gr]	% eau	Rf moyenne (MPa)	Rc moyenne (MPa)
I1	508,10	0	18	0,66	2,54
I2	500,00	5,00 (1%)	19	0,84	2,80
I3	495,17	12,38 (2,5%)	21	0,91	2,92
I4	496,00	24,80 (5%)	22	0,93	2,95
I5	450,00	33,75 (7,5%)	25	0,99	3,14

Tableau 85. Quantités mélangées et résistances à la flexion et à la compression des éprouvettes terre – bagasse.

L'augmentation de la résistance à la compression avec l'ajout des fibres est souvent justifiée par la réduction de la taille des fissures de retrait (Ramaswamy et al., 1983 ; Ziegler et al., 1998 ; Filho et al., 2000). Les fibres limitent la formation des microfissures dues au retrait de séchage, et empêchent leur propagation (Vergas et al., 1986). Millogo et al. 2014 justifient l'augmentation de la résistance à la flexion avec l'ajout de fibre par la résistance à la traction élevée des fibres et leur adhérence à la matrice argileuse.

Par contre, l'augmentation de la teneur en fibres au-delà d'une valeur optimale diminue la contrainte d'adhérence des fibres à la terre. Cela conduit à une diminution de la résistance à la compression (Khedari et al., 2005). Vergas et al. (1986) considèrent cette valeur à 8 % en poids. Dans notre étude la valeur maximale de fibre ajoutée a été limitée à 7,5.

III.4.2 Formulation terre – cendre de bagasse – chaux

Les propriétés de l'échantillon utilisé sont présentées au Tableau 86.

Propriétés	Échantillon du Schisto-Calcaire (site A)
Perte au feu (%)	10,6
Limite d'Atterberg (%)	
Liquidité	42,0
Plasticité	32,3
Indice de plasticité <i>IP</i>	9,7
Granulométrie laser (%)	
< 2 µm	5,5
< 63 µm	90,5
< 100 µm	100
Minéralogie (%)	
Quartz	24
Plagioclase	/
Orthose	2
Goethite	18
Hématite	1
Magnétite	3
Minéraux argileux	52
<i>Illite</i>	12
<i>Chlorite</i>	2
<i>Kaolinite</i>	84

Tableau 86. Propriétés de la terre utilisée pour la formulation en terre – cendre de bagasse – chaux.

Dans cette étude, seule la chaux hydraulique a été utilisée.

La vitesse globale de la réaction pouzzolanique dans les liants dépend de nombreux facteurs (Hewlett, 2004) : la quantité de pouzzolane dans le liant ; la quantité de SiO₂ dans la pouzzolane ; la nature des phases actives dans la pouzzolane ; la surface spécifique de la pouzzolane ; les propriétés physiques et chimiques de la chaux ; la durée de durcissement ; la température ; le rapport eau/solide.

D'une manière générale, la teneur en silice (SiO₂) augmente lorsque la température et/ou la durée de combustion augmente, et lorsque la perte au feu, liée à la quantité de carbone, diminue

(Sabuni, 1995, Lima et al., 2012). Un changement de couleur est observé en fonction de la teneur en carbone (allant du noir vers le blanc, voir le rose pâle lorsqu'il n'y a plus la présence de carbone).

Une cendre pouzzolanique doit contenir de la silice amorphe (Feng et al., 2004). Durant la calcination, la cendre peut se cristalliser donnant des faibles propriétés pouzzolaniques. Plusieurs recherches ont montré que pour l'éviter, la température de combustion ne doit pas excéder 600°C (Ajay et al., 2009 ; Basika et al., 2015).

Nous avons effectué une représentation qualitative des phases amorphes et cristallines par DRX de la cendre calcinée (Fig. 119). Le spectre présente des raies correspondant aux distances inter-réticulaires du quartz, de la cristobalite, de l'hématite, de la mullite et du carbonate de potassium. On remarque que la cendre contient peu de silice amorphe par rapport à la silice cristalline (quartz). Ceci s'explique par la haute température (>600°C) atteinte dans le four lors de la cuisson des briques. Cette cendre est également contaminée par des éléments provenant des briques. D'où des traces de la mullite et de l'hématite.

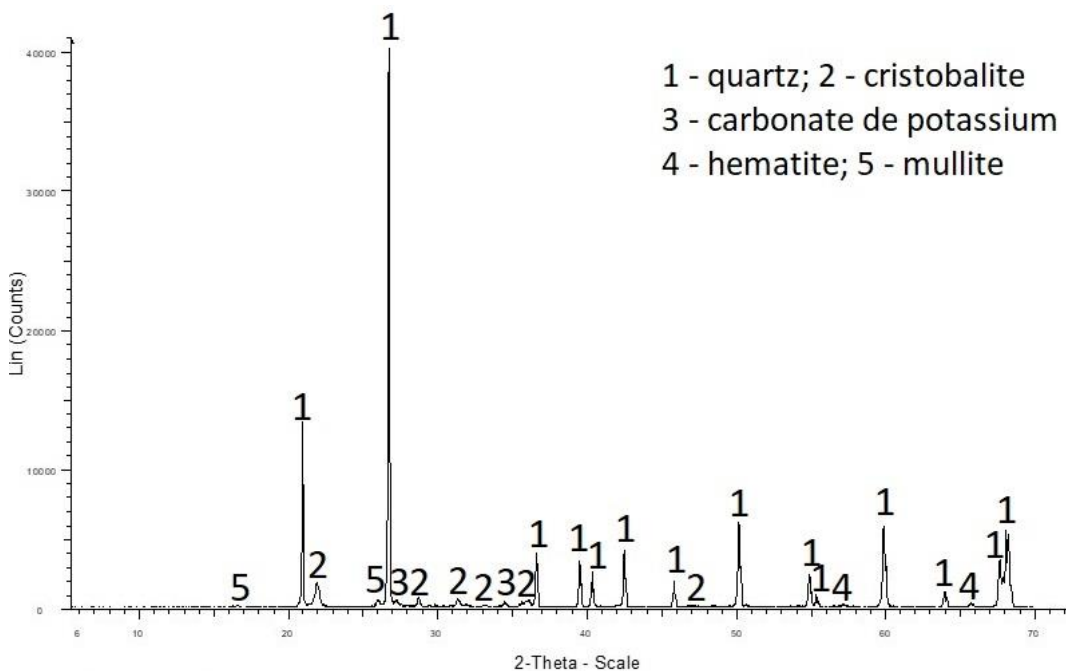


Fig. 119. Diffractogramme de la cendre de bagasse.

La surface spécifique de la cendre influence sa réaction pouzzolanique avec la chaux. Elle est plus importante lorsque la surface spécifique augmente (Feng et al., 2004). La granulométrie de la cendre a été réalisée après un tamisage manuel (Tableau 87).

Tamis (µm)	500	425	300	250	212	150	106	75	63	53
Refus cumulé (%)	5,8	11,2	26,9	35,3	46,4	60,6	77,4	89,1	95,1	97,6

Tableau 87. Distribution granulométrique de la cendre de bagasse.

Hailu et Biruku (2012), recommandent que 50% de la cendre de bagasse à utiliser comme pouzzolane aient un diamètre inférieur à 40 µm. Nous remarquons que la cendre calcinée a une granulométrie très grossière liée à la présence de débris de briques cuites.

Les mélanges ont été réalisés selon différentes proportions présentées au Tableau 88. Les éprouvettes ont été conservées sous cure durant 14 jours dans un sac en plastique, et dans une pièce dont la température est maintenue à 21 ± 2 °C et l'humidité relative à 60 ± 10 %.

Les valeurs des résistances à la flexion (Rf) et à la compression (Rc) sont présentées au Tableau 88. L'ajout de la cendre de bagasse seule ou associée à la chaux n'augmente pas suffisamment la résistance du matériau. Ceci s'explique par le fait que la cendre obtenue contient peu de silice amorphe et a une granulométrie très grossière. Elle est donc peu pouzzolanique. Elle interagit alors comme un simple stabilisant physique en modifiant la taille des particules de l'échantillon. Cette cendre n'est donc pas un bon stabilisant.

Mélange	Masse échantillon (gr)	% cendre (gr)	% chaux (gr)	% eau (gr)	Rf moyenne (MPa)	Rc moyenne (MPa)
II1	513	0	0	24	0,40	1,02
II2	505	6	6	27	0,44	1,67
II3	450	8	8	30	0,43	1,37
II4	450	12	12	34	0,47	1,48
II5	600	6	0	n.d	0,46	1,51
II6	600	0	6	n.d	0,79	2,30

Tableau 88. Quantités mélangées et résistances à la flexion et à la compression des éprouvettes terre – cendre de bagasse - chaux. n.d = non déterminé.

On observe une légère augmentation des résistances à la flexion et à la compression qui peut être due à la réaction pouzzolanique ou à la chaux seule. Des essais complémentaires seraient à réaliser. La stabilisation à la chaux seule est une perspective intéressante pour cette terre, car elle augmente la résistance du matériau.

Un matériau ayant une résistance à la compression de 1,3 Mpa peut être utilisé en maçonnerie. La valeur souhaitée de la résistance à la flexion des briques de terre crue à utiliser en maçonnerie est de 0,4 Mpa (Jaime et al. 2012).

III.4.3 Formulations terre-sable et terre-concassé

L'échantillon utilisé provient de l'altération *in situ* des roches du Sous-groupe des grès de l'Inkisi. Un échantillon a été prélevé dans la province de Kinshasa. Il s'agit d'une terre largement présente dans la partie nord-ouest de la région. Ses caractéristiques sont présentées au Tableau 89.

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire prélevé le long du fleuve Congo. Il s'agit d'un sable dont la distribution de la taille des particules est donnée à la Fig. 120. Le concassé (granulat) utilisé provient de fines de broyage du grès de l'Inkisi appelées localement « poussière ». Sa plage de répartition granulométrique est représentée à la Fig. 120.

Propriétés	Échantillon de l'Inkisi
Perte au feu (%)	10,6
Limite d'Atterberg (%)	
Liquidité	34
Plasticité	23
Indice de plasticité <i>IP</i>	11
Granulométrie laser (%)	
< 2 µm	7
< 63 µm	77
< 100 µm	100
Minéralogie (%)	
Quartz	42
Plagioclase	/
Orthose	/
Goethite	/
Hématite	/
Magnétite	/
Minéraux argileux	52
<i>Illite</i>	12
<i>Chlorite</i>	2
<i>Kaolinite</i>	84

Tableau 89. Propriétés de la terre de l'Inkisi.

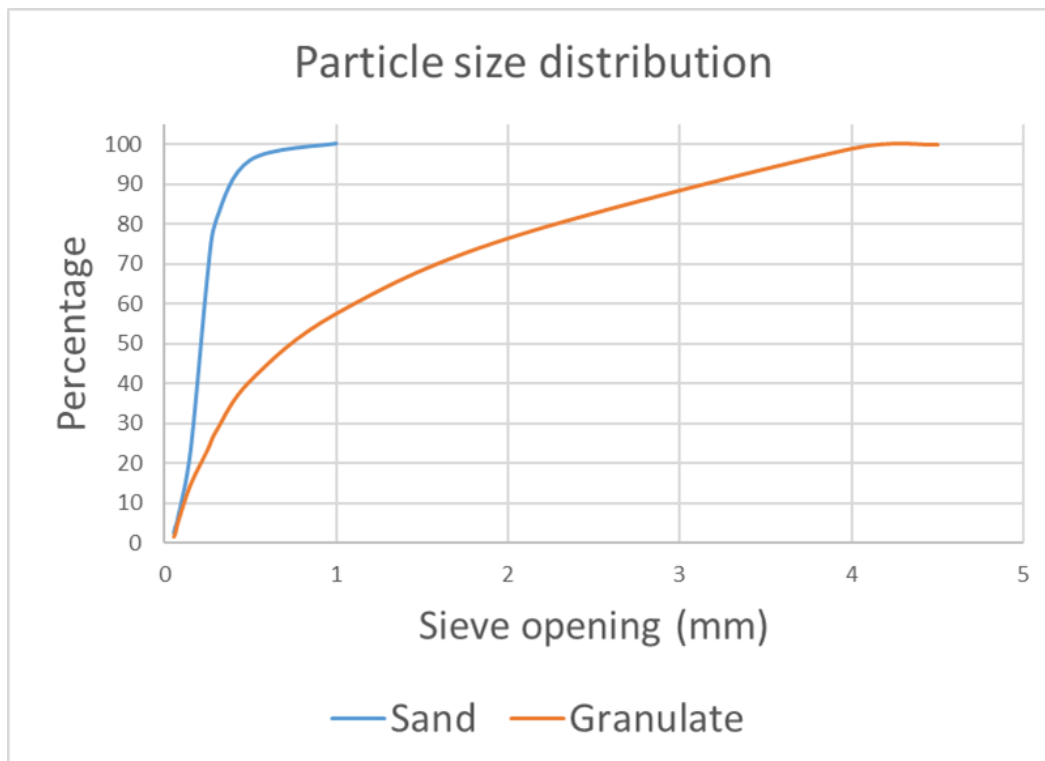


Fig. 120. Répartition granulométrique du sable et du granulat utilisés.

Les mélanges ont été réalisés selon différentes proportions présentées aux Tableaux 90 et 91. La résistance à la flexion augmente faiblement avec l'ajout de sable. La résistance à la compression augmente lorsqu'on ajoute de 0 à 50% de sable. Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'ajout de 50% de sable (Tableau 90). L'ajout de granulat a peu d'effet sur la résistance à la flexion. Cependant la résistance à la compression augmente. Les meilleurs résultats sont obtenus avec 35% du granulat ajouté (Tableau 91).

Échantillon	% sable	Rf (MPa)	Rc (MPa)
III1	0	0,56	2,28
III2	35	0,59	2,59
III3	50	0,71	3,09

Tableau 90. Résistances à la flexion (Rf) et à la compression (Rc) des mélanges terre - sable.

Échantillon	% granulat	Rf (MPa)	Rc (MPa)
IV1	0	0,56	2,28
IV2	20	0,54	2,54
IV3	35	0,56	3,10

Tableau 91. Résistances à la flexion (Rf) et à la compression (Rc) des mélanges terre - granulat.

On observe une augmentation de la résistance à la compression avec l'ajout de sable et de granulat. Ceci peut s'expliquer par une densification du matériau. En ajoutant le sable ou le gravier on apporte une structuration du matériau (Houben et Guillaud 1989 ; Olivier, 1994 ; Morel et al., 2007 ; Kouakou et Morel, 2009). L'ajout de granulat n'améliore pas la résistance à la flexion.

La résistance à la compression d'une terre mise en œuvre pour la construction peut varier entre 0,4 et 5 MPa (Moevus et al. 2012). Les constructions en terre crue sont généralement dimensionnées pour que le matériau ne soit soumis qu'à une contrainte de compression (Moevus et al. 2012). Par conséquent, il existe peu d'exigences concernant la résistance à la flexion des BTC. Celle-ci est souvent comprise entre 0,1 et 0,5 MPa dans les normes (Moevus et al. 2012). Par exemple, la norme néo-zélandaise NZS 4298 (1998) recommande une résistance minimale à la flexion de 0,25 MPa. Les éprouvettes testées atteignent toutes cette valeur minimale.

III.4.4 Test de durabilité mouillage/séchage

La stabilisation à la bagasse de canne à sucre, au sable et au granulat est une perspective intéressante. Cependant il est indispensable de faire des tests de durabilité sur ces matériaux. Les fortes précipitations enregistrées dans les régions de Kinshasa et du Kongo Central rendent les matériaux en terre fragiles. L'ajout de ciment a été tenté afin d'accroître la résistance du matériau face aux précipitations. Nous avons effectué des tests de durabilité (résistance à l'action de l'eau) sur les mélanges terre- bagasse, terre-sable et terre- granulat. Nous avons testé l'ajout de 6% de ciment sur 3 mélanges ayant donné les meilleurs résultats (I5, III3 et IV3). D'après Rigassi (1995) 5 ou 6% de ciment suffiraient pour avoir des résultats satisfaisants. Les résultats sont présentés au Tableau 92.

Il existe différents types de ciment selon leur composition, résistance, vitesse de prise et de durcissement. Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type Portland composé au calcaire EN – 197-1 CEM II 32,5. Les ciments Portland composés résultent du mélange de >65% de clinker et <35 % d'autres constituants. Le clinker est obtenu à partir de la cuisson de 80% de carbonates et 20% d'argile. Les autres constituants sont de nature et composition

variables. Il peut s'agir de laitiers de haut fourneau, cendres volantes, pouzzolanes, sulfate de calcium (Rigassi, 1995).

	I5	III3	IV3
Rc sans ciment	3,14	3,09	3,10
R_{sec} (MPa)	4,73	3,19	3,71
R_{msa} (MPa)	3,54	3,00	3,64
C_{rch}	0,75	0,94	0,98

Tableau 92. Valeurs des résistances à la compression à sec des mélanges avec ciment (R_{sec}), résistance à la compression après mouillage séchage des mélanges avec ciment (R_{msa}) et de coefficient de résistance à l'humidité (C_{rh}). I5 : mélange terre- bagasse ; III3 : mélange terre-sable ; IV3 : mélange terre-granulat.

Ce test montre qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression avec l'ajout de 6% de ciment. Le ciment permet de créer des liens entre les particules de sables et graviers et d'augmenter la résistance à la compression (Rigassi, 1995). Cependant la durabilité n'est pas suffisamment améliorée :

- Le traitement avec 7,5% de bagasse et 6% de ciment a une résistance à l'état sec très satisfaisante, cependant la résistance après mouillage séchage est altérée de 25%.
- Le traitement avec 35% de poussière et 6 % de ciment a une résistance à l'état sec satisfaisante. La résistance après mouillage séchage diminue de 6%, mais reste supérieure au mélange précédent.
- Le traitement avec 50% de sable et 6% de ciment a une résistance à l'état sec satisfaisante. La résistance diminue de 2% après 6 cycles de mouillage séchage, mais reste supérieure aux deux autres mélanges.

Houben et Guillaud (1989), montrent que le BTC stabilisé aux fibres végétales a une faible durabilité à l'eau due à l'absorption de l'eau par les fibres. Ceci explique l'altération de 25% de la résistance à la compression de l'éprouvette stabilisée à la bagasse après mouillage-séchage. Heathcote (2002) montre que pour une même teneur en ciment, la durabilité augmente avec la teneur en sable. Ceci explique la durabilité plus élevée de la terre stabilisée avec le sable et le granulat et 6% de ciment.

III.5 Synthèse

La Belgique contient différentes terres. Ces terres appartiennent à des formations sédimentaires argileuses déposées à différentes périodes géologiques du Quaternaire au Secondaire. Les argiles du Quaternaire sont les argiles des polders et du Bas-Escaut, les limons de couverture et les argiles du Groupe de Campine. Les argiles du Tertiaire sont les argiles d'Andenne et du Condroz, les argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse, l'argile de la Formation de Boom, les argiles de Hénis, les argiles d'Assche, les argiles du Groupe d'Ypres et les argiles du Groupe de Landen. Les argiles du Secondaire comprennent les argiles de Herve, les argiles d'Aix-la-Chapelle, les argiles du Groupe du Hainaut, les argiles d'Ethel et d'Arlon et les argiles liées à l'altération des massifs schisto-gréseux, des shales et arkoses. Ces formations sédimentaires argileuses ou argiles constituent les principales ressources d'où l'on peut extraire des terres propices pour la construction en BTC.

Des échantillons de terre ont été collectés en Belgique dans les dépôts allant du Quaternaire au Secondaire et en RD Congo. Chaque échantillon de terre a été caractérisé par des propriétés minéralogiques et géotechniques et pour certains échantillons par des propriétés chimiques. 135

échantillons ont été prélevés en Belgique dans 56 sites. Pour chaque site, une description géologique a été réalisée pour constituer une base de données des formations argileuses belges. Cette caractérisation a permis de répondre au premier objectif de cette thèse à savoir évaluer l'aptitude des terres collectées pour la fabrication des BTC. Pour ce faire les formations argileuses échantillonnées ont été regroupées en trois catégories : A. formations argileuses pouvant être utilisées telles quelles pour faire des BTC ; B. formations argileuses qui conviennent à la fabrication des BTC mais exigeant modification préalable par addition de particules grossières comme du sable ou du gravier ; C. formations argileuses qui conviennent à la fabrication des BTC si elles sont mélangées à d'autres terres pour leur donner une meilleure consistance, et éventuellement des particules grossières (sable, gravier). Cinq échantillons (i.e., Libin, Gembloux, Rumst, Beerse et Barry) ont été sélectionnés sur base de leur appartenance à ces 3 catégories, pour la confection des BTC.

Les échantillons de la RD Congo appartiennent à deux Super-groupes géologiques, i.e., l'Inkisi et le Schisto-Calcaire. Ils ont été échantillonnés à Kwilu Ngongo, Mbanza Ngungu, Nkamba, Kasangulu et Lukala. Deux cartographies géologiques des dépôts argileux ont été faits à Kwilu-Ngongo et Kasangulu. Ce projet a permis de tester la valorisation de déchets végétaux de bagasse et de cendre de bagasse à Kwilu Ngongo.

Sept formations argileuses (Libin, Gembloux, Barry, Beerse, Rumst, Inkisi et Schisto-calcaire) de composition minéralogique différentes ont été utilisées pour la fabrication des BTC. Des essais de stabilisation ont été réalisés en ajoutant des proportions différentes de composants inorganiques ou organiques, i.e., 3 types de granulats de dimensions 0/2, 0/4, 0/6,3 et 0/14 mm pour la Belgique et bagasse de canne à sucre, cendre issue de la combustion de la bagasse, sable alluvionnaire en RDC. Trois énergies de compactations différentes ont été utilisées en utilisant une presse hydraulique (100, 200 et 300 kN) avec 3, 6 et 10 % d'eau.

Des BTC et éprouvettes ont été produites et caractérisées par retrait de séchage, résistance à l'abrasion, essai de compression, essai de flexion, essai d'absorption d'eau par capillarité, essai d'immersion complète, essai d'égouttement accéléré et essai de gel-dégel. Ces essais permettent de dégager 5 tendances.

- Les résistances à l'absorption d'eau par capillarité, à l'égouttement accéléré et au gel-dégel ainsi que le retrait volumique de séchage augmentent avec le pourcentage de granulats ajoutés.
- Les résistances à la compression, flexion et à l'abrasion n'augmentent pas avec l'ajout de granulats quel que soit le type de terre.
- La résistance à l'érosion par désagrègement diminue avec l'ajout de granulats.
- La résistance à la flexion augmente avec le pourcentage de fibre.
- La lithologie des granulats n'a pas d'influence sur les propriétés des BTC.

Ces résultats montrent que la stabilisation permet d'améliorer les paramètres de durabilité des BTC.

IV. Discussion et recommandations

Le Tableau 93 résume les effets des différents stabilisants ajoutés sur les paramètres mesurés, en reprenant les meilleures valeurs obtenues. Les résistances à l'absorption d'eau par capillarité, à l'égouttement accéléré et au gel-dégel, ainsi que le retrait volumique de séchage augmentent avec le pourcentage de granulats ajoutés. Les résistances à la compression, à la flexion et à l'abrasion n'augmentent pas avec l'ajout de granulats pour tout type de terre. La résistance à l'érosion par désagrègement diminue avec l'ajout de granulats, alors que la résistance à la flexion augmente avec le pourcentage de fibre. La nature et la quantité du stabilisant doivent être déterminées en fonction du paramètre à améliorer.

La presse hydraulique a l'avantage par rapport à d'autres méthodes de mise en forme utilisées (barrettes et presse manuelle) de compacter davantage l'échantillon, car la pression de mise en forme est beaucoup plus élevée, et de produire des matériaux plus denses et avec une meilleure résistance à la compression (Tableau 94). Cependant la presse manuelle a l'avantage de coûter moins cher et d'être plus mobile, ce qui faciliterait son déplacement d'un chantier à un autre. Les barrettes sont adaptées pour des caractérisations en laboratoire, surtout lorsqu'on ne dispose pas de grandes quantités d'échantillon.

La plupart de normes sur la résistance à la compression des BTC concernent les BTC stabilisés au ciment (Cid-Falceto et al. 2011). Il est donc difficile de comparer ces valeurs avec celles obtenues dans cette étude.

La caractérisation par compression des BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm s'est faite sur un bloc entier, comme dans les normes Nouvelle Zélande [NZS 4298] et USA [CID 91] (voir Tableau 4). Les valeurs obtenues reportées dans le Tableau 94 peuvent donc être comparées à ces 2 normes. Nous pouvons en conclure que les BTC obtenus avec les terres de Beerse et Rumst ainsi que certains BTC obtenus avec les terres de Barry peuvent être utilisés en mur extérieur ou intérieur, dans une construction limitée à 2 étages, pour une épaisseur minimale de mur de 200 mm (voir Tableau 5). Par contre, les BTC produits avec les terres de Gembloux et Libin sont à utiliser avec précaution.

Les normes concernant la durabilité (résistance à l'eau, résistance au gel-dégel) concernent également les BTC stabilisés au ciment (voir Tableau 4). Les BTC 29,5 x 14 x 9,5 cm et les éprouvettes cubiques produits ne satisfont pas à ces normes. Les matériaux produits doivent donc être utilisés de façon à les préserver de l'eau et du gel en utilisant un enduit protecteur, en adaptant le plan de construction « bon chapeau et bonnes bottes » (cfr I.2.2) ou pour un usage intérieur.

Échantillons	Libin	Gembloux	Barry	Beerse	Rumst	Inkisi	Schisto-calcaire
Rc presse manuelle (MPa)	0,12 à 0,33	0,24 à 1,35	1,77 à 3,06	2,19 à 5,13	2,46 à 4,26		
Rc éprouvettes (MPa)	0,59 à 3,45 ^a	1,85 à 3,69 ^a	6,39 à 18,06 ^a	5,10 à 14,89 ^a	4,45 à 18,61 ^a	2,28 à 3,10 ^b	1,02 à 3,14 ^b
Rf barrettes (MPa)						0,56 à 0,71	0,40 à 0,99

Tableau 94. Valeurs minimales et maximales des résistances à la compression obtenues. Rc=résistance à la compression, Rf = résistance à la flexion. a : éprouvettes cubiques, b : barrettes.

	Bagasse					Cendre bagasse – chaux				Sable 0/1mm		Granulat 0/4,5 mm		Granulat 0/14 mm					Granulat 0/2 mm					Granulat 0/4 mm					Granulat 0/6,3 mm							
Pourcentage	0	1	2,5	5	7,5	0	6	8	12	0	35	50	0	20	35	0	20	33	43	50	0	12,5	25	40	60	0	12,5	25	40	60	0	12,5	25	40	60	
Inkisi												✓ ✓	✓		✓																					
Schisto- calcaire					✓ ✓		✓		✓																											
Libin																				✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓				✓ ✓	✓ ✓					✓ ✓ ✓	✓ ✓				✓ ✓ ✓
Gembloux																				✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓				✓ ✓	✓ ✓		✓ ✓				✓ ✓ ✓	✓ ✓			✓ ✓ ✓
Beerse														✓ ✓						✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓			✓ ✓	✓ ✓					✓ ✓ ✓	✓ ✓			✓ ✓ ✓	
Barry																		✓ ✓		✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓			✓ ✓	✓ ✓					✓ ✓ ✓	✓ ✓			✓ ✓ ✓	
Rumst																	✓ ✓			✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓			✓ ✓	✓ ✓					✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓		✓ ✓ ✓	

Tableau 93. Sélection des paramètres optimaux obtenus selon les différentes formulations et type de stabilisants utilisés. Chaque paramètre est indiqué par une couleur différente : Retrait volumique de séchage, Résistance à l'absorption d'eau par capillarité, Résistance à la compression, Résistance à la flexion, Résistance à l'abrasion, Résistance à l'érosion par désagrégement, Résistance à l'égouttement accéléré, Résistance aux cycles gel-dégel. Les cases cochées correspondent aux meilleures valeurs des paramètres mesurés.

La détermination de la résistance à la compression des éprouvettes s'est faite selon une méthode expérimentale qui ne correspond pas aux normes décrites ci-dessus. Il est donc difficile de comparer les résistances à la compression obtenues sur les éprouvettes aux valeurs des normes, et de proposer des pistes d'utilisation sur ces éprouvettes. Cependant cette étude montre que le bon choix des terres, l'augmentation de la pression de mise en forme, l'ajout de stabilisants et le bon dosage de la quantité d'eau à ajouter au mélange permettent d'avoir des matériaux plus résistants. Cette étude a l'avantage de porter sur 2 régions aux contextes différents. Un bilan comparatif de la construction en terre crue dans ces deux régions est présenté au Tableau 95.

	Belgique	Kinshasa et Kongo Central
Stabilisants	Les stabilisants utilisés ont été livrés. Leur accessibilité est mieux garantie.	Les stabilisants utilisés ont été collectés par nos soins. L'accessibilité des stabilisants a été difficile et les stabilisants plus longs à collecter.
Protocole de production des matériaux	(1) Extraction de la terre. (2) Évaluation de la convenance de la terre en laboratoire. (2) Préparation de la terre : séchage ^a , broyage (3) Mélange avec l'eau et les stabilisants. (4) Pressage et démoulage. (5) Séchage des BTC ^a . (6) Stockage des BTC secs.	(1) Extraction de la terre. (2) Préparation de la terre : séchage ^b , broyage. (3) Mélange avec l'eau et les stabilisants. (4) Pressage et démoulage. (5) Séchage des BTC ^b . (6) Stockage des BTC secs.
Défis de la construction en terre	Coût de la matière première et de la main d'œuvre élevée. Manque de visibilité Normes d'utilisation strictes	La terre crue est souvent rejetée dans le milieu urbain car considérée comme matériau de seconde classe. La forte pluviométrie exige de protéger les murs en terre en adaptant les plans architecturaux.
Perspectives	L'utilisation des granulats de calcaire, grès et porphyre améliore certaines propriétés des BTC. D'autres types de granulat, notamment ceux provenant de la démolition, pourraient être envisagés. Ce travail a répertorié des gisements conventionnels pour la terre de construction. Caractériser d'autres gisements non conventionnels tels que les terres de déblais est une perspective de ce travail.	L'utilisation de déchets agricoles de la canne à sucre ouvre une voie à la valorisation plus large des déchets agricoles, principalement dans la région de Kinshasa, où les conséquences de l'urbanisation rapide résident dans le problème de gestion des déchets. La ville de Kinshasa produit 7000 tonnes de déchets par jour provenant des ménages, marchés, places publiques et des entreprises (RATPK, 2016). Parmi ces déchets, des plantes à fibres (e.g., bananier, palmier, cocotier) pourraient être valorisées comme stabilisant des BTC.

Tableau 95. Étude comparée de l'utilisation des BTC entre la Belgique et les régions de Kinshasa et du Kongo Central. a: le séchage de la terre et des BTC nécessite plus d'investissement car le climat ne favorise pas le séchage à l'extérieur. b: le séchage peut être fait à l'extérieur en saison sèche et sous hangar en saison humide. Cela réduit le coût des installations.

Une étude d'estimation des coûts est essentielle pour évaluer l'impact économique de l'utilisation des matériaux locaux dans la construction. En fonction des conditions locales, les coûts de production des BTC et de construction en BTC varient d'une région à l'autre, même au sein d'un même pays. Adam et Agib (2001) ont établi une liste de conditions pouvant affecter la variation des coûts de constructions en BTC. Ces conditions de variations sont présentées au Tableau 96 et sont comparées dans les différentes régions étudiées.

Conditions de variation des coûts	Belgique	Kinshasa	Kongo Central
Disponibilité de la terre	Certaines terres sont disponibles en grande quantité et d'autres non. La terre peut être disponible sur le site de production des BTC (cas de l'entreprise Lebailly) ou transporté sur ce site (cas de BCmaterials).	La terre est soit disponible sur le site de construction de l'habitation ou doit être transportée sur le site. Cette terre est disponible en quantité importante dans la partie ouest de la région (environ 10% de la région) et rare ailleurs.	La terre peut être disponible sur le site de production des matériaux et de construction de l'habitat (cas à Mbanza Ngungu, Nkamba, Kasangulu) ou à proximité du site (cas à Kwilu Ngongo et Lukala). Cette terre est également disponible en quantité importante. Le transport de la terre et des BTC est très limité.
Aptitude de la terre à la stabilisation et type, qualité et quantité de stabilisant nécessaire	Certaines terres présentent des grandes hétérogénéités et nécessitent des précautions pour être utilisées dans la construction en BTC. Certaines terres nécessiteront plus de stabilisants.	La terre provient de l'altération des roches néoprotérozoïques (grès de l'Inkisi). Cette terre est homogène et nécessite peu de modifications pour être utilisées dans la construction en BTC. Il sera généralement nécessaire d'ajouter du sable (jusqu'à 50 % dans notre cas) ou des fibres.	Deux terres d'altération des roches néoprotérozoïques sont présentes dans la région (Inkisi et Schisto-calcaire). Ces terres sont homogènes et nécessitent peu de modifications pour être utilisées dans la construction en BTC. Il sera généralement nécessaire d'ajouter du sable ou des fibres.

Tableau 96. Facteurs de variations des coûts de production et de construction en BTC.

Conditions de variation des coûts	Belgique	Kinshasa	Kongo Central
Prix des matières premières, en particulier des stabilisants	La terre, l'eau et les stabilisants naturels (sable, granulats, fibres végétaux) sont souvent disponibles à coût modéré.	La terre, le sable et l'eau sont souvent disponibles à moindre coût.	La terre est souvent disponible gratuitement. Le sable est un produit qui a un certain coût, car rare (cas à Nkamba, Kwilu Ngongo, Lukala, Mbanza Ngungu). D'autres stabilisants (déchets végétaux) peuvent cependant être obtenus gratuitement.
Formats des BTC et normes requises	Les BTC sont de taille réduite ou grande. Les normes d'utilisation des BTC sont strictes	Les BTC produits sont généralement de grands formats. Ce qui réduit la quantité de mortier.	Les normes d'utilisations sont moins strictes et les BTC de grande taille.
Niveau de salaire et Productivité de la main-d'œuvre ^a	Le prix de la main d'œuvre est élevé et la main-d'œuvre généralement qualifiée.	La main d'œuvre est bon marché, et les ouvriers souvent qualifiés.	La main d'œuvre est très bon marché et les ouvriers souvent qualifiés.

Tableau 96. (Suite). Facteurs de variations des coûts de production et de construction en BTC.
a: notons que la construction en BTC peut être réalisée de manière autonome, sans coût de main-d'œuvre.

Sur base de ce tableau ; nous pouvons conclure que construire en BTC coûte plus cher en Belgique qu'à Kinshasa, et plus cher à Kinshasa qu'au Kongo central. Un chiffrage des coûts n'a pas été fait dans le cadre de cette étude et constitue une perspective.

V. Conclusion et perspectives

Cent trente-cinq échantillons de matériaux argileux (terre) ont été prélevés dans 56 sites répartis dans 19 formations et membres argileux en Belgique et 32 échantillons ont été prélevés dans 5 sites en R. D. Congo. Ces échantillons ont été caractérisés en laboratoire.

Par comparaison avec la littérature, ces analyses ont permis de classer les dépôts argileux belges échantillonnés en trois catégories selon leur aptitude à fabriquer les BTC. Quatre d'entre eux (dépôts de limon, argiles de paléo-altération des schistes dévoniens, argiles de paléo-altération des schistes ordoviciens et kaolin ardennais) ne conviennent pas à la fabrication de BTC s'ils ne sont pas mélangés à d'autres matériaux (argiles, sable, gravier - Catégorie 1). Treize d'entre eux (argiles de la Formation de l'Escaut, Membre de Rijkevorsel, argiles d'Andenne et du Condroz, argiles de l'Entre Sambre-et-Meuse, Membre de Putte, Formation de Tielt, Formation de Kortrijk, Formation de Carnières, Formation de Hannut, argile de la Formation de Vaals, argile de la Formation d'Aachen, argiles du Groupe du Hainaut, argile de la Formation d'Ethe) sont acceptables pour la fabrication des BTC mais nécessitent l'ajout de particules grossières (sable, gravier - Catégorie 2). Deux d'entre eux (Membre de Turnhout, argiles de paléo-altération des schistes du Famennien) peuvent être utilisées sans modification (Catégorie 3).

Les matériaux argileux des régions de Kinshasa et du Kongo-Central sont des produits d'altération des roches du Sous-groupe Schisto-Calcaire ou du Sous-groupe de l'Inkisi. Ces matériaux conviennent pour la production des BTC, mais nécessitent un ajout de particules grossières (sable et gravier).

La caractérisation de l'ensemble des échantillons suggère que toutes les terres prélevées peuvent être utilisées dans la construction en BTC.

Soixante BTC ont été fabriqués à l'aide d'une presse manuelle. Vingt éprouvettes ont été fabriquées dans un moule 4x4x16 cm. Cinq cent neuf éprouvettes ont été produites à l'aide d'une presse hydraulique.

En agissant sur la nature des minéraux argileux, la taille des particules, la pression de mise en forme, la quantité d'eau ajoutée, la nature et le pourcentage du stabilisant, on arrive à produire des BTC avec une résistance mécanique et une durabilité améliorées.

A. La nature des minéraux argileux

À partir des terres prélevées à Libin, Gembloux, Barry, Beerse et Rumst, la caractérisation des BTC produits a montré que :

- (1) Une terre riche en kaolinite et illite présente un retrait plus faible qu'une terre riche en smectite. Les terres de Gembloux et de Libin ne contiennent que de la kaolinite et de l'illite. Elles ont une valeur de retrait de séchage inférieure aux terres de Rumst, Beerse et Barry.
- (2) Les résistances à la compression, à l'abrasion et aux gouttes d'eau augmentent avec la plasticité d'une terre. Le caractère non plastique des échantillons de Libin et de Gembloux se traduit par une faible résistance à la compression, à l'abrasion et à l'impact des gouttes d'eau.
- (3) La masse volumique sèche diminue avec l'augmentation de la limite de liquidité (LL). $LL_{Rumst} > LL_{Barry} > LL_{Beerse}$, d'où les masses volumiques $Beerse > Barry > Rumst$.
- (4) La vitesse d'absorption d'eau par capillarité augmente avec la teneur en smectite. Les vitesses d'absorption d'eau sont plus importantes pour les échantillons de Rumst et Beerse riches en smectite que ceux de Gembloux et Libin, riches en illite et kaolinite.

(5) La résistance au gel-dégel augmente avec le pourcentage de kaolinite et d'illite et la diminution de la smectite. Les échantillons de Libin et Beerse résistent mieux aux cycles de gel-dégel que les échantillons de Barry, Beerse et Rumst.

B. La taille des granulats

Des éprouvettes ont été produites en incorporant des granulats de différentes tailles. Trois granulométries ont été utilisées le 0/2, 0/4 et 0/6,3 m. Ceci a permis d'affirmer que :

(1) La masse volumique des éprouvettes augmente avec la taille de granulats.

(2) Les meilleurs résultats des résistances à la compression sont obtenus avec le granulat 6,3 mm pour la terre de Libin, 4 mm pour celle de Gembloux et 2 mm pour celles de Beerse, Barry et Rumst.

C. La pression de mise en forme

Nous avons mesuré les résistances à la compression des éprouvettes comprimées à différentes pressions de mise en forme : 100, 200 et 300 kN. L'augmentation de la pression de mise en forme permet d'augmenter la masse volumique et la résistance en compression des 5 terres testées.

D. La quantité d'eau ajoutée

La masse volumique diminue avec l'augmentation de la teneur en eau, pour toutes les 5 terres. Ce qui se traduit par une diminution de la résistance à la compression.

E. La nature et le pourcentage du stabilisant

Six stabilisants ont été ajoutés à la terre à savoir la bagasse, la cendre de bagasse, la chaux, le ciment, le sable alluvionnaire 0/1 mm, et le granulat de grès pour fabriquer des éprouvettes avec les terres prélevées en RDCongo ; et les granulats de grès, porphyre et calcaire pour stabiliser les terres prélevées en Belgique.

(1) L'ajout de 0 à 7,5% de bagasse augmente la résistance à la flexion de 0,66 à 0,99 MPa et la résistance à la compression de 2,54 à 3,14 MPa en empêchant le développement des fissures de retrait.

(2) L'ajout de 0 à 50% de sable 0/1 mm augmente la résistance à la flexion de 0,56 à 0,71 MPa et la résistance à la compression de 2,28 à 3,09 MPa.

(3) L'ajout de 0 à 35% de granulat 0/4,5 mm n'affecte pas la résistance à la flexion, mais augmente la résistance à la compression de 2,28 à 3,10 MPa.

(4) La stabilisation avec 6 % de chaux seule est une perspective intéressante pour la terre de Kwilu-Ngongo, car elle augmente sa résistance à la compression de près de 130 %. Contrairement à l'ajout de la cendre de bagasse utilisée, seule ou associée à la chaux, qui n'augmente pas suffisamment la résistance du matériau.

(5) L'ajout de 6% de ciment dans 3 mélanges contenant respectivement 7,5% de bagasse, 35% de granulat 0/4,5mm et 50% de sable 0/1 mm améliore leur résistance à l'eau, mesuré par 6 cycles de mouillage-séchage.

(6) L'ajout de granulat réduit l'absorption d'eau et le retrait du BTC des 5 terres belges testées.

(7) L'ajout de 20 à 50% de granulat 0/14 mm améliore les résistances à la compression et à l'abrasion des terres de Libin et de Gembloux. Cependant, les valeurs de résistance à la compression de ces 2 terres restent moins élevées (<1,36 MPa pour l'échantillon de Gembloux, <0,34 MPa pour l'échantillon de Libin). Leurs valeurs de coefficient d'abrasion restent également faibles (<2 cm²/g pour l'échantillon de Gembloux et <1 cm²/g pour l'échantillon de Libin). L'ajout de 20% de granulat 0/14 mm augmente la résistance à la compression et à l'abrasion de la terre de Rumst. Au-delà de 20%, la cohésion des agrégats ajoutée diminue et le

matériau devient moins résistant à la compression et à l'abrasion. Les mêmes effets ont été observés avec la terre de Barry, mais ils se sont produits au-delà de 43% de granulats 0/14 mm ajoutés. L'ajout de 20% ou plus de granulats 0/14 mm diminue la résistance à la compression et à l'abrasion de la terre de Beerse.

(8) L'ajout de 0 à 60 % de granulats 0/2 mm, 0/4 mm et 0/6,3 mm améliore la résistance à la compression des terres de Libin et de Gembloux.

(9) Les échantillons de Beerse, Barry et Rumst montrent une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de granulats 0/2 mm, 0/4 mm et 0/6 mm par rapport à l'échantillon sans ajout de granulats. Ensuite la résistance à la compression diminue en deçà de la valeur de l'échantillon sans ajout de granulats. Les échantillons de Beerse, Barry et Rumst montrent tous une diminution de la Rc avec l'augmentation du pourcentage de granulats de 12,5 à 60 %.

(10) La vitesse d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du pourcentage de granulats.

(11) La vitesse d'érosion par désagrègement, mesurée par le test d'immersion complète, augmente avec l'augmentation du pourcentage de granulats.

(12) La résistance à l'impact de la goutte d'eau, mesurée par test d'égouttement accéléré, augmente avec l'augmentation du pourcentage de granulats.

(13) La résistance au gel-dégel augmente avec l'ajout de granulats.

Le développement de la construction en BTC à Kinshasa et au Kongo Central devrait bénéficier de la disponibilité et de l'homogénéité de la terre, de la connaissance traditionnelle de l'architecture en terre par la population et d'une demande croissante en logement accessible à faible coût économique.

En Belgique, l'intérêt croissant pour les matériaux de construction écologiques, est le principal moteur actuellement. La disponibilité des terres et de la technologie de production des matériaux de construction sont également des atouts pour le développement de la filière.

Cinq formations et membres argileux ont été choisis en Belgique et 2 en R. D. Congo pour répondre à la question comment améliorer les performances et la durée de vie des BTC. Élargir cette étude à d'autres formations argileuses et répertorier d'autres sites qui contiennent des gisements argileux adéquats en Belgique et dans la région Kinshasa est également une perspective de ce travail.

Cette étude montre que la durabilité des BTC est améliorée différemment pour chaque type de terre. Afin de compléter nos analyses il aurait été intéressant d'effectuer les tests thermiques : la conductivité thermique, la capacité thermique, la diffusivité thermique ou l'effusivité thermique sur les échantillons stabilisés et non stabilisés pour voir le pouvoir isolant des matériaux produits.

Ce projet a permis de valoriser les formations argileuses, de valoriser les sables alluvionnaires, les granulats rocheux et les déchets agricoles dans le secteur de la construction en BTC.

Outre les résultats obtenus, cette thèse a été aussi un apprentissage. Sa multidisciplinarité m'a permis d'acquérir des connaissances dans la conception et la caractérisation des matériaux de construction ou encore la conception architecturale du bâtiment. Mon souhait est de continuer à acquérir les connaissances sur la construction en terre crue dans l'espoir d'être un jour un acteur dans ce domaine.

Références

- Adam, E. & A. Agib, A. (2001). *Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan*. Paris: Graphoprint for the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Adler, I. (1966). *X-ray emission spectrography in geology*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
- AFNOR. (1999). *XP P94-011 – Sols : Reconnaissance et Essais – Description – Identification – Dénomination des sols – Terminologie – Éléments de classification*. La Plaine Saint-Denis: Éditions AFNOR.
- AFNOR. (2001). *XP P13-901 - Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions – Spécifications – Méthodes d'essais – Conditions de réception*. La Plaine Saint-Denis: Éditions AFNOR.
- AFNOR. (2013). *NF EN 933-9. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène*. La Plaine Saint-Denis: Éditions AFNOR.
- Agarwal, A. (1981). *Bâtir en terre : Le potentiel des matériaux à base de terre pour l'habitat du Tiers-Monde*. London: Institut international de l'environnement et du développement.
- Agridoc (2004). *Fabrication de blocs stabilisés : Synthèse technique*. Paris: Agridoc.
- Ajay, G., Hattori, K., Ogata, H. & Mandula. (2009). Properties and Reactivity of Sugarcane Bagasse Ash. In *Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering*. Cairo, Egypt. Retrieved from <http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/07/07006-35.pdf>.
- Alaa, M. R., Hosam, E.-D. H. S., & Amr, F. S. (2014). Effect of Silica Fume and Slag on Compressive Strength and Abrasion Resistance of HVFA Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8, 1, 69-81. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s40069-013-0051-2>.
- Albon, (2009). Tertiaire geologische kaart. <https://dov.vlaanderen.be/dovweb/html/3tertiair.html#kartering>. Dernière visite, le 21/12/2016.
- Allinson, D., & Hall, M. (2010). Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings*, 42 (6), 845 - 852. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.005>.
- Al Mukhtar, M, Belanteur, N, Tessier, D, & Vanapalli, SK. (1996). The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states. *Applied Clay Science*, 11, 99–115. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00023-3).
- Alvarez, P., & Maurin, J.-C. (1991). Évolution sédimentaire et tectonique du bassin protérozoïque supérieur de Comba (Congo): stratigraphie séquentielle du Supergroupe Ouest Congolien et modèle d'amortissement sur décrochements dans le contexte de la tectogénèse panafricaine. *Precambrian Research* 50, 137–171. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90051-B](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90051-B).
- Alvarez, P., Maurin, J.-C., & Vicat, J.-P. (1995). La Formation de l'Inkisi (Supergroupe Ouest-congolien) en Afrique centrale (Congo et Bas-Zaïre): un delta d'âge Paléozoïque comblant un bassin en extension. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 20, 2, 119-131, [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(95\)00038-U](https://doi.org/10.1016/0899-5362(95)00038-U).
- Andrade, F.A, Al-Qureshi, H.A. & Hotza, D. (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 51, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>.
- Anger, R. (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction* (Thèse de doctorat). Lyon, INSA, Lyon.
- Anger, R. & Fontaine, L., (2009). *Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture*. Paris: Belin
- Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., & Ruiz, E. (2011). Construire en terre, une autre voie pour loger la planète. *Secteur Privé & Développement, revue bimestrielle de Proparco*, 18-21.
- Appro-techno. (2019). *Presse manuelle Terstaram*. http://www.appro-techno.be/fr/page_presse-manuelle-terstaram_29.aspx. Consulté le 19/02/2019.
- Argio. (2019). *Argio*. <http://www.argio.com/>. Consulté le 17/02/2019.
- ARS. (1975). *Control of Water Pollution from Cropland – Volume 1, Report ARS – H-5-1*. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture.
- Asselberghs, E. (1920). Le kaolin en Belgique. *Annales des mines en Belgique*, 21, 1059-1067.

- Asselberghs, E. (1946). L'Eodévonien de l'Ardenne et des régions voisines. *Mémoires de l'Institut géologique de l'Université de Louvain*, 14, 111-123. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2268.1/1154>.
- ASTM. (1998). *Annual book of ASTM standards: Section 4*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2003). *ASTM: D 559-96, Standard method of wetting and drying test of compacted soil cement mixture*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Attom, M.F. (1997). The effect of compactive energy level on some soil properties. *Applied Clay Science* 12(1-2), 61–72. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131796000373>.
- Babylas, N., Boxus, I., Jannes, L., Pirard, F. & Institut du patrimoine wallon. (2012). *Travaux de gros-œuvre : Maçonnerie traditionnelle, terre crue*. Namur: Institut du patrimoine wallon.
- Baeteman, C. (1991). Chronology of coastal plain development during the Holocene in West Belgium. *Quaternaire*, 2(3), 116-125. doi:10.3406/quate.1991.1960
- Baeyens, J. (1934). Note sur la composition physico-chimique et le besoin en chaux des terres de Kisantu. *Bulletin agricole du Congo Belge*, 25, 271-275.
- Baha, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*, 26, 633-641. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003
- Baley, C. (2005). *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites* (Doctoral dissertation). Université de Bretagne Sud, Lorient.
- Barbier, F. (2012). *Étude de paléaltération météorique (Crétacé Inférieur à Néogène) sur socle silicoclastique hétérogène : caractérisation et essai de cartographie d'altérites en Région Wallonne (Belgique)* (Thèse de doctorat). Facultés Universitaires Notre Dame de la Paix de Namur, Namur.
- Barchy L., & Marion J-M. (2000). *Carte géologique de Dalhem-Herve et notice explicative 42/3-4*. Namur: Ministère de la Région Wallonne, DGRNE.
- Baudrand N.M. (n.d). *Dessins cycle de production d'un mur en Pisé, Bauge, Torchis, Brique crue*. Unpublished document.
- Baur, J. (2012). L'érosion dans une construction en pisé, Le cas de la « Maison Rauch ». Retrieved from https://documents.epfl.ch/groups/l/lf/lfv/www/enseignement/UE-ENAC/2012/Joel%20Baur_L'erosion%20dans%20une%20construction%20en%20pise.pdf.
- Bavay, G. (n.d.). *Patrimoine architectural en Belgique*. Consulté le 21 décembre 2018 from https://cdn.uclouvain.be/groups/cms-editors-loci/semaine-terre-crue/Sophie-Bronchart_txt.pdf.
- Basika, E., Kigozi, J. & Kiggundu, N. (2015). Investigation of sugar cane bagasse ash as a binding material for the construction industry. *Journal of Global Ecology and Environment* 2(4), 205-208. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/303287208_INVESTIGATION_OF_SUGAR_CANE_BAGASSE_ASH_AS_A_BINDING_MATERIAL_FOR_THE_CONSTRUCTION_INDUSTRY.
- BCmaterials. (2019). *BC materials : de la terre d'excavation au matériau de construction*. <http://www.bcmaterials.org/>. Consulté le 09/03/2019.
- Belanger, I., Delsate, D., Ghysel, P., Laloux, M., & Boulain, F. (2002). *Carte géologique de Wallonie, Notice explicative : Saint-Léger, Messancy, Musson, Le Fays, Houwald*. Namur: Région Wallonne.
- Ben Ayed, H., Limam, O., Kallel, A. (2011). Béton d'argile : application aux briques de terre comprimée. In *INVACO₂ : Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction*.
- Berndt C.C. & Hodzic, A. (2007). Bagasse fibre for sustainable manufacturing. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 1, 289-300. doi 10.1166/jbmb.2007.001.
- Bernier, F., Volckaert, G., Alonso, E., & Villar, M. (1997). Suction-controlled experiments on Boom clay. *Engineering Geology*, 47, 325–38. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00127-5).
- Bogaert J. & Halleux J.-M. (2015). *Territoires périurbains. Développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud*. Gembloux: Presses agronomiques de Gembloux.
- Bogemans, F. (1994). *Toelichting bij de Quartairgeologische kaarten van Vlaanderen: Turnhout-Meerle*. Brussels: Ministerie Vlaamse Gemeensch.

- Bogemans F. (1996). *Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart - kaartblad 23, Mechelen*. Brussels: Vlaamse overheid, dienst Natuurlijke Rijkdommen.
- Bogemans, F. (1997). *Toelichting bij de Quartairgeologische kaarten van Vlaanderen: Essen-Kapellen*. Brussels: Min. Vlaamse Gemeensch.
- Bogemans, F. (1998). *Toelichting bij de Quartairgeologische kaarten van Vlaanderen: Maarle-Arendonk*. Brussels: Min. Vlaamse Gemeensch.
- Bogemans F. (2005). *Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart - kaartblad 2-8, Meerle-Turnhout*. Brussels: Vlaamse overheid, dienst Natuurlijke Rijkdommen.
- Bogemans F. (2007). *Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart - kaartblad 29, Kortrijk*. Brussels: Vlaamse overheid, dienst Natuurlijke Rijkdommen.
- Bogemans F., & Baeteman C. (2006). *Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart - kaartblad 19-20, Veurne-Roeselare*. Brussels: Vlaamse overheid, dienst Natuurlijke Rijkdommen.
- Bogemans, F., Kiden, P., Huybrechts, W., Notebaert, B., Beerten, K., Lanckacker, T., Rixhon, G. & Heyvaert, V. (2017). Quaternary Lithostratigraphic Units (Belgium) Aeolians sediments. *National Commission for Stratigraphy Belgium*. Consulté le 17/02/2019 from <https://ncs.naturalsciences.be/quaternary/introduction-figs>
- Boissezon, P. & Gras, F. (1970). *Notice explicative n° 44 Carte pédologique Sibiti-Est République du Congo à 1/500.000*. Paris: ORSTOM.
- Bolle A.-C. (2017). *L'architecture participative en terre crue : Une approche potentielle pour la demande croissante de logement ?* (Mémoire de fin d'étude). Université de Liège, Liège.
- Bouezmarni, M., Hanson, A., Belanger, I. & Debbaud, V. (2015). *Carte hydrogéologique de Wallonie, 1/25 000 Vivy – Paliseul Notice explicative*. Namur: Service Publique de Wallonie.
- Bouchet, A., Meunier, A., & Sardini, P. (2000). *Minéraux argileux : Structure cristalline, Identification par diffraction de rayons X* (Mémoire 23). Total-Fina-Elf, Pau.
- Boulvain, F., Belanger, I., Delsate, D., Dosquet, D., Ghysel, P., Godefroit, P., Laloux, M., Roche, M., Teerlynck, H. & Thorez, J. (2000). New lithostratigraphical, sedimentological, mineralogical and palaeontological data on the mesozoic of belgian lorraine: a progress report. *Geologica Belgica*, 3, 3-33. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2268/19047>.
- Boulvain, F. & Marion, J.-M. (1994) : *Carte géologique de Wallonie, Philippeville-Rosée 53/5-6, 1/25.000*. Namur: Ministère de la Région Wallonne, DGRNE.
- Briat, M. A., & Bayet, M. L., (1900). *Carte géologique de Belgique, 1/40 000 Carte géologique de Belgique à l'échelle de 1/40 000. Roelux – Seneffe, n°141*. Bruxelles: Institut cartographie militaire, Commission géologique de Belgique.
- Brindley, G.W., & Brown, G. (1980). *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*. London: Mineralogical Society.
- Bronchart, S., & Bavay, G. (2011). Earthen architecture in Belgium. In *Terre Incognita Earthen architecture in Europe*.
- Brown, M.E. (2001). *Introduction to thermal analysis*. Grahamstown: Kluwer.
- Bruce King, P. E. (2006). Review of Earthen Building Codes and Standards from Around the World. Retrieved from <https://buildwellsource.org/materials/natural-materials-rural/earth/40-review-of-earthen-building-codes-and-standards-from-around-the-world-bruce-king-pe-2006>.
- Bui, T. T., Bui, Q. B., Limam, A., & Maximilien, S. (2014). Failure of rammed earth walls: from observations to quantifications. *Construction and Building Material*, 51, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.053>
- Bui, Q. B. (2008). *Stabilité des structures en pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques* (Thèse de Doctorat). INSA Lyon: Lyon.
- Bui, Q. B., Morel, J. C., Venkatarama Reddy, B. V., Ghayad, W. (2013). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44(5), 912–919. Retrieved from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013230800156X>
- Buffel P., Vandenberghe N. & Vackier M. (2009). *Toelichtingen bij de Geologische Kaart van België - Vlaams Gewest, Kaartblad 23, Mechelen*. Belgische Geologische Dienst en Vlaamse overheid, afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond. Brussels: Natuurlijke Rijkdommen.

- Calembert, L. (1945). *Les gisements de terre plastiques et réfractaires d'Andenne et du Condroz*. Liège: Vaillant-Carmanne.
- Calembert, L. (1947). Phosphates de la Hesbaye. Etages Sénonien et Maestrichtien. In Centenaire de l'Association des ingénieurs sortis de l'Université de Liège Congrès 1947. *Section géologie*, 341-344.
- Calembert, L. (1948). Les argiles plastiques et réfractaires de la Haute Belgique. *Section Géologie*, 283-312.
- Calembert, L., & Gulinck, M. (1954). L'Oligocène. Prodrôme d'une description géologique de la Belgique. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 495-532.
- Camapum De Calvalho, J., Crispel, J.-J., Mieussens, C. & Nardone, A. (1987). *La reconstitution des éprouvettes en laboratoire, théorie et pratique Rapport de recherche LPC n°145*. Paris: Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports.
- Camerman, C. (1939). Données sur la constitution chimique des argiles belges. *Section géologie*, 9, 80-115.
- Caritas Lubumbashi. (2011). Inauguration de la nouvelle école en BTC du village Kuvumbi. Consulté le 13 avril 2019 from <https://www.bddlubumbashi.fr/inauguration-de-la-nouvelle-ecole-en-btc-du-village-kuvumbi/>.
- Casel, T. (2000). *Maisons d'argile en Midi-Pyrénées*. Toulouse: Privat.
- Centre de recherche routière (1981). *Mode opératoire limites de consistance des sols (limites de liquidité et de plasticité) MF 47/81*. Bruxelles : CDI.
- Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.-C., Wong, H., & McGregor, F. (2016). Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110, 70-78. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027.
- Chirhalwirwa Mwilarhe, L. (2008). *Habitat périurbain autoconstruit en République Démocratique du Congo. Perspectives d'amélioration des logements de terre crue en climat tropical* (thèse de doctorat). Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Cid-Falceto J., Mazarrón, F. R. & Cañasa, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63, 523, 159-169.
- Cid-Falceto, J., Mazarrón, F.R, Cañas, I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Material*, 37, 738-745, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019>.
- Claytec. (2004). *Projets en terre réalisés par DRUWID et par ses partenaires CLAYTEC en Belgique et au Luxembourg*. Consulté le 19 décembre 2018 from <http://www.claytec.be/fr/bauherren/lehmbaubeispiele/>.
- Cosson, J. (1955). *Carte Géologique De Reconnaissance Notice explicative sur les feuilles pointe-noire et brazzaville*. Brazzaville: Direction Des Mines et de la Géologie de L'Afrique Équatoriale Française.
- Craig, R.F. (1987). *Craig's Soil Mechanics*. Dundee: Spon Press.
- CRATERRE [Centre de recherche et d'application pour la construction en terre], Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S. & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Paris: Alternatives et Parallèles.
- CRATERRE et Urbaplan. (2010). *République Démocratique du Congo, projet d'appui au redressement du secteur de l'éducation (PARSE). Stratégie nationale pour la réhabilitation et la construction des écoles de qualité au moindre coût*. Villefontaine: CRATERRE éditions.
- Crombé, P., & Robinson, E. (2016). Human resilience to Lateglacial climate and environmental change in the Scheldt basin (NW Belgium). *Quaternary International*, 428, 50-63. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.116>.
- Crowley, M. (1997). Quality Control for Earth Structures. *Australian Institute of Building Papers*, 8, 109-119.
- Daneels, A. (2008). Monumental Earthen Architecture at La Joya, Veracruz, Mexico. Crystal River. Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies. Consulté le 4 avril 2019 from <http://www.famsi.org/reports/07021>.
- Daneels, A. & Guerrero L. F. (2011). La construction en terre crue dans les tropiques humides. Un cas archéologique exceptionnel au Veracruz, Mexique. Mexico: Geplacea. Retrieved from http://openarchive.icomos.org/1182/1/II-3-Article7_Daneels_Guerrero.pdf.

- Cuba9. (1990). *Atlas del bagazo de la caña de azúcar*. Mexico: Geplacea.
- Danso, H., Martinson, D.B., Ali, M. & Williams, J.B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction & Building Materials*, 101, 797-809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>.
- Davies, T. C. (2015). Urban geology of African megacities. *Journal of African Earth Sciences*, 110, 188-226. doi:10.1016/j.jafrearsci.2015.06.012
- Dean, W. E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44(1), 242-248, 1974. <http://dx.doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- De Beer, E. E. (1967). Shear strength characteristics of the boom clay. In *Geotechnical Conference, Vol. 1*, (83-88). Oslo
- Decler, J., & Viaene, W. (1993). Rupelian Boom clay as raw material for expanded clay manufacturing. *Applied Clay Science*, 8, 2, 111-128. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(93\)90032-V](https://doi.org/10.1016/0169-1317(93)90032-V).
- Decler J., Viaene W., & Vandenberghe N. (1983). Relationship between chemical, physical and mineralogical characteristics of the Rupelian Boom Clay, Belgium. *Clay Mineral*, 18, 1-10. <https://doi.org/10.1180/claymin.1983.018.1.01>.
- De Craen M., Swennen R., & Keppens E. (1999). Petrography and geochemistry of septarian carbonate concretions from the Boom Clay Formation (Oligocene, Belgium). *Netherlands Journal of Geosciences/ Geologie en Mijnbouw*, 77, 63-76. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1003468328212>.
- Deforce, K., Storme, A., Bastiaens, J., Debruyne, S., Denys, L., Erynck, A., Crombé, P. (2014). Middle-Holocene alluvial forests and associated fluvial environments: A multi-proxy reconstruction from the lower Scheldt, N Belgium. *The Holocene*, 24(11), 1550-1564. doi:10.1177/0959683614544059.
- De Francesco, A. (2015). *Une approche prospective du pisé. La technique peut-elle se développer au sein de la filière belge de la terre crue ?* (Mémoire de fin d'étude). Université de Liège, Liège.
- Delcambre, B., & Pingot, J. L. (1993). *Carte géologique de Hastière – Dinant 53/7-8 (1/25.000)*, Ministère de la Région Wallonne. Namur: Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement.
- Delcambre, B., & Pingot, J. L. (2000). *Carte géologique de Gozée – Nalinnes 52/3-4 (1/25.0000)*. Namur: Service Public de Wallonie.
- Delcambre, B., & Pingot, J. L. (2002). *Carte géologique de Chastre – Gembloux 40/5-6 (1/25.0000)*. Namur: Service Public de Wallonie.
- Delcambre, B., & Pingot, J. L. (2004). *Carte géologique de Wallonie, planchette 53/1-2 Biesme - Mettet et sa notice explicative*. Namur: Ministère de la Région Wallonne.
- Delcambre, B., & Pingot J-P. (2012). *Carte géologique de Wallonie, planchette 46/3-4 Gouy-Lez-Piéton – Gosselies*. Namur: Service public de Wallonie.
- Delecour F. (1981). *Initiation à la pédologie*. Gembloux: Service de la Science du Sol.
- Delpomdor, F., Eyles, N., Tack, L., & Prétat, A. (2016). Pre- and post-Marinoan carbonate facies of the Democratic Republic of the Congo: Glacially- or tectonically-influenced deep-water sediments? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 457, 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.06.014>.
- Delvaux, D. (2001). Karoo rifting in western Tanzania: precursor of Gondwana breakup. *Contributions to Geology and Paleontology of Gondwana, In honour of Prof. Dr. Helmut Wopfner*, 111-125. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/268303813_Karoo_rifting_in_western_Tanzania_precursor_of_Gondwana_break-up.
- De Moor, G. (1963). Bijdrage tot de kennis van de fysische landschapsvorming in Binnen-Vlaanderen. *SOBEG*, 32, 329-433.
- De Moor, G. (1974). De afzetting van Dendermonde en haar betekenis voor de jongkwartaire evolutie van de Vlaamse Vallei. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 56, 85-109.

- De Moor, G., & Heyse, H. (1974). Lithostratigrafie van de kwartaire afzettingen in de overgangszone tussen de Kustvlakte en de Vlaamse Vallei in noord-west België. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 56, 85-109.
- Demoulin, A., Barbier, F., Dekoninck, A., Verhaert, M., Ruffet, G., Dupuis, C. & Yans, J. (2017). Erosion Surfaces in the Ardenne–Oesling and Their Associated Kaolinic Weathering Mantle. In: A. Demoulin (ed.) *Landscapes and Landforms of Belgium and Luxembourg*. Berlin: Springer Verlag.
- Deng, Y. F., Cui, Y. J., Tang, A. M., Li, X. L., & Sillen, X. (2012). An experimental study on the secondary deformation of Boom clay. *Applied Clay Science*, 59-60, 19-25. doi:10.1016/j.clay.2012.02.001
- Deng, Y. F., Tang, A. M., Cui, Y. J., Nguyen, X. P., Li, X. L., & Wouters, L. (2011). Laboratory hydro-mechanical characterisation of Boom Clay at Essen and Mol. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(17-18), 1878-1890. doi:10.1016/j.pce.2011.10.002
- Denis, B. (1974). Notice explicative n°52. *Carte pédologique au 1/200.000, Brazzaville-Kinkala, République Populaire du Congo*. Paris: ORSTOM.
- De Paepe, P., Hertogen, J., & Tack, L. (1975). Mise en évidence de laves en coussins dans les faciès volcaniques basiques du massif de Kimbangu (Bas-Zaïre) et implications pour le magmatisme ouest-congolien. *Annales Société Géologique Belgique* 98, 251–270.
- De Sloovere, P. (1983). Excentometer measurements in a cavity cooled down to -196°C. In *Symposium international In situ esting, Vol. 2* ((pp481-491). Paris.
- De Weerd, L., Muechez, Ph., Viaene W., & Kasse C., (1998). Clay mineralogical and geochemical study of the plio-pleistocene kempen formation in northern Belgium. *Aardkundige Mededelingen* 9, 51-60.
- Din, G. & Cohen, E. (2013). Modelling municipal solid waste management in Africa: case study of matadi, the Democratic Republic of Congo. *Journal of Environmental Protection*, 4, 435 – 445. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/313603163_Modeling_Municipal_Solid_Waste_Management_in_Africa_Case_Study_of_Matadi_the_Democratic_Republic_of_Congo_Policy_and_Planning_for_a_Sustainable_Society.
- Dinu, I. (2006). *Erosion control products from sugarcane bagasse* (Doctoral dissertation). University Alexandru Ioan Cuza, Iași.
- Dormal, M. V. (1894). C.R. de l'excursion de la Société belge de géologie de paléontologie et d'hydrologie dans les terrains jurassique et triasique des environs d'Arlon et de Florenville. *Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie*, VIII, 102-129.
- Dormal, M. V. (1897). *Carte géologique de Belgique, 1/40 000 Carte géologique de Belgique à l'échelle de 1/40 000. Vivy – Paliseul, n°207*. Bruxelles: Institut cartographie militaire, Service géologique de Belgique.
- Dricot, E.M. (1962). Microstratigraphie des argiles de la campine. *Bulletin de la société belge de géologie*, 12, 219-228.
- Drnevich, V. E. (2007). *A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils*. West Lafayette: Purdue University.
- Druart, S. (1997). *Les argiles d'Hautrage. Prospection du gisement et potentialité dans l'industrie du ciment blanc* (Master's thesis). Faculté Polytechnique de Mons, Mons.
- Druwid (2019). *Matériaux de construction écologiques/ Produits*. http://www.druwid.com/fr/okologische-baustoffe-produkte/claytec_fr.htm. Consulté le 17/02/2019.
- Dumont, A. (1842). Mémoire sur les terrains triasique et jurassique de la province de Luxembourg. *Mémoires de l'Académie royale de Belgique*, XIV, 5-36.
- Dumont, A. (1850). Rapport sur la carte géologique du Royaume. *Bulletins de l'Académie royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique*, 16(2), 351-373.
- Dumont, A. (1851). Note sur la position géologique de l'argile rupélienne et sur le synchronisme des formations tertiaires de la Belgique, de l'Angleterre et du Nord de la France. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 18(2), 179-195.

- Dumoulin, V., Marion, J.-M. (1997). *Carte géologique de Wallonie, planchette 58/1-2 Sautour-Surice, édité par le Ministère de la Région Wallonne Carte et notice*. Namur: Ministère de la Région Wallonne
- Dumoulin, V., Marion, J.-M. (1999). *Carte géologique de Wallonie, planchette 57/3-4, Froidchapelle – Senzeille, et sa notice explicative*. Namur: Ministère de la Région Wallonne
- Dupuis, C., Brych, J. Laga, P., & Vandenberghe, N. (1988). Sondage stratigraphique au Mont-Panisel : premiers résultats géologiques et géotechniques. *Bulletin de la société belge de géologie*, 97, 35-46.
- Dupuis, C., Charlet, J.-M., Dejonghe, L. & Thorez, J. (1996). Reconnaissance par carottage des paléoaaltérations kaolinisées mésozoïques de la Haute Ardenne (Belgique). Le sondage de Transinne : premiers résultats. *Annales de la société belge de géologie*, 119, 91-109.
- Ecobati. (2019). *Argilus*. <https://www.ecobati.com/fr/produits/brique-de-terre-crue>. Consulté le 17/02/2019.
- Ecoconsomo (2017). *L'argile dans la maison*. <http://www.ecoconso.be/fr/L-argile-dans-la-maison-du-sol-au-derniere-visite> le 11 avril 2017
- Ecomat. (2019). *Producten*. <https://ecomat.be/producten>. Consulté le 17/02/2019.
- Egoroff, A. (1955). *Esquisse géologique du sous-sol de Léopoldville: D'après les sondages (1947-1955)*. Léopoldville: Service Géologique du Congo Belge et du Ruanda-Urundi.
- El Ouahabi, M. (2013). *Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc* (thèse de doctorat). Université de Liège, Liège.
- Ertus, R., (1990). *Les néoformations d'halloysite dans les cryptokarsts oligo-miocènes de l'Entre-Sambre-et- Meuse (Belgique). Approche sédimentologique, pétrographique et minéralogique* (Thèse de doctorat). Université de Paris-sud Orsay et Faculté Polytechnique de Mons, 178 p.
- Eslinger, E., & Pevear, D. R. (1988). *Clay minerals for petroleum geologists and engineers*. Tulsa: SEPM.
- Etambakonga, C.L., (2012). *The Challenges of Solid Waste Management Facing the City of Kinshasa: The Case of Kinshasa Local Municipality*. Retrieved from <http://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/10977>.
- Etude « POTY ». (2001). *Inventaire des ressources du sous-sol et perspectives des besoins à terme des industries extractives de la Wallonie*. Service public de Wallonie
- Evans, R. (1980). Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. In M. J. Kirkby & R. P. C. Morgan (Eds) (pp. 109-128). Chichester: Wiley & Sons.
- Fagel N. (2010). *Argiles et environnement*. Notes de cours, Liège, Université de Liège, 145p, inédit.
- FEDIEX. (2018). *L'industrie du calcaire en Belgique*. <http://www.fediex.be/template.php?t=20&PHPSESSID=mou6o1r99os6ekf5cq153uf1m4>. (accessed 2 July 2018).
- Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M., & Sugita, S. (2004). Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and Concrete Research*, 34, 3, 521, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.005>.
- Filho, R.D.T., Scrivener, K., England, G.L. & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(2), 127–143. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6).
- Firket, AD. (1874). Notice sur la carte de la production, par commune, des carrières de la Belgique pendant l'année 1871. *Annales Travaux Publiques*, 32, 61-102.
- Flament, C. (2013). *Valorisation des fines de lavage de granulats : application à la construction en terre crue* (Thèse de doctorat). Université d'Artois, Artois.
- Fontaine, L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture*. Paris: Belin
- Forir, M. H. (1896). *Carte géologique de Belgique, 1/40 000 Carte géologique de la Belgique à l'échelle de 1/40 000. Visé – Fouron-Saint-Martin, n°108*. Bruxelles: Institut cartographie militaire, Commission géologique de Belgique.
- Forir, H. (1900). *Carte géologique de la Belgique au 1/40000, Planche 185 Houyet – Han-sur-Lesse*. Bruxelles: Institut cartographie militaire, Commission géologique de Belgique.

- Frimmel, H. E., Tack, L., Basei, M. S., Nutman, A. P., & Boven, A. (2006). Provenance and chemostratigraphy of the Neoproterozoic West Congolian Group in the Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences*, 46, 3, 221-239, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.04.010>.
- Galán-Marín, C., Petric, J., & Rivera-Gómez, C. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, 24, 1462-1468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008>.
- Galloway, J.E.Jr. (1994). *Grading, Shape, and Surface Properties*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- GATE. (1994). Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks). Eschborn: German Appropriate Technology Exchange.
- Geets, S., Maréchal, R., & Laga, P. (2000). *Lithostratigrafie van het Paleogeen*. Brussels: Stratigrafische Commissie Tertiair.
- Gens, A. (2012). Geomechanics of argillaceous rocks for nuclear waste disposal. In *International Post – TIMODAZ workshop*. Saint-Ursanne: Mont Terri rock laboratory.
- Giresse, P., Bongo-Passi, G., Delibrias, G. & Duplessy, G. (1982). La lithostratigraphie des sédiments hémipélagiques du delta profond du fleuve Congo et ses indications sur les paléoclimats de la fin du Quaternaire. *Bulletin de la société géologique*, (7), XXIV (4), 803-815.
- Giresse, P., Ouetiningue, R., & Barousseau, J. P. (1990). Minéralogie et microgranulométrie des suspensions et des alluvions du Congo et de l'Oubangui. *Bulletin de la société géologique*, 43, 151–173.
- Girolimetto, F. (1982). Aspects de la sédimentologie des sables tertiaires à l'ouest de la Meuse de Dinant. *Annales de la société géologique de Belgique*, 105, 249-257.
- Goedert, P. (1938). Les sols de l'Afrique centrale, spécialement du Congo belge : Caractéristiques pédologiques, Fertilité. Bruxelles: Institut national pour l'étude agronomique du Congo belge.
- Goffinet F., Ruthy I., César E., & Dassargues A. (2014). *Carte hydrogéologique de Wallonie, Planchettes Andenne - Couthuin n° 48/1-2*. Namur: Service public de Wallonie, DGO 3 (D GARNE), Dépôt légal D/2014/12.796/5 - ISBN 978-2-8056- 0151-4.
- Gresillon, J.M. (1978). Étude de l'aptitude des sols à la stabilisation au ciment application à la construction. *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, 361, 2-8.
- Guerin, L. (1985). *Construction à faible cout dans les programmes speciaux de travaux publics: Principes directeurs pour l'emploi de la terre crue*. Genève: Bureau international du travail.
- Guettala, A., Abibsi, A. & Houari, H., (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>.
- Gulinck M. (1958). *Atlas de Belgique Planche 39*. Bruxelles: Académie royale de Belgique, Comité national de Géographie, Commission de l'Atlas national.
- Gulinck, M. (1966) : Sur le caractère marin de certains sables des poches karstiques du Condroz. *Bulletin de la société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie*, 75, 348-349.
- Gulinck, M., & Hacquaert, A. (1954). L'Éocène inférieur – Le Landénien. In P. Fourmarier (éd.) *Prodrome d'une description géologique de la Belgique* (pp. 451-465). Liège: Vaillant-Carmanne.
- Gullentops, F. (1952). Découverte en Ardenne de minéraux volcaniques de l'Eiffel. *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 38, 736-740.
- Gullentops, F., Bogemaans, F., De Moor, G., Paulissen, E., & Pissart, A. (2001). Quaternary lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica*, 4, 153-164.
- Haesaerts, P. (1985). Les loess du Pléistocène supérieur en Belgique. Comparaisons avec les séquences d'Europe centrale. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 22(2), 105-115. doi:10.3406/quate.1985.1534
- Haesaerts, P., Damblon, F., Gerasimenko, N., Spagna, P., & Pirson, S. (2016). The Late Pleistocene loess-palaeosol sequence of Middle Belgium. *Quaternary International*, 411, 25-43. doi:10.1016/j.quaint.2016.02.012.

- Hailu, B., Dinku, A. (2012). Application of sugarcane bagasse ash as a partial cement replacement material. *Journal of EEA*, 29, 1-12. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/258441337_Application_of_sugarcane_bagasse_ash_as_a_partial_cement_replacement.
- Hakimi, A., El Kortbi, M., Ouissi, H., & Yamani, N. (1998). Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment. *Materials and Structures*, 31, 20 - 26. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02486410>.
- Hall, M. R. (2005). Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber. *Building and Environment*, 42, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.017>.
- Hall, M. R. & Allinson, D. (2009). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44(9), 1935-1942. doi:10.1016/j.buildenv.2009.01.007
- Hall, M. R. & Djerbib, Y. (2006). Moisture ingress in rammed earth: Part 2 – The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building Materials*, 20(6), 374–383. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061805000620>
- Halleux, J.M., Courtejoie, F., Dawance, S., Fagel, N., Frédéricich, M., Lebailly, P., Poncelet, M., Rubbers, B. & Bogaert, J. (2016). Territoires périurbains : développement, enjeux et perspectives dans les pays du sud Une introduction générale. In J. Bogaert & J.M. Halleux (Eds.), *Territoires périurbains : Développement, enjeux et perspectives dans les pays du sud* (pp. 141-149). Gembloux: Presses universitaires de Gembloux.
- Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9 (3), 185-189. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E).
- Heathcote, K. A. (2002). *An investigation into the erodibility of earth wall units* (Thèse de doctorat) University of Technology, Sydney. Retrieved from <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/20153/2020/02Whole.pdf>
- Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101–110. Retrieved from http://igitur-archive.library.uu.nl/bio/2007-0214-200214/lotter_01_lossonignition.pdf.
- Heitz, P. (2014). Architecture en terre. La pathologie humide du pisé. *Qualité construction*, 143, 62-69.
- Hemes, S., Desbois, G., Klaver, J., & Urai, J. L. (2016). Microstructural characterisation of the Ypresian clays (Kallo-1) at nanometre resolution, using broad-ion beam milling and scanning electron microscopy. *Netherlands Journal of Geosciences*, 95(03), 293-313. doi:10.1017/njg.2016.16
- Hennebert M., & Doremus P. (1995). *Carte géologique et notice explicative de la carte Lens-Soignies*. Namur: Ministère de la Région Wallonne.
- Hennebert M., & Doremus P. (1997). *Carte géologique de Wallonie et notice explicative. Planche Antoing – Leuze (37/7-8) au 1/25 000*. Namur: Ministère de la Région Wallonne.
- Hewlett, P. C. (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Hins, A. (2015). Communication personnelle.
- Hins. (2019). *Dans la maison*. <https://www.hins.be/dans-la-maison/>. Consulté le 17/02/2019.
- Hoffman, P. F. (1999). The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball Earth. *Journal of African Earth Sciences*, 28, 1, 17-33. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(99\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(99)00018-4)
- Horn, R.A., Wegner, T.H. & Kugler, D.E. (1992). Newsprint from blends of kenaf CTMP and deinked recycled newsprint. *Tappi Journal* 75(12), 69 – 72.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1989). *Traité de construction en terre*. Marseille: Parenthèses. (2ème éd. 1995 ; 3ème éd. 2006).
- Houben, H., Guillaud, H., CRAterre., & Intermediate Technology Publications. (1994). *Earth construction: A comprehensive guide*. London: Intermediate Technology Publications.

- Huysmans, M., & Dassargues, A. (2006). Hydrogeological modeling of radionuclide transport in low permeability media: a comparison between Boom Clay and Ypresian Clay. *Environmental Geology*, 50(1), 122-131. doi:10.1007/s00254-006-0191-7.
- ICIDCA. (1990). *La industria de los derivados de la caña de azúcar*. La Habana: Instituto cubano de investigación de la caña de azúcar.
- Inhabitat. (2016a). *BC-AS Architects Complete Rammed Earth Hunting Cabin in Belgium*. Consulté 19 décembre 2018 from <https://inhabitat.com/bc-as-architects-complete-maison-de-chasse-rammed-earth-hunting-cabin-in-belgium/>
- Inhabitat. (2016b). *Rammed-earth walls clad an observation tower to blend into a Belgian nature reserve*. Consulté 19 décembre 2018 from <https://inhabitat.com/rammed-earth-walls-clad-an-observation-tower-blends-into-a-belgian-nature-reserve/>
- Jacobs P. & De Ceukelaire M. (2002). *Toelichtingen bij de Geologische Kaart van België - Vlaams Gewest, Kaartblad 19-20, Veurne-Roeselare*. Brussels: Belgische Geologische Dienst en Vlaamse overheid, afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen.
- Jacobs P., Van Beirendonck F., & Mostaert F. (2004). *Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart - kaartblad 4-5(deel)-11-12, Blankenberge-Westkapelle-Oostduinkerke-Oostende*. Vlaamse overheid, dienst Natuurlijke Rijkdommen.
- James, J., & Pandian, P. K. (2016). Industrial Wastes as Auxiliary Additives to Cement/Lime Stabilization of Soils. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 1-17. doi:10.1155/2016/1267391.
- Jannot, Y. & Degiovanni, A. (2018). *Thermal Properties Measurement of Materials*. London: ISTE Wiley.
- Jaquin, P.A (2009). Humidity regulation in earth buildings. In Ramboll Technical Forum. London.
- Jerome, A. (1907). De la découverte d'un gisement notable de kaolin en Ardenne. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 21, 217-222.
- Jiménez, D. M. C., & Guerrero, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21, 2, 237-251.
- Kampunzu, A. B., Kapenda, D., & Manteka, B. (1991). Basic magmatism and geotectonic evolution of the Pan African belt in central Africa: Evidence from the Katangan and West Congolian segments. *Tectonophysics*, 190, 363-371. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90438-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90438-X).
- Kaplan, M.F. (1959). Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates, Proceedings. *American Concrete Institute*, 55, 1193-1208.
- Kate, J.M., & Gokhale, C.S. (2006). A simple method to estimate complete pore size distribution of rocks. *Engineering Geology*, 84, 48 - 69. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.009>.
- Kasse C. (1988). *Early-Pleistocene tidal and fluvial environments in the southern Netherlands and northern Belgium* (Doctoral dissertation). Free University Press, Amsterdam.
- Kasse, C. (1993). Periglacial environments and climatic development during the early Pleistocene Tiglian stage (Beerse Glacial) in northern Belgium. *Geologie en Mijnbouw* 72, 107-123. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/293398429_Periglacial_environments_and_climatic_development_during_the_early_Pleistocene_Tiglian_stage_Beerse_Glacial_in_northern_Belgium.
- Kenneth, D.M. (2014). *Short- and long-term performance of compressed earth blocks and sandwich panels with natural skins* (doctoral thesis). Queen's University, Kingston.
- Khalfaoui, A., & Hajjaji, M. (2009). A Chloritic-illitic clay from Morocco: Temperature-time-transformation and neoformation. *Applied Clay Science*, 45, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.03.006>.
- Khedari, J., Watsanasathaporn, P. & Hirunlabh, J. (2005). Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.042>.
- Kosmatka, S.H. (1994). Bleeding. *ASTM Special Technical Publication No. 169C*, 89-111.
- Kouakou, C. H, Emeruwa, E., Boffoué, Y., Coulibaly, Y. & Kouakou, A. (2003). Influence de l'eau et du ciment sur la stabilité et la conductivité thermique des briquettes d'argile ciment. In *Acte du séminaire sous régional sur le thème Valorisation des matières premières argileuses pour un*

- développement durable dans les domaines de l'industrie du bâtiment et de l'artisanat (pp. 72-79). Ouagadougou.
- Kouakou, C. H., & Morel, J. C. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.019>.
- Kubanza, N. S., & Simatele, D. (2015). Social and environmental injustices in solid waste management in sub-Saharan Africa: a study of Kinshasa, the Democratic Republic of Congo. *Local Environment*, 21(7), 866-882. doi:10.1080/13549839.2015.1038985
- Kur, F., Béguin, D., & Tassin, M. (1998). *L'habitat écologique : Quels matériaux choisir?*. Mens: Terre vivante.
- Laboratoire de Géotechnologie ULiège. Pycnomètre à gaz (Hélium) Masse volumique des grains (absolue ou réelle). Consulté le 2/2/2017 from http://www.facsu.ULiège.ac.be/upload/docs/application/pdf/201505/essai_pynometre_helium.pdf.
- Lachnitt, J. (1983). *Les matériaux réfractaires*. Paris: Presses universitaires de France.
- Lanfranchi, R., & Schwartz, D. (1990). *Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*. Paris: Editions de l'ORSTOM.
- Laga, P. (1988). *Borgloon Formation – Bo*. <https://ncs.naturalsciences.be/paleogene-neogene/2103-borgloon-formation-bo>.
- Laga, P., Lowye, S., & Geets, S. (2001). Paleogene lithostratigraphic units (Belgium). In Bultynck & Dejonghe (Eds.), *Guide to revised lithostratigraphic scale of Belgium*, (pp. 135-152). Brussels: Geologica Belgica 4/1-2.
- Lahogue, P., Mbokokala, D., Mees, F. & Laghmouch, M. (2013). Carte géologique de Kinshasa 1/50.000. Tervuren (Belgique)/Kinshasa (RDC): Musée royal de l'Afrique centrale & Centre de Recherche Géologique et Minière.
- Laloux, M., Dejonghe, L., Ghysel, P. & Hance, L., (1996). *Fléron – Verviers 42/7-8, notice explicative*. Namur: Ministère de la Région wallonne.
- Lateef, A. S. A., Fernandez-Alonso, M., Tack, L., & Delvaux, D. (2010). Geological constraints on urban sustainability, Kinshasa City, Democratic Republic of Congo. *Environmental Geosciences*, 17(1), 17-35. doi:10.1306/eg.04080908007.
- Lebailly. (2019). *Terres d'Hautrage, Produits à base d'argile pour l'écoconstruction*. <http://www.lebailly.com/fr/terrescrues.htm>. Consulté le 17/02/2019.
- Lefèvre (1964). *Carte géologique de Léopoldville à l'échelle du 1/200.000*. Léopoldville: Service géologique.
- Legrand, R. (1952). Carte géologique et hysométrique du socle paléozoïque de la Belgique, complétée par les allures générales du Crétacé. *Bulletin de la société belge de géologie, de paléontologie et d'Hydrologie*, LIX, 318-341.
- Legrand R. (Ed.). (1968). *Le Massif du Brabant*. Namur : Service géologique de Belgique.
- Lemaire, R. M. (1984). *Le Patrimoine monumental de la Belgique: Vol. 1*. Bruxelles: Mardaga.
- Le Marechal, A. (1966). *Contribution à l'étude des plateaux Batéké*. Brazzaville: ORSTOM.
- Lepersonne, J. (1973). *Carte géologique à l'échelle 1/200000. Notice explicative de la feuille Ngungu (degré carré S6/14 = SB 33.9)*. Kinshasa: Département des Mines, Direction du Service Géologique.
- Lerliche, M. (1923). *Le Terrain wealdien et les terrains tertiaires de l'Ardenne pendant l'ère tertiaire*. Bruxelles: Hayez.
- Le Tacon, F. (1978). La présence de calcaire dans le sol Influence sur le comportement de l'Epicéa commun (*Picea excelsa* Link.) et du Pin noir d'Autriche (*Pinus Nigra nigricans* Host.). *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 35 (2), 165-174.
- Li, L., & Aubertin, M. (2003). A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30, 4, 644-658. doi: 10.1139/103-012.
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials* 25, 4294–4298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>.

- Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., & Neto, V. F. (2012). Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 35, 829-837, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127>.
- Liu, D.-M. (1997). Influence of porosity and pore size on the compressive strength of porous hydroxyapatite ceramic. *Ceram. Int.* 23, 135–139. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(96\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(96)00009-0).
- Loréa, S. (2014). *Brique en terre crue, développement d'une filière en Région wallonne* (Mémoire de fin d'étude). Université de Liège, Liège.
- Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources* (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse.
- Malaise, M. C. (1901). *Carte géologique de Belgique, 1/40 000 Carte géologique de Belgique à l'échelle de 1/40 000. Libin – Bras, n°203*. Bruxelles: Institut cartographique militaire, Commission géologique de Belgique.
- Malinverno, A. (2008). Introduction to physical properties. In Well Logging Principles and Applications G9947 - Seminar in Marine Geophysics. http://www.ideo.columbia.edu/res/div/mgg/lodos/Education/Logging/slides/Physical_properties.pdf.
- Mango-Itlamya, L. A., (2015). *Valorisation des géoressources argileuses de la région de Kinshasa pour améliorer la qualité et la durabilité des matériaux de construction utilisés dans l'habitat périurbain* (Mémoire de fin d'étude). Université de Liège, Liège.
- Maniatidis, V., Walker, P., Heath, A., & Hayward, S. (2007). Mechanical and thermal characteristics of rammed earth. In B.V. Venkatarama Reddy (Ed.), *Monto Mani, International Symposium on Earthen Structures* (pp. 205-211). Monto Mani.
- Marcoen, J.M., Thorez, J., Monjoie, A., & Schroeder, Ch. (2000). *Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour centres d'enfouissement technique et réhabilitation de dépotoirs en Région wallon*. Namur: Ministère de la Région wallonne Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement.
- Marechal, R. (1993). A new lithostratigraphic scale for the Palaeogene of Belgium. *Bulletin de la société belge de géologie*, 102, 215-229.
- Marechal, R., & Laga, P. (1988). *Voorstel lithostratigraphische indeling van het Paleogeen*. Brussel: National Commissie Voor Stratigrafi.
- Marlière R. (1934). Argiles et sables wealdiens du Hainaut. Note suivie de considérations générales sur les kaolins, argiles communes et réfractaires du sous-sol belge. *Public de l'Association des Ingénieurs de l'École des Mines de Mons*, 48, 1-51.
- Marlière, R. (1954). Crétacé. In Fourmarier, P., (Eds.), *Prodrome d'une description géologique de la Belgique* (pp. 417-444). Liège: Société géologique de Belgique.
- Matthijs J. (2002). *Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart - kaartblad 27-28-36, Proven-Ieper-Ploegsteert*. Brussels: Vlaamse overheid, dienst Natuurlijke Rijkdommen.
- Mengeot, A., Roland, S., Dastien, J., & Rorive, A. (2000). *Carte hydrogéologique de Wallonie notice explicative Planche Antoing – Leuze (37/7-8) au 1/25 000*. Namur: Service Public de Wallonie.
- Mertens, J. & Wouters, L. (2003). *3D Model of the Boom Clay around the HADES-URF*. Brussels: ONDRAF-NIROND.
- Meylemans, E., Bogemans, F., Storme, A., Perdaen, Y., Verdurmen, I., & Deforce, K. (2013). Lateglacial and Holocene fluvial dynamics in the Lower Scheldt basin (N-Belgium) and their impact on the presence, detection and preservation potential of the archaeological record. *Quaternary International*, 308-309, 148-161. doi:10.1016/j.quaint.2013.03.034
- Mie, G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, Leipzig, vol. 25, 377–445.
- Millogo, Y., Morel, J.-C., Aubert, J.E. & Ghavami K. (2014). Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>.

- Minke, G. (2000). *Earth Construction Handbook - The Building Material Earth in Modern Architecture*. Ashurst: WITpress.
- Moevus, M., Fontaine, L., & Anger, R. (2012). Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature. In CRATerre-EAG (Ed.), *Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E)*. Grenoble: Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- Mohamed, A.E.M.K. 2013. Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Construction and Building Materials* 38, 242–247, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.031>.
- Molard J., Camps J., Laquerbe M. (1987). Étude de l'extrusion et de la stabilisation par le ciment d'argiles monominérales. *Materials and Structures* 10, 44–50. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472726>.
- Moles O., Guéguen A., Lopes Ferreira Th. & Benbeghila R. (2009). *Sensibilisation aux systèmes constructifs adaptés à la région de Kabalo, République Démocratique du Congo*. Villefontaine: CRATerre éditions.
- Moore, D.M., & Reynolds, R.C. (1989). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford: Oxford University Press.
- Morel, J C, Pkla, A, & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21, 2, 303-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Moriset, S. 2018. *11 000 ans d'architecture de terre*. Unpublished document.
- Morton, T. & Buckman, J. (2008). Traditional cob wall: response to flooding. *Structural Survey*, 4, 302 – 321. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/235259463_Traditional_cob_wall_Response_to_flooding
- Müller, R. O. (1972). *Spectrochemical analysis by X-ray fluorescence*. New York: Plenum Press.
- Nguyen, X. P., Cui, Y. J., Tang, A. M., Li, X. L., & Wouters, L. (2014). Physical and microstructural impacts on the hydro-mechanical behaviour of Ypresian clays. *Applied Clay Science*, 102, 172-185. doi:10.1016/j.clay.2014.09.038
- Ngur-Ikone, J.K., (2010). *La gestion des déchets plastiques à Kinshasa : un autre défi environnemental à relever dans la conception des villes durables*.
- Nicaise D., (1998). *L'halloysite des cryptokarsts de l'Entre-Sambre-et-Meuse (Belgique) : synthèse géologique, minéralogique et géochimique* (Thèse de Doctorat). Université Paris Sud Orsay et Faculté Polytechnique de Mons.
- Nicaise, D., & Dupuis, C. (1997). *L'halloysite des cryptokarsts néogènes de l'Entre-Sambre-et-Meuse et du Condroz (Belgique)*. Unpublished document, Région Wallonne.
- Nicolini, P. (1959). *Le synclinal de la Nyanga (zone de la boucle du Niari) : Contribution à l'étude des minéralisations stratiformes du Moyen-Congo*. Brazzaville: Bulletin de la direction des Mines et Géologie A.E.F.
- Niroumand, H., Barcelo, J. A., Kibert, C. J. & Saaly, M. (2017). Evaluation of Earth Building Tools in Construction (EBTC) in earth architecture and earth buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 861-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.267>.
- Njoya, A., Nzeukou, A., Mache, J.R., Wetschondo, D., Pirard, E., Melo, U.C., & Fagel, N. (2016). Valorisation des georessources pour matériaux locaux de construction en zone périurbaine des pays en voie de développement. In Bogaert, J. & Halleux J. M. (Eds.), *Territoires périurbains : Développement, enjeux et perspectives dans les pays du sud* (pp. 141-149). Gembloux: Presses universitaires de Gembloux.
- Nkenku Luaka E. (2006). *La gestion et la gouvernance des déchets dans la ville-province de Kinshasa* (Mémoire de fin d'étude). Université de Kinshasa, Kinshasa.
- Nogaredo, P., Rekk, S., & Hallet, V. (2011). *Carte hydrogéologique de Belgique 1/25.000 59/1-2 Houyet – Han-sur-Lesse*. Namur: Service Public de Wallonie.
- Nowamooz, H., & Chazallon, C. (2011). Finite element modelling of a rammed earth wall. *Construction and Building Materials*, 25 (4), 2112–2121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.021>.

- NZS 4298. (2015). *Materials and workmanship for earth buildings*. Wellington: Standards New Zealand.
- Nzuzi, L. (1999). La gestion des déchets domestiques : bilan annuel d'une expérience pilote de l'hôtel de ville de Kinshasa. In *Actes du 1er colloque sur la problématique des déchets à Kinshasa*, (pp. 1-348). Med. Fac. Landbouww, Univ. Gent 64(1).
- OCHA. (2007). *Zones de santé dans le Bas Congo et Kinshasa*. Kinshasa: OCHA DRC – HIS.
- Ogunye, F. O. & Boussabaine, H. (2002a). Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks. *Construction and Building Materials*, 16, 3, 163 - 172. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00004-1).
- Ogunye, F. O. & Boussabaine, H. (2002b). Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. *Construction and Building Materials*, 16, 3, 173-180. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00010-7).
- Olivier, D.M. (1994). *Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre* (Doctoral dissertation). Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- ONDRAF/NIRAS (2001). *Aperçu technique du rapport SAFIR 2. Safety assessment and feasibility interim report 2*. Bruxelles: NIROND.
- Pacyna, D. & Denayer, J. (2010). *Mines, minières et carrières souterraines en Wallonie : Risques associés et contraintes*. Namur: Service public de Wallonie.
- Paepe, R. (1969). Les Unités litho-stratigraphiques du Pléistocène supérieur de la Belgique. La stratigraphie des loess d'Europe. *Supplément au Bulletin A.F.E.Q., 8e Congrès INQUA*, 45-51.
- Paepe, R. & Vanhoorne, R. (1967). *The stratigraphy and palaeobotany of the Late Pleistocene in Belgium*. Bruxelles: Ministerie van Economische Zaken, Bestuur van het Mijnwezen, Belgische Geologische Dienst
- Paepe, R. & Vanhoorne, R. (1976). *The Quaternary of Belgium in its relationship to the stratigraphical legend of the Geological Map*. Bruxelles: Service géologique de Belgique.
- Patty, R. L. (1936). The Relation of Colloids in Soil to its Favorable use in Pise or Rammed Earth Walls. *South Dakota Agricultural Experiment Station, Bulletin 298*. Retrieved from https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1297&context=agexperimentsta_bulletins.
- Pedro, C. N. (2012). *La chaîne panafricaine du Nord-Ouest de l'Angola : Etude pétrostructurale, géochimique et géochronologique. Implications géodynamiques* (Thèse de Doctorat). Université Montpellier 2, Montpellier.
- Pedrosa-Soares A. C., Noce C.M., Wiedemann C.M. & Pinto C.P. (2001). The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, 110, 307-323. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/232392341_The_Aracuai-West-Congo_Orogen_in_Brazil_an_overview_of_a_confined_orogen_formed_during_Gondwanaland_assembly.
- Peltier, R. & Rumpler, A. (1959). *Manuel du laboratoire routier*. Paris: Dunod.
- Pereira-Goncalves, A. (2017). *Terres de Bruxelles* (Master's thesis). Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Pesson, P. (1971). *La vie dans les sols*. Paris: Gauthier-Villars.
- Pignal, B. (2005). *Terre crue : Technique de construction et de restauration*. Paris: Eyrolles.
- P'Kla, A. (2002). *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, Lyon.
- Pironet, C. (2012). Les Anciennes Briqueteries de Rome. De l'argile à la brique... et retour à la nature. L'Ourthe, une nature riche et diversifiée. n° 7. http://www.natagora.be/fileadmin/Regionales/Ourthe_Ambleve/PDF/Les_Briqueteries_de_Rome.pdf.
- PNUD. (2009a). *Province de Kinshasa profil résumé pauvreté et conditions de vie des ménages*. Kinshasa : Programme des nations unies pour le développement Unité de lutte contre la pauvreté

- PNUD. (2009b). *Province du Bas-Congo profil résumé pauvreté et conditions de vie des ménages*. Kinshasa : Programme des nations unies pour le développement Unité de lutte contre la pauvreté.
- Popovics, S. (1979). *Concrete-Making Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Poty, E., & Chevalier, E. (2014). *L'activité extractive en Wallonie à l'aube du XXIe siècle: ressources du sous-sol et perspectives futures*.
- Prix-construction. (2019). Générateur de prix de la construction. <http://generateur-de-prix.cype.fr/>. consulté le 13 avril 2019.
- Proctor. (1933). *Fundamental Principles of Soil Compaction*. New York: Engineering NewsRecord.
- Quinif, Y. (1989). Paleokarsts in Belgium. In Elsevier and Academia (Ed), Bosak, P., Ford, D.C., Glazek, J., Horacek, I. *Paleokarst A Systematic and Regional Review* (pp. 35-50). Amsterdam and Praha, 35-50.
- RATPK (2016). *Kinshasa produit journallement 7 000 tonnes de déchets, selon la RATPK, communiqué de presse, 2 février*. <http://www.radiookapi.net/2016/02/10/actualite/environnement/kinshasa-produit-journallement-7-000-tonnes-de-dechets-selon-la>. Consulté le 29/8/2016.
- Ramaswamy, H.S., Ahuja, B.M. & Krishnamoorthy, S. (1983). Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 5(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(83\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0262-5075(83)90044-1).
- RATP (2016). *Kinshasa produit journallement 7 000 tonnes de déchets, selon la Régie d'Assainissement et des Travaux Publics de Kinshasa, communiqué de presse, 2 février*. <http://www.radiookapi.net/2016/02/10/actualite/environnement/kinshasa-produit-journallement-7-000-tonnes-de-dechets-selon-la>. Consulté le 13/4/2019.
- Rashad, A.M., Seleem, H.E-D.H., Shaheen, A.F. (2014). Effect of silica fume and slag on compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(1), 69-81. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s40069-013-0051-2>.
- Rawle, A. (2001). *Basic principles of particle size analysis*. Malvern Technical paper.
- Rekk, S. (2014). *Méthodologie et essai de constitution de terroirs géochimiques : application aux céramiques communes d'ateliers du Nord de la Gaule* (Thèse de doctorat). Université de Namur, Namur. <http://hdl.handle.net/2078.2/144658>
- Remacle A. (2003). Un site de grand intérêt biologique : la carrière de kaolin de l'Arfaye à Libin (Province de Luxembourg, Belgique). *Natura Mosana* 56 (1), 1- 24.
- Ren, W., Han, S., Li, J., & Liu, M. (2017). Investigation of the relative abrasion resistance of concrete pavement with chip-sprinkled surfaces. *Wear*, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.011>.
- Rigassi, V. (1995). *Blocs de terre comprimée, volume I. Manuel de production*. Grenoble: CRATERRE-EAG.
- Robaszynski F. (1991). *Étude géologique de deux sondages au Sud du Bois des Poteries à Hautrage (rapport FPMS-Lebailly)*. Mons: Faculté Polytechnique de Mons.
- Russo Ermolli, E. (1991). Datation palynologique de gisements tertiaires de l'Entre-Sambre-et-Meuse. Essai de reconstitution des paléoenvironnements et des paléoclimats. *Service géologique de Belgique*, 245, 1-40.
- Ruthy, I., & Dassargues, A. (2009). *Carte hydrogéologique de Wallonie 1/25.000, 34/5-6*. Namur: Service public de Wallonie.
- Sarsby, R. W. (2013). *Environmental Geotechnics (second edition)*. London: Ice Publishing.
- Sabuni, E. (1995). *Research into the potentialities of rice husk ash cement for application in rural Tanzania*. Pays-Bas.
- Schure, J., Ingram, V., Marien J.-N., Nasi, R., & Dubiez, E. (2011). *Woodfuel for urban centres in the Democratic Republic of Congo: the number one energy and forest product returns to the policy agenda*. Bogor.

- Schwartz, D. (1985). *Histoire d'un paysage : le lousseke. Paléoenvironnement quaternaire et podzolisation sur sables batéké (quarante derniers millénaires, région de Brazzaville, R.P. du Congo)* (Thèse de Doctorat). Université de Nancy I, Nancy.
- Schwartz, D., & Rambaud, D. (1983). *Contribution des analyses de sables (granulométrie, morphoscopie et exoscopie) à une étude morphologique : Lousseke de Gangalingole (Pool. R.P. du Congo). Tentative de reconstitution paléogéographique et généralisation*. Brazzaville: ORSTOM.
- Seret, G., (1957). Les terrasses et les formes associées dans le bassin de la Lesse inférieure. *Annales de la société géologique de Belgique*, T. LXXX, 355-378.
- Shilstone, J.M.Sr. (1990). Concrete Mixture Optimization. *Concrete International Design and Construction*, 12, 6, 33-39.
- Simatele, D., & Etambakonga, C. L. (2015). Scavenging for solid waste in Kinshasa: A livelihood strategy for the urban poor in the Democratic Republic of Congo. *Habitat International*, 49, 266-274. doi:10.1016/j.habitatint.2015.05.029.
- Sitton, J. D., Zeinali, Y., Heidarian, W. H., & Story, B. A. (2018). Effect of mix design on compressed earth block strength. *Construction and Building Materials*, 158, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>.
- Soltner, D. (1992). *Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol*. Sainte Gemmes sur Loire: Collection Sciences et Techniques Agricoles.
- Sorel A., Rekk S., Capette L., & Hallet V. (2015). *Carte hydrogéologique de Wallonie, Planchettes Gesves – Ohey n° 48/5-6*. Namur: Service public de Wallonie, DGO 3 (D GARNE), Dépôt légal D/2015/12.796/9 - ISBN 978-2-8056- 0185-9
- Soyer, J. (1978). Les sables tertiaires de l'Entre-Sambre-et-Meuse condrusien. *Annales de la société géologique de Belgique*, 101, 93-100.
- Spargna, P., Yans, J., De Putter T., Hilde, V., & Dupuis, C. (2006). Les ressources en matières argileuses de la Belgique : le point de la question en 2003. *Mines et Carrières*, 104, 36-43.
- Speyer, R.F. (1994). *Thermal analysis of materials*. Atlanta: Marcel Dekker Inc.
- Stainer, X. (1902). *Carte géologique n° 169, Durbuy – Mormont au 1/40 000*. Bruxelles: Institut cartographie militaire, Commission géologique de Belgique. <http://hdl.handle.net/2268.1/1169>.
- Stainer, X. (1920). *Carte géologique n° 156, Gesves – Ohey au 1/40 000*. Bruxelles: Institut cartographie militaire, Commission géologique de Belgique.
- Sturbaut, E. (1998). High-resolution holostratigraphy of Middle Paleocene to Early Eocene strata in Belgium and adjacent areas. *Paleontographica Abt. A*, 247, Lfg. 5-6, pp. 91-156.
- Sturbaut, E., De Ceukelaire, M., Lanckacker T., Matthijs, J., Stassen, P., Van Baelen H., & Vandenbergh, N., (2016). Lithostratigraphy Ieper Group. <http://ncs.naturalsciences.be/paleogene-neogene/ieper-group>, accessed 24/10/2018.
- Sturbaut, E., & Nolf D. (1986). Revision of Ypresian stratigraphy of Belgium and northwestern France. *Med. Werkgr. Tert. Kwart. Geol.*, 23(4), 115-172.
- Stuc-and-staff. (2019). *Producten*. <http://www.stuc-and-staff.be/clayfinish-stuc-floor-kaleimortel/>. Consulté le 17/02/2019.
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1988). *Appropriate building materials – a catalogue of potential solutions*. Switzerland: SKAT & IT Publications.
- Tack, L. (2001). Early Neoproterozoic magmatism (1000–910 Ma) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo craton. *Precambrian Research*, 110, 277-306. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00192-9).
- Tack, L, Wingate, M.T.D., Liègeois, J.-P., Fernandez-Alonzo, M. & Deblond, A. (2001). Early Neoproterozoic magmatism (1000–910 Ma) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo craton. *Precambrian Research*, 110, 277-306. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00192-9).
- Taghiloha, L. (2013). *Using rammed earth mixed with recycled aggregate as a construction material* (master thesis). Ecola de Camins, Balcelona.
- Tannous, L. (1995). *The Effect of Density on the Durability of Stabilised Soil Blocks* (Undergraduate Building Project). University of Technology Sydney, Sydney.

- Tardy, Y. (1993). *Péetrologie des latérites et des sols tropicaux*. Paris: Masson.
- Tavernier, R. & De Moor (1974). L'évolution du Bassin de l'Escaut. In Macar (ed.), *L'évolution quaternaire des bassins fluviaux de la Mer du Nord Méridionale* (pp. 159-231). Centenaire de la Société géologique de Belgique.
- Tavernier R., & Gulinck, M. (1947). Les roches argileuses de la basse et de la moyenne Belgique. *Section Géologie*, 277-281.
- TerraLyon. (2016). Actes du XIIe congrès mondial sur les architectures de terre, 11-14 juillet. Lyon, France.
- Thorez, J. & Bourguignon, P. (1973). Minéraux argileux des argiles de dissolution des calcaires dinantiens en Condroz. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 96, 59-85.
- Thorez, J., & Monjoie, A. (1973). Lithologie et assemblages argileux de la Smectite de Herve et des craies campaniennes et maastrichtiennes dans le nord-est de la Belgique. *Annales de la société géologique de Belgique*, 96, 651-670.
- TotalBoox, & TBX. (2012). *Modern Earth Buildings*. Elsevier Science
- Tucker, M., & Hardy, R. (1988). X-ray powder diffraction of sediments. In M. Tucker (ed.), *Techniques in sedimentology* (pp. 191-228). Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- United Nations Environment Programme. (2016). *Global environment outlook: GEO-6: assessment for the Pan-European region*. Nairobi: United Nations Environment Program.
- Valbois RN asbl, Cellule Pierre, Yans, J. (2008). *Investir dans le kaolin – Une matière première à haute valeur ajoutée disponible en Ardenne*.
http://www.rnd.be/wp-content/uploads/2013/02/Etude_kaolin.pdf dernière visite le 11 décembre 2016
- Vandenbergh N., Laenen B., Van Echelpoel E., & Lagrou D. (1997). Cyclostratigraphy and climatic eustasy. Example of the Rupelian stratotype. *Earth and Planetary Science*, 325, 305-315.
- Van den Broeck, E. & Forir H., (1903) : *Carte géologique de Belgique, Planchette 107- Tongres-Herderen, 1/40.000*. Namur: Service géologique de Belgique
- Van Hoecker, R. (1924). Numéro consacré à Richard Acke architecte, volume 4, n°9. In *La Cité: Urbanisme, Architecture, Art Public*. Bruxelles.
- Van Marcke, Ph., & Laenen, B. (2005). *The ypresian clays as possible host rock for radioactive waste disposal: an evaluation*. Brussels: NIROND.
- Venkatarama Reddy, B.V., & Jagadish, K.S. (1993). The static compaction of soils. *Géotechnique*, 43, 2, 337 - 341.
- Vanneste, C. & Hennebert, M. (2005). *Carte géologique de Wallonie au 1/25.000ème (avec notice explicative), Planche Mouscron – Zwevegem n°29/5-6 et Templeuve – Pecq n°37/1-2*. Namur: Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Dépôt légal D/2005/5322/67, ISSN D/2005/5322/67.
- Vergari A., & Quinif Y. (1997). Les paléokarsts du Hainaut. *Geodinamica Acta*, 10, 4, 175-187.
- Vergas, J., Bariola, J. & Blondet, M. (1986). Seismic Strength of Adobe masonry. *Materials & Structures*, 19, 253-258. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472107>.
- Verhegge, J., Missiaen, T., & Crombé, P. (2016). Exploring Integrated Geophysics and Geotechnics as a Paleolandscape Reconstruction Tool: Archaeological Prospection of (Prehistoric) Sites Buried Deeply below the Scheldt Polders (NW Belgium). *Archaeological Prospection*, 23(2), 125-145. doi:10.1002/arp.1533.
- Voisin, L. (1995). Le kaolin en Ardenne. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle des Ardennes*, 85, 64-70.
- Verhasselt, A. (1993). *Caractérisation de la pouzzolanicité des cendres volantes*. Paris.
- Walker, P. J. & Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilized compressed earth blocks and mortars. *Materials and Structures* 30, 545-551. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/224238871_A_brief_review_of_Compressed_Stabilized_Earth_Brick_CSEB [accessed Feb 23 2019].
- Walker, P. J. (1995). Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, 17, 4, 301-310. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00019-9](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9).

- Walker, P. J. (2000). Strength and Durability Testing of Earth Blocks. In *6th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries* (pp. 110-118). Bangalore.
- Walker, P. J. (2001). *The Australian earth building handbook*. Sydney: Standards Australia.
- Wang, L., Zhou, S. H., Shi, Y., Tang, S. W., & Chen, E. (2017). Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete. *Composites Part B*, 130, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.058>.
- Weaver, C.E. (1989). *Clays, Muds, and Shales*. Amsterdam: Elsevier.
- Weisz, A., Kobe, A., McManus, A.M. & Nataatmadja, A. (1995). Durability of Mudbrick – Comparison of Three Test methods. In *4th Australasian Masonry Conference* (pp 249- 258). Sydney.
- Wetshondo, D. (2012). *Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)* (Doctoral dissertation). Université de Liège, Liège.
- Wouters L., & Vandenberghe N. (1994). Géologie de la Campine - Essai de synthèse. ONDRAF/NIRAS.
- Yans, J. (2007). *Lithostratigraphie, minéralogie et diagenèse des sédiments à faciès wealdien du bassin de Mons (Belgique)*. Bruxelles: Classe des sciences, Académie royale de Belgique.
- Yans, J., Chauvin A., Clauer N., Dejax, J. De Putter, T., Dupuis, C., Feraud, G., Guillocheau, F., Masure, E., Leosti, I., Perruchot, A. Pons, D., Spagna, P. & Wyns, R., (2003). An overview of the saprolites of Belgium and their potential kaolinitic supplies to Mesozoic and Cainozoic sediments. *Géologie de la France*, 1, 33-37.
- Yans, J., Dejax, J., Pons, D., Dupuis, C., & Taquet, P. (2005). Implications paléontologiques et géodynamiques de la datation palynologique des sédiments à faciès wealdien de Bernissart (bassin de Mons, Belgique). *Comptes Rendus Palevol*, 4(1-2), 135-150. doi:10.1016/j.crpv.2004.12.003
- Yans, J., Spagna P., Foucher J.-C., Perruchot A., Streel M., Beaunier P., Robaszynski F. & Dupuis C. (2002). Multidisciplinary study of the wealden deposits of the Mons Basin (Belgium): a progress report. *Aardkundige Mededelingen*, 12, 39-42.
- Yu, HD (2010). *Study on long term hydro-mechanical coupled behavior of Belgium Boom clay* (PhD thesis). Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xiaohongshan.
- Yu, H.-D., Chen, W.-Z., Jia, S.-P., Cao, J.-J., & Li, X.-L. (2012). Experimental study on the hydro-mechanical behavior of Boom clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, 159-165. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.05.013
- Yu L. (1999). Interface theoretical analysis on the relationship between concrete interface and strength. *J. East China Jiaotong Univ.* 16(4), 14–19.
- Zeelmaekers, E., Honty, M., Derkowski, A., Środoń, J., De Craen, M., Vandenberghe, N., Wouters, L. (2015). Qualitative and quantitative mineralogical composition of the Rupelian Boom Clay in Belgium. *Clay Minerals*, 50(2), 249-272. doi:10.1180/claymin.2015.050.2.08
- Zhong-Sen, L. (2015). *Études des propriétés hydromécaniques des sols argileux non saturés proches de la saturation* (Thèse de doctorat). École centrale des arts et manufactures, école centrale Paris, Paris.
- Ziegler, S., Leshchinsky, D., Ling, H.L. & Perry, E.B. (1998). Effect of short polymeric fibres on crack development in clays. *Soils and Foundations*, 38 (1), 247–53.