

Lavie Arsène Mango-Itulamy

mangoarsene@gmail.com

In Mango-Itulamy, L. A. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. Thèse de Doctorat. Université de Liège, Liège. <http://hdl.handle.net/2268/234994>

Potentiel d'utilisation de la terre crue à Kinshasa et au Kongo Central

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 mécanisée (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). Implanter 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).

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).

- 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 :

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 **Sous-groupe du Sansikwa** correspond à une succession siliciclastique, associée à des conglomérats, suivie d'argilites, de quart-zarénites 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 oolitiques, 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 ; Alvarez 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).

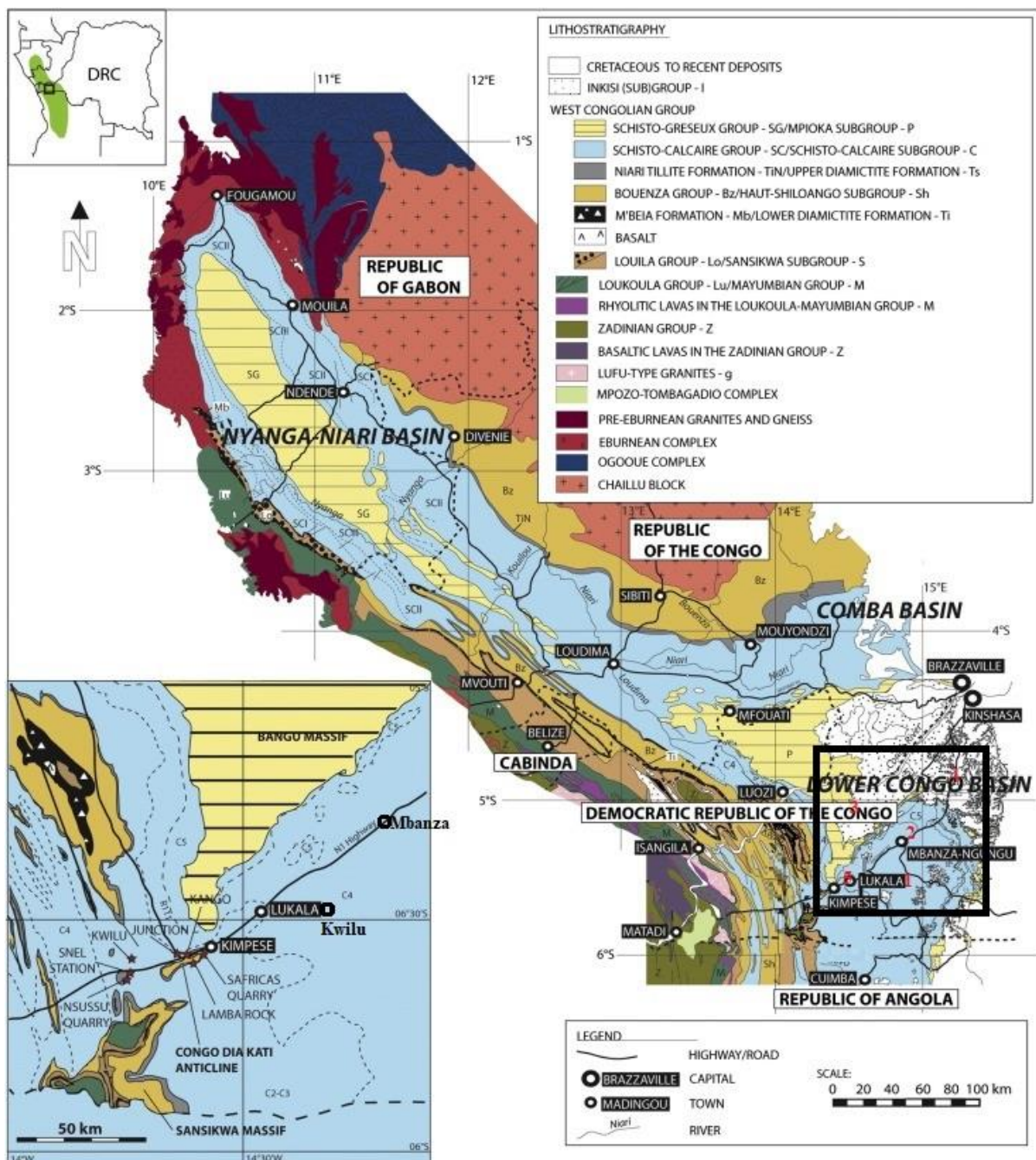


Fig. 90. Carte géologique de la ceinture de l'Ouest Congo montrant les sites d'échantillonnage. 1. Kwilu Ngongo ; 2. Mbanza Ngungu ; 3. Nkamba ; 4. Kasangulu ; 5. Lukala (modifié d'après Delpomdor et al. 2016, modifié d'après Lepersonne 1973).

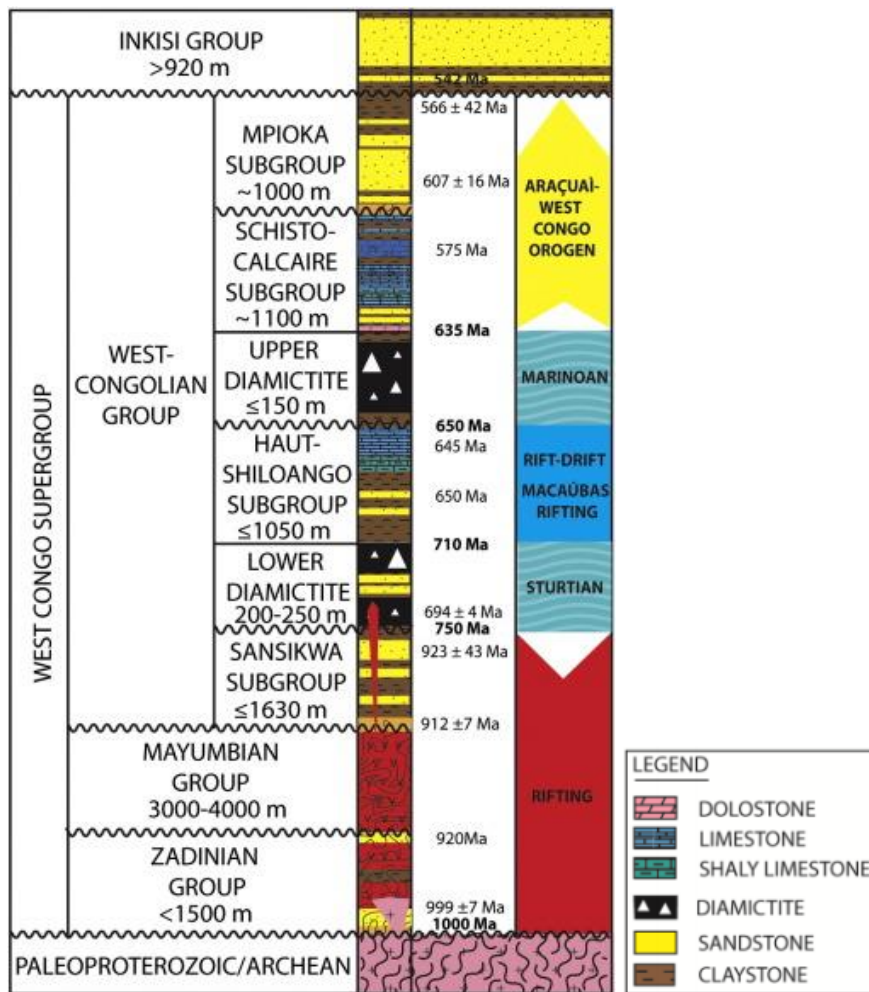


Fig. 91. Subdivision lithostratigraphique du Super Groupe de l’Ouest-Congo dans le Bas-Congo et événements orogéniques (Delpomdor et al. 2016, modifiée d’après Tack et al., 2001).

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.

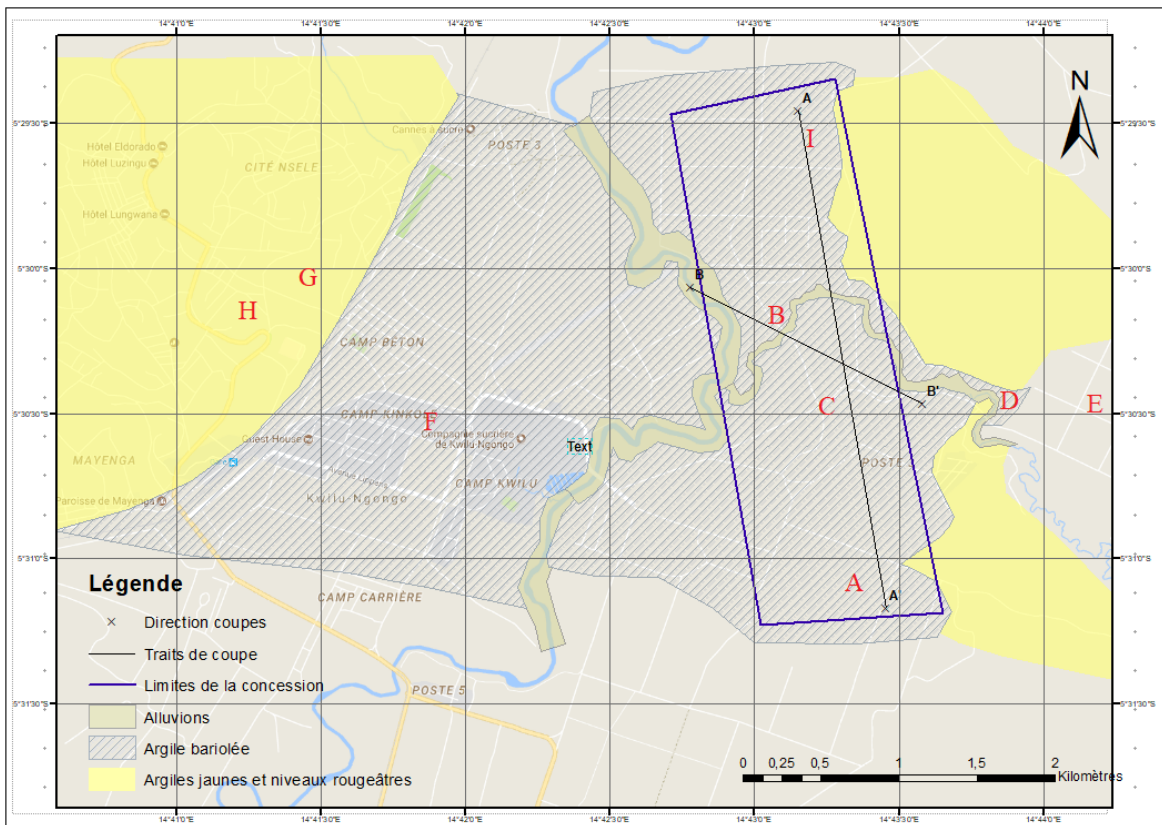


Fig. 96. Carte de couverture de la région de Kwilu Ngongo.

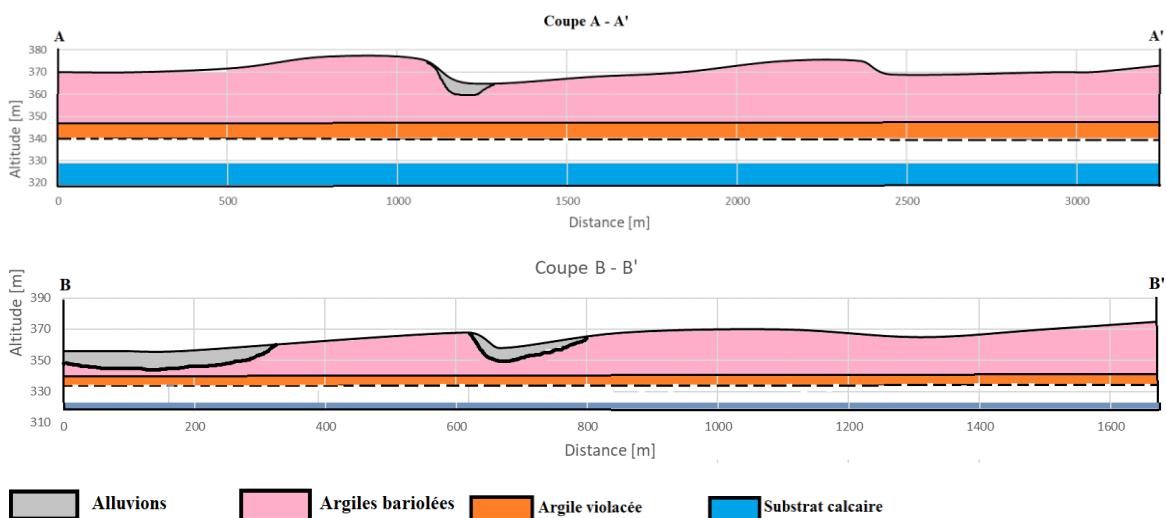


Fig. 97. Coupes géologiques à travers la concession.

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 combustion.

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
Illite	23	12	6	5	37	3	14	8
Chlorite	1	1	4	1	/	3	3	2
Kaolinite	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).

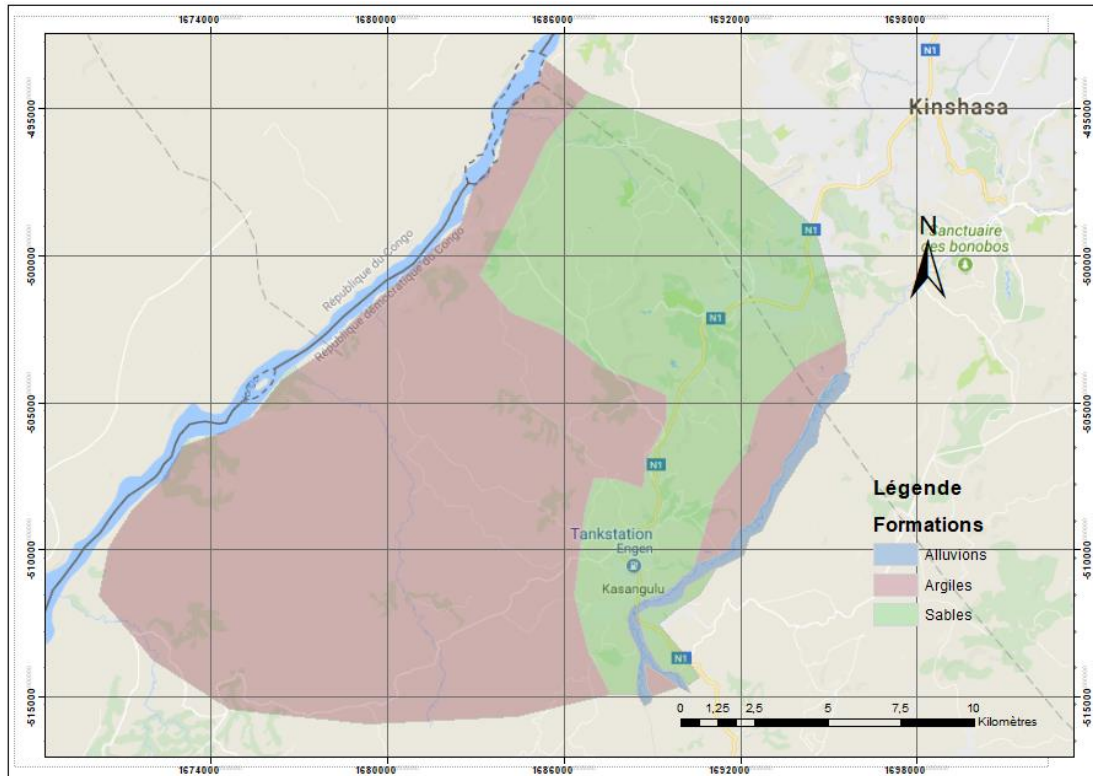


Fig. 102. Carte des formations de couverture de la région de Kasangulu.

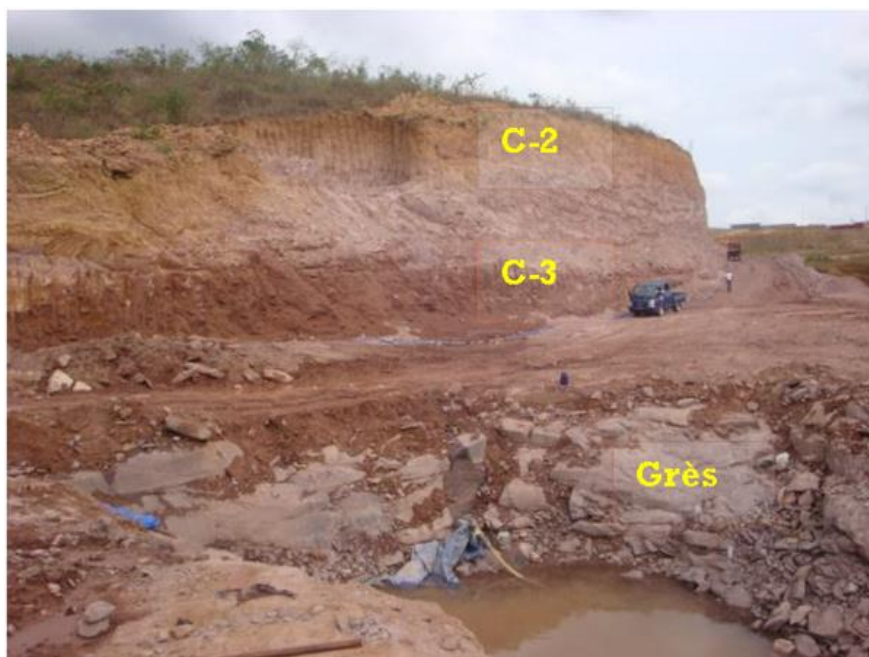


Fig. 103. Vue sur la terre issue de l'altération du grès de l'Inkisi. C2 : Latérite, C3 : Saprolite (Wetshondo. 2012).

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°30'51.07"S 14°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).

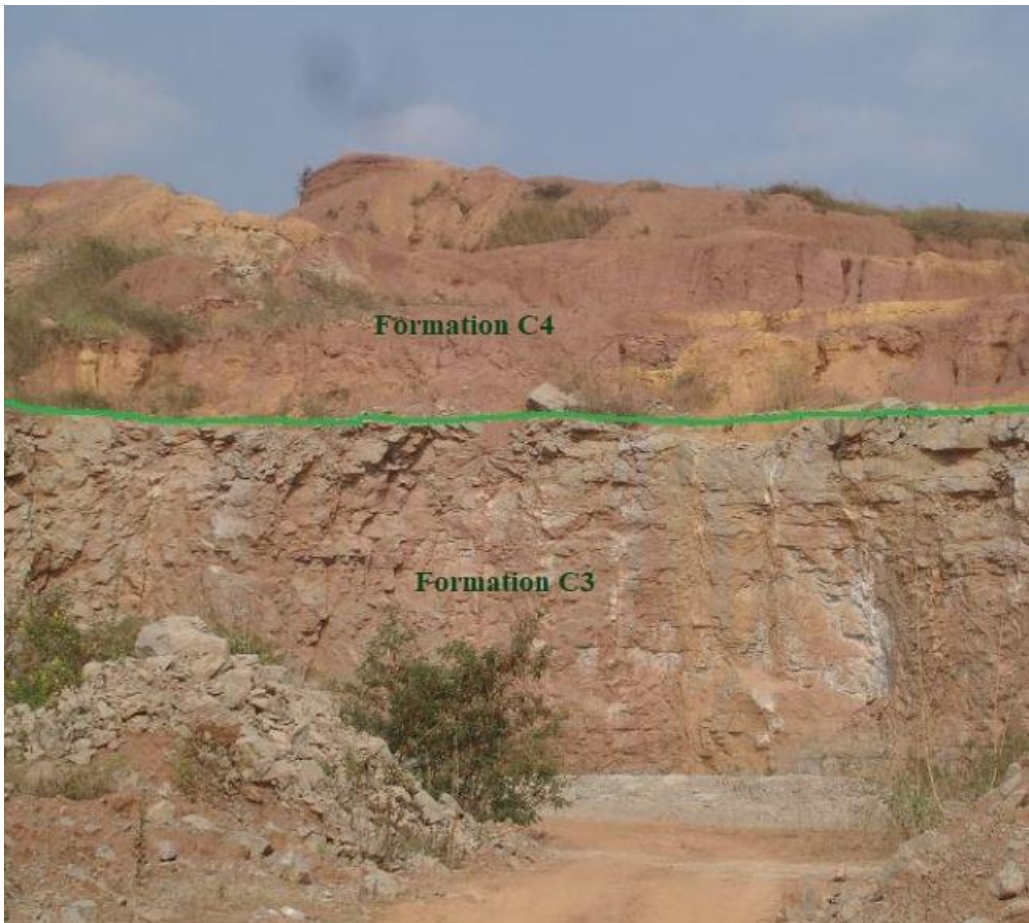


Fig. 104. Contact entre les Formations C3 et C4.

Le deuxième échantillon (**LSI**) a été prélevé 150 mètres au sud-ouest de la carrière précédente (5°30'54,82"S 14°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.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.

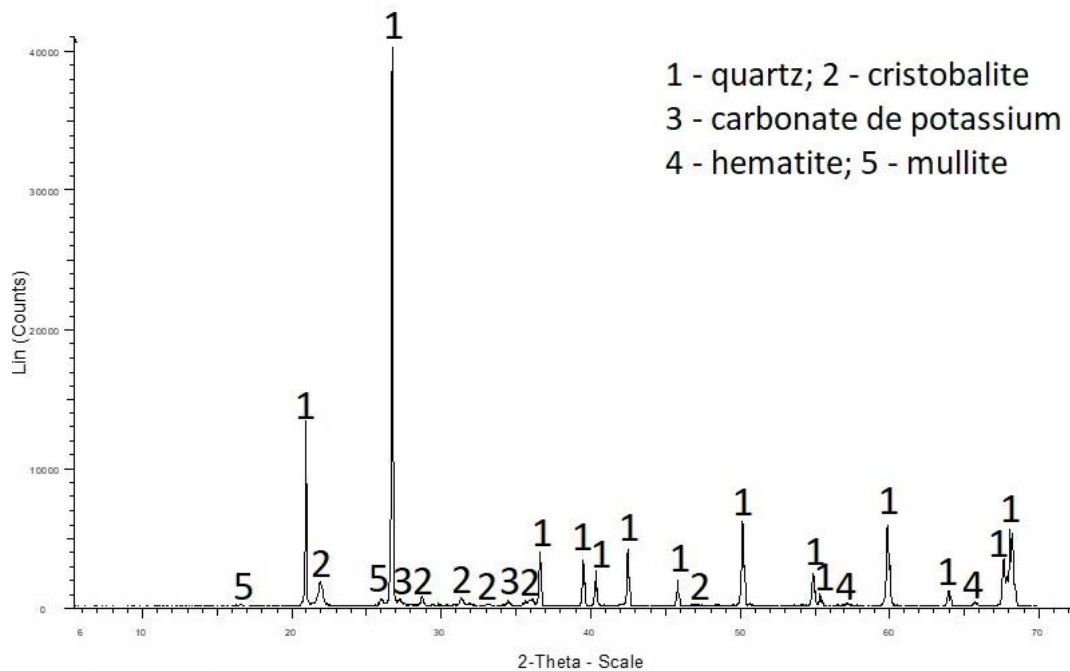


Fig. 119. Diffractogramme de la cendre de bagasse.

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.

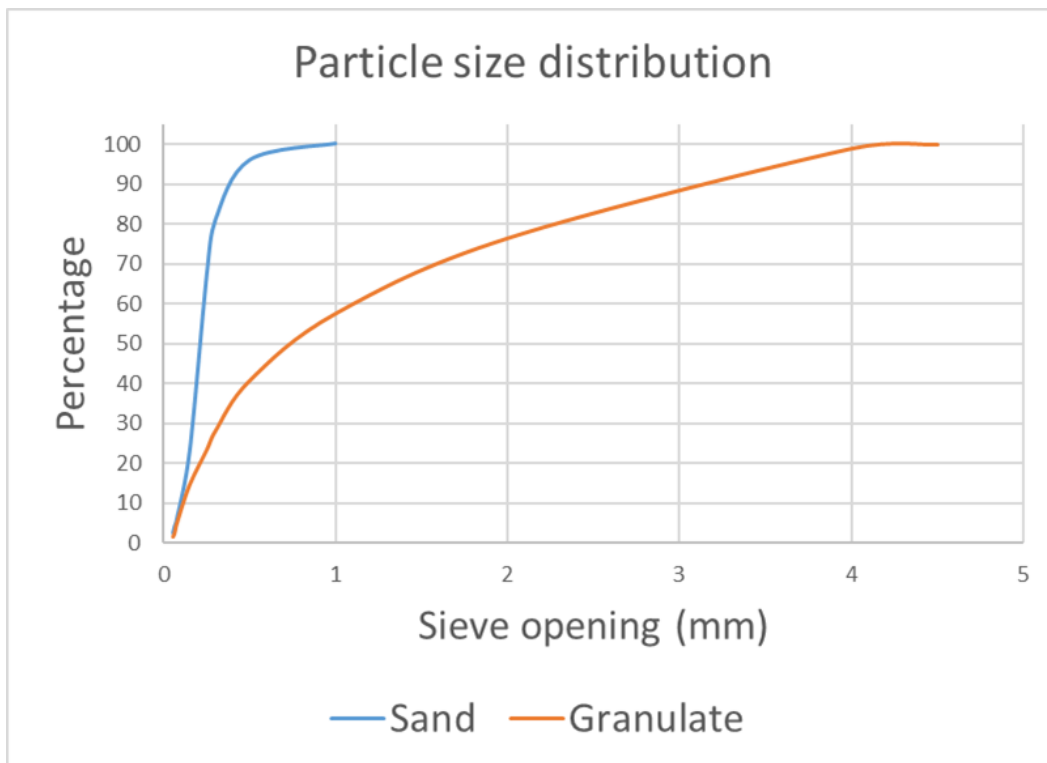


Fig. 120. Répartition granulométrique du sable et du granulat utilisés.

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 désagrégement 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.

V. Conclusion et perspectives

Un bilan comparatif de la construction en terre crue dans ces deux régions est présenté au Tableau 95.

	Kinshasa et Kongo Central
Stabilisants	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) 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	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 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	Kinshasa	Kongo Central
Disponibilité de la terre	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	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.
Prix des matières premières, en particulier des stabilisants	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 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	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.

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.