

Université
de Liège



Faculté des Sciences
Département de Géologie
U.R. Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs)
Promoteur du mémoire : Prof. Nathalie FAGEL

Université de Liège

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

Par

Lavie Arsène MANGO ITULAMYA
2e Master en Sciences Géologiques

Année Académique 2014 – 2015

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 Dominique Wetsondo et Jean René Kabamba qui m'ont accueilli et encadré lors de mon séjour à Kinshasa.

Je remercie le personnel du Laboratoire des Matériaux de Constructions et du Laboratoire de Géotechnique de l'ULg. Je pense tout particulièrement à Monsieur Luc Courard, Monsieur Frédéric Collin, David Bastin, Amaury Daras, Sophie Grigoletto, Véronique Szepetiuk et Monique Denotte.

Je remercie ceux qui, par leurs encouragements m'ont motivé à aller au bout, en particulier ma famille.

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

JURY

Dr. N. FAGEL, Professeur à l'Université de Liège, Promoteur

Dr. Ir. F. COLLIN, Chargé de cours à l'Université de Liège

Dr. Ir. L. COURARD, Professeur à l'Université de Liège

Dr. Ir. E. PIRARD, Professeur à l'Université de Liège

Table des matières

Table des matières.....	4
Résumé.....	5
I. Introduction.....	6
II. Origine des matériaux argileux de Kinshasa.....	9
II.1 Géologie régionale.....	9
II.2 Géomorphologie régionale.....	13
II.3 Sols.....	14
III. Sites et techniques d'échantillonnage.....	16
III.1 Kasangulu.....	16
III.2 Ndjili Cecomaf.....	20
III.3 Lutendele.....	22
IV. Essai de valorisation.....	27
V. Matériel et méthode.....	34
V.1 Analyse des terres et des argiles.....	34
V.2 Caractérisation des liants.....	37
V.3 Caractérisation des éprouvettes.....	40
VI. Résultats et discussion.....	42
VI.1 Caractérisation chimique.....	42
VI.2 Caractérisation minéralogique.....	43
VI.3 Granulométrie et limites d'Atterberg.....	43
VI.4 Perte au feu.....	48
VI.5 Résistance à la compression et à la flexion.....	50
VII. Synthèse.....	57
VIII. Conclusion.....	60
Bibliographie.....	61
Annexes.....	68

Résumé

La région de Kinshasa contient une abondance de matières premières argileuses dans plusieurs de ses localités. Ces matières argileuses font leurs preuves dans la construction en terre cuite. Ce travail consiste à valoriser ces ressources argileuses dans un autre secteur de construction : la terre crue. L'objectif est de trouver une alternative durable et peu gourmande en énergie.

Trois localités contenant d'importantes ressources argileuses ont été échantillonnées : Kasangulu, Lutendele et Ndjili Cecomaf. Ces matériaux sont caractérisés afin de voir s'ils sont adaptés à la construction en terre crue selon les techniques et les normes courantes :

Les matériaux argileux de Kasangulu possèdent des caractéristiques minéralogiques (composition minéralogique), physiques (masse volumique, teneur en eau naturelle, granulométrie, indice de plasticité) et géotechniques (résistance à la compression et à la flexion) qui font qu'ils sont plus propices à la construction en terre comprimée (pisé et BTC).

Les matériaux de Lutendele et ceux de Ndjili Cecomaf sont caractérisés par des paramètres minéralogiques, physiques et géotechniques qui font qu'ils sont plus propices à la construction en terre moulée (adobe, mortier, bauge).

Abstract

The Kinshasa region contains an abundance of clay raw material in many of its localities. These clay materials show their ability in the clay building. This work is to develop these resources in another clay construction sector : the raw earth. The objective is to find a sustainable alternative which consumes less energy

Three localities containing important clay resources were sampled : Kasangulu, Lutendele and Ndjili Cecomaf. These materials are characterized in order to see if they are suitable for earthen construction techniques according to current standards :

The clay materials of Kasangulu possess mineralogical characteristics (mineralogical composition), physical (density, natural water content, particle size, plasticity index) and geotechnical (compressive strength and flexural strength) that make them more conducive to compressed earth construction (adobe and BTC).

Materials of Lutendele and Ndjili Cecomaf are characterized by mineralogical, physical and geotechnical parameters that make them more conducive to the construction of molded earth (adobe, mortar, bauge).

I. Introduction

Ce mémoire s'inscrit dans un projet qui vise à valoriser les gisements argileux de la région de Kinshasa et à améliorer les matériaux de construction à base d'argile. Deux raisons nous ont poussé à nous intéresser à ce sujet.

- D'une part, la République Démocratique du Congo est réputée pour ses ressources en matière première. A l'heure actuelle la quasi totalité des investissements nationaux ou internationaux, s'orientent vers les gisements métalliques (cuivre, cobalt, zinc, manganèse, or...) (Carter Center, 2002 ; Kating, 2014). Par contre les gisements d'argiles sont plutôt délaissés à l'heure actuelle.
- D'autre part, la région de Kinshasa a connu une forte expansion spatiale et démographique avec comme conséquence le développement d'une région périurbaine (Lateef et al. 2010). A l'heure où elle est en (re)construction, la qualité de l'habitat est un problème crucial.

Les gisements d'argiles produisent principalement de la matière première pour l'industrie de la céramique et de la construction. La fabrication des briques de construction à Kinshasa est totalement faite de façon artisanale et les briques cuites sont chauffées au bois, avec les problèmes qui en découlent, notamment la déforestation (Schure et al., 2011 ; Wetshondo, 2012). En outre, la fabrication des matériaux de construction est gourmande en énergie. La tendance actuelle est de réduire au maximum la température et la durée nécessaires au traitement (Röhlen et al., 2013).

L'objectif de ce mémoire vise donc à produire, à partir des argiles locales, des matériaux de construction durables, peu gourmands en énergie et respectant l'habitat local. Cette thématique sera appliquée pour les briques crues. Pour répondre à cet objectif, la première étape a consisté à un échantillonnage d'argiles à Kinshasa (Lutendele et Ndili Cecomaf) et à Kasangulu, une localité située dans la province du Bas Congo (Fig. I.1). Les régions choisies se justifient par l'abondance des matières premières argileuses et par des besoins importants de développement. Les échantillons sont ensuite caractérisés d'un point de vue chimique, minéralogique, et géotechnique puis testés pour la construction des briques crues.

Ce mémoire fait suite à la thèse de Wetshondo (2002). Cette dernière a porté sur l'investigation des gisements argileux potentiels de la région de Kinshasa, leur caractérisation, et une application dans le domaine de la céramique de construction (briques cuites). Wetshondo a inventorié les matériaux argileux dans six localités dans la région de Kinshasa : Kingabwa, Kasangulu, Ndjili Cecomaf, Lemba Imbu, BriKin et Lutendele, mais seules les argiles de 2 sites (Kasangulu et Kingabwa) ont servi pour la caractérisation en laboratoire et la valorisation dans le domaine des briques cuites. La caractérisation des matériaux argileux de Kasangulu et de Kingabwa dans la thèse de Wetshondo a été faite par les méthodes géotechniques (teneur en eau naturelle, teneur en matières organiques, équivalent de sable, granulométrie, limites d'Atterberg, pH, Proctor Normal Modifié) ; microscopiques ; chimiques (fluorescence X, spectroscopie d'absorption atomique) et minéralogiques (diffraction des rayons X, spectroscopie infrarouge). Les principales conclusions de la thèse ont été :

- (1) Les matériaux de Kasangulu sont caractérisés par une teneur en eau naturelle comprise entre 10 et 20%, un équivalent de sable variant de 10 à 14%, une teneur en matériaux argileux de 2 à 32%. Ces matériaux sont aussi plastiques (W_L compris entre 35 et 49%, et W_P compris entre 19 et 22%), inorganiques ($M.O < 1\%$), limoneux (11 à 42% de limons), sableux (14 à 32% de sables fins et 24 à 35% de sables grossiers) et latéritisés. Ils sont composés d'un assemblage minéralogique dominé par la kaolinite, le quartz, la muscovite ou l'illite, la goethite, la gibbsite, les feldspaths alcalins et la chlorite.

Selon ces caractéristiques, les matériaux argileux de Kasangulu pourraient, selon Wetshondo, être

valorisés pour la fabrication des briques cuites ou stabilisées et éventuellement des tuiles.

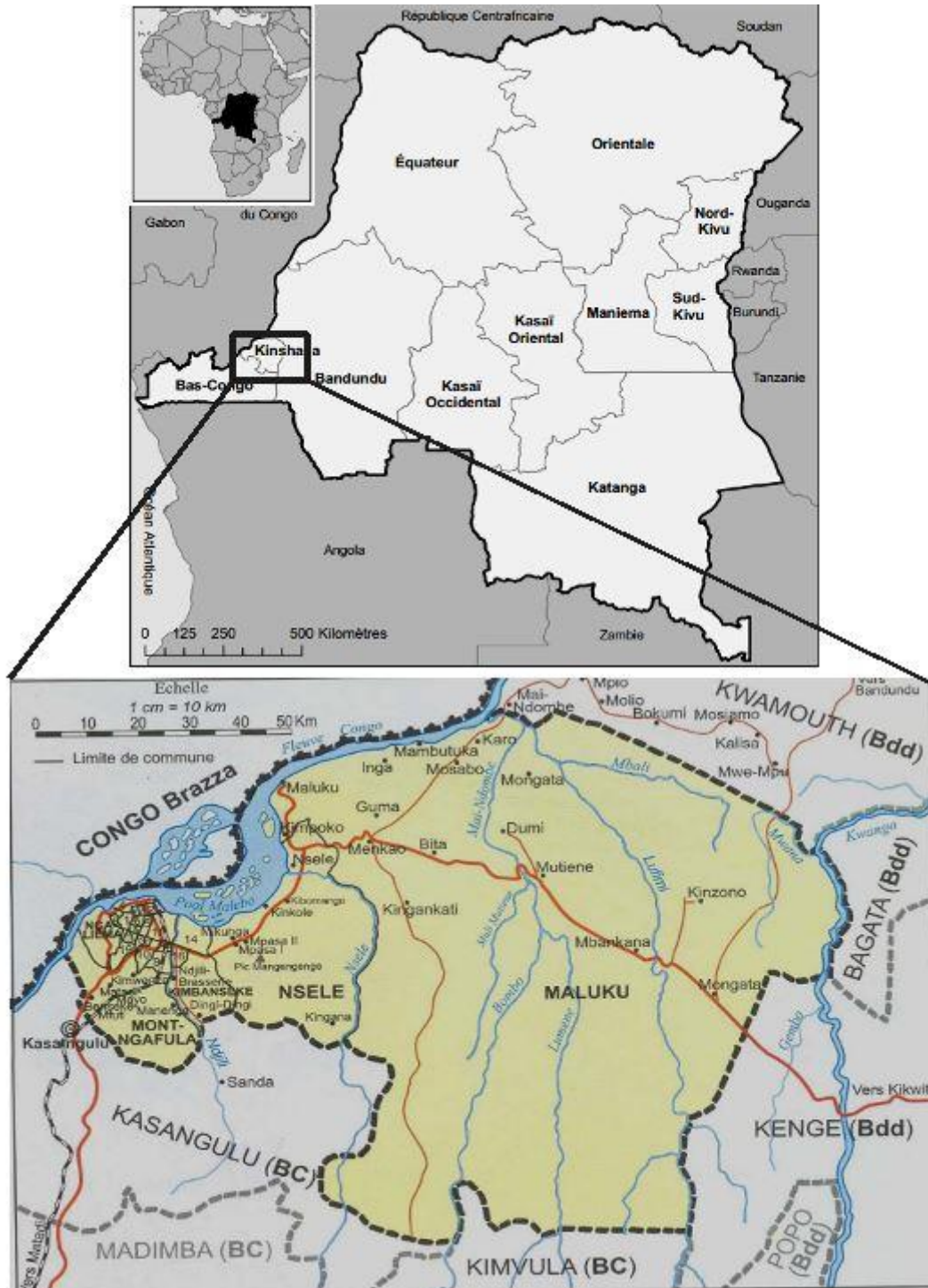


Fig. 1.1 : Situation géographique de la République Démocratique du Congo et de la ville province de Kinshasa (Ministère du Plan et Ministère de la Santé Kinshasa, République Démocratique du Congo et Macro International, 2008, modifié).

- (2) Les matériaux argileux de Kingabwa sont inorganiques (M.O <1%), grasses, et très plastiques (W_L compris entre 71 et 83%, et W_P compris entre 33 et 36%). Ils comprennent 40 à 60% d'argiles et 40 à 55% de limons. Le minéral le plus abondant est la kaolinite de bonne cristallinité, accompagnée de quartz, de l'illite et de la chlorite.

Ces caractéristiques montrent que les matériaux argileux de Kingabwa constituent

d'importantes ressources minérales qui peuvent être valorisés dans la filière de la céramique fine (émaux, porcelaine,...) (Wetshondo, 2012).

Ce mémoire élargira la caractérisation (minéralogique, chimique et géotechnique) des argiles de la région de Kinshasa à 2 autres localités (Lutendele et Ndjili Cecomaf) ainsi qu'à 3 sites supplémentaires dans la localité de Kasangulu (voir point III). Outre cette caractérisation, la valorisation des matériaux argileux se fera ici dans le domaine des briques crues.

La figure I.2 illustre les localités dans lesquelles Wetshondo a répertorié les gisements d'argiles dans la région de Kinshasa ainsi que les localités où ont été prélevés les échantillons qui seront caractérisés dans le cadre de ce mémoire.

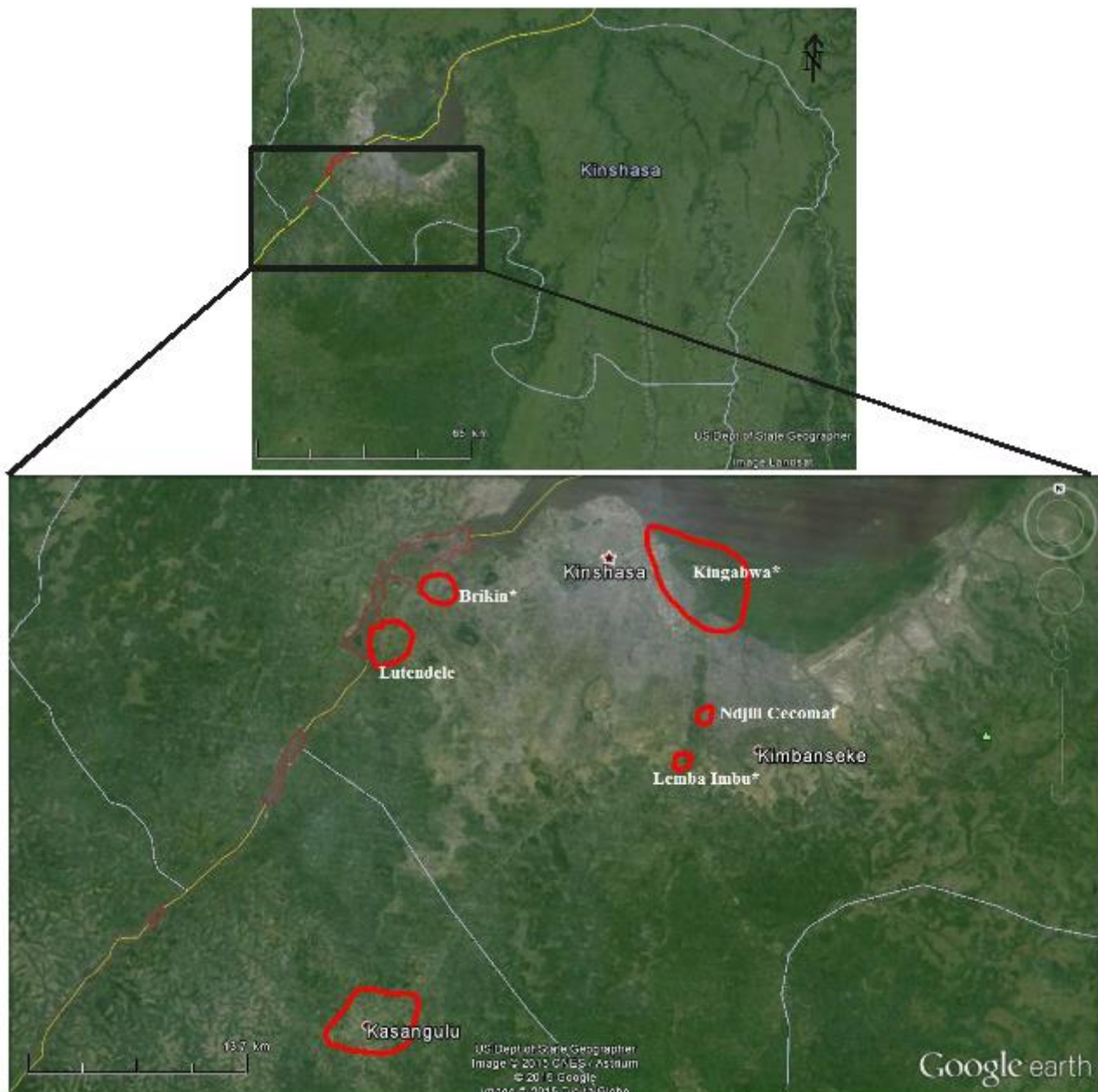


Fig. I.2 : Localités répertoriées par Wetshondo comme contenant des gisements de matériaux argileux (carte modifié d'après Google Earth, 2015). Les localités suivies d'un astérisque n'ont pas été échantillonnées dans le cadre de ce mémoire.

II. Origine des matériaux argileux de Kinshasa

L'origine des matériaux argileux de la région de Kinshasa est liée à la géologie et à la géomorphologie régionales.

II.1 Géologie régionale

La région de Kinshasa est située dans la ceinture de l'Ouest Congo (super-groupe de l'Ouest Congo). Cette dernière s'étend sur environ 1400 km, parallèlement à la côte Atlantique, du sud-ouest du Gabon au nord-ouest de l'Angola (Fig. II.1). Elle s'est mise en place à l'orogénèse panafricaine. Cette dernière 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). A l'ouest de l'Afrique, elle est à l'origine de la ceinture Ovest Congo, et au Brésil, elle a causé la formation de la ceinture Araçuaí (Pedrosa-Soares et al., 2001 ; Frimmel et al., 2006).

Le super-groupe Ovest Congo comprend, du plus vieux au plus jeune, 3 groupes néoprotérozoïques : le Zadinien, le Mayumbien et l'Ovest-Congolien, qui reposent en discordance sur le craton archéen (Tack, 2001) (Table II.1).

KAROO and post-KAROO SUPERGROUPS		
WEST CONGO SUPERGROUP	West Congolian Group	Inkisi Subgroup (>920 m) 566 Ma
		Mpioka Subgroup (1000 m)
		Schisto-Calcaire Subgroup (1100 m)
Upper Mixtite Formation (150 m)		
Haut Shiloango Subgroup (1050 m)		
Lower Mixtite Formation (400 m)		
	Sansikwa Subgroup (1650 m)	
	Mayumbian Group	Felsic volcanic, volcanoclastic and subvolcanic rocks (3000 - 4000 m; 912 ± 7 to 920 ± 8 Ma)
	Zadinian Group	Siliciclastics (<1500) covered by Gangila metabasalt (1600 - 2400 m) Palabala metarhyolite
KIMEZIAN SUPERGROUP (c. 2.1 Ga)		Noqui granite 999 ± 7 Ma

Table II.1 : Subdivision lithostratigraphique du groupe Ovest Congo dans le Bas-Congo (Frimmel et al., 2006, modifié d'après Tack, 2001).

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

- Le groupe Mayumbien qui le recouvre comprend des roches volcaniques felsiques associées à des roches volcano-sédimentaires et des intercalations sédimentaires qui sont par endroits recoupées par divers granitoïdes cogénétiques de composition monzogranitique à syénogranitique et de granites alcalins feldspathiques. L'âge de la mise en place obtenu pour deux de ces granitoïdes est de 920 ± 8 Ma et 912 ± 7 Ma (Tack, 2001). Les roches du Mayumbien montrent une forte déformation suite à l'orogénèse panafricaine (Tack, 2001) (Fig. II.1).

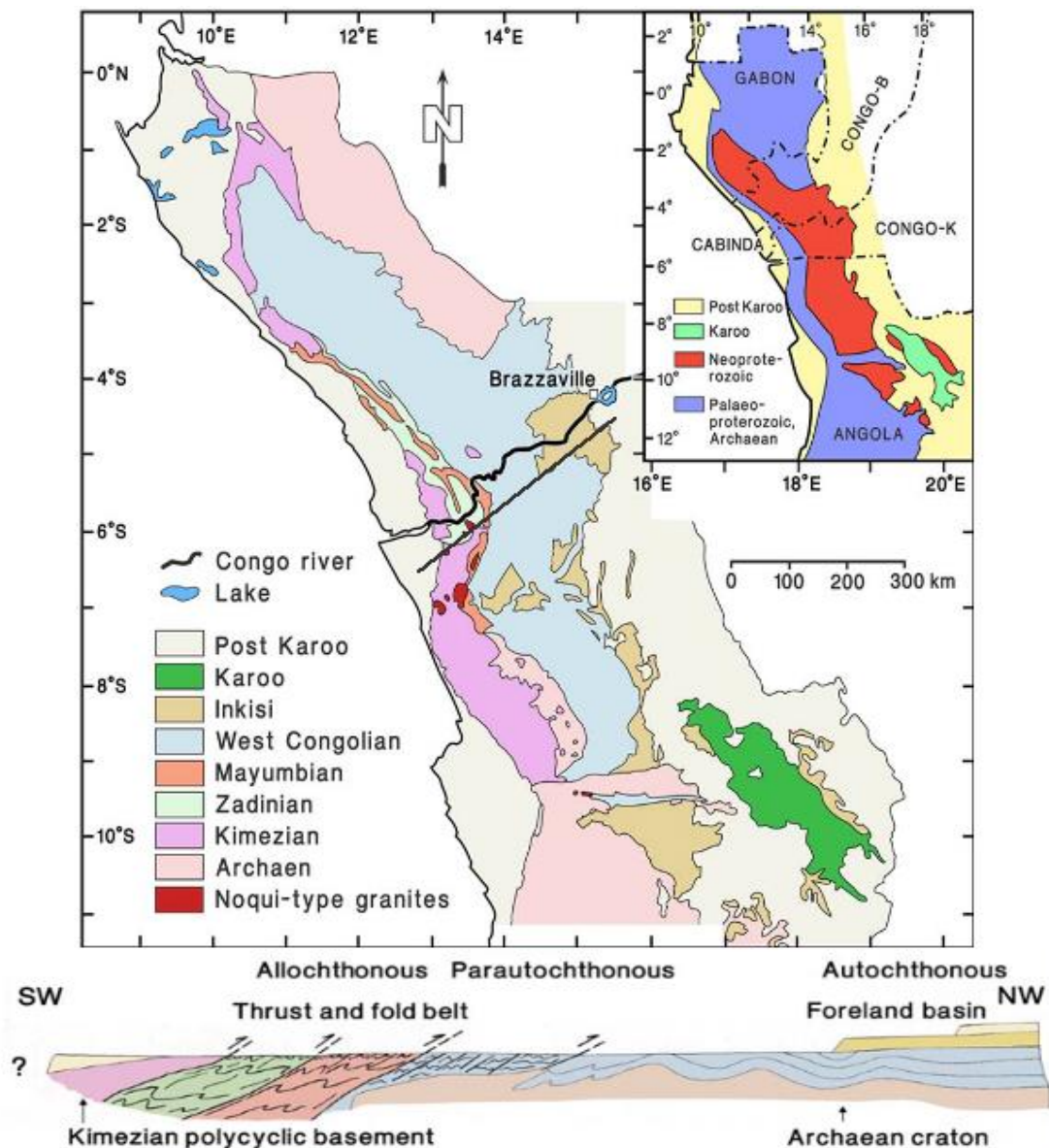


Fig. II.1 : Principales unités de la ceinture Ouest Congo et section transversale SW-NE schématique à travers la ceinture (Frimmel et al., 2006 ; modifié d'après Tack, 2001, modifié).

Les groupes Zadinien et Mayumbien indiquent une activité volcanique associée à un début de sédimentation de type rift, entre 1000 et 910 Ma, liés à la dislocation du continent Rodinia (Tack, 2001).

- Le groupe de l'Ouest-congolien débute par une succession siliciclastique, associée à des conglomérats, suivie des argilites, des quartzarénites et des arkoses (sous-groupe du Sansikwa). Ce dernier est recouvert par une diamictite (formation de la Mixtite inférieure), qui est associée à un

épisode de coulée de laves basaltiques en coussin (De Paepe et al., 1975 ; Kampunzu et al., 1991 ; Frimmel et al., 2006). Ensuite viennent une succession variée de conglomérats, d'argilites, de calc-pélites, quartzarénites, calcarénites (sous-groupe du Haut Shiloango), et éventuellement une deuxième diamictite (la formation de la Mixtite supérieure). Celles-ci sont recouvertes par une séquence de cap-carbonate de rampe et de plate-forme avec des biohermes de stromatolites et de cyanobactérie filamenteuse *Obruchevella*, connue comme le sous-groupe Schisto-calcaire (Alvarez et al., 1995). La succession sédimentaire allant du sous-groupe de Sansikwa au sous-groupe schisto-calcaire est une séquence de plate-forme de marge passive pré-panafricaine (Frimmel et al., 2006).

Le sous-groupe Schisto-Calcaire est suivi d'une succession siliciclastique avec des conglomérats de quartzarénite, d'arkose, et d'argilite (sous-groupe du Mpioka). Elle est interprétée comme un dépôt de molasse fin-orogénique qui se produit tout au long de la ceinture Ouest Congo, ayant été affectée localement par la déformation panafricaine (Tack, 2001).

La position stratigraphique des roches sédimentaires siliciclastiques à grains principalement grossiers sus-jacent (sous-groupe de l'Inkisi) est mal connue. 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 séparent le sous-groupe de l'Inkisi du groupe Ouest-congolien et le considèrent comme une unité lithostratigraphique individuelle.

Le sous-groupe de l'Inkisi est souvent interprété comme une molasse tardi-panafricaine déposée dans un bassin d'avant-pays avec un faciès de bancs tabulaires rouges (Nicolini, 1959 ; Alvares et al., 1995). Il correspond 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 (Cosson, 1955 ; Alvares et al. 1995) : des arkoses à micas blancs et des lits à galets de grès, argilites, psammites, et quartz ; des grès siliceux fins, feldspathiques et micacés avec localement des intercalations d'argilites. Le sous-groupe de l'Inkisi s'étend à l'Ouest de Brazzaville, à Kinshasa, dans le bassin du Bas-Congo, et jusqu'au sud en Angola. Il a une épaisseur de 600 à 1000m (Cosson, 1955 ; Alvarez et al., 1995).

Le sous-groupe de l'Inkisi est recouvert par les dépôts du Karoo¹ d'âge permien en Angola et du Post Karoo en République Démocratique du Congo. Ces derniers se sont mis en place à la suite de la dislocation du Gondwana (fin du Jurassique) et à la transgression marine du sud vers le nord qui s'en est suivie du Crétacé inférieur à l'Eocène supérieur (Alvarez et al.1995).

Le super-groupe Post Karoo est caractérisé par des roches gréseuses et carbonatées (Lanfranchi et Schwartz, 1990). La transgression était associée à une érosion intense dans le bassin du Congo pendant le Crétacé et le début du Tertiaire, donnant 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 de taille moyenne avec une usure éolienne marquée, et un ciment argileux peu abondant (Boissezon et Gras, 1970). On peut également observer un niveau conglomératique à galets et blocs arrondis de grès quartzite, des blocs de cuirasse contenant des pseudo-concrétions quartzieuses, et une brèche englobant des cherts analogues à ceux que l'on trouve dans les formations du Schisto-calcaire (Boissezon et Gras, 1970) (Table. II.2).

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).

Denudation events	Lithology	Stratigraphy
	Recent alluvium (point bars, flood plains, flood basins, and marshes)	Holocene
Gullying/Erosional surface	Sands of Lemba (0.0 to 10 m) Lower and middle terraces	Holocene–Pleistocene
	Loam: fine to medium sand, argilaceous, brown or orange (0.0 to 30 m) Lower, middle, and high terraces	(Quaternary or older alluvium)
		Pleistocene
Erosional surface	Kaolinite sand (0.0 to 8 m)	
Deep gullying	Gravelly very coarse sand (post Gres Polymorphes). Channel fill entrenching older units (>25 m). Unconfined aquifer	
	Gres Polymorphes unit: silicified at basal part i.e., toward the underlying Gres Tendre (2 m thick)	Eocene Oligocene Miocene
	Gres Tendre unit. Beige to pink and white sandstone (30 m). Few outcrops in the plain of Kinshasa.	Cretaceous
Discordance	Marly sandstone, argilaceous, and schisty sandstone: calcareous, red or green, partially fossiliferous (phylopodes and fish scales)	Upper Jurassic
Long hiatus	Inkisi siliciclastics	Post-Cambrian to pre-Permian

Table II.2 : Stratigraphie détaillée de la région de Kinshasa (Lateef et al., 2010).

Au Cénozoïque, on observe des grès polymorphes composés des sables éoliens et des lentilles calcaires ou argileuses, le plus souvent cimentés par la silice (série de Kalahari inférieur), qui témoignent d'une période d'aridification. Ces grès sont surmontés par la série des sables ocres du Néogène, appelés sables Batéké (série de Kalahari supérieur) qui font suite à la fin de l'aridification et au début d'un régime de mousson (Fig. II.2) (Giresse et al., 1990).

L'Holocène se caractérise par des dépôts d'alluvions. Il s'agit principalement de graviers surmontés de limon (Giresse, 1990).

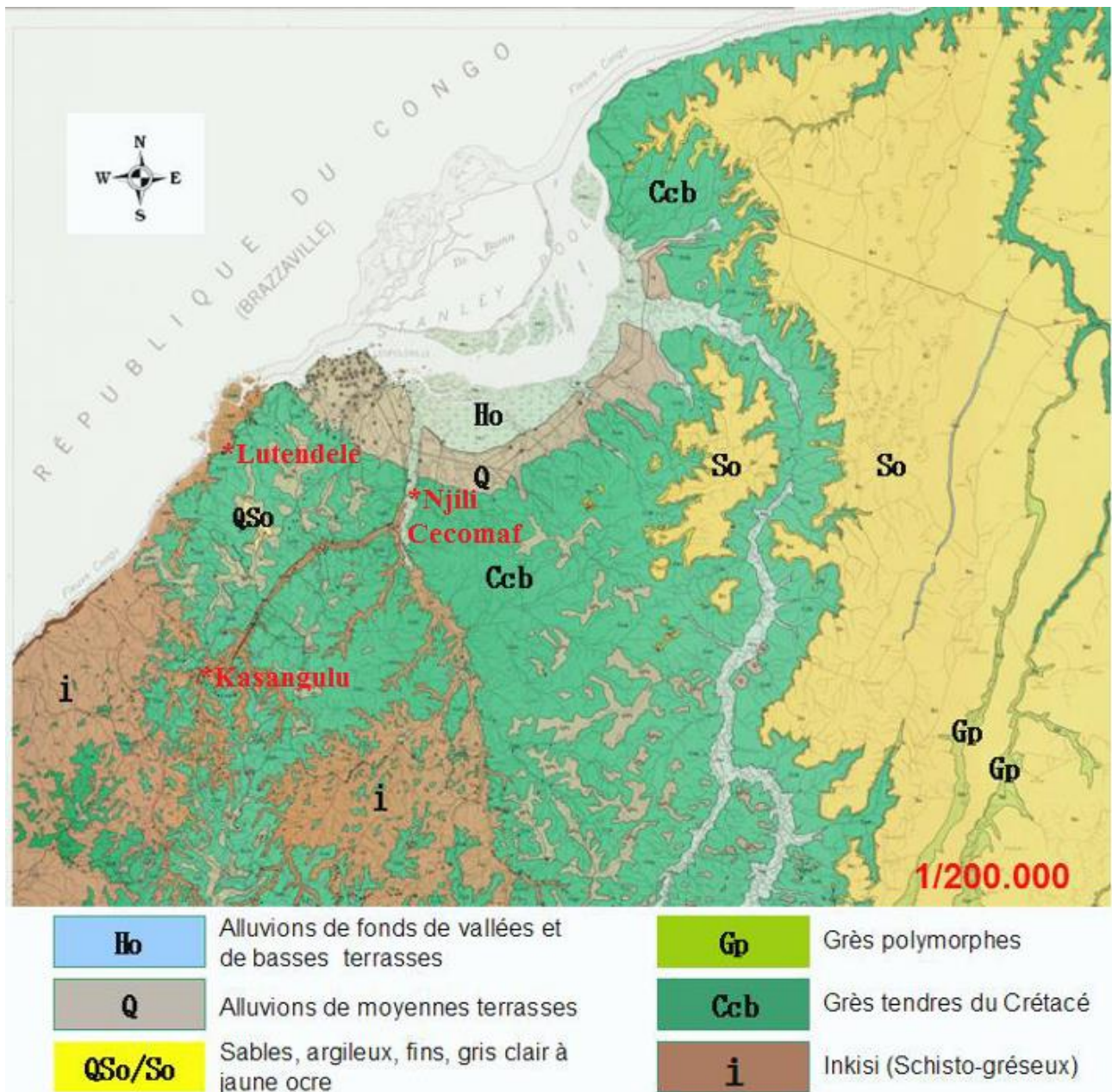


Fig. II.2 : Carte géologique de Kinshasa (Wetshondo, 2012, modifié d'après Musée Royal de l'Afrique Centrale, 1963, modifié).

II.2 Géomorphologie régionale

Trois faciès géomorphologiques sont observés dans la région de Kinshasa (Lefèvre, 1964) (Fig. II.3): (1) La plaine et les basses terrasses des rivages du fleuve Congo : s'étalent sur un substratum gréseux incliné vers le nord-est (grès de l'Inkisi). Les sols dans cette zone sont organiques et podzolitiques à substrat argileux et argilo-sableux (Lateef et al. 2010). Cette plaine se situe entre 300 et 320 m d'altitude et a une superficie d'à peu près 100 km². Elle se divise en deux parties à savoir la plaine de Lemba à l'Ouest de la rivière Ndjili, et la plaine de Leo à l'Est de la Ndjili (Lefèvre, 1964). La zone des plaines est limitée au nord par le fleuve Congo.

(2) La zone des collines : succède aux basses terrasses au fur et à mesure qu'on s'éloigne du fleuve Congo vers le sud-est. Elle est constituée de grès tendres altérés recouverts de sables fin argileux. Ces collines sont recouvertes des ferrisols intergrades de texture sablo-limoneuse. La zone des collines culmine de 350 à 675 m d'altitude (Lefèvre, 1964 ; Lateef et al., 2010).

(3) Le plateau des Bateke : prolonge au sud le plateau du Kwango. Il est constitué d'une série de sables fins reposant sur le grès polymorphe (voir Table II.2). Ce plateau couvre une superficie d'environ 7.500 Km², soit 75,3% de l'ensemble de l'étendue de la ville de Kinshasa. Il culmine entre 600 et 700 m d'altitude (Lefèvre, 1964 ; Lateef et al., 2010).

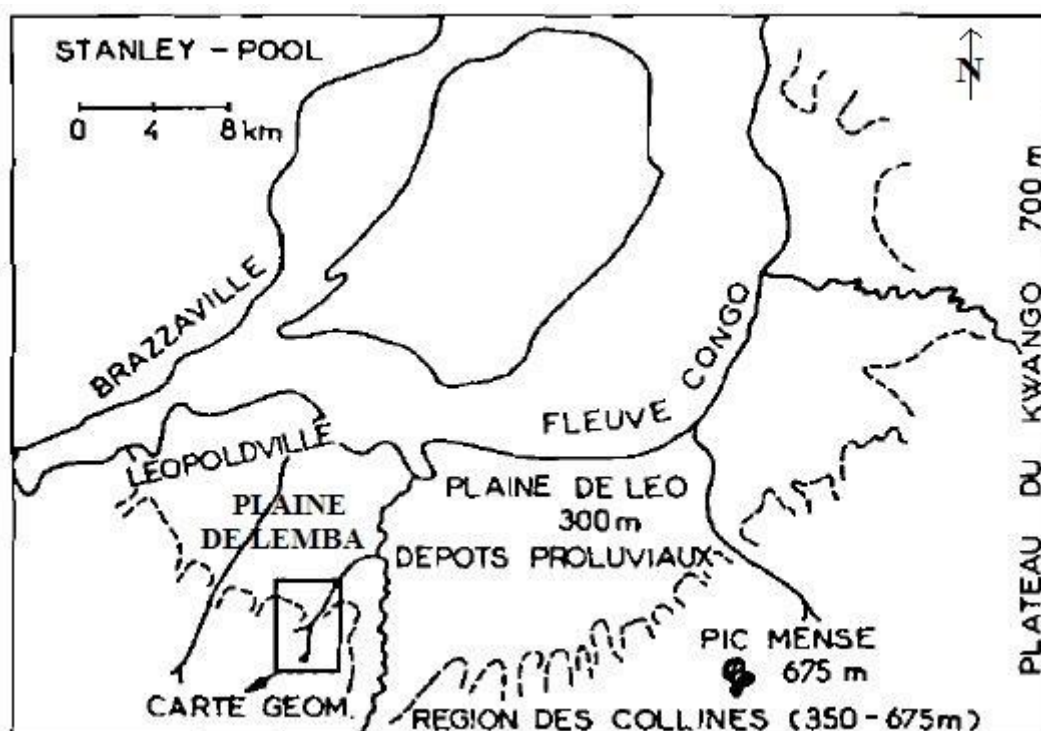


Fig. II.6 : Carte géomorphologique de la ville de Kinshasa (modifié d'après Lefèvre, 1964).

II.3 Sols

Le sol est une formation naturelle de surface, à constituants minéraux et/ou organiques, résultant de la transformation d'une roche mère, sous l'action du climat, de la nature de la roche-mère, de la géomorphologie et dans une moindre mesure de la végétation, de l'action de l'Homme et de la faune. Mais le facteur temps ne doit pas être négligé (Duchaufour et Blum, 2000). Les matériaux argileux échantillonnés dans le cadre de ce mémoire sont donc des éléments du sol. Les sols de Kinshasa sont de types tropicaux, développés sous l'action d'un climat chaud et humide. Ils sont généralement pauvres chimiquement et leur acidité est prononcée. Ils disposent d'une teneur en argile généralement < 20 % et en certains endroits, ils sont argilo-sableux (Egoroff, 1955).

Influence de la roche mère

D'après Egoroff (1955), le schisto-calcaire et toutes les formations antérieures appartenant à l'orogénèse Ouest-congolienne fournissent un sol argileux jaune, assez stérile, de perméabilité médiocre, liée à la teneur en sable. Tandis que les schisto-gréseux, et argilo-calcaires donnent des sables argileux jaunes ou brun clairs peu fertiles et suffisamment perméables. Les sols qui s'y développent sont pauvres excepté dans les formations alluvionnaires et colluvionnaires où ils sont fertiles. Les matériaux issus de l'altération des grès tendres et grès polymorphes (grès pauvres en minéraux altérables) sont uniquement constitués de sables quartzeux, avec un pourcentage d'argile inférieur à 5 % (Cosson, 1955 ; Le Maréchal, 1966 ; Boissezon et Gras, 1970 ; Schwartz et Rambaud, 1983). Les sols développés sur les matériaux sableux de Batéké sont peu épais, et contiennent moins de 20 % de minéraux argileux (largement dominés par la kaolinite) (Schwartz et Rambaud, 1983).

Influence du climat

Les sols de Kinshasa sont principalement de 3 types (Egoroff, 1955) :

(1) Les sols peu évolués

Il s'agit de sols jeunes, sableux grisâtre ou argilo-sableux, résultant d'un apport de colluvions et/ou d'alluvions. Ils sont caractérisés par l'absence ou la faible altération sur toute l'épaisseur du profil (Schwartz, 1985). On les trouve surtout le long du Pool Malebo, où leur extension reste limitée ; au sommet des collines les plus élevées et sur les versants des vallées profondes, généralement sur le substratum schisto-gréseux et les massifs anciens (Egoroff, 1955).

(2) Les podzols

« La podzolisation est un processus pédogénétique caractérisé par l'altération biochimique des silicates par la matière organique provenant de la surface, et la migration sous forme complexée des produits de cette altération pour s'accumuler au sein d'un horizon sous-jacent » (Schwartz, 1985).

« La podzolisation affecte les matériaux sableux et à une certaine teneur en fer, et nécessite la présence d'une nappe d'eau, qui ralentit la décomposition de la matière organique et facilite la complexolyse » (Schwartz, 1985). On trouve les podzols en fond de vallées sur les sables Batéké (Giresse et al., 1982).

(3) Les sols ferrallitiques

Les sols ferrallitiques sont les principaux sols qui se développent dans la zone intertropicale humide. Ils se caractérisent par une hydrolyse poussée d'un grand nombre de minéraux primaires, alors que les sesquioxides restent sur place (Duchaufour et Blum, 2000).

Les produits de synthèse sont essentiellement des argiles de la famille de la kaolinite, des oxydes de fer et d'alumine (goethite et gibbsite), ainsi qu'un certain nombre de minéraux hérités de la roche mère ayant résisté à l'altération ou à la dissolution comme le quartz, la magnétite, l'ilménite, le zircon ... et dans une moindre mesure l'illite, la muscovite, le grenat, la tourmaline etc. (Duchaufour et Blum, 2000). Les horizons d'altération peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres.

Dans la région de Kinshasa, les sols ferrallitiques se développent sur le matériau d'altération des grès de l'Inkisi, sur les sables Batéké, et sur le matériau d'origine alluviale.

Sols échantillonnés

Les sols ferrallitiques sur matériau d'altération des grès de l'Inkisi

Ces sols ont été échantillonnés dans le cadre de ce mémoire à Kasangulu et à Lutendele (voir point III). On les retrouve dans la partie sud ouest de la région (Egoroff, 1955). Ces sols sont caractérisés par un pH acide, un taux de matière organique relativement faible, une forte teneur en potassium qui provient des feldspaths du grès et quelques illites héritées (Schwartz, 1985). Denis (1974) a effectué une caractérisation de quatre horizons au sein de ce profil :

- 0 – 100 cm. Horizon à matière organique non directement décelable et diffuse dans tout l'horizon. Sablo-argileux à argilo-sableux.
- 100 – 300 cm. Horizon sablo-argileux à argilo-sableux.
- 330 – 335 cm. 50 % d'éléments grossiers, de 3 à 7 cm de diamètre : grès durs, arrondis, ferruginisés, galets rouges de quartzite.
- 335 – 380 cm. Horizon sableux. Roche sédimentaire altérée dans la masse.

Ces sols sont parfois contaminés par des matériaux sableux provenant des formations Batéké, qui étaient autrefois plus étendue (Denis, 1974).

Les sols ferrallitiques sur le matériau d'origine alluviale

Ces sols ont fait l'objet d'un échantillonnage dans le cadre de ce mémoire à Ndjili Cecomaf (voir point III). Ils sont argilo-sableux et donnent de meilleurs rendements agricoles. La forte pluviométrie les lessive et produit une hydrolyse totale des éléments du sol (Egoroff, 1955).

III. Sites et techniques d'échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé lors d'un séjour de recherche que j'ai réalisé du 3 au 31 juillet 2014 à Kinshasa. L'échantillonnage sur le terrain s'est fait dans trois localités (Kasangulu, Ndjili Cecomaf et Lutendele), et été guidée par Dominique Wetshondo, professeur à l'Université de Kinshasa, assisté de Jean René Kabamba, assistant à l'Université de Kinshasa. Le premier lieu échantillonné (Kasangulu) est situé dans la province du Bas-Congo (à l'ouest de Kinshasa), dans le territoire portant le même nom, et les deux autres sont situés dans les communes de Ndjili et de Mont Ngafula. Trois sites de prélèvement ont été enregistrés à Kasangulu, un à Ndjili Cecomaf et trois à Lutendele.

III.1 Kasangulu

L'échantillonnage à Kasangulu a été réalisé en trois points, distants de moins de moins d'1 km et différents de ceux étudiés par Wetshondo (2012) (Fig. III.1).

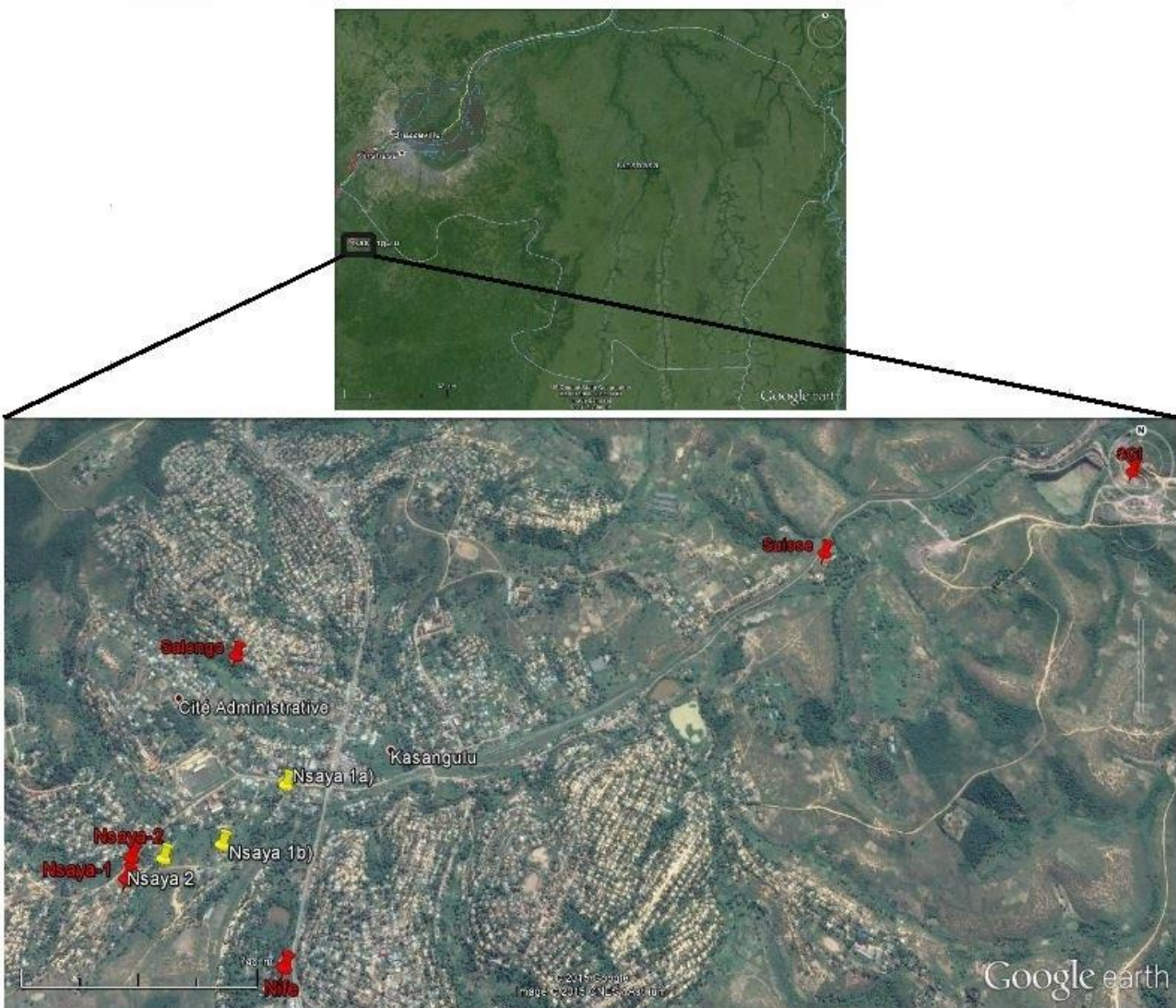


Fig. III.1 : Localisation des 3 points d'échantillonnage (Nsaya 1a, Nsaya 1b et Nsaya 2) et de ceux de Wetshondo (SGI, Suisse, Nsaya-1, Nsaya-2, Nife et Salongo) (modifié d'après Google Earth, 2015)

Point 1 : Nsaya 1a

Le site Nsaya 1a ($4^{\circ}35'33,26''S/ 15^{\circ}10'1,02''E$, altitude 397 m) est une paroi d'une petite exploitation artisanale d'argiles, à des fins de briqueterie. Il se localise le long d'une petite route en terre, et près des habitations (fig. III.2).



Fig. III.2 : Site d'échantillonnage de Nsaya 1a.

Trois niveaux ont été observés sur ce site. Ils sont présentés schématiquement sur la figure (III.3). Le premier niveau est constitué d'un sol humifère noirâtre. Ce faciès n'a pas fait l'objet d'un échantillonnage. Son épaisseur est de 40 cm. Le deuxième niveau présente une épaisseur de 2,40 m. Il est constitué d'une argile jaunâtre, avec des traces noirâtres au sommet. L'échantillon (C2 Nsaya 1I) a été prélevé à une profondeur d'environ 2 m. Le troisième et dernier niveau a une épaisseur de plus de 2 m. Il est rougeâtre et constituerait la saprolithe des grès de l'Inkisi. L'échantillon (C3 Nsaya 1I) a été prélevé à une profondeur située entre 3 et 4 m.

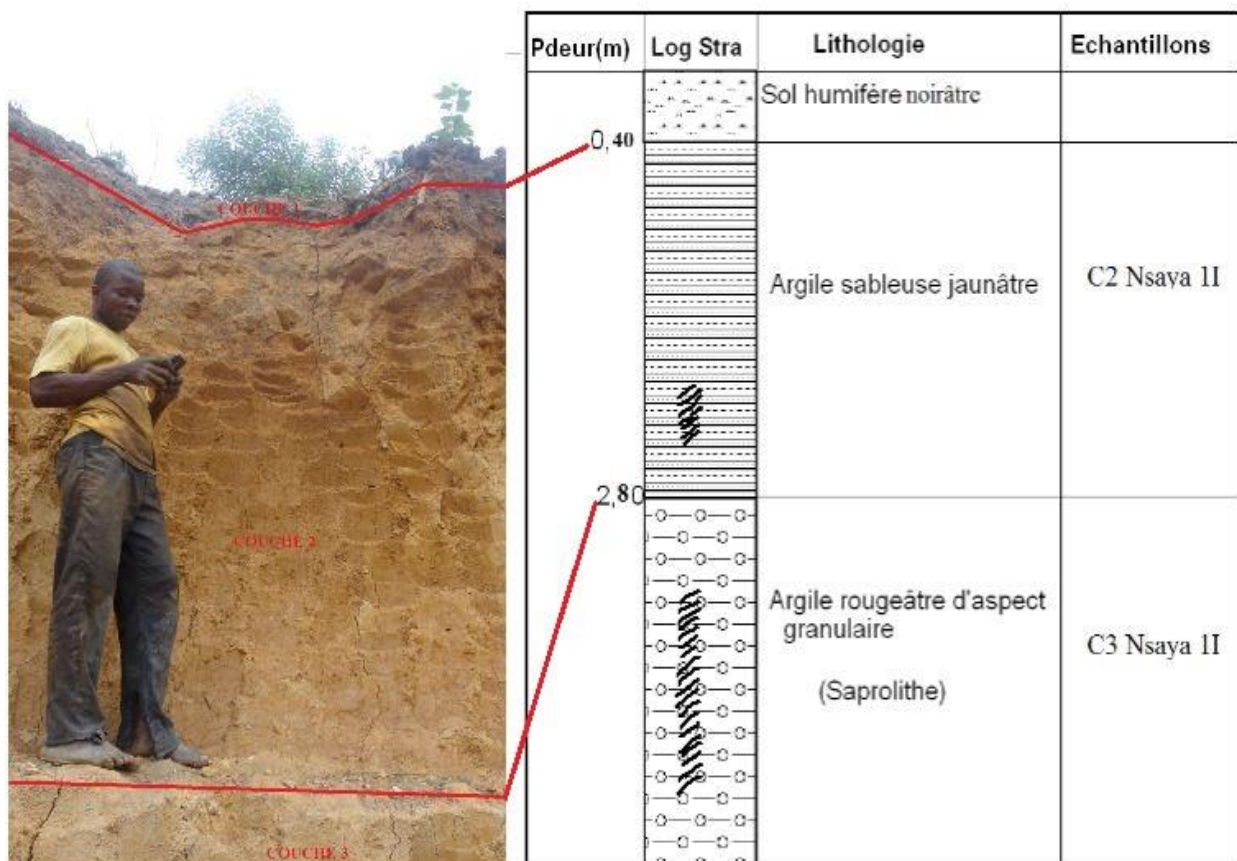


Fig. III.3 : Front de taille et log lithologique de Nsaya 1a, montrant les différents niveaux argileux. Les zones hachurées représentent les zones où ont été prélevés les échantillons.

Point 2 : Nsaya 1b

Le deuxième site qui a fait objet d'un échantillonnage est situé à 200 mètres au sud-ouest du premier. Il s'agit aussi de la paroi d'une exploitation artisanale (Fig. III.4).



Fig. III.4 : Site d'échantillonnage de Nsaya Ib.

Quatre niveaux ont été observés (Fig. III.5). Le premier est noirâtre et épais de 40 cm, et le deuxième de 2,50 m. Le niveau 3 est rougeâtre et a fait objet d'échantillonnage (C3 Nsaya III). Il est suivi d'un « horizon » de 15cm d'épaisseur constitué de morceaux de grès rouges en altération au sein d'une masse argileuse (Fig. III.6). En dessous de cet horizon, on observe un quatrième niveau, qui aurait les mêmes caractéristiques que le niveau 3 (échantillon C4 Nsaya III).

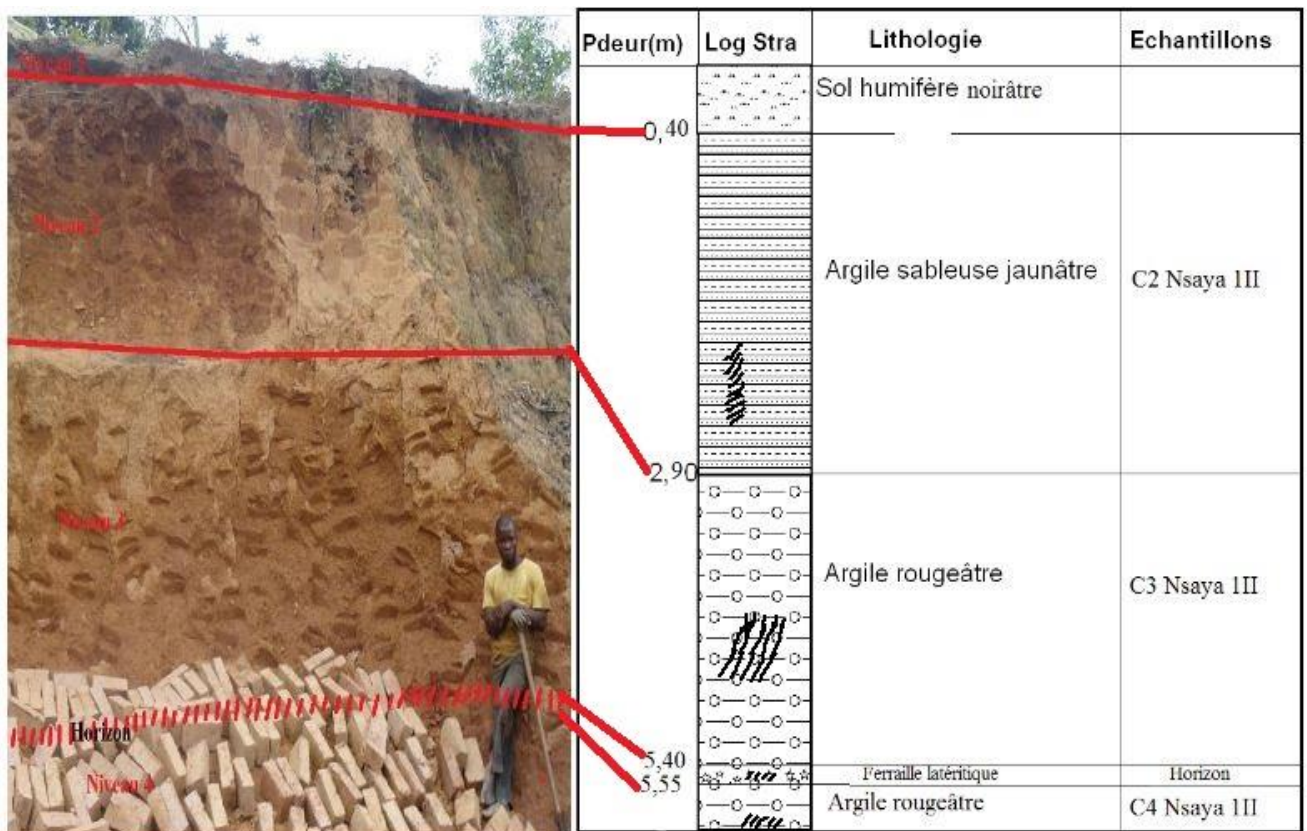


Fig. III.5 : Front de taille et log lithologique de Nsaya Ib, montrant les différents niveaux argileux. Les zones hachurées représentent les zones où ont été prélevés les échantillons.

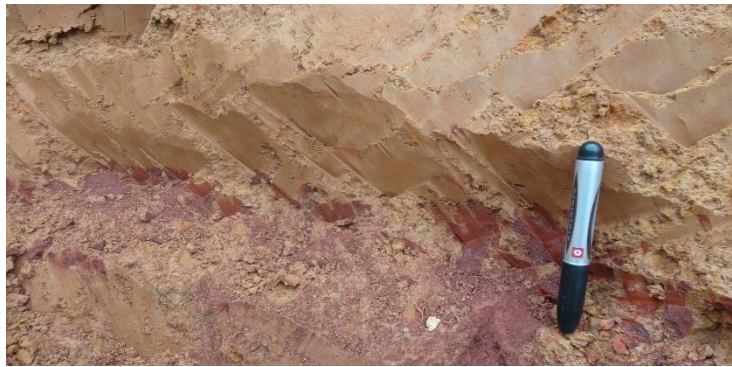


Fig. III.6 : Vue sur la couche « horizon ».

Point 3 : Nsaya 2

Le troisième et dernier site d'échantillonnage à Kasangulu (Nsaya 2, 4°35'41,70"S/15° 9'48,60"E, 394 mètres), est un front de taille d'une exploitation artisanale située dans le quartier de Nsaya 2, le long d'une petite route en terre. Seules 2 couches ont été observées : la couche 1 (couche humifère) et la couche 2 (argile jaunâtre) (fig. III.7). La couche 2 a été la seule à avoir été échantillonnée (échantillon C2 Nsaya 2).

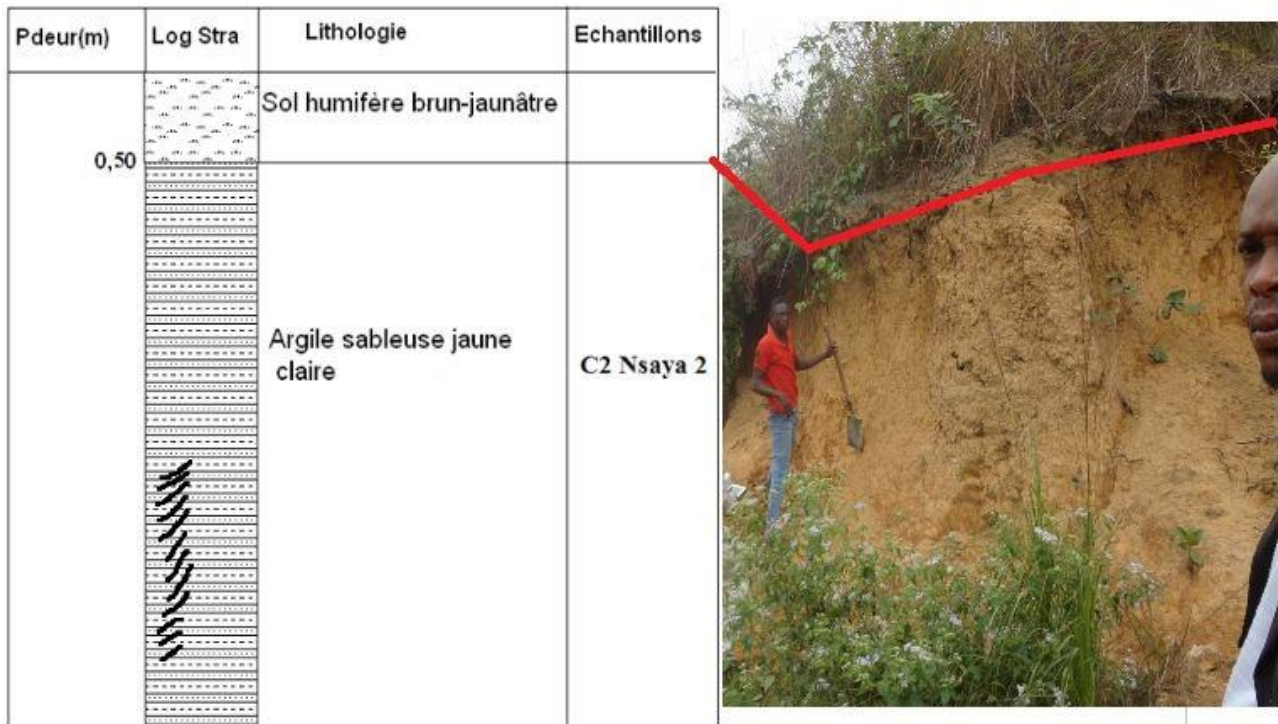


Fig. III.7 : Front de taille et log lithologique de Nsaya 2, montrant les différents niveaux argileux. La zone hachurée représente la zone où a été prélevé l'échantillon.

Sur base des observations visuelles, les matériaux prélevés à Kasangulu montrent une continuité spatiale entre eux comme l'illustre la figure III.8.

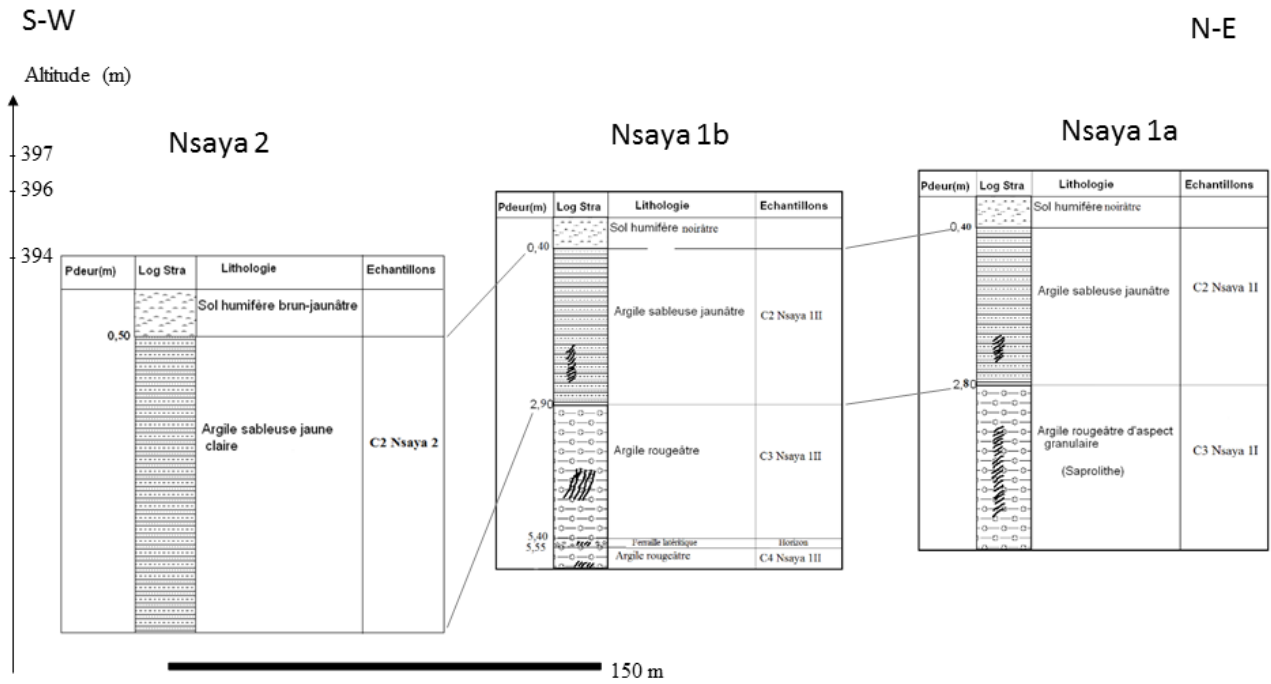


Fig. III. 8 : Profil en long des sites d'échantillonnage de Kasangulu.

III.2 Ndjili Cecomaf

Ce site est localisé le long de la rivière Ndjili, sur la rive droite (Fig. III.9), et a pour coordonnées géographiques 4°25'15,60"S/ 15°21'45,80"E ; altitude 284 mètres. Il est caractérisé par des dépôts d'alluvions. Les matériaux argileux y sont exploités de manière artisanale. L'échantillonnage a été réalisé dans un puits artisanal de 3 m de profondeur (Fig. III.10). L'argile extraite ici montre trois faciès différents. Le premier faciès est caractérisé par une argile humifère noirâtre, suivie d'un deuxième faciès d'argiles jaunâtres épais d'environ 1,50 m et d'un troisième faciès d'argile blanche épais de plus de 1 m (Fig. III.11). Cette argile extraite de façon artisanale est utilisée pour des briques (faciès 2) ou est consommée après cuisson, surtout par les femmes enceintes à Kinshasa (faciès 3).

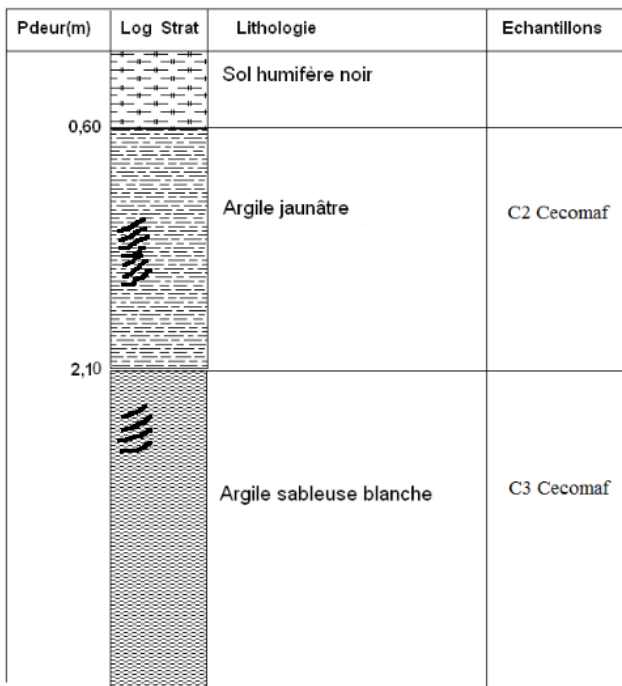


Fig. III.11 : Log lithologique du site d'échantillonnage de Njili Cecomaf. Les zones hachurées représentent les zones où ont été prélevés les échantillons.

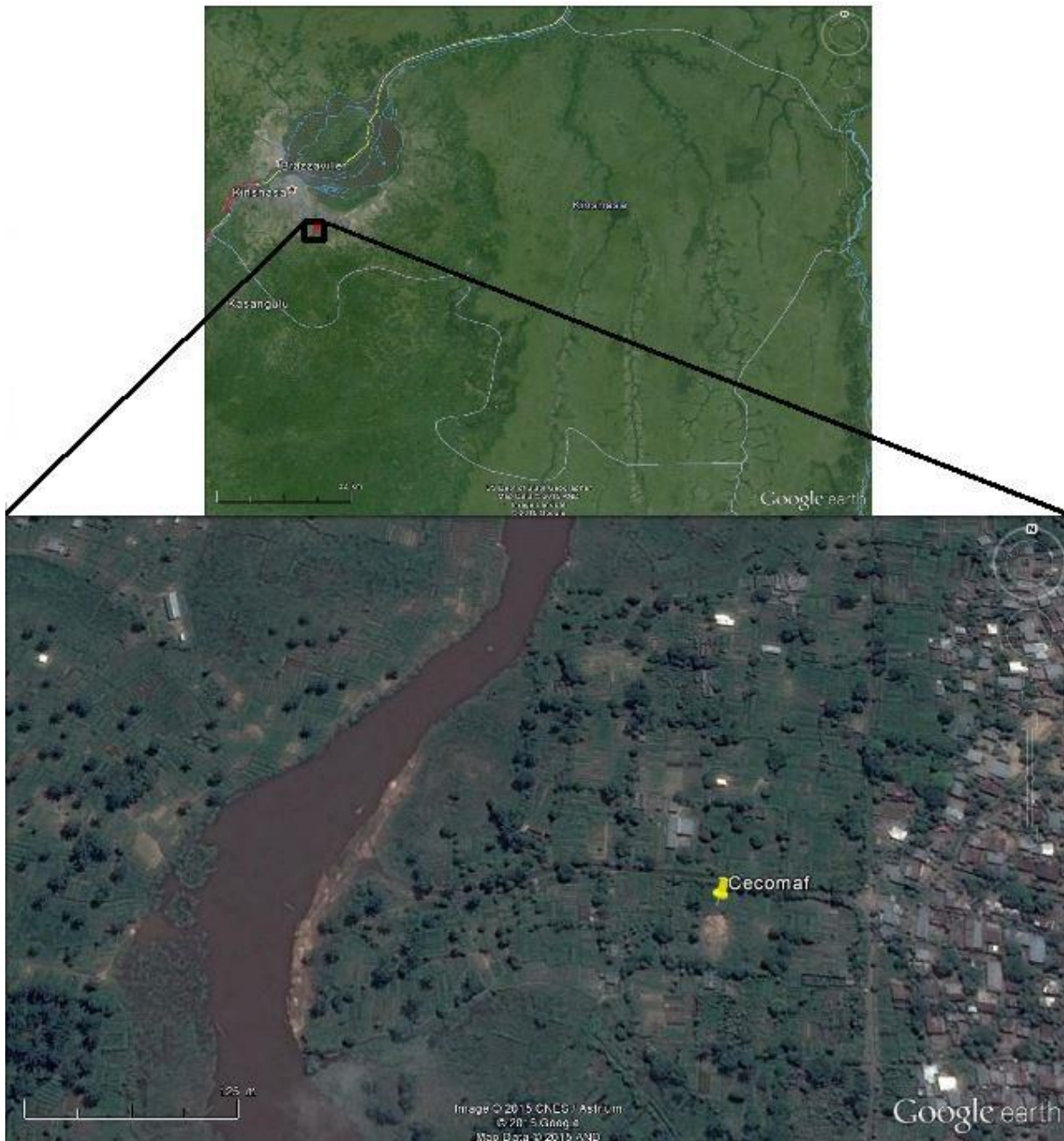


Fig. III.9 : Localisation du point d'échantillonnage à Ndjili Cecomaf (modifié d'après Google earth, 2015).



Fig. III.10 : Puits d'échantillonnage à Ndjili Cecomaf.

III.3 Lutendele

Les sites d'échantillonnage à Lutendele sont représentés à la figure III.12.



Fig. III.12 : Point d'échantillonnage de Lutendele (modifié d'après Google earth, 2015).

Lutendele/Mbudi 1

Le site d'échantillonnage de Lutendele/Mbudi 1 ($4^{\circ}22'26,90''S/ 15^{\circ}12'0,30''E$; altitude 266 mètres) est localisé à Lutendele dans la commune de Mont Ngafula. Le site est un ancien puits artisanal (Fig. III.13), qui a été rafraîchi pour échantillonner une argile jaunâtre, située en dessous d'une argile humifère noirâtre épaisse de 15 cm (Fig. III.14). L'argile échantillonnée est en contact direct avec la nappe aquifère, ce qui empêche les exploitants d'aller plus profondément.



Fig. III.13 : Site d'échantillonnage de Lutendele/Mbudi 1.



Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0,15		Sol humifère brunâtre à grisâtre	
		Argile sableuse jaunâtre	C2 Lutendele1

Fig. III. 14 : Front de taille et log lithologique de Lutendele/Mbudi 1, montrant les différents niveaux argileux. La zone hachurée représente la zone où a été prélevé l'échantillon.

Lutendele/Mbudi 2

Le site est situé à environ 200 mètres du site précédent (4°22'25,30"S/15°11'56,50"E ; altitude 264 mètres), et le long d'un petit cours d'eau appelé Boyi (Fig. III.15). Le faciès argileux échantillonné à cet endroit est noirâtre (Fig. III.16).



Fig. III.15 : Site d'échantillonnage de Lutendele/Mbudi 2.

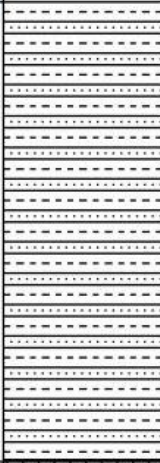
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0		Argile sableuse noirâtre présence de la matière organique plus vers le sommet	C2 Lutendele2 (échantillon moyen)

Fig. III.16 : Log lithologique de Lutendele/Mbudi 2.

Lutendele/Kimbaguiste

Le site de Lutendele/Kimbaguiste (4°22'14,50"S/15°11'31,10"E ; altitude 262 mètres) est situé à Lutendele, dans le quartier Kimbaguiste, sur un terrain que la société BriKin (Briqueterie de Kinshasa) louait à l'église kimbaguiste, et sur lequel elle prélevait de l'argile. Actuellement le site est occupé par des exploitants artisanaux. Deux faciès ont été observés et échantillonnés sur ce site situé le long de la rivière Boyi (Fig. III.17) : un premier faciès constitué d'argiles jaunâtres et épais de 2,60 mètres, et un deuxième faciès constitué d'argiles blanchâtres.

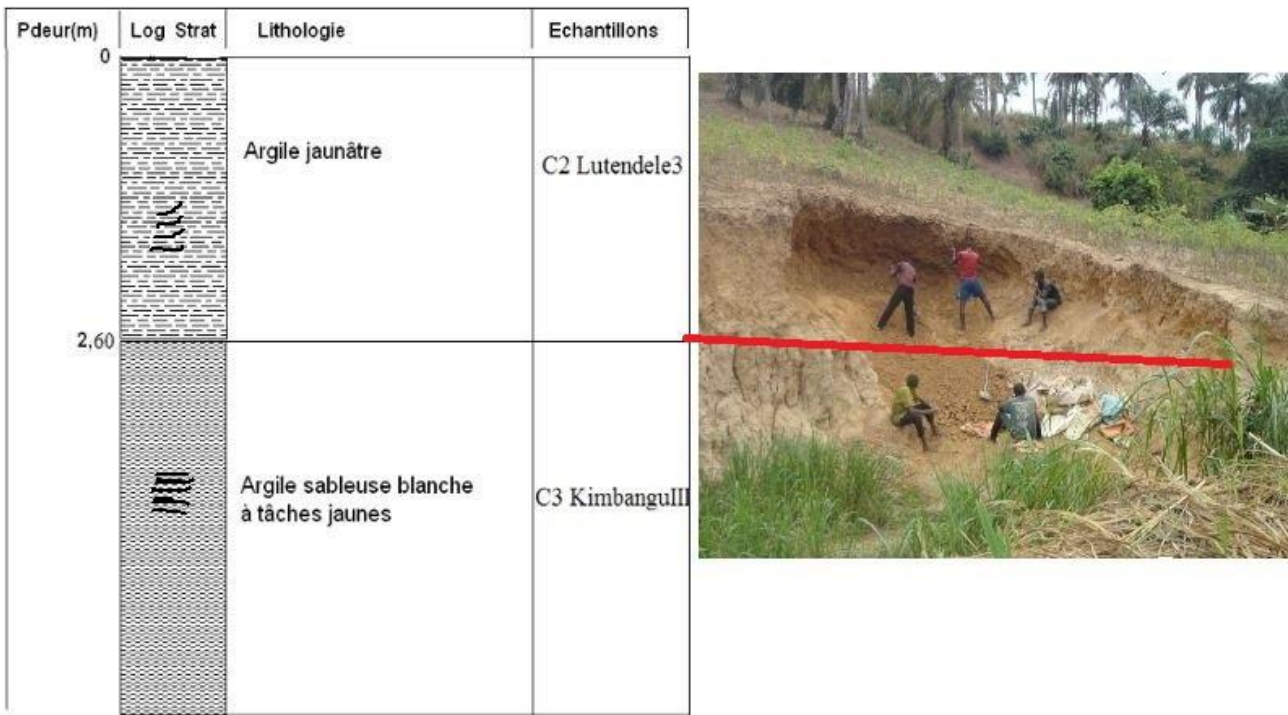


Fig. III.17 : Front de taille et log lithologique de Lutendele/Kimbaguiste, montrant les différents niveaux argileux. La zone hachurée représente la zone où ont été prélevés les échantillons.

Sur base des observations visuelles il a été impossible d'établir une continuité spatiale entre les matériaux échantillonnés à Lutendele. Néanmoins vu leur proximité une continuité a été établie comme l'illustre la figure III.18.

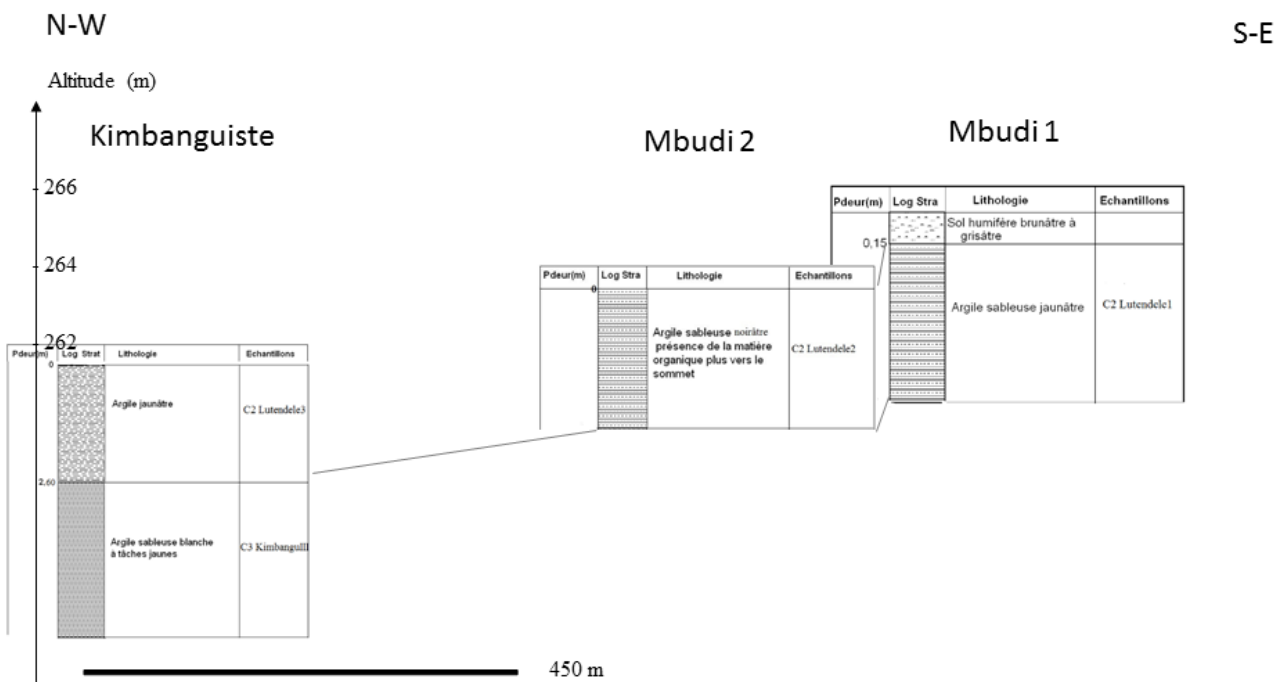


Fig. III. 18 : Profil en long des sites d'échantillonnage de Lutendele.

Le tableau III.1 résume les différentes caractéristiques des échantillons prélevés pour cette étude.

Localité	Site	Localisation	Altitude (m)	Échantillon	Profondeur moyenne de l'échantillon (m)	Description
Kasangulu	Nsaya 1a	4°35'33,26"S 15°10'1,02"E	397	C2 Nsaya 1I	2,10 à 2,40	Argile jaunâtre
				C3 Nsaya 1I	3,20 à 4,00	Saprolite rougeâtre
	Nsaya 1b	4°35'40,08"S15° 9'54,80"E	396	C2 Nsaya 1II	1,80 à 2,40	Argile jaunâtre
				C3 Nsaya 1II	4,10 à 4,60	Argile rougeâtre
				Horizon	5,40 – 5,55	Ferraille tatéritique
	Nsaya 2	4°35'41,70"S 15° 9'48,60"E	394	C2 Nsaya 2	2 à 2,50	Argile jaunâtre
Ndjili Cecomaf	Ndjili Cecomaf	4°25'15,60"S 15°21'45,80"E	284	C2 Cecomaf	1,20 à 1,80	Argile jaunâtre
				C3 Cecomaf	2,40 à 2,80	Argile blanche
Lutendele	Mbudi 1	4°22'26,90"S 15°12'0,30"E	266	C2 Lutendele1	0,60 à 0,75	Argile jaunâtre
	Mbudi 2	4°22'25,30"S 15°11'56,50"E	264	C2 Lutendele2	0 à 1,30	Argile noirâtre
	Kimbaguiste	4°22'14,50"S 15°11'31,10"E	262	C2 Lutendele3	1,20 à 1,70	Argile jaunâtre
				C3 KimbanguIII	3,60 à 4	Argile blanchâtre

Tableau III.1 : Caractéristiques des échantillons prélevés.

IV. Essai de valorisation

Utilisation des matériaux argileux

A cause de leurs diverses propriétés physico-chimiques (adsorption, absorption, adhésion, émulsion, malléabilité, résistance,...), les argiles connaissent de nos jours un essor d'utilisation notamment dans l'industrie (Chavanne, 2011 ; Ragouilliaux et al., 2007 ; Elsass, 2005) :

- de la céramique grossière ou de construction pour la fabrication des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée ; et de la céramique fine pour la fabrication des carreaux pour sols et murs, des céramiques ornementales, des appareils sanitaires, des abrasifs inorganiques,...
- agricole pour diluer les pesticides ;
- pharmaceutique et médicinale ;
- papetière où les argiles telles les kaolins sont utilisées comme charge dans la masse du papier et comme revêtement de surface ;
- pétrolière pour la fabrication des boues de forage ou des catalyseurs argileux,...

Application dans la construction : les briques crues

Techniques

La terre crue est un terme employé pour désigner la terre utilisée en construction avec moins de transformation possible. Selon le département de l'énergie américain, 50% de la population mondiale vit dans une construction en terre crue (Fontaine et Anger, 2009). Aujourd'hui, les techniques de construction en terre sont très variées, et découlent en grande partie des états hydriques du matériau terre lors de sa mise en œuvre (Houben et Guillaud, 1995).

Les principales techniques de construction traditionnelles en terre crue sont (Doat et al., 1979) :

- **le torchis ou colombage** : dans cette construction, la terre, le plus souvent mélangée à de la paille ou à d'autres fibres, est placée à l'état plastique sur une structure porteuse en lattis de bois appelée colombe.
- **le pisé** : la terre humide et pulvérulente est compactée dans des coffrages, puis décoffrée immédiatement. Il s'agit d'une construction en murs massifs avec une mise en œuvre longue. Ce qui fait qu'il demeure un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés (Fontaine et Anger, 2009). Ce mode de construction peut supporter même des terres caillouteuses (Fontaine et Anger, 2009).
- **l'adobe ou brique crue** : est une brique de terre crue moulée à l'état plastique ou façonnée à la main, souvent mélangée de paille, qui se solidifie en séchant à l'air libre.
- **la bauge** : est une construction faite en empilant les unes sur les autres des boules de terre malléables entièrement façonnée à la main. La terre est mélangée à l'eau et éventuellement à des fibres végétales pour éviter la fissuration.
- **les Blocs de Terre Comprimée (BTC)** : blocs fabriqués dans des presses qui compriment de la terre humide et pulvérulente. Les blocs obtenus sont immédiatement démoulés et stockés de manière à laisser les faces principales en contact avec l'air afin de favoriser le séchage. La résistance mécanique peut être augmentée par addition de sable, de ciment ou de chaux.
- **le Bloc de Terre Allégée (BTA)** : la terre est mélangée à des fibres végétales (paille, chènevotte), puis moulée ou comprimée de manière à obtenir une brique légère.
- **le mortier** : terme généralement utilisé pour désigner une terre de granulométrie inférieure à 400 µm. Il permet d'assembler les blocs en maçonnerie.
- **les enduits en terre** : il s'agit d'une terre tamisée, mélangée avec de l'eau et appliquée sur un support préalablement humidifié. Les enduits en terre sont un matériau prêt à l'emploi disponible sur le marché de la construction, et qui présente une étendue de couleurs et de textures. Les enduits en terre sont utilisés comme couche de finition ou pour boucher les trous afin de réaliser une surface plane. Du sable et/ou des fibres végétales sont ajoutés le plus souvent afin d'éviter la fissuration.

Avantages

La terre crue présente les avantages liés à (Doat et al., 1979 ; Fontaine et Anger, 2009) :

- la simplicité de sa réalisation : la terre est mélangée à de l'eau, et souvent à d'autres liants, malaxée avec les pieds ou des outils simples (pelle, bêche,...) jusqu'à ce qu'elle atteigne l'état plastique souhaitée ; puis préparée dans des moules ou manuellement.

- sa rentabilité économique : la terre crue permet la réalisation d'un habitat économique pour les populations les plus démunies.

- son faible impact environnemental : la terre crue nécessite peu d'énergie et d'eau pour sa mise en œuvre. Elle est le plus souvent issue d'une ressource locale, et réduit les problèmes liés aux transports. Elle est également réutilisable.

Exigences techniques

Les normes d'utilisation des argiles dans la construction en terre crue varient d'un pays à l'autre, et reposent souvent sur la granulométrie, la composition chimique et/ou minéralogique, caractéristiques dont dépendent le comportement des produits finaux (Khalifaoui et Hajjaji, 2009).

La granulométrie et la plasticité

La composition granulométrique des argiles (obtenue par tamisage et sédimentométrie) intervient pour une part importante dans leurs aptitudes au façonnage et au séchage. La connaissance de la granulométrie est une indication importante mais non suffisante à la sélection d'un sol. Avec la plasticité (limites d'Atterberg), ils constituent les paramètres principaux pour déterminer la convenance d'une terre. Les figures IV.1 et IV.2 illustrent les recommandations usuelles concernant la granulométrie et la plasticité des terres pour la construction. Cette synthèse a été faite par Jiménes et Guerrero (2007) sur base des normes et guides de construction en terre de plusieurs pays (AFNOR. XP P13-901, 2001 ; CRA Terre-EAG, 1998 ; Houben et Guillaud, 1994 ; Rigassi, 1995, MOPT, 1992).

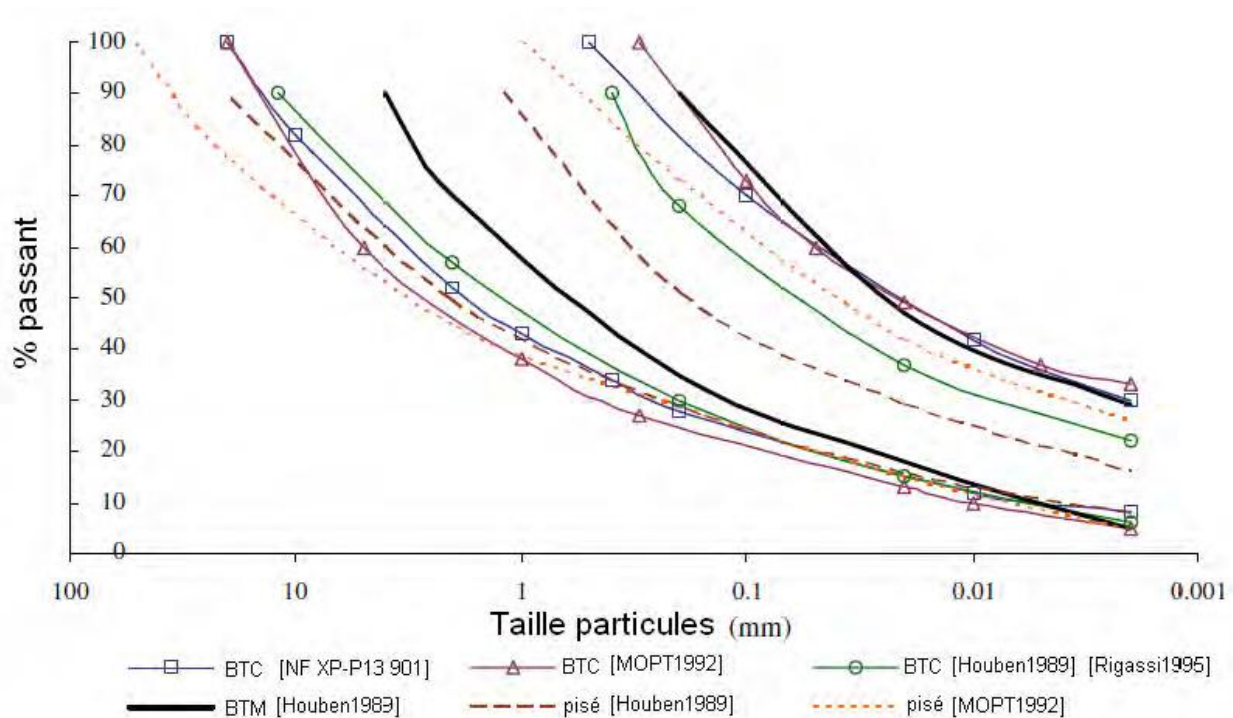


Fig. IV.1 : Enveloppes de courbes granulométriques conseillées pour construire en pisé, en BTC et en BTM (BTM = Brique de Terre Moulée = adobe, mortier, bauge, enduit) (Jiménes et Guerrero, 2007).

Nous remarquons que selon le type de construction les normes granulométriques varient. La terre

nécessitant plus de restriction en ce qui concerne la granularité est le pisé et la BTC en raison de la compression et de la possibilité de fissuration (Jiménes et Guerrero 2007). La terre la moins restrictive est l'adobe, avec une teneur en argile de plus de 10 %.

La figure IV.1 suggère comme bonne terre pour la construction, celle avec une distribution de taille des particules comprise entre les 2 enveloppes (supérieure et inférieure). Il est admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans la zone recommandée peuvent donner des bons résultats, en fonction des stabilisants utilisés. Cette zone sert de guide à l'utilisateur et non de spécification rigide (Moëvus et al. 2012).

La plasticité est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans rupture. Pour une terre, elle dépend directement de sa minéralogie, et donc de la teneur en argiles, et de leur capacité d'adsorption d'eau. Ainsi, une smectite par exemple peut adsorber beaucoup plus d'eau qu'une kaolinite, parce qu'elle a une plus grande surface spécifique et que l'eau peut pénétrer l'espace interfoliaire (Moëvus et al. 2012).

Les limites d'Atterberg (liquidité et plasticité) sont les indicateurs de plasticité couramment employées. Les limites de liquidité (W_L) et plasticité (W_P) minimales et maximales recommandées, déduites des abaques (AFNOR. XP P13-901, 2001 ; CRA Terre-EAG, 1998 ; Houben et Guillaud, 1994 ; Rigassi, 1995) sont présentées à la figure IV.2. Elles doivent être prises avec prudence parce que les valeurs sont corrélées aux objectifs visés par la construction (Jiménes et Guerrero, 2007). Jiménes et Guerrero (2007) recommandent une terre pour toutes les constructions, celle avec un W_L et W_P compris entre la zone partagée par tous les abaques proposés et présentées à la figure IV.2, soit W_P compris entre 16 et 28 et W_L compris entre 32 et 46.

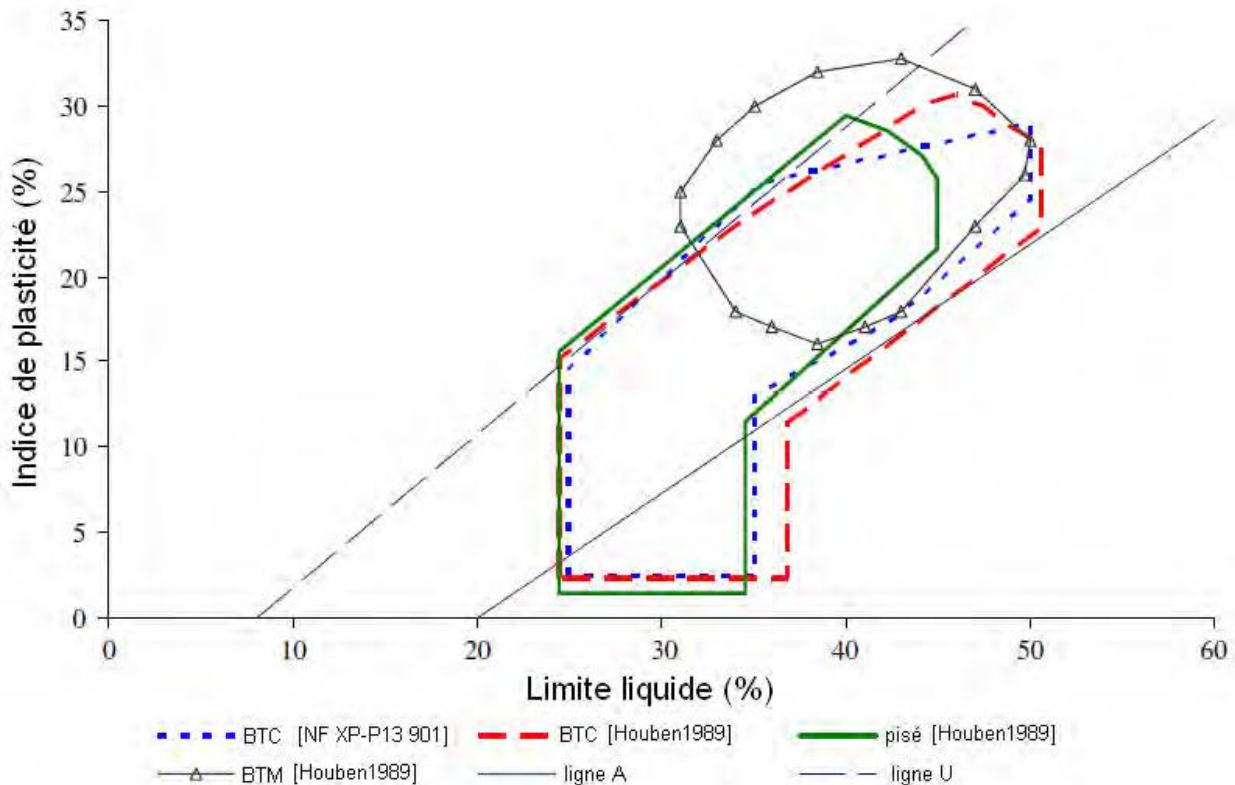


Fig. IV.2 : Diagramme de plasticité et convenance des terres. (BTM = Brique de Terre Moulée = adobe, mortier, bauge, enduit) (Jiménes et Guerrero, 2007).

D'après les autres références examinées, la plasticité des sols appropriés pour la BTC et le pisé est similaire, alors que l'adobe nécessite des sols plus plastiques, parce que les minima recommandés des limites de liquidité et de plasticité sont plus grands.

La composition minéralogique

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 qui constituent le squelette. Signalons que la cohésion des argiles n'est présente qu'à des teneurs d'eau inférieures à la limite de liquidité. Pour des teneurs d'eau élevées, les argiles perdent toute cohésion et acquièrent une consistance liquide (Doat et al. 1979).

La présence de kaolinite et d'illite dans l'échantillon de terre va influencer les propriétés de gonflement et de fissuration de la terre crue. Les cristaux de kaolinite et d'illite ne peuvent accueillir de molécules d'eau entre leurs feuillets du fait de l'étroitesse de leur espace interfoliaire. Ils ne peuvent donc présenter aucun gonflement intercrystallin lorsqu'ils sont plongés dans l'eau. La quantité d'eau nécessaire pour liquéfier une boue de kaolinite ou d'illite est ainsi beaucoup plus faible que celle nécessaire pour liquéfier une boue d'argile gonflante de type smectite. Au séchage, une boue de kaolinite ou d'illite présente ainsi beaucoup moins de retrait (Tardy, 1993 ; Andrate et al., 2011).

Le tableau IV.1 illustre les principaux constituants minéraux de la terre et leurs propriétés physiques. Aucune recommandation sur la teneur en kaolinite et en illite pour une terre crue n'a été trouvée dans la littérature.

Principaux composants des sols et leurs propriétés physiques			
Désignation du groupe	Principaux minéraux présents	grosueur des grains	Propriétés physiques
Sable très pur Silice	Quartz	$> 1 \mu$	Sans cohésion, abrasif
Mica	Muscovite	$> 1 \mu$	sans cohésion
Carbonate	Calcite Dolomite	variable	
Sulfate	Gypse	$> 1 \mu$	susceptible d'attaquer cert. ciments
Argiles	Kaolinite	$\approx 1 \mu$	pas de gonflement plasticité faible peu de cohésion
	Illites et Micas partiellement dégradés	variable	gonflement, plasticité moyenne
	Montmorillonites « bentonites » et interstratifiés	$\leq 1 \mu$	très gonflante très plastique
	Chlorite Vermiculite	$\approx 0,1 \mu$	gonflement limité
Matières organiques	ne sont pas des minéraux	aucune	dégradation rapide

Tableau IV.1 : Principaux constituants des sols et leurs propriétés physiques (Doat et al. 1979).

La matière organique

La matière organique est en règle générale considérée comme « nocive » dans les constructions en terre crue. Elle retarde la prise et provoque une baisse de résistance. Il est déconseillé d'utiliser une terre contenant plus de 2 % de matière organique. Néanmoins, l'ajout de la chaux ou du chlorure de calcium peut réduire l'influence néfaste de la matière organique (CRA Terre-EAG, 1998).

L'eau

L'eau renforce la cohésion naturelle de la terre en intensifiant l'interaction entre les particules d'argiles. Sans elle, il serait impossible de construire un mur en terre (Fontaine et Anger, 2009). Mouiller un sol modifie sa cohésion et sa plasticité, selon le type de sol (Tableau 2). Les venues d'eau (principalement d'origines météoriques, ou par ajout de matériau frais), sont à réduire dans le cas de construction en terre crue non ou mal stabilisées.

Sol graveleux	Eau	Moule	Pas cohésif
Sol sableux			Peu cohésif
Sol siliceux			Cohésif
Sol argileux			Très cohésif

Tableau IV.2 : Effet de l'eau sur la cohésion des sols (d'après Rigassi, 1995).

Masse volumique

La masse volumique va influencer le comportement physique du matériau terre. Plus la masse volumique de la terre est élevée, plus sa porosité diminue, et moins l'eau y pénètre (Doat et al., 1979).

Propriétés physiques

Les propriétés physiques de la terre crue utilisée comme matériau de construction sont encore mal connues. Les normes publiées sont peu nombreuses, partielles et concernent souvent les blocs de terre comprimés (BTC) stabilisés au ciment. Pourtant il existe comme nous l'avons vu, beaucoup d'autres techniques de construction en terre crue fiables. Moevus et al. (2012) ont publié un rapport faisant un état des lieux des connaissances concernant les propriétés rhéologiques, mécaniques, thermiques et hygrométriques de la terre crue, sur base des documents du laboratoire CRATerre-EAG et des revues scientifiques. Ils se sont intéressés uniquement à la terre crue sans stabilisants hydrauliques (ciment, chaux ou plâtre) (tableau IV.3).

Propriétés	Unité	Terre comprimée	Terre moulée	Terre allégée
Teneur en argile	%	5 à 30	20 à 40	
Indice de plasticité IP	%	5 à 30	15 à 35	
Teneur en eau initiale W_{in}	%	5 à 15	15 à 35	
Masse volumique sèche ρ	kg/m ³	1600 à 2200	1200 à 2100	300 à 1200
Teneur en eau ambiante w	%	0 à 5		
Retrait de séchage	%	1 à 3	1 à 20	Proche de 0
Coefficient résistance à la vapeur μ		5 à 20		
Module de Young E	GPa	1,0 à 6,0		< 1,0
Résistance compression R_c	MPa	0,4 à 3,0	0,4 à 5,0	
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	720 à 2100	180 à 1200
Conductivité thermique λ	W/m.K	0,5 à 1,7	0,3 à 1,5	0,1 à 0,3

Tableau IV.3: Synthèse des principales propriétés de la terre (Moevus et al., 2012).

Propriétés chimiques

L'analyse chimique sert à identifier les principaux groupes d'atomes exprimés en pourcentage massique d'oxydes. Ces éléments justifient plusieurs propriétés des argiles dont la couleur, le degré d'interaction avec des liants,... La composition chimique de la kaolinite, fait qu'elle se lie plus aisément à la chaux que l'illite (Konan et al., 2008). Aucune recommandation sur la teneur en pourcentage d'oxydes pour une terre crue n'a été trouvée dans la littérature.

La stabilisation

La stabilisation sert à améliorer les propriétés physiques (texture, granulométrie), chimiques ou mécaniques de la terre. Elle doit être compatible avec la conception des bâtiments, la qualité du matériau, l'économie du projet et la durabilité. La stabilisation n'est pas nécessaire lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau (murs enduits, murs intérieurs, murs protégés) mais devient indispensable dans le cas contraire (Houben et Guillaud, 1989).

Stabilisation au ciment

L'ajout du ciment permet d'améliorer en particulier la résistance à l'eau de la terre en créant des liens entre les particules les plus grosses. De ce fait, il est souhaitable d'utiliser des terres peu argileuses (< 30 %), et pas trop d'eau (Doat et al. 1979).

Stabilisation à la chaux

L'ajout de la chaux provoque une diminution de la plasticité de la terre. D'où l'on conseille de l'appliquer de préférence aux sols plastiques à très plastiques. Une proportion optimale de chaux existe pour chaque terre, mais les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres argileuses (30 à 40 %, voire 70 %). La terre stabilisée à la chaux doit contenir une partie argileuse non négligeable, puisque c'est sur elle que la chaux va réagir (Doat et al., 1979).

L'ajout de la chaux renforce également le matériau terre et le liquéfie. Ce qui réduit la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'état visqueux (Fontaine et Anger, 2009). La résistance à la compression (surtout pour les terres riches en kaolinite), subit une importante augmentation à moyen et à long terme (Doat et al., 1979). La stabilisation à la chaux donne des résultats qui varient fortement selon la composition minéralogique de la terre (Doat et al. 1979 ; CRA Terre-EAG, 1998).

Stabilisation au sable et aux fibres

Ces stabilisants réduisent la fissuration au séchage et dans le cas des fibres (paille, chènevotte, etc.), ils augmentent la résistance à la traction. Ils contribuent à la résistance de la terre à l'échelle du grain, c'est-à-dire de l'ordre du millimètre ou du centimètre ; mais ils n'interagissent pas directement avec les plaquettes d'argile, à l'échelle microscopique (CRA terre-EAG, 1998).

Stabilisation aux biopolymères

Il existe une multitude de biopolymères, d'origine animale ou végétale, pour stabiliser la terre crue comme matériau de construction. Ceux-ci apportent à la terre une meilleure résistance à la fissuration lors du séchage, une meilleure résistance à l'eau de pluie ou à l'érosion, une meilleure résistance mécanique, ou peuvent en faciliter l'application, par une texture plus souple ou une meilleure capacité d'adhésion (CRA Terre-EAG, 1998). Ils sont généralement regroupés en quatre parties distinctes : les polysaccharides, les lipides, les protéines et une catégorie comprenant d'autres molécules complexes. Ces substances libèrent des molécules qui, elles, interagissent avec les feuillets des argiles (CRA Terre-EAG, 1998).

Stabilisation à la cendre de balle de riz (CBR)

La balle de riz est la partie externe recouvrant le grain de riz (paddy). Elle est sujette à des nombreuses valorisations : aliment pour le bétail, fertilisant en agriculture, additif dans le ciment ou la chaux comme matériau pouzzolanique (voir ci-dessous), combustible,... en raison de son problème de

traitement ainsi que son faible coût (Sabuni, 1995). La balle de riz a une masse moyenne de 20% de celle du paddy brut. Sa masse et sa composition dépendent de la variété du riz cultivé, de la zone géographique, de la saison, des méthodes de cultures, etc. (Della et al, 2002). La balle de riz est composée de 70 à 80 % de matières organiques (principalement la cellulose, la lignine, le pentosane et une petite quantité de protéines et de vitamines) et de matières minérales non organiques dont la silice. Cette dernière est dispersée dans les matières organiques et concentrée sur la partie externe de l'enveloppe (Zhou et al, 2002). Si on calcine la balle de riz à une température bien définie, elle est transformée en une cendre possédant une haute teneur en silice amorphe réactive. Cette dernière peut ainsi être utilisée comme pouzzolane (voir ci-dessous) favorisant la durabilité et la résistance des composites à base de ciment (ou de chaux) (Della et al, 2002).

Dans le cadre de ce mémoire, la stabilisation se fera avec de la cendre de balle de riz (CBR) et de la chaux. La CBR n'est pas un matériel produit dans la région de Kinshasa, mais son choix se justifie par : la faible quantité de matériau terre disponible : la stabilisation par un stabilisant local tel que la paille aurait nécessité une quantité d'échantillon plus importante, qu'avec la CBR ; son intérêt scientifique : ces dernières années ont vu un intérêt grandissant pour la valorisation de la balle de riz dans le domaine de la construction. La science a donc trouvé un autre moyen pour valoriser ce déchet. En plus, le remplacement d'une proportion de ciment par de la cendre de balle de riz permet de réduire les coûts de la construction. Les caractéristiques de la CBR utilisée sont présentées au point V.2.

V. Matériel et méthode

V.1 Analyse des terres et des argiles

Afin de répondre aux objectifs fixés, les échantillons vont être caractérisés d'un point de vue chimique, minéralogique et physique. La caractérisation chimique consistera à déterminer la composition chimique élémentaire par fluorescence X. La caractérisation minéralogique se fera par diffraction des rayons X. La caractérisation physique consistera à déterminer la teneur en eau naturelle, la teneur en matières organiques, la masse volumique, les limites d'Atterberg, et la granulométrie.

Diffraction des rayons X (DRX)

Préparation des échantillons

Une analyse sur poudre totale et sur la fraction argileuse a été réalisée sur chaque échantillon. La préparation des échantillons s'est faite selon le protocole du laboratoire Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires de l'Université de Liège (Fagel, 2010) adapté selon Moore et Reynolds (1989).

Pour la poudre totale, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 30°C, broyés manuellement dans un bol en agate, puis tamisés pour récupérer les fractions inférieures à 250 µm. On a ensuite constitué des pastilles à l'aide des supports métalliques pour la diffraction. *Pour la minéralogie de la fraction argileuse*, nous avons réalisé un agrégat orienté. Un agrégat orienté est un dépôt de particules argileuses inférieures à 2 µm sur une lame de verre (Moore et Reynolds, 1989). L'analyse par Diffraction des Rayons X (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). Pour se faire, une petite portion de chaque échantillon séché est placée dans un berlin et mélangée à l'eau distillée, puis homogénéisée par agitation sur une plaque magnétique. Une fois l'échantillon bien homogénéisé, s'en est suivi un tamisage à 63 µm, en présence d'eau.

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. Cette portion 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 dits diffractogrammes à l'état normal (N).

Certaines argiles ont des distances 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 deux nouveaux traitements :

- la solvatation à la vapeur d'éthylène-glycol (EG) : se fait sous cloche et a pour conséquence de faire gonfler les feuillets de certains minéraux argileux (Fagel, 2010) ;
- le chauffage à 500°C : permet de déshydrater le minéral argileux (Fagel, 2010).

Ces deux traitements modifient l'espace interfoliaire de manière spécifique et permettent de différencier les espèces argileuses entre elles (Fagel, 2010).

Méthode d'analyse

L'échantillon de poudre placé sur lame de verre est bombardé par des rayons X obtenus en bombardant une anode de cuivre par un faisceau d'électrons accélérés dans le vide. Ces rayons X au contact avec la poudre sont réfléchis par chaque cristallite de la poudre 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 :

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

où θ est la moitié de l'angle de déviation, n est 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 ou distance interréticulaire. C'est la loi de Bragg (Tucker et Hardy, 1988).

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

Analyse chimique par Fluorescence X (FX)

La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX) est une technique d'analyse chimique élémentaire d'un échantillon. Elle constitue une des premières étapes dans la caractérisation de tout matériau et permet d'éclairer les propriétés des échantillons argileux en vue d'une utilisation dans diverses applications.

Principe

Lorsque l'on bombarde 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).

Appareillage

Le spectromètre utilisé est de marque ARL™ PERFORM'X du laboratoire de pétrologie sédimentaire (PETROSED) de l'ULg.

Préparation des échantillons

Le matériau est séché à 40°C, broyé et tamisé à 250 μm . La perte de masse par chauffage est d'abord déterminée. Pour cela, l'échantillon est chauffé à une température de 1000 °C pendant 2 heures. Cette température est atteinte en 4 heures. Il est ensuite décomposé par un broyage manuel, puis mélangé à une proportion de 11x sa masse (+/- 0,0003) au flux de borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et à environ 0,002 gr de LiBr. Ces composés ont pour propriété de baisser la température de fusion. Les 3 composants (borax, LiBr et échantillon) sont ensuite mélangés manuellement puis soumis à la fusion en s'assurant une bonne homogénéité. La dernière étape consiste à réaliser des perles qui seront analysées. Étant donné qu'un solvant de borax a été utilisé, l'oxyde de sodium Na_2O n'est pas dosé. Les concentrations élémentaires ont été obtenues en réalisant une calibration par rapport à des standards (Adler, 1966 ; Lachnitt, 1983; Müller, 1972).

Analyse granulométrique et sédimentométrie

L'analyse granulométrique permet de classer les grains d'un échantillon selon leurs tailles, et donne le pourcentage de chaque classe par rapport au poids total de l'échantillon. L'échantillon à classer est passé dans une série de tamis emboîtés ayant des diamètres d'ouverture croissants du bas vers le haut : 2,38mm et 4,76 mm. L'échantillon est placé dans le tamis supérieur et le classement se fait par vibration manuelle ou à l'aide d'une plaque vibrante.

Le refus récupéré dans chaque tamis est alors pesé et le pourcentage déterminé. Le résultat est reporté sur une courbe granulométrique.

La sédimentométrie est la technique la plus adaptée pour répartir en classes granulométriques les éléments plus fins que 75 μm . L'échantillon est mélangé à un défloculant (le sulfate de sodium) afin de séparer les colloïdes ; et à l'eau. Le tout est mixé puis placé à 20°C pendant 24h avant d'être homogénéisé par agitation manuelle.

La vitesse de sédimentation des particules solides (v) est liée à leur diamètre (D), à leur masse spécifique (Y_s), à la masse spécifique du liquide qui les contient (Y_l) et à la viscosité de ce même liquide (η), selon la relation :

$$v = g \frac{\gamma_s - \gamma_l}{18 \eta} D^2$$

Au temps t après le début de la sédimentation, la suspension ne contient à la profondeur h de la surface, que des particules d'une certaine vitesse et d'un certain diamètre. Le pourcentage en poids de ces particules à cet instant peut être calculé au moyen d'un aéromètre en tenant compte des corrections liées à la température ou encore au défloculant (Peltier et Rumpler, 1959).

Limites de consistance

Les limites de consistance ou limites d'Atterberg correspondent aux proportions en eau pour lesquelles le matériau argileux passe d'un comportement semi-liquide à un comportement plastique (limite de liquidité, W_L), et ensuite d'un comportement plastique à un comportement semi-solide (limite de plasticité W_P) (fig. II.3). Les limites d'Atterberg servent à classer les sols, et à prévoir leur comportement lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement (Peltier et Rumpler, 1959).

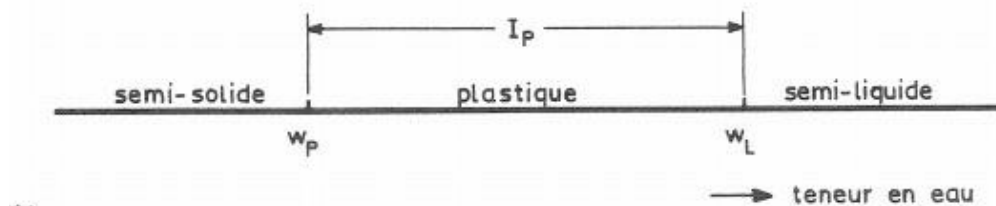


Fig. II.3 : Limites de consistance (Centre de recherches routières, 1981).

Limite de liquidité

On prend 200 gr de matériaux de granulométrie inférieure à 425 μm , on y ajoute de l'eau pour bien homogénéiser et former une pâte argileuse. Celle-ci est placée ensuite dans une coupelle et on définit une lèvres calibrée. Ensuite l'échantillon est secoué sur l'appareil de Casagrande, et on note le nombre de coups correspondant à la fermeture de la lèvres sur 1 cm. On s'efforce à avoir toujours un nombre de coups compris entre 15 et 35. Les mesures sont reportées sur un graphique teneur en eau – nombre de coups.

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.

Indice de plasticité

Elle caractérise l'intervalle où le matériau argileux demeure plastique ou façonnable. Elle s'obtient par la différence entre la limite de liquidité et de plasticité : $I_p = W_L - W_P$

Masse volumique

La mesure de la masse volumique s'est faite à l'aide d'un pycnomètre à gaz suivant la norme NF EN ISO 8130-2 au laboratoire de matériaux de construction de l'ULg. Ce pycnomètre est un moyen rapide de mesurer avec précision la masse volumique et la porosité d'un matériau. Cet appareil utilise un gaz (l'hélium dans notre cas) à une pression variant entre 140-170 kPa. L'échantillon à analyser, de masse connue M_e , est introduit dans la petite cellule en aluminium du pycnomètre. L'hélium est alors confiné à une certaine pression P_1 dans le volume V_1 connu d'une cellule. Le gaz est ensuite libéré dans le volume de détente V_2 dans lequel se situe l'échantillon. On obtient alors une certaine pression P_2 . Le volume V_e de l'échantillon peut être déterminé grâce à la loi des gaz parfaits. La mesure est

effectuée quatre fois et le résultat final correspond à la valeur moyenne.

Perte au feu

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

Principe

L'échantillon est chauffé dans un four pendant 24 heures à 105 °C afin de le déshydrater. La différence des pesées entre l'échantillon non chauffé et chauffé donne la teneur en eau. Ensuite, la matière organique est éliminée sous formes de cendres et de CO₂ durant une chauffe de 4 heures à 550 °C dans un second four (mesures réalisées au laboratoire AGEs de l'ULg). L'analyse dans notre cas s'est faite sur un échantillon de terre, d'environ 1,5 gr que l'on a placé dans un bol en céramique d'environ 10 ml.

Exploitation des données

La teneur en eau est calculée selon :

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

La densité sèche est déduite de la teneur en eau :

$$\text{densité sèche} = (100 - \text{teneur en eau}) / 100 \times \text{densité du grain}$$

Cette formule considère que l'échantillon contient de l'eau et des particules sédimentaires.

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 ; Eau 1 ; ...

La teneur en matière organique est calculée selon la perte au feu à 550 °C suivant :

$$\text{LOI 550} = \left(\frac{\text{masse sèche} - \text{masse}_{550}}{\text{masse sèche}} \right) * 100$$

Le carbone organique total peut être estimé à 50 % de la MO totale (Tucker et Hardy, 1988).

V.2 Caractérisation des liants

Les liants sont des minéraux souvent classifiés en deux catégories : les liants hydrauliques (ciment Portland, chaux hydraulique, laitiers, ciments spéciaux, etc.) et les liants aériens (chaux aérienne, gypse, plâtre, argile, etc.), qui diffèrent selon la manière dont ils durcissent. Les liants hydrauliques durcissent grâce à la réaction qu'ils développent avec l'eau alors que les liants aériens ont besoin de CO₂ pour durcir par carbonatation (Van Balen, 2005).

La chaux

Parmi la chaux, on peut spécifier deux types : la chaux hydraulique et la chaux aérienne, qui diffèrent selon le processus de production, et donc du matériau brut utilisé. La chaux aérienne est obtenue par la calcination de calcaire naturel ou de coquillages alors que la chaux hydraulique est produite à partir de calcaire impur, contenant des composés argileux ou organiques ou des mélanges de calcaire et d'argile. Dans cette étude, seule la chaux hydraulique sera traitée dans la phase expérimentale.

Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux n'ayant aucune capacité propre de liant mais pouvant réagir avec de la chaux Ca(OH)₂ en présence d'eau à température ambiante afin de former des composants du

ciment. Ce pouvoir est appelé « activité pouzzolanique ».

On distingue :

- les pouzzolanes naturelles : proviennent généralement de l'activité volcanique mais aussi de la sédimentation consolidée. C'est par exemple la terre de Santorin, le tuff et le trass de la région du Rhin en Allemagne, la Bavière, la Roumanie et la pierre ponce de l'Eifel en Allemagne. (Verhasselt, 1993)

- les pouzzolanes artificielles obtenues par calcination de certaines argiles, schistes argileux et autres diatomites. Ils possèdent les mêmes propriétés que les pouzzolanes naturelles (Verhasselt, 1993).

Dans le cas des liants chaux/pouzzolane, les pouzzolanes réagissent avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la chaux hydratée. 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 SiO_2 dans la pouzzolane ; la nature des phases actives dans la pouzzolane ; la surface spécifique de la pouzzolane ; les propriétés physiques et chimiques du ciment et/ou de la chaux hydratée ; la durée de durcissement ; la température ; le rapport eau/solide.

La cendre de balle de riz

Composition chimique

D'une manière générale, la teneur en silice 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). Les impuretés principales de la cendre sont des produits alcalins dont le potassium est le constituant prédominant (Zhang et al., 1996). 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).

Composition minéralogique

Pour obtenir une cendre pouzzolanique, la CBR doit contenir de la silice amorphe (Feng et al., 2004). Durant la calcination, la cendre peut se cristalliser donnant des faibles propriétés pouzzolaniques. Toutes les recherches ont montré que pour l'éviter, la température de combustion ne doit pas excéder 750°C . Halleux (2012), a effectué une représentation qualitative des phases amorphes et cristallines de la silice par DRX sur trois échantillons de cendres de balles de riz calcinées à des températures différentes : 600°C , 700°C et 800°C . Le spectre a montré des raies correspondant aux distances inter-réticulaires du quartz (3,34 ; 4,26 ; 1,82 et 1,54), de la cristobalite (4,04 ; 2,49 et 2,47) et de la tridymite (4,11 et 4,33). Il a remarqué que :

- la cendre obtenue à 600°C présentait une distance inter-réticulaire « d » proche de 4,20311 pouvant expliquer la présence de cristobalite et dont l'intensité était plus faible que pour celui représentant la cristobalite à 700°C . Cela explique donc la formation de phases cristallines lorsque la température augmente.

- entre la DRX caractérisant la cendre calcinée à 600°C et la DRX pour une cendre calcinée à 800°C , la quantité de quartz diminue. Il y a donc transformation du quartz en phase cristalline.

Il a donc choisi la température de 600°C pour calciner la balle de riz.

Calcination

Durant la combustion, la matière organique est brûlée, produisant une cendre de balle dont la masse est d'environ 20% de la masse initiale des balles. Il s'agit d'un matériau poreux, riche en silice mais dont les propriétés dépendent beaucoup des conditions de calcination (Feng et al., 2004). Ainsi, la cendre produite par des incinérateurs à hautes performances en laboratoire peut généralement atteindre de haut pourcentage de silice pouvant atteindre 98 % (Halleux, 2012). La calcination s'est faite suivant un protocole proposé par Halleux (2012). Elle utilise un four pouvant atteindre de hautes températures. Une quantité de 2,2 kg est calcinée à chaque fournée de 2 heures. On obtient ainsi à chaque fois 400 g de cendres environ. Lors de la calcination, une couche de carbonisation se forme tout autour du profilé, ce qui empêche la balle de riz située à la périphérie de prendre correctement feu. Pour palier à cela, un mélange fréquent est recommandé afin de casser cette couche de

carbonisation. Un mélange a été réalisé toutes les 30 minutes pour obtenir une cendre de couleur quasi homogène. La température de calcination est de 600°C.

Surface spécifique

La surface spécifique de la CBR dépend aussi des conditions de calcination (température, durée). En effet, la cristallisation de la silice mène à l'agglomération des particules, alors que la présence de carbone dans la cendre, augmente la surface spécifique étant donné que le carbone est très poreux (Jaturapitakkul et Roongreung, 2003). La surface spécifique peut être contrôlée par le broyage. En broyant la CBR, on diminue la taille des particules et on augmente la surface spécifique. La structure poreuse se casse et donne lieu à des fines particules poreuses possédant des propriétés similaires de celles de la fumée de silice (Sabuni, 1995). Mais le broyage ne doit pas être prolongé afin d'éviter la destruction complète de la structure poreuse et une agglomération des particules diminuant ainsi la surface spécifique de la CBR (Bui et al., 2005). La surface spécifique de la CBR influence la réaction pouzzolanique avec de la chaux. Elle est plus importante lorsque la surface spécifique augmente (Feng et al., 2004). La grande surface spécifique demandera également une quantité importante d'eau pour obtenir une bonne mise en œuvre du mélange incorporant la balle de riz (Feng et al., 2004).

La granulométrie de la CBR a été réalisée après un broyage et un tamisage manuels.

Dans notre étude, nous avons choisi les tamis à 250µm, 150µm, 75µm et 53µm. Cela nous a donc permis d'obtenir une cendre avec une granulométrie proche des valeurs trouvées dans la littérature : < 250 µm : 95 % ; < 150 µm : 85 % ; < 75 µm 67 % ; < 53 µm : 54 %.

Activité pouzzolanique

Feng et al., 2004 ont indiqué que la réaction pouzzolanique augmentait avec l'accroissement de la quantité de silice amorphe et l'augmentation de la surface spécifique. Différentes méthodes existent pour déterminer l'activité pouzzolanique. Beaucoup reposent sur le concept de la variation de conductivité électrique, et montrent que la cendre de balles de riz a une activité pouzzolanique similaire à celles obtenues pour d'autres pouzzolanes artificielles (cendres volantes et fumées de silice). (Bui, 2001 ; Feng et al., 2004).

L'activité pouzzolanique de la CBR a été effectuée par la méthode de Luxan et al. (1989). C'est une méthode indirecte et qualitative basée sur la mesure du changement de conductivité électrique. Luxan et al. (1989) imposent une solution saturée en chaux Ca(OH)_2 de 200 ml à une température de 40°C avec 5g de cendres. On mesure tout d'abord la conductivité de la chaux seule dans de l'eau déminéralisée, via les ions Ca^{2+} et les ions OH^- en provenance du Ca(OH)_2 . Ensuite on ajoute la CBR. La silice amorphe commence à réagir avec les Ca(OH)_2 et forme des C-S-H¹. Cette réaction réduit le nombre d'ions de Ca^{2+} et OH^- présents dans la solution et diminue la conductivité électrique. La variation de la conductivité électronique est calculée en soustrayant la valeur de la conductivité de la solution eau-chaux par la somme des conductivités des solutions eau-chaux-CBR et eau-CBR. D'après Luxan et al. (1989), un matériau est considéré comme ayant une mauvaise activité pouzzolanique lorsque la variation de conductivité est inférieure à 0,4 mS/cm ; une pouzzolanité variable lorsque la variation se situe entre 0,4 et 1,2 mS/cm ; et une bonne pouzzolanité lorsque la variation est supérieure à 1,2 mS/cm.

La CBR a été testée deux fois, et la valeur moyenne a été sélectionnée (tableau V.1).

1 C-S-H (Calcium silicate hydrate) est le résultat de la réaction entre la chaux, la silice et l'eau $3\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

Conductivité solution chaux [mS/cm]	Conductivité chaux + cendres [mS/cm]	Conductivité eau + cendres [mS/cm]	Variation de conductivité électrique
7,89	5,25	0,759	1,896
7,88	5,33	0,675	1,859
			Moyenne 1,878

Tableau V.1 : *Activité pouzzolanique obtenue par la méthode de Luxan et al. (1989).*

Liants chaux - CBR

La CBR pouzzolanique réagit avec le Ca(OH)_2 présent dans la chaux hydratée. Cela entraîne la formation de produits stables et insolubles dont principalement des phases de C-S-H. La quantité de Ca(OH)_2 ou d'ions Ca^{2+} est donc moindre quand il y a une addition de CBR (Bui, 2001 ; Villar-Cocina et al., 2003 ; Zhang et al., 1996). Les propriétés des mélanges chaux-CBR (ou chaux-CBR et terre) publiées sont peu nombreuses, partielles et concernent souvent la résistance en compression. D'une manière générale, les résistances des mélanges chaux-CBR augmentent après l'addition de CBR dû à la réaction pouzzolanique ; bien qu'elles sont encore plus faibles que celles obtenues pour un ciment de référence (Stroeven et al., 1999 ; Jaturapitakkul et al., 2003). Les compositions des mélanges chaux CBR trouvées dans la littérature varient de 20 % à 80 %. Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant 50% de CBR et 50% de chaux (Waswa-Sabuni et al., 2003).

V.3 Caractérisation des éprouvettes

Réalisation des éprouvettes

Quatre échantillons représentatifs en provenance des 3 localités d'échantillonnage ont été sélectionnés pour ce test. Dans un premier temps, ils ont été broyés pendant 15 minutes dans un broyeur, afin d'avoir une argile de granulométrie adéquate pour réaliser des barrettes. Les mélanges ont ensuite été réalisés (tableau V.2). Un mélangeur de type Hobart a permis d'homogénéiser le mélange.

Échantillon	Masse échantillon [gr]	Masse chaux [gr]	Masse CBR [gr]	Masse eau [gr]	Nombre d'éprouvettes
C2 Nsaya 1	1000	60 (6%)	60 (6%)	301,48	2
	950	0	0	183,58	2
C3 Nsaya 1	750	45 (6%)	45 (6%)	299	2
	950	0	0	225,44	2
	454,53	27,27 (6%)	0	136,83	1
C2 Cecomaf	750	45 (6%)	45 (6%)	253,59	2
	487	0	0	117,74	1
C2 Lutendele2	700	42 (6%)	42 (6%)	296,78	2
	399,5	0	0	162,34	1

Tableau V.2 : *Quantités mélangées pour la réalisation des éprouvettes.*

Les barrettes confectionnées correspondent aux dimensions standards pour les essais sur mortiers à liant hydraulique, à savoir $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Les mélanges ont été placés dans les moules en respectant les étapes suivantes :

1. Verser l'eau dans le bol du mélangeur, dont la quantité permet de nous assurer un état plastique.
2. Mélanger l'argile, la cendre de balle de riz et la chaux dans un seau.
3. Verser l'argile, la cendre de balle de riz et la chaux mélangées dans le mélangeur.
4. Mélanger pendant 1 minute.
5. Racler les parois du bol durant une minute.
6. Re-mélanger pendant 1 minute.
7. Placer le mélange dans les moules préalablement huilés, en le damant en plusieurs couches.
8. Araser les moules afin d'obtenir des surfaces planes.
9. Démouler immédiatement les barrettes, et les placer sur une grille aérée.

Les éprouvettes ont été conservées durant 28 jours en atmosphère contrôlée, dans une pièce dont la température est maintenue en permanence à 21 °C (± 2 °C) et l'humidité relative à 60 % (± 10 %). Les propriétés mécaniques sont estimées grâce à des essais de flexion et de compression sur des barrettes de 28 jours d'âge. La résistance normale d'un mortier à liant hydraulique est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm^2 ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ MPa} = 10 \text{ daN/cm}^2 = 10 \text{ bars}$) (AFNOR, 2002)

Essai de flexion

La résistance en flexion est déterminée par l'essai de flexion 3 points. L'éprouvette est chargée en son centre par une force centrée et supportée par deux appuis espacés de 100 mm (Fig. V.1). 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.

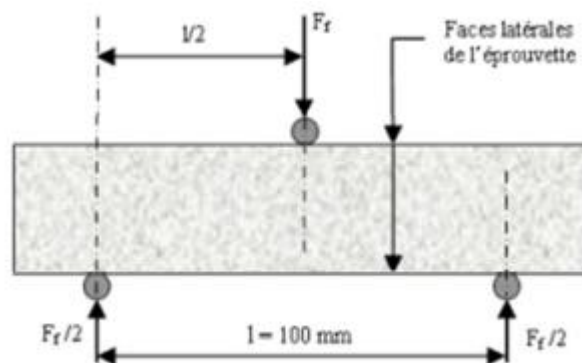


Fig. V.1 : Schéma et dispositif de l'essai de flexion 3 points (Halleux, 2012, modifié).

Essai de compression

Après rupture de l'éprouvette par flexion, les 2 morceaux sont récupérés et soumis séparément à la compression (Fig. V.2). 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.

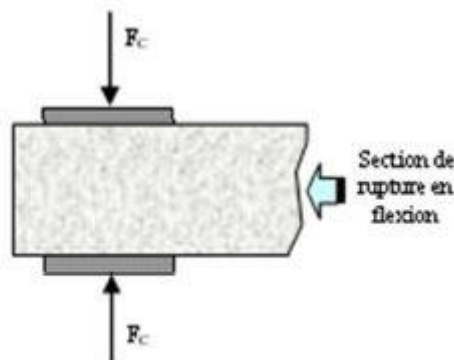


Fig. V.2 : Schéma et dispositif de l'essai de compression (Halleux, 2012, modifié).

VI. Résultats et discussion

Dans la suite, les échantillons ayant été analysés par l'ensemble des méthodes décrites au point IV, seront marqués par un astérisque. En effet, il était impossible de réaliser l'ensemble de ces méthodes sur tous les échantillons. Les échantillons ont été sélectionnés selon qu'ils étaient représentatifs, ou qu'ils étaient en suffisante quantité pour le test à réaliser. Pour être concerné par l'ensemble des analyses, un échantillon devait peser plus de 2 kg. Seuls 4 échantillons remplissaient cette condition. Ces échantillons étaient en plus grande quantité parce que, sur les sites où ils ont été prélevés, se développait une activité extractive plus importante. Ils m'ont donc semblé plus importants à être caractérisés.

VI.1 Caractérisation chimique

Le tableau VI.1 présente les compositions chimiques des 7 échantillons analysés. Pour un même site, les échantillons sont repris dans le tableau, selon un ordre de profondeur croissant. Les échantillons des sites de Nsaya 1b et Ndjili Cecomaf ont été choisis pour évaluer les variations d'éléments chimiques en fonction de la profondeur. L'échantillon de Lutendele/Mbudi2 a été choisi parce qu'il sera caractérisé par l'ensemble des méthodes.

Les compositions chimiques des différents échantillons sont assez proches mais des particularités peuvent être soulignées :

- avec la perte au feu, les éléments les plus abondants sont le SiO_2 , le Al_2O_3 et dans une moindre mesure, le Fe_2O_3 . La présence de ces éléments est essentiellement liée à la nature et à la proportion des minéraux présents dans les échantillons.
- la couleur des sols est essentiellement liée aux oxydes de fer. Les teneurs en fer sont assez proches les unes des autres malgré une différence de couleur (qui devient plus rougeâtre avec la profondeur pour les échantillons de Nsaya 1b et plus blanchâtre pour les échantillons de Ndjili Cecomaf). Il ne s'agit pas forcément de la proportion mais plutôt la nature des phases minéralogiques qui contiennent les oxydes de fer qui influence la couleur des sols (Aubert, 2013). L'échantillon « horizon » montre une teneur en Fe_2O_3 plus élevée. Il s'agit probablement d'un horizon d'accumulation.

Sites	Echantillons	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	K_2O	TiO_2	P_2O_5	PF	Total
Nsaya 1b	C2 Nsaya 1II*	72,16	14,89	4,03	0,00	0,19	0,03	0,57	0,79	0,00	7,33	100,00
	C3 Nsaya 1II*	70,10	16,18	4,61	0,01	0,21	0,02	0,68	0,82	0,00	7,37	100,00
	Horizon	53,71	11,39	26,23	0,01	0,44	0,02	1,01	0,68	0,01	6,50	100,00
	C4 Nsaya 1II	67,69	17,35	5,05	0,01	0,32	0,03	0,99	0,82	0,00	7,74	100,00
Ndjili Cecomaf	C2 Cecomaf*	63,11	21,98	2,11	0,01	0,40	0,06	0,93	0,83	0,04	10,54	100,00
	C3 Cecomaf	63,90	21,91	1,36	0,01	0,44	0,08	1,11	0,87	0,02	10,32	100,01
Lutendele/Mbudi2	C2 Lutendele 2*	63,97	16,31	4,73	0,01	0,24	0,09	0,93	1,13	0,19	12,41	100,01

Tableau VI.1 : Compositions chimiques des échantillons (%). Le Na_2O et le SO_3 ont été mesuré par le fluorimètre mais ne sont pas repris dans le tableau parce que leurs valeurs pour l'ensemble des échantillons étaient de 0,00. L'astérisque indique les échantillons pour lesquelles toutes les analyses ont été réalisées.

VI.2 Caractérisation minéralogique

Il est possible, à partir d'un diffractogramme, d'estimer semi-quantitativement les proportions de chaque phase minérale. Cette approche se fait en multipliant les intensités mesurées des pics (counts) par un facteur correctif qui tient compte de l'élargissement des réflexions et des variations d'incidences du faisceau (Cook *et al.*, 1975 ; Thorez, 1976 ; Boski *et al.*, 1998), et en faisant une règle de trois entre les différentes phases minérales présentes sur un même diffractogramme. Cette méthode semi-quantitative présente une précision estimée à $\pm 10\%$ (Holtzaffel, 1985).

La caractérisation minéralogique déterminée par DRX est présentée au tableau VI.2. Les diffractogrammes sur la poudre totale et sur la fraction argileuse des échantillons analysés sont présentés en annexes 1 et 2. Le calcul semi-quantitatif des phases minérales présentes dans la poudre totale et dans la fraction argileuse de ces échantillons est présenté en annexes 3 et 4. La minéralogie totale des échantillons est fort semblable et constituée essentiellement de minéraux argileux et de quartz. Des traces de muscovite et de feldspath-K sont aussi observées sur les spectres de la poudre totale avec l'augmentation de la profondeur. Ces minéraux proviennent de la roche mère. Les spectres DRX sur poudre totale montrent également la présence de goethite, et parfois d'hématite. Les minéraux argileux sont dominés par la kaolinite, et dans une moindre mesure par l'illite. Certains échantillons montrent également des traces de chlorite (minéral difficilement altérable) provenant sans doute de la roche mère. La présence de kaolinite $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ est liée à l'altération des feldspaths présents dans la roche mère. L'illite $\text{KA}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ est liée à l'altération du feldspath-K, et dans une moindre mesure de la muscovite. La teneur plus élevée en illite des échantillons de Lutendele s'expliquerait alors par l'altération d'une roche mère plus riche en feldspath-K.

Sites	Echantillons	Muscovite	Feldspath-K	Quartz	Argile totale	Fraction argileuse		
						Kaolinite	Illite	Chlorite
Nsaya 1a	C2 Nsaya 1I	-	2	56	42	83	17	-
	C3 Nsaya 1I	-	-	39	61	83	17	-
Nsaya 1b	C2 Nsaya 1II*	-	-	52	48	90	10	-
	C3 Nsaya 1II*	-	-	50	50	80	20	-
	Horizon	1	-	53	46	70	29	1
	C4 Nsaya 1II	1	-	42	58	71	27	2
Nsaya 2	C2 Nsaya 2	-	-	47	53	73	27	-
Ndjili Cecomaf	C2 Cecomaf*	-	-	68	32	89	10	1
	C3 Cecomaf	< 1	3	44	53	83	16	1
Lutendele/Mbudi1	C2 Lutendele1	-	-	71	29	77	22	1
Lutendele/Mbudi2	C2 Lutendele2*	-	4	43	53	49	50	1
	C2 Lutendele3	1	6	52	41	48	49	3
Lutendele Kimbanguiste	C3 KimbanguIII	1	4	58	37	56	43	1

Tableau VI.2 : Estimation semi-quantitative de la minéralogie des échantillons (%). Les pourcentages des minéraux argileux sont déterminés en considérant la valeur des argiles totales à 100 %.

VI.3 Granulométrie et limites d'Atterberg

La figure VI.1 présente les courbes granulométriques de cinq échantillons, obtenues par tamisage et par sédimentométrie. La granulométrie de l'échantillon C2 Lutendele2* n'a été faite que partiellement. Seule la fraction sableuse a été estimée.

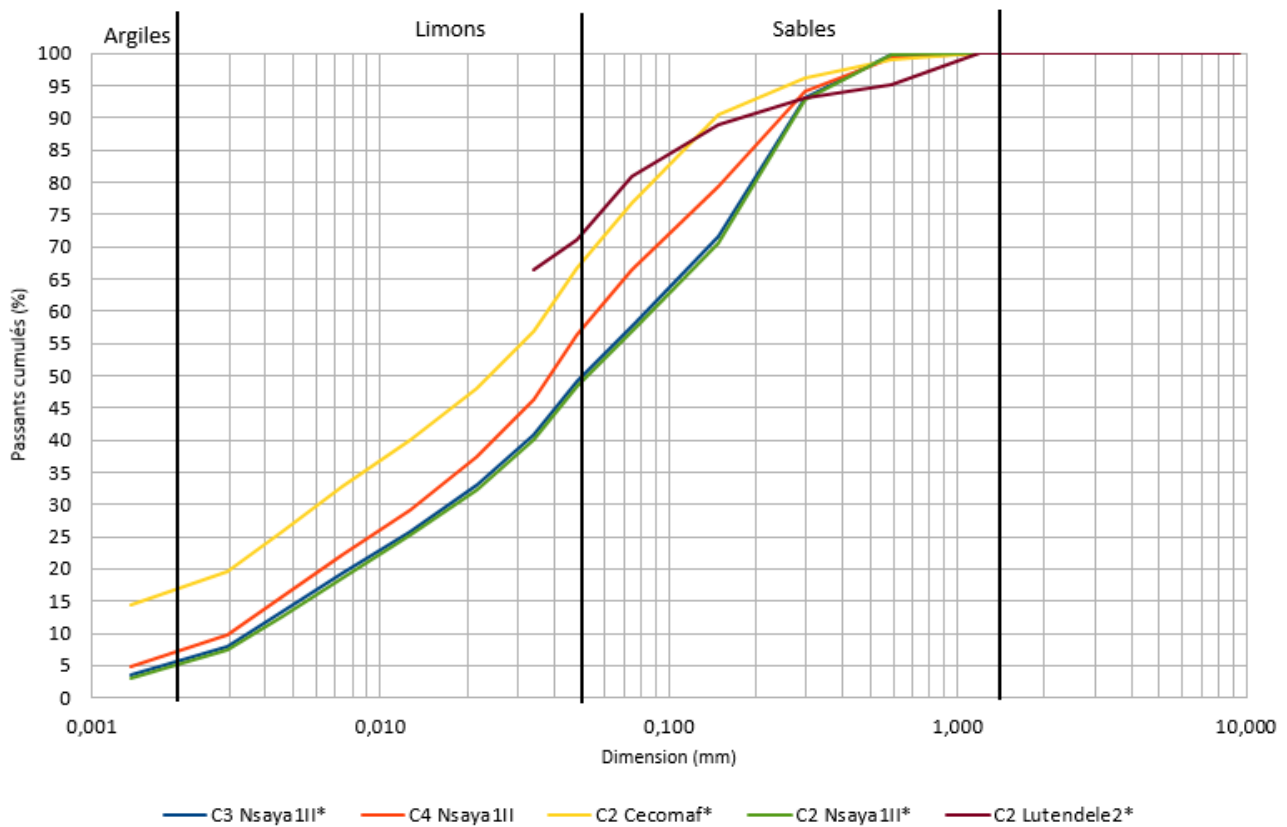


Fig. VI.1 : Courbes granulométriques des échantillons analysés.

Afin de comparer facilement ces courbes, le tableau VI.3 et la figure VI.2 présentent la composition granulométrique de ces échantillons et leur classification.

Échantillons	% Argiles (< 2 μm)	% Limons (2 – 50 μm)	% Sables (0,05 – 2 mm)	Classification
C2 Nsaya 1II*	5	44	51	Limono-sableux
C3 Nsaya 1II*	6	44	50	Limono-sableux
C4 Nsaya 1II	7	50	43	Limono-sableux
C2 Cecomaf*	17	50	33	Limoneux
C2 Lutendele2*	72		28	Limono-argileux

Tableau VI.3 : Composition et classification granulométriques des échantillons analysés.

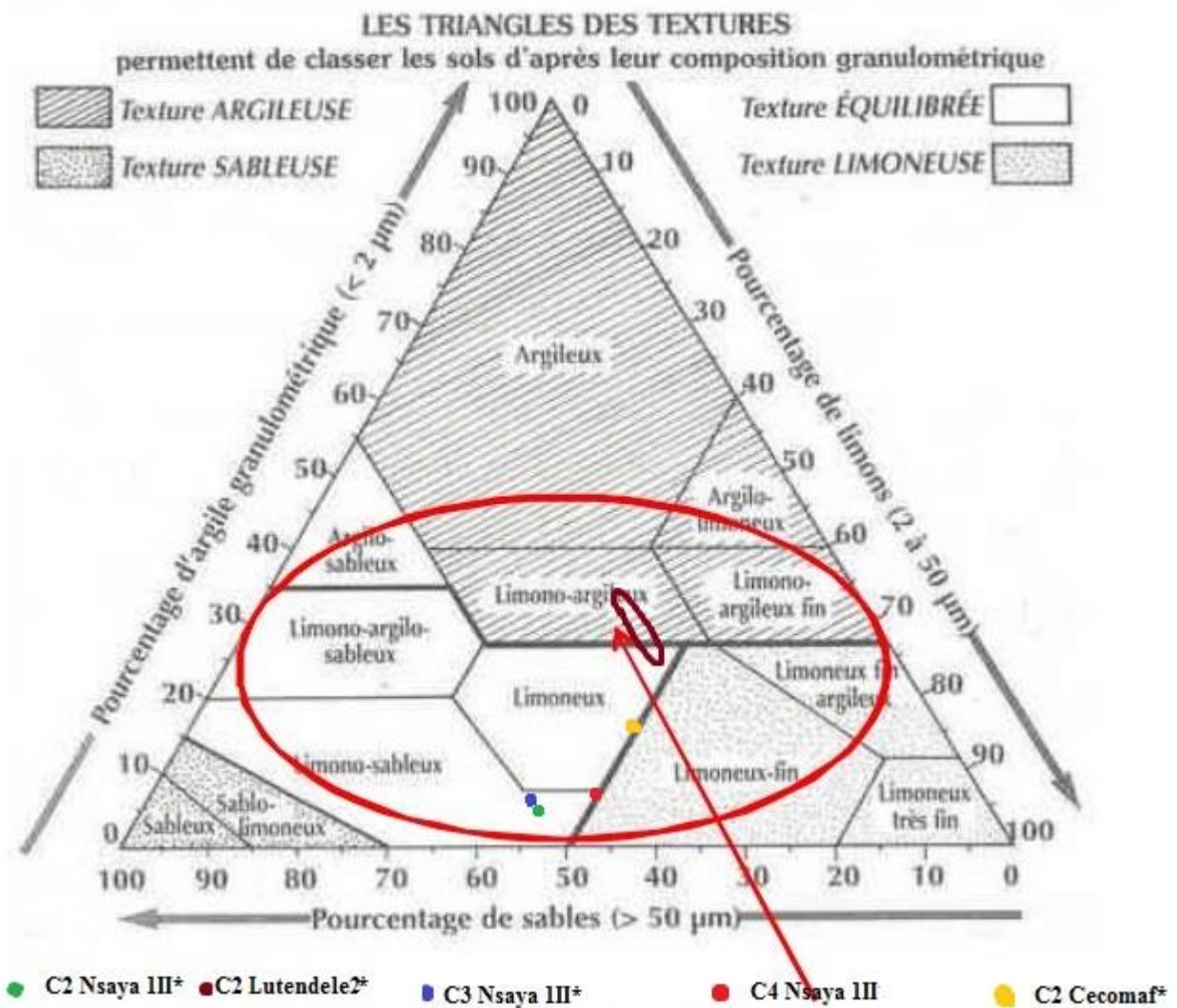


Fig. VI.2 : Triangle des textures montrant la zone des terres propices à la construction en terre crue (encadré rouge) (Modifié d'après Delbecq, 2011).

A titre de comparaison, la figure VI.2 présente également la granulométrie des terres propices à la construction en terre crue. Celle-ci a été établie par Delbecq (2011) sur base d'une synthèse bibliographique.

Le tableau VI.4 illustre également les caractéristiques granulométriques des terres crues en fonction des techniques de construction (synthèse d'après Jiménez et Guerrero, 2007).

Techniques	Document	Pays	Argile	Silt	Sable	Gravier
Adobe	NTE E 080 (2000)	Pérou	10 – 20	15 – 25	55 – 70	
	HB 195 (2002) ^a	Australie	10 – 40	10 – 30	Sable + gravier fin 30 – 75	
	Houben et Guillaud (1994)		5 – 29			
BTC	XPP 13-901 (2001)	France	10 – 30			
	ARSO (1996)	Afrique	8 – 30			
	HB 195 (2002) ^a	Australie	10 – 40	10 – 30	Sable + gravier fin 30 – 75	
	MOPT (1992)	Espagne	5 – 34			
	Houben et Guillaud (1994)		6 – 22			
	Rigassi V (1995) ^b		8 – 30	10 – 25	25 – 80	0 – 40
	Rigassi V (1995) ^b		6 – 23			
Pisé	SAZS 724 (2001)	Zimbabwe	5 – 15	15 – 30	Sable + gravier fin 30 – 75	
	MOPT (1992)	Espagne	5 – 26			
	IETCC (1971) ^{c,d}	CYTED	10 – 40	20 – 40	10 – 40	10 – 20 gravier fin
	Houben et Guillaud (1994)		8 – 16			
Adobe, BTC, pisé	McHenry (1984) ^{e,f}		15	32	30	23
	Smith and Austin (1996) ^g		4 – 15	40	60 – 80	

Tableau VI.4 : Recommandations concernant les teneurs des différentes fractions du sol.

D'après les recommandations dans les abaques de granularité les argiles désignent les particules < 0,002 mm.

a argile < 0,002 mm ; silt 0,002 à 0,06 mm ; sable 0,06 à 2 mm ; gravier 2-6 mm.

b argile < 0,002 mm ; silt 0,002 à 0,06 mm ; sable 0,06 à 2 mm ; gravier fin 2-20 mm.

c uniquement des indications pour le pisé stabilisé.

d argile < 0,002 mm ; silt 0,002-0,5 mm ; sable 0,5-5 mm ; graviers 5-20 mm.

e AASHO, argile < 0,005 mm ; silt 0,005 à 0,075 mm ; sable fin 0,075 à 0,425 mm ; sable grossier 0,425 à 2,0 mm ; gravier > 2,0 mm.

f les valeurs moyennes des sols qui ont montré des bonnes performances dans les bâtiments existants.

g argile < 0,002 ; limon 0,002 à 0,0625 mm ; sable 0,0625 à 2 mm.

Sur base de la granulométrie, tous les échantillons analysés sont adaptés à la construction en terre crue d'après Delbecq (2011). D'après le tableau VI.4, on remarque que d'un auteur à l'autre les compositions granulométriques changent, pour une même technique de construction. Ceci témoigne de l'absence de norme unique vis à vis de la construction en terre crue. Selon les auteurs et les techniques, les échantillons analysés vont s'adapter ou pas à l'une ou l'autre technique de construction en terre crue. Les matériaux de Kasangulu (Nsaya) sont ceux qui sont relativement mieux adaptés pour la construction en pisé et en BTC. En effet ces deux techniques de construction nécessitent une teneur en argile plus faible en raison de la compression et de la possibilité de fissuration (Jiménes et Guerrero 2007). L'adobe est la technique la moins restrictive vis-à-vis de la granulométrie (Jiménes et Guerrero 2007). Tous nos échantillons sont adaptés à cette technique mais l'échantillon de Cecomaf serait la mieux adaptée en raison d'une proportion en argile plus importante qui assure une meilleure cohésion.

Les résultats des limites d'Atterberg, sont présentés au tableau VI.5. La détermination de l'indice de plasticité est présentée en annexe 5. Huit échantillons ont été analysés. La priorité a été accordée aux 4 échantillons qui étaient disponibles en plus grande quantité. Les échantillons C4 Nsaya 1II, C3 Cecomaf et ceux de Lutendele/Kimbaguiste ont été choisis pour mettre en évidence des variations sur un même site. La plasticité d'une terre augmente avec la teneur en minéraux argileux, et leur surface spécifique (Casagrande, 1958 ; Centre de recherches routières, 1981). Sur base de l'indice de plasticité, les sols sont classés en 4 catégories (tableau VI.6).

Les matériaux de Kasangulu et de Ndjili Cecomaf sont peu plastiques ou plastiques, alors que les matériaux de Lutendele sont non plastiques ou peu plastiques. Cette différence peut s'expliquer par une minéralogie des matériaux de Lutendele marquée par une plus grande quantité d'illite alors que les autres matériaux sont beaucoup plus riches en kaolinite. A titre comparatif, le tableau VI.7 illustre les valeurs résumées par Jiménes et Guerrero, 2007 (Fig. IV.2).

Sites	Échantillons	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité
Nsaya 1b	C2 Nsaya 1II*	34	18	16
	C3 Nsaya 1II*	34	24	10
	C4 Nsaya 1II	34	23	11
Ndjili Cecomaf	C2 Cecomaf*	32	20	12
	C3 Cecomaf	41	26	14
Lutendele/Mbudi2	C2 Lutendele2*	32	29	3
Lutendele/Kimbaguiste	C2 Lutendele3	33	24	9
	C3 KimbanguIII	26	20	6

Tableau VI.5 : Résultats de l'analyse des limites d'Atterberg.

Ip	Dénomination	Exemples de sol
Inférieur à 5	Non plastique	Sable limoneux ou argileux, sable
De 5 à 15	Peu plastique	Limon sableux, limon,
De 15 à 25	Plastique	Limon, limon argileux
Plus de 25	Très plastique	Argile

Tableau VI.6 : Classification des sols sur base de l'indice de plasticité (Casagrande, 1958 ; Centre de recherches routières, 1981).

Technique	Document	Limite de liquidité	Indice de plasticité
Adobe	Houben et Guillaud (1994)	31 – 50	16 – 33
Pisé	Houben et Guillaud (1994)	25 – 46	2 – 30
BTC	Houben et Guillaud (1994)	25 – 51	2 – 31
	ARS (1996)	25 – 50	2,5 – 29
	XP P 13-901 (2001)	25 – 50	2,5 – 29

Tableau VI.7 : Limites de liquidité et indices de plasticité maximum et minimum obtenus dans les références d'après Jiménes et Guerrero, 2007.

Sur base de cette analyse, nous pouvons conclure que tous nos échantillons sont adaptés pour la réalisation de BTC et pisé selon Houben et Guillaud (1994), ARS (1996) et XP P 13-901 (2001). Dans le cas des BTC et du pisé, un indice de plasticité plus élevé signifierait une masse volumique faible, or une terre mise en œuvre à l'état comprimé demande une terre avec une masse volumique élevée (voir ci-dessus). Les échantillons analysés ne conviennent pas parfaitement pour faire de l'adobe selon Houben et Guillaud (1994). En effet pour les terres mises en œuvre à l'état plastique (adobe, mortier, torchis), il est difficile de définir de manière rigoureuse la consistance visée, et donc la teneur en eau optimale. Les artisans veulent donc une terre avec un indice de plasticité plus élevé pour assurer une bonne maniabilité (Moevus et al., 2012).

VI.4 Perte au feu

Les résultats de la perte au feu sont présentés au tableau VI.8.

Sites	Échantillons	Masse humide (gr)	Masse sèche 105°C (gr)	Masse 550°C (gr)	Teneur en eau naturelle (%)	Matière organique (%)	PF XRF
Nsaya 1a	C2 Nsaya II	1,514	1,433	1,368	5,4	4,6	
	C3 Nsaya II	1,526	1,352	1,287	11,4	4,8	
Nsaya 1b	C2 Nsaya III*	1,501	1,491	1,425	0,7	4,4	7,3
	C3 Nsaya III*	1,515	1,350	1,287	10,9	4,7	7,7
	Horizon	1,522	1,447	1,384	5,0	4,3	6,5
	C4 Nsaya III	1,510	1,349	1,263	10,6	6,4	7,7
Nsaya 2	C2 Nsaya 2	1,524	1,293	1,217	15,2	5,9	
Ndjili Cecomaf	C2 Cecomaf*	1,514	1,242	1,160	18,0	6,6	10,3
	C3 Cecomaf	1,531	1,189	1,100	22,4	7,5	10,3
Mbudi 1	C2 Lutendele1	1,508	1,210	1,150	19,8	5,0	
Mbudi 2	C2 Lutendele2*	1,545	1,031	0,937	33,3	9,1	12,4
Kimbaguiste	C2 Lutendele3	1,534	1,275	1,212	16,9	4,9	
	C3 KimbanguIII	1,517	1,305	1,252	14,0	4,1	

Tableau VI.8 : Teneur en eau naturelle et en matière organique.

La teneur en eau d'un sol (W) représente la masse d'eau contenue dans ce sol. Étant donné que cette mesure a été effectuée au mois d'avril 2015 sur des échantillons prélevés en juillet 2014, ces valeurs ne reflètent sans doute pas la réalité. On remarque cependant une variation de W en fonction de la profondeur de l'échantillon (les échantillons plus profonds montrent des valeurs de W plus élevées), et de la nature de l'échantillon (les échantillons plus argileux montrent des valeurs de W plus élevées).

La teneur en matière organique des différents échantillons est relativement élevée. Ceci pourrait poser problème pour la construction en terre crue non stabilisée (MO doit de préférence être < 2 %).

La teneur en matière organique est faible par rapport à la perte au feu (PF) déterminée par XRF. La PF a été déterminée après une chauffe à 1000°C. D'autres éléments autres que la matière organique ont été perdus à 1000°C.

La densité sèche peut être déterminée sur base de la masse après passage à l'étuve à 105°C.

$$\rho_{\text{sèche, sat}} = \frac{\rho_{\text{solide}}}{\rho_{\text{eau}} + w \cdot \rho_{\text{solide}}}$$

avec la teneur en eau initiale $w = m_{\text{eau}} / m_{\text{solide}}$, la masse volumique de la phase solide $\rho_{\text{solide}} = 2650$

kg/m³ (valeur courante pour la plupart des terres), la masse volumique de l'eau peau = 998,2 kg/m³ à 20°C (Moevus et al., 2012).

La densité sèche dépend de plusieurs paramètres : la teneur en eau à la mise en œuvre, la distribution granulométrique, la proportion et la nature de la phase liante, l'énergie de compaction,... (Moevus, et al. 2012)

Le tableau VI.9 donne les valeurs de densité sèche obtenues à l'aide de la formule ci-dessus et à l'aide du pycnomètre. Ces deux modèles montrent des différences parfois très significatives. Les valeurs obtenues au pycnomètre sont probablement plus précises.

Sites	Échantillons	Masse humide (gr)	Masse sèche 105°C (gr)	Masse eau (gr)	W (gr)	Densité sèche (kg/m ³)	Densité pycnomètre (kg/m ³)
Nsaya 1a	C2 Nsaya 1I	1,5143	1,4333	0,081	0,0565	2308	
	C3 Nsaya 1I	1,5259	1,3518	0,1741	0,1288	1978	
Nsaya 1b	C2 Nsaya 1II*	1,5013	1,4905	0,0108	0,0072	2605	2769
	C3 Nsaya 1II*	1,5149	1,3497	0,1652	0,1224	2004	2859
	Horizon	1,5218	1,4465	0,0753	0,0521	2332	
	C4 Nsaya 1II	1,5095	1,3494	0,1601	0,1186	2019	2731
Nsaya 2	C2 Nsaya 2	1,5242	1,293	0,2312	0,1788	1800	
Ndjili Cecomaf	C2 Cecomaf*	1,5141	1,2415	0,2726	0,2196	1677	2889
	C3 Cecomaf	1,5314	1,1889	0,3425	0,2881	1504	
Mbudi 1	C2 Lutendele1	1,5078	1,2097	0,2981	0,2464	1605	
Mbudi 2	C2 Lutendele2*	1,5448	1,0308	0,514	0,4986	1142	
Kimbaguiste	C2 Lutendele3	1,534	1,2746	0,2594	0,2035	1724	
	C3 KimbanguIII	1,517	1,3054	0,2116	0,1621	1856	

Tableau VI.9 : Densité des échantillons analysés.

Le calcul de la densité a une grande importance. Une terre plus dense est moins perméable et moins compressible (Doat et al., 1979). Le tableau VI.10 donne des plages de variation de la masse volumique sèche en fonction de la technique de construction, des différentes valeurs relevées dans la littérature. La terre mise à l'état compactée a une densité plus élevée. Il est donc possible d'augmenter la densité d'une terre en utilisant une presse ou de la diminuer en y ajoutant des fibres végétales (Kouakou et Morel, 2009 ; Morel et Kouakou, 2011).

Technique	Teneur en eau initiale (%)	Masse volumique sèche (kg/m ³)
Pisé, BTC	5 à 15	1600 à 2200
Adobe, mortier, bauge	15 à 35	1200 à 2100
Terre allégée		300 à 1200

Tableau VI.10 : Plages de variation de la masse volumique sèche de la terre crue (Moevus et al., 2012).

La mesure faite au pycnomètre ne varie pas en fonction de la teneur en eau initiale. Ceci s'explique par le fait que cette mesure est faite sur des échantillons préalablement séchés à l'étuve. Par contre on remarque que pour la méthode empirique, la densité diminue avec la teneur en eau initiale (Fig. VI.3). De ce fait on peut regrouper les échantillons qui sont propices pour la construction en Blocs de Terre Comprimés (pisé et BTC), ceux qui sont propices à la terre moulée (adobe, mortier, bauge) et ceux qui sont propices à la terre allégée (C2 Lutendele 2*). Les échantillons peuvent cependant

s'adapter à une autre technique en subissant une modification (presse, fibres, modification de la granulométrie,...)

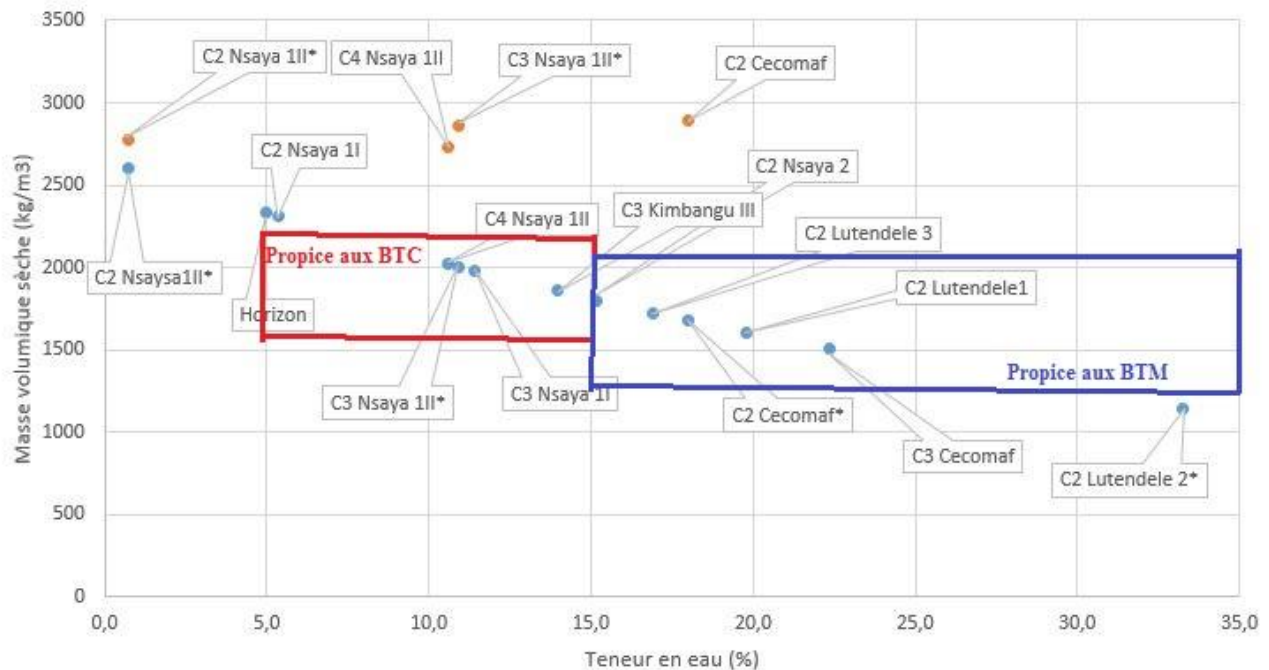


Fig. VI.3 : Masse volumique sèche et teneur en eau initiale. En jaune, les mesures faites au pycnomètre et en bleu les mesures faites à l'aide de la formule empirique.

VI.5 Résistance à la compression et à la flexion

Les normes pour les essais de compression et flexion propre à la terre crue sont rares. La plupart de tests de résistance à la compression et à la flexion sont des transpositions d'essais appliqués pour les bétons de ciment. C'est le cas dans notre étude. Les propriétés mécaniques de ces deux matériaux étant complètement différentes, les valeurs de résistance ne sont donc pas toujours intrinsèques au matériau terre : la mesure étant en partie influencée par le dispositif d'essai.

Les courbes de résistance à la flexion et à la compression obtenues à 28 jours (R_{f28} et R_{c28}) sont présentées à l'annexe 6. Le tableau VI.11 présente les valeurs des résistances en flexion et en compression de 4 échantillons. Seuls les échantillons disponibles en plus grande quantité ont été sélectionnés pour ce test.

Les valeurs obtenues par essai pour un même échantillon sont comparables. Ce qui signifie que le test s'est fait dans les mêmes conditions et que les éprouvettes ont été bien réalisées.

Par soucis de lisibilité, le tableau VI.12 reprend les valeurs moyennes de résistance en flexion et compression des différents échantillons et les compare aux différentes valeurs trouvées dans la littérature (Moevus et al. 2012 ; Jiménes et Guerrero, 2007).

Échantillons		Rf	Rf moyenne par échantillon		Résistance compression	Rc moyenne par éprouvette	Rc moyenne par échantillon	
C2 Nsaya 1II*	C2 Nsaya 1II* -1	0,54	0,59	C2 Nsaya 1II* -1A	2,40	2,4	2,58	
				C2 Nsaya 1II* -1B	2,61			
	C2 Nsaya 1II*-2	0,64		C2 Nsaya 1II* -2A	2,71	2,61		
			C2 Nsaya 1II* -2B	2,58				
	C2 Nsaya 1II*-M1	0,64	0,64	C2 Nsaya 1II* -M1A	2,74	2,72	2,73	
				C2 Nsaya 1II* -M1B	2,70			
C2 Nsaya 1II*-M2	0,64	C2 Nsaya 1II* -M2A		2,80	2,74			
		C2 Nsaya 1II* -M2B	2,67					
C3 Nsaya 1II*	C3 Nsaya 1II*-1	0,55	0,56	C3 Nsaya 1II*-1A	2,29	2,12		2,33
				C3 Nsaya 1II*-1B	1,95			
	C3 Nsaya 1II*-2	0,57			C3 Nsaya 1II*-2A	2,65	2,55	
			C3 Nsaya 1II*-2B	2,44				
	C3 Nsaya 1II*-M1	0,42	0,40	C3 Nsaya 1II*-M1A	3,61	3,67	4,16	
				C3 Nsaya 1II*-M1B	3,72			
	C3 Nsaya 1II*-M2	0,38		C3 Nsaya 1II*-M2A	4,37	4,66		
			C3 Nsaya 1II*-M2B	4,94				
C3 Nsaya 1II*-Chaux	0,52	0,52	C3 Nsaya 1II*-Chaux-A	1,83	1,83	1,98		
			C3 Nsaya 1II*-Chaux-B	2,13	2,13			
C2 Cecomaf*	C2 Cecomaf*-1	1,01	1,01	C2 Cecomaf*-1A	3,75	3,81	3,81	
				C2 Cecomaf*-1B	3,86			
	C2 Cecomaf*-M1	1,04	0,97	C2 Cecomaf*-M1A	3,29	3,42	3,25	
				C2 Cecomaf*-M1B	3,54			
	C2 Cecomaf*-M2	0,90		C2 Cecomaf*-M2A	2,82	3,08		
		C2 Cecomaf*-M2B	3,34					
C2 Lutendele2*	C2 Lutendele2*-1	1,33	1,33	C2 Lutendele2*-1A	4,40	4,69	4,69	
				C2 Lutendele2*-1B	4,97			
	C2 Lutendele2*-M1	0,75	0,75	C2 Lutendele2*-M1A	3,22	3,17	3,14	
				C2 Lutendele2*-M1B	3,11			
	C2 Lutendele2*-M2	0,75		C2 Lutendele2*-M2A	3,27	3,11		
				C2 Lutendele2*-M2B	2,95			

Tableau VI.11 : Résistances à la flexion et à la compression. Pour un même échantillon, les essais en flexion ont été réalisés sur 1 ou 2 éprouvettes. D'où le nom de l'échantillon est suivi d'un indice -1 ou -2 (pour essai 1 et essai 2). Lorsque la lettre M est mise devant le -1 ou le -2, cela signifie que l'échantillon a été mélangé à la chaux (6 %) et à la CBR (6 %). La dénomination **C3 Nsaya 1II*-Chaux** désigne l'échantillon avec 6 % de chaux et sans CBR. Pour une même éprouvette, l'essai en compression a été réalisé 2 fois, en raison d'un essai par demi-éprouvette (d'où les lettres A et B).

		C2 Nsaya 1II*	C3 Nsaya 1II*	C2 Cecomaf*	C2 Lutendele2*	Normes		
						Terre comprimée	Terre moulée	Terre allégée
Rf ₂₈	Sans stabilisation	0,59	0,56	1,01	1,33	0,1 à 0,5		
	+ 6 % chaux et CBR	0,64	0,40	0,97	0,75			
	+ 6 % chaux		0,52					
Rc ₂₈	Sans stabilisation	2,58	2,33	3,81	4,69	0,4 à 3,0	0,4 à 5,0	< 1,0
	+ 6 % chaux et CBR	2,73	4,16	3,25	3,14			
	+ 6 % chaux		1,98					

Tableau VI.12 : Résistance à la flexion et à la compression.

Pour illustrer un autre effet de la stabilisation sur la terre, la figure VI.4 donne les masses volumiques des échantillons non stabilisés et stabilisés à la chaux et à la CBR.

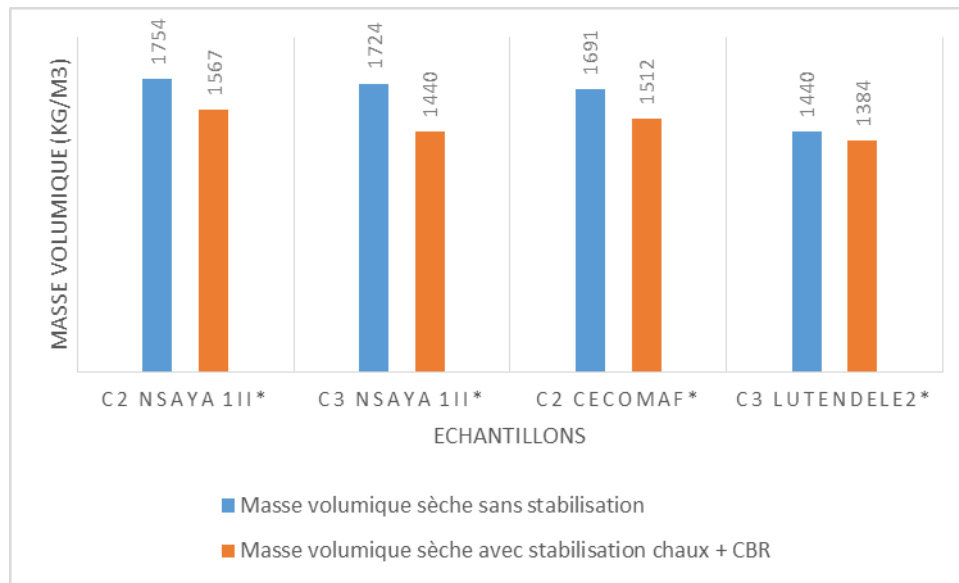


Fig. VI.4 : Variation de la masse volumique avec la stabilisation

On observe une diminution de la masse volumique avec la stabilisation. Celle-ci est d'autant plus marquée que l'échantillon non stabilisée avait une densité initiale élevée. La diminution de la masse volumique peut être justifiée par l'occupation des espaces vides par les particules de chaux et de CBR.

Résistance à la compression

La résistance à la compression est la principale propriété mécanique de la terre qui intéresse les bâtisseurs (Houben et Guillaud, 1989). Elle est la seule propriété mécanique qui fait l'objet de fortes exigences réglementaires. Plus la résistance en compression est élevée, plus l'épaisseur des murs pourra être faible pour une hauteur de bâtiment donnée. La résistance à la compression d'une terre mise en œuvre pour la construction peut varier entre 0,4 et 5 MPa. Pour le pisé, les valeurs sont plus faibles : 0,4 à 3 Mpa. Les paramètres qui améliorent la résistance à la compression de la terre sont :

- une densité élevée (Houben et Guillaud, 1989 ; Olivier, 1994 ; Morel et al. 2007 Kouakou et Morel, 2009),
- une teneur en eau faible (Olivier, 1994 ; Gelard, 2005),
- une teneur en argile et limon élevée (Olivier, 1994),
- une teneur en montmorillonite élevée (Van Damme, 2001),
- une bonne homogénéité (Maniatidis et Walker, 2008 ; Bui et al., 2009),
- des grains de petite taille (Heath, 2007).

Plusieurs conclusions et hypothèses peuvent être faites sur base des résultats obtenus par l'essai de compression (Fig. VI.5).

- (1) Les échantillons non stabilisés C2 Nsaya 1II* et C3 Nsaya 1II* ont des valeurs de R_{c28} plus faible sans doute liées à la faible teneur en argile (5 et 6 %). Ils sont adaptés à la construction en terre crue comprimée et moulée selon les normes citées au tableau VI.4. Les échantillons C2 Cecomaf* et C2 Lutendele2* ont une R_{c28} plus élevée sans doute liée à une teneur en argile plus importante. Ils sont les mieux adaptés pour la construction en terre moulée.

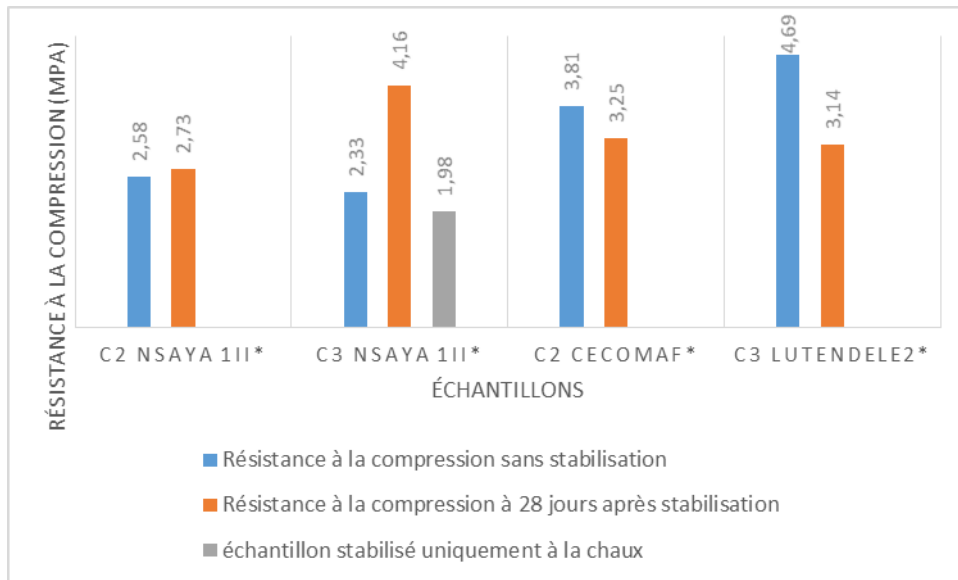


Fig. VI.5 : Résistances à la compression.

(2) La stabilisation à la chaux et à la CBR augmente légèrement R_c pour l'échantillon C2 Nsaya 1II*, augmente fortement R_c pour l'échantillon C3 Nsaya 1II*, alors qu'elle diminue plus ou moins fortement R_c pour les 2 autres échantillons. Les raisons de ces comportements variés peuvent être multiples :

- Thompson (1966) a montré qu'une kaolinite ou une montmorillonite étaient plus réactives à la chaux qu'une illite ou une chlorite. Ceci pourrait expliquer la diminution de R_{c28} de l'échantillon C3 Lutendele2* plus riche en illite (50 %).
- La matière organique interfère aussi en retardant, voire en empêchant, le déclenchement des réactions pouzzolaniques ; ce qui diminue la résistance du mélange très fortement (Thompson 1966 ; Hebib et Farrel, 2003). La figure VI.6 rend compte de la variation des R_{c28} sans et avec stabilisation à la chaux et à la CBR en fonction de la teneur en matière organique. On remarque bien que la stabilisation diminue la résistance en compression des échantillons plus riches en matière organique.

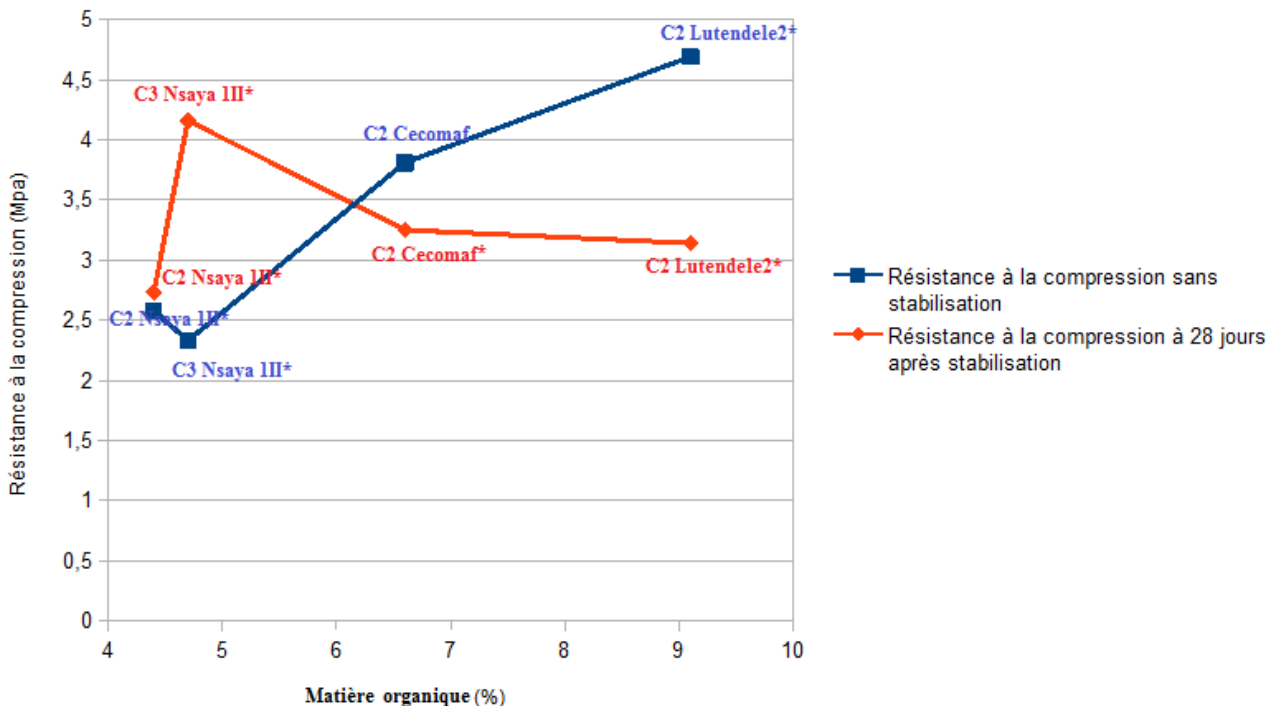


Fig. VI.6 : Influence de la matière organique sur la résistance en compression des échantillons.

- L'augmentation de la résistance des sols traités à la chaux dépend seulement des réactions entre l'argile et la chaux (Thompson, 1966). Elles sont lentes comme le montre la figure VI.7.

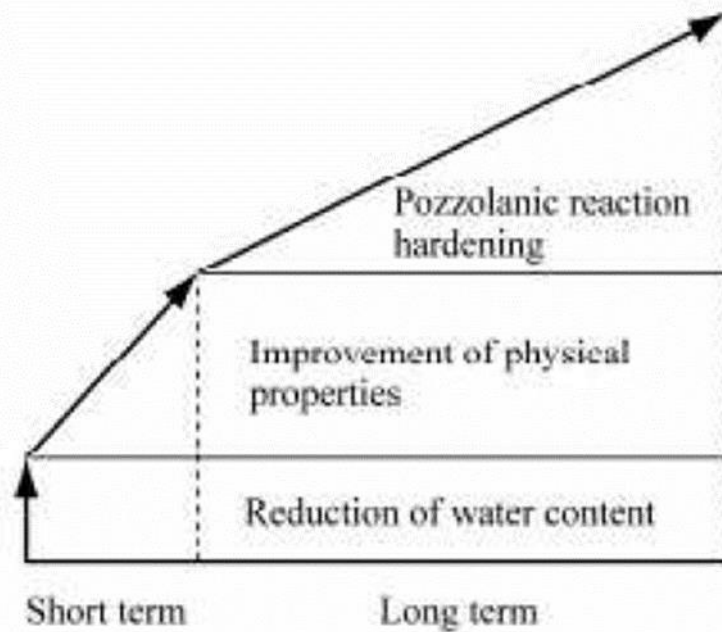


Fig. VI.7 : *Processus de stabilisation à la chaux (CDIT, 2002).*

L'effet de la CBR et de la chaux se manifeste donc plus tard. On peut donc supposer que la vitesse de la réaction pouzzolanique n'est pas la même pour les différents échantillons. Ce qui se traduit par une R_{c28} avec stabilisation faible pour certains échantillons. Il aurait été intéressant de tester la résistance à la compression sur une plus longue période de l'ordre de 2 ou 3 mois.

- Le durcissement du mélange chaux-CBR-sol se fait en formant des liaisons C-S-H et en asséchant l'eau de l'échantillon. Cet assèchement d'eau peut provoquer une fissuration de l'échantillon et diminuer ainsi sa résistance. Il peut être d'autant plus marqué que l'échantillon a une teneur en eau initiale plus élevée. La figure VI.8 montre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau initiale. Les échantillons à forte teneur en eau initiale voient leur R_{c28} diminuer avec la stabilisation.

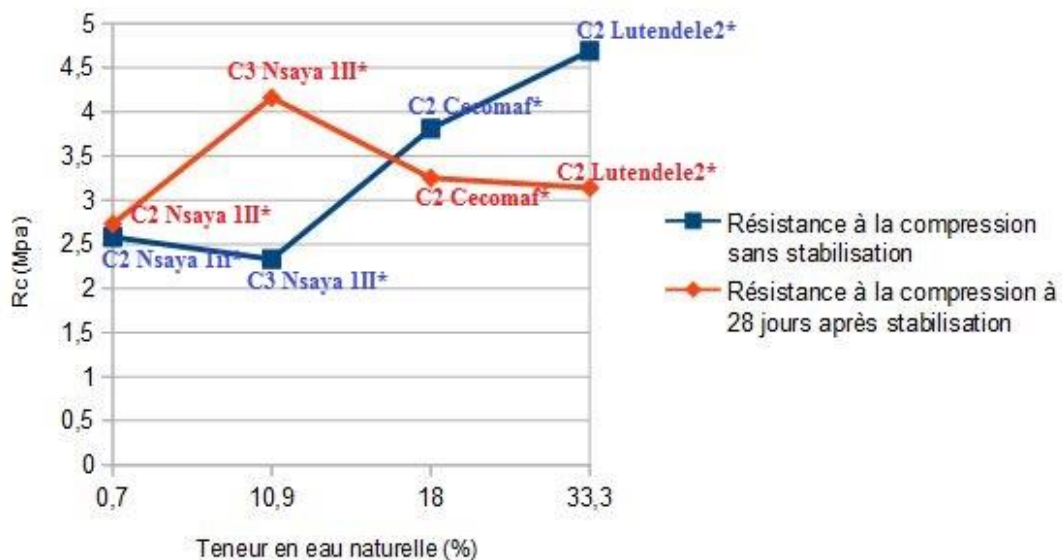


Fig. VI.8 : *Variation de R_{c28} en fonction de la teneur en eau initiale.*

- (3) Le test réalisé sur l'échantillon stabilisé à la chaux uniquement (sans CBR) montre une R_{C28} plus faible. On peut en conclure que la stabilisation à la chaux seule n'a pas un effet bénéfique.

Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est considérée comme de faible importance par rapport à la résistance à la compression dans le domaine de la construction. Les constructions en terre sont généralement dimensionnées de manière à ce que le matériau ne soit sollicité qu'en compression (Moevus et al., 2012). Il n'y a en général pas d'exigence concernant la résistance à la flexion de la terre crue. Peu de valeurs fiables ont été trouvées dans la littérature concernant la résistance à la flexion de la terre crue (tableau VI.13). Les rares mesures montrent qu'elle est de l'ordre de 0,1 à 0,5 MPa.

Réf.	Technique	Commentaire
NZS 4298:1998	BTC	La plus faible résistance à la flexion mesurée sur 5 échantillons doit être > 0,25 MPa.

Tableau VI.13 : Exigences réglementaires concernant la résistance à la flexion.

Les mêmes paramètres influant sur la résistance à la compression (une teneur en argiles importante, une densité élevée et une teneur en eau faible) influencent de manière similaire la résistance à la flexion (P'kla, 2003 ; Hakimi, 1996).

Deux conclusions peuvent être tirées des résultats d'essai en flexion (Fig. VI.9):

- (1) Tous les matériaux analysés ont une valeur de R_f supérieure aux valeurs imposées par les normes. Ils sont donc adaptés pour résister aux contraintes de flexion que subit une construction en terre.
- (2) L'effet de la stabilisation sur la résistance à la flexion n'est pas mis en évidence. R_f augmente légèrement avec la stabilisation pour l'échantillon C2 Nsaya 1II*, diminue faiblement pour C3 Nsaya 1II* et C2 Cecomaf et diminue fortement pour C3 Lutende2. Les mêmes raisons évoquées pour la R_c justifient ces comportements.

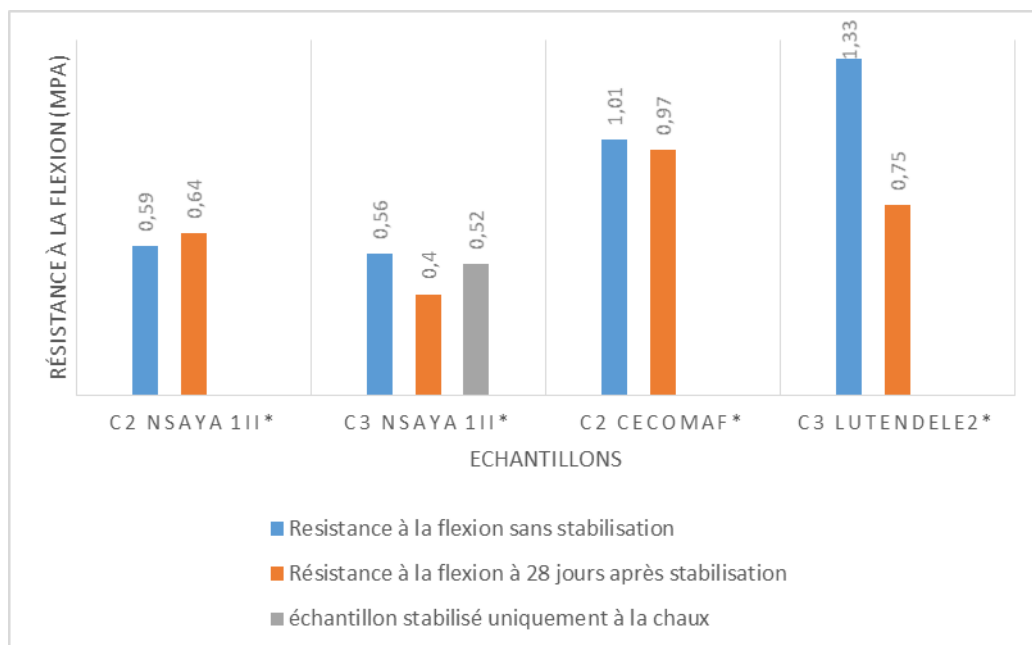


Fig. VI.9 : Résistances à la flexion.

Les études consultées (Duarte Tiago, 2011 ; Mtallib et Bankole, 2011) ont montré une augmentation de la résistance à la compression et à la flexion avec la stabilisation à la chaux et à la CBR. Mtallib et Bankole (2011) observent une augmentation de 40 % de la California Bearing Ratio (ratio mesurant la résistance à l'effort tranchant d'un sol) entre un sol non stabilisé et un sol stabilisé avec 8 % de

chaux et 10 % de cendre de balle de riz. Duarte Tiago (2011) mesure les résistances en compression et en flexion à 14 jours et à 28 jours d'une terre stabilisée à la chaux et à la cendre de balle de riz selon un ratio chaux/CBR de 1 : 2, sur des éprouvettes 4*4*16 cm et selon la norme NF EN 196-1. Les résultats obtenus sont présentés au tableau VI.14.

Diamètre de la plus grosse particule de CBR	Rf 14 jours (Mpa)	Rc 14 jours (Mpa)	Rf 28 jours (Mpa)	Rc 28 jours (Mpa)
500 µm	1	2,7	1,4	3,2
250 µm	1,4	3,4	1,5	3,5
125 µm	1,4	3,6	1,6	3,8
75 µm	1,5	3,5	2,3	5,5

Tableau VI.14 : Caractérisation mécanique des éprouvettes d'après Duarte Tiago, 2011.

Nous pouvons conclure que la stabilisation dans notre cas n'a pas fourni les résultats souhaités.

VII. Synthèse

Le tableau VII.1 résume les caractéristiques mesurées pour les différents échantillons. Trois groupes peuvent être identifiés.

(1) Les matériaux de Kasangulu :

La couche 2 des matériaux de Kasangulu est caractérisée par une Rc28 de 2,58 Mpa et une Rf28 de 0,59 (sans stabilisation), une masse volumique élevée (comprise entre 1800 et 2605 kg/m³), une teneur en eau naturelle < 15 %, une teneur en argile de 5 % (échantillon C2 Nsaya 1II*), et un indice de plasticité de 16 (échantillon C2 Nsaya 1II*). **Ces caractéristiques font que ces matériaux sont plus propices à la construction en terre comprimée (pisé et BTC).**

Les couches 3 et 4 sont caractérisées par une Rc28 de 2,33 Mpa et une Rf28 de 0,56 (sans stabilisation), une masse volumique élevée (comprise entre 1978 et 2019 kg/m³), une teneur en eau naturelle < 15 %, une teneur en argile de 6 % (échantillon C3 Nsaya 1II*), et un indice de plasticité de 10 (échantillon C3 Nsaya 1II*). **Ces caractéristiques font que ces matériaux sont plus propices à la construction en terre comprimée (pisé et BTC).**

(2) Les matériaux de Lutendele :

La couche 2 des matériaux de Lutendele est caractérisée par une Rc28 de 1,69 Mpa et une Rf28 de 1,33 (sans stabilisation), une masse volumique comprise entre 1142 et 1724 kg/m³, une teneur en eau naturelle > 15 %, une teneur en argile > 20 % (échantillon C2 Lutendele2*), et un indice de plasticité < 10. **Ces caractéristiques font que ces matériaux sont plus propices à la construction en terre moulée (adobe, mortier, bauge).** La couche 3 n'a pas été caractérisée par beaucoup de méthodes.

(3) Les matériaux de Ndjili Cecomaf :

La couche 2 des matériaux de Ndjili Cecomaf est caractérisée par une Rc28 de 3,81 Mpa et une Rf28 de 1,01 (sans stabilisation), une masse volumique de 1677 kg/m³, une teneur en eau naturelle > 15 %, une teneur en argile de 17 % (échantillon C2 Cecomaf*), et un indice de plasticité de 12. **Ces caractéristiques font que ces matériaux sont plus propices à la construction en terre moulée (adobe, mortier, bauge).** La couche 3 n'a pas été caractérisée par beaucoup de méthodes.

	Kasangulu							Ndjili Cecomaf		Lutendele				
Paramètres	C2 Nsaya II	C3 Nsaya II	C2 Nsaya III*	C3 Nsaya III*	Horizon	C4 Nsaya III	C2 Nsaya 2	C2 Cecomaf*	C3 Cecomaf	C2 Lutendele1	C2 Lutendele2*	C2 Lutendele3	C3 KimbanguIII	Normes pour la terre crue non stabilisée
Composition chimique														
Silice (SiO2) %			72,16	70,1	53,71	67,69		63,11	63,9		63,97			
Alumine (Al2O3) %			14,89	16,18	11,39	17,35		21,98	21,91		16,31			
Oxyde de fer (Fe2O3) %			4,03	4,61	26,23	5,05		2,11	1,36		4,73			
Perte au feu %			7,33	7,37	6,5	7,74		10,54	10,32		12,41			
Composition minéralogique														
% Quartz	56	39	52	50	53	42	47	68	44	71	43	52	58	
% Argile	42	61	48	50	46	58	53	32	53	29	53	41	37	
% Kaolinite	83	83	90	80	70	71	73	89	83	77	49	48	56	
% Illite	17	17	10	20	29	27	27	10	16	22	50	49	43	
Propriétés physiques														
<i>Granulométrie</i>														
% Argile			5	6		7		17			72			5 à 30 pisé et BTC ; (5) 20 à 40 adobe, mortier, bauge
% Limon			44	44		50		50						
% Sable			51	50		33		33			28			
<i>Limites d'Atterberg</i>														
Limite de Liquidité			34	34		34		32	41		32	33	26	
Limite de plasticité			18	24		23		20	26		29	24	20	
Indice de plasticité			16	10		11		12	14		3	9	6	5 à 30 pisé et BTC ; 5 à 35 adobe, mortier, bauge
<i>Teneur en eau naturelle (%)</i>	5,4	11,4	0,7	10,9	5	10,6	15,2	18	22,4	19,8	33,3	16,9	14	5 à 15 pisé et BTC ; 15 à 35 adobe, mortier, bauge
<i>Masse volumique sèche (kg/m3)</i>	2308	1978	2605	2004	2332	2019	1800	1677	1504	1605	1142	1724	1856	1600 à 2200 pisé et BTC ; 1200 à 2100 adobe, mortier, bauge ; 300 à 1200 terre allégée

Propriétés géotechniques													
<i>Résistance à la flexion (Mpa)</i>													
Sans stabilisation			0,59	0,56				1,01			1,33		
Avec stabilisation (chaux + CBR)			0,64	0,4				0,97			0,75		
<i>Résistance à la compression (Mpa)</i>													
Sans stabilisation			2,58	2,33				3,81			1,69		0,4 à 3,0 pisé et BTC ; 0,4 à 5,0 adobe, mortier, bauge ; < 1 terre allégée
Avec stabilisation (chaux + CBR)			2,73	4,16				3,25			3,14		

Tableau VII.1 : Principales caractéristiques des matériaux échantillonnés dans la région de Kinshasa (Kasangulu, Lutendele et Ndjili Cecomaf).

VIII. Conclusion

Treize échantillons de matériaux argileux provenant de 3 localités et 7 sites de la région de Kinshasa ont été échantillonnés lors d'un séjour à Kinshasa. Ces échantillons sont des roches d'altération et sont soit résiduels, soit des alluvions. Les sites d'échantillonnage se sont justifiés par l'abondance des gisements argileux. Le contexte d'échantillonnage montre que certains de ces matériaux présentent une continuité spatiale. Ce qui se traduit par des caractéristiques similaires.

Les échantillons ont été caractérisés par des essais chimiques, minéralogiques, physiques et géotechniques. L'objectif principal visé à savoir valoriser les gisements dans le domaine de la construction en terre crue stabilisée et non stabilisée a été atteint.

Les analyses chimique élémentaire et minéralogique nous ont permis de regrouper ensemble les échantillons qui ont les mêmes compositions, et de prévoir les interactions que les échantillons auront avec la chaux et la cendre de balle de riz après stabilisation. L'analyse de la granulométrie et des limites d'Atterberg a montré une grande importance. Ces 2 paramètres physiques sont ceux qui influencent le plus la mise en œuvre de la terre crue. Leur détermination a permis de voir si nos échantillons répondaient aux normes et techniques courantes de construction en terre crue. La masse volumique sèche influence le comportement physique d'un sol. Nous avons mis en évidence sa relation directe avec la résistance du matériau terre. La méthode expérimentale a consisté à réaliser des éprouvettes et à déterminer les résistances à la compression et à la flexion, deux propriétés mécaniques de la terre qui intéressent les bâtisseurs.

L'ensemble des techniques mises en œuvre a abouti à la conclusion suivante : les matériaux argileux de Kasangulu sont plus propices à la construction en terre comprimée (pisé et BTC), alors que les matériaux de Lutendele et ceux de Ndjili Cecomaf sont plus propices à la construction en terre moulée (adobe, mortier, bauge).

Lorsque la terre crue est utilisée en construction comme mur porteur, son grand ennemi reste l'eau, principalement d'origine météorique. Afin de compléter nos analyses il aurait été intéressant d'effectuer les tests d'absorption d'eau sur les échantillons stabilisés et non stabilisés pour voir leur résistance à l'eau. Mais la faible quantité de matériau disponible ne l'a pas permis. Elargir cette caractérisation à d'autres localités, et répertorier d'autres localités qui contiennent des gisements argileux dans la région Kinshasa est également une perspective que je souhaiterai réaliser.

Le but d'un mémoire n'est pas seulement de fournir des résultats, mais aussi d'apprendre. Ce mémoire a suscité en moi un grand intérêt pour le domaine de la construction, et plus particulièrement pour la construction en terre crue. Il a été très enrichissant pour moi car il m'a permis de découvrir dans le détail le secteur de la terre crue, ses contraintes, ses exigences, et ses enjeux. 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.

Bibliographie

- Adler, I. (1966). *X-ray emission spectrography in geology*. Amsterdam: Elsevier Pub. Co.
- AFNOR. XP P13-901, (2001). *Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions – Specifications – Test methods – Delivery acceptance conditions*. Saint-Denis La Plaine Cedex: AFNOR.
- African Regional Organisation for Standardisation (ARSO). (1996). *Compressed Earth Blocks*. Brussels: CDI.
- Alvarez, P., & Maurin, J.-C., (1991). Evolution 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.
- Alvarez, P., Maurin, J.-C., & Vicat, J.-P. (January 01, 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.
- Andrade, F. A., Al-Qureshi, H. A., & Hotza, D. (January 01, 2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 51, 1-7.
- Aubert, J-P. (2013). *Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées*. Rapport final du projet TERCRUSO : Toulouse.
- Boissezon, P. & Gras, F. (1970). Notice explicative n° 44. Carte pédologique Sibiti-Est. Rép. Du Congo à 1/500.000. ORSTOM. Paris. 144 p. + 1 carte h.t.
- Boski, T., Pessoa, J., Pedro, P., Thorez, J., Dias, J. M. A., & Hall, I. R. (January 01, 1998). Factors governing abundance of hydrolyzable amino acids in the sediments from the N.W. European Continental Margin (47-50°N). *Progress in Oceanography*, 42, 1, 145-164.
- Bui, D. D. (2001). *Rice husk ash as a mineral admixture for high performance concrete*. Delft: DUP Science.
- Bui, D. D., Hu, J., & Stroeven, P. (March 01, 2005). Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 27, 3, 357-366.
- Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., & Meunier, N. (January 01, 2009). Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth. *Materials and Structures*, 42, 8, 1101-1116.
- Carter Center. (2012). *Les Investissements Miniers en République Démocratique du Congo : Développement ou Appauvrissement des Communautés Locales? Rapport d'impact des investissements miniers étrangers sur les droits humains Cas des investissements Chemical of Africa (Chemaf) et Ruashi Mining au Katanga*. Bruxelles : CDI.
- Casagrande, A. (1958). *Notes on the design of the liquid limit device*. Cambridge, Mass.: Harvard University, Division of Engineering and Applied Physics.
- CDIT (2002). *The Deep Mixing Method - Principle, Design and Construction*, 121 pages.

- Centre de recherche routière (1981). *Mode opératoire limites de consistance des sols (limites de liquidité et de plasticité)*. MF 47/81. Bruxelles : CDI.
- Centre for the Development of Industry (ACP-EC), & CRATERre. (1998). *Compressed earth blocks: Standards*. Brussels: Centre for the Development of Industry.
- Chavanne, P. (2011). *200 remèdes à l'argile*. Paris: First éd.
- Congo (Democratic Republic), (2011). *Plan quinquennal de croissance et de l'emploi 2011-2015*. Kinshasa.
- Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., & Zemmels I., (1975). *Methods of sample preparation and x-ray diffraction analysis in x-ray mineralogy laboratory*. In: Kaneps, A.G. et al. (Eds.), *Init. Rep. DSDP XXVIII*. Printing Office, Washington, DC, 997-1007.
- Cosson, J., & Gouvernement General De L'Afrique Equatoriale Francaise. *Carte Geologique De Reconnaissance*. (1955). *Notice explicative sur les feuilles pointe-noire et brazzaville*. Place of publication not identified: La Direction Des Mines Et De La Geologie De L'Afrique Equatoriale Francaise.
- CRATERre-EAG, CDI. (1998). *Compressed earth blocks: Standards – Technology*, series No.11. Brussels: CDI.
- Delbecque, C. (2011). *Approche contemporaine de la construction en terre*. Paper presented at the Histoire de la construction en terre.
- Della V. P., Kühn I. & Hotza D. (2002). Rice Husk Ash as an alternative source for active silica production. *Materials Letters* 57, 818-821.
- Delvaux, D. (2001). Karoo rifting in western Tanzania: precursor of Gondwana breakup? In : *Contributions to Geology and Paleontology of Gondwana*. In honour of Prof. Dr. Helmut Wopfner, Cologne, 111-125.
- Denis, B. (1974). *Notice explicative n°52. Carte pédologique au 1/200.000, Brazzaville-Kinkala, Rep. Pop. Congo*, Paris, ORSTOM, 101 p. + une carte h. t.
- 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.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Villefontaine, Isère). (1979). *Construire en terre*. Paris: Alternatives et Parallèles.
- Duarte Tiago, J. C. (2011). Effect of rice ash particle size in lime based mortars. *Cement and concrete research*, 36, 12.
- Duchaufour, P., & Blum, W. E. H. (2000). *Introduction à la science du sol: Sol, végétation, environnement*. Paris: Dunod.
- 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.
- Elsass, F. (n.d.). *Minéralogie des argiles de sols : structure, altération, réactivité*.
- Fagel N. 2010. *Argiles et environnement*. Notes de cours, Liège, Université de Liège, 145p, inédit.

- Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M., & Sugita, S. (January 01, 2004). Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and Concrete Research*, 34, 3, 521.
- Fontaine, L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre: Du grain de sable à l'architecture*. Paris: Belin.
- Frimmel, H. E., Tack, L., Basei, M. S., Nutman, A. P., & Boven, A. (October 01, 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.
- Gelard, D., Laurent, J.-P., Van, D. H., & Institut national polytechnique (Grenoble). (2005). *Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation*. S.l.: s.n..
- 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. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, (7), XXIV (4), 803-815.
- Giresse, P., Ouetiningue, R., & J.-P. Barusseau, J. P., (1990). Minéralogie et microgranulométrie des suspensions et des alluvions du Congo et de l'Oubangui. *Sci. Géol. Bull.* 43: 151–173.
- Halleux, E. (2013). *Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar*. (Mémoire de fin d'étude), Université de Liège, Liège.
- [HB 195] Walker, P., & Standards Australia International. (2002). *The Australian earth building handbook*. Sydney: Standards Australia International.
- Heath, A., Walker, P., & Burt, J. (2007). *Improving the Bond Strength of Unfired Clay Masonry*. B.V. Venkatarama Reddy, Monto Mani, International Symposium on Earthen Structures, 22-24 August 2007, Bangalore, India, pp. 237 – 243.
- Hebib, S., & Farrell, E. R. (2003). Some experiences on the stabilization of Irish Peats. *Canadian Geotechnical Journal* 40: 107-120.
- Hewlett, P. C. (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinmann.
- Hoffman, P. F. (January 01, 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.
- Holtzapffel, T. (1985). *Les minéraux argileux: Préparation, analyse diffractométrique et détermination*. Villeneuve d'Ascq: Société géologique du Nord.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1989). *Traité de construction en terre*. Marseille: Éd. Parenthèses. (2^{ème} éd. 1995 ; 3^{ème} éd. 2006).
- Houben, H., Guillaud, H., CRAterre., & Intermediate Technology Publications. (1994). *Earth construction: A comprehensive guide*. London: Intermediate Technology Publications.
- Instituto de la Construcción y del Cemento "Eduardo Torroja", Jenaro, G. J. M., & Muñoz, M. R. (1971). *Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja: 70*. Madrid: s. n..
- Jaturapitakkul, C., & Roongreung, B. (October 01, 2003). Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15,5, 470-475.

- Jiménez, D. M. C., & Guerrero, I. C. (January 01, 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. (May 01, 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.
- Kating, Philippe-Alexandre Sondji Mulanza. (2014). *Le projet de révision du Code minier de la RDC: de l'incitation à la dissuasion? The draft revision of the Mining Code of the DRC: the incentive to deterrence? Egmont Paper No. 63, January 2014.*
- Khalfaoui, A., & Hajjaji, M. (June 01, 2009). A Chloritic-illitic clay from Morocco: Temperature-time-transformation and neoformation. *Applied Clay Science*, 45, 83-89.
- Konan, K. L., Peyratout, C., Cerbelaud, M., Smith, A., Bonnet, J.-P., & Jacquet, A. (January 01, 2008). Influence of two dispersants on the rheological behavior of kaolin and illite in concentrated calcium hydroxide dispersions. *Applied Clay Science*, 42, 1, 252-257.
- Kouakou, C. H., & Morel, J. C. (April 01, 2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44, 27-34.
- 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.
- Lateef, A. S. A., Fernandez-Alonso, M., Tack, L., & Delvaux, D. (March 01, 2010). Geological constraints on urban sustainability, Kinshasa City, Democratic Republic of Congo. *Environmental Geosciences*, 17, 1, 17-35.
- Lefèvre (1964). *Carte géologique à l'échelle du 1/200.000*. Léopoldville: Service géologique (Bureau de Léopoldville, Bureau d'Elisabethville, Bureau de Bukavu).
- Le Marechal, A. (1966). *Contribution à l'étude des plateaux Batéké*. ORSTOM - Brazzaville, 50 p. multigraph.
- Luxán, M. P., Madruga, F., & Saavedra, J. (January 01, 1989). Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*, 19, 1, 63-68.
- Maniatidis, V., & Walker, P. (2008). Structural capacity of rammed earth in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, N° 3, pp. 230 - 238
- McHenry, P. G. (1984). *Adobe and rammed earth buildings: Design and construction*. New York: Wiley.
- Ministère du plan avec la collaboration du Ministère de la Santé Kinshasa, République Démocratique du Congo., & Macro International (Calverton, Md.). (2008). *Enquête démographique et de santé du Congo (EDS-RDC)*. Dakar [etc.: DPS [etc.].
- 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.)* (pp. 75). Grenoble: Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

- Moore D.M. et Reynolds R.C. 1989. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford, Oxford University Press, 332p.
- MOPT (1992). *Bases Para el Diseño y Construcción con Tapial*. Madrid, Spain: Centro de Publicaciones, Secretarí a General Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Morel, J-C, & Kouakou, C-H. (2011). Performances mécaniques de l'adobe. 3èmes Echanges Transdisciplinaires sur les Constructions en Terre Crue, *Table ronde de Toulouse*, pp. 489-497.
- Morel, J C, Pkka, A, & Walker, P. (2007). *Compressive strength testing of compressed earth blocks*. Construction and Building Materials, Vol. 21, N° 2, pp. 303 - 309.
- Mtallib, M. O. A., & Bankole, G. M. (September 05, 2011). The improvement of the index properties and compaction characteristics of lime stabilized tropical lateritic clays with rice husk ash (RHA) admixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 983-996.
- Müller, R. O. (1972). *Spectrochemical analysis by X-ray fluorescence*. New York: Plenum Press.
- Nicolini, P. (1959). *Le synclinal de la Nyanga (zone de la boucle du Niari)*. Contribution à l'étude des minéralisations stratiformes du Moyen-Congo. Bull. Dir. Mines et Géol. A.E.F., Brazzaville, 10, 15Op.
- NZS 4298:1998. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*. New Zealand Standard.
- OLIVIER, D. E. N. I. S. M. Y. R. I. A. M., & LAREAL, P. I. E. R. R. E. (1994). *LE MATERIAU TERRE, COMPACTAGE, COMPORTEMENT, APPLICATION AUX STRUCTURES EN BLOCS DE TERRE*. S.l.: s.n..
- PEDRO, Claude nsugani. (2012). *La chaîne panafricaine du Nord-Ouest de l'Angola : Etude pétrostructurale, géochimique et géochronologique. Implications géodynamiques*.
- 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 Res.*, 110: 307-323.
- Peltier, R., & Rumpler, A. (1959). *Manuel du laboratoire routier*. Paris: Dunod.
- Peru. (2000). *Adobe: Reglamento nacional de construcciones : norma técnica de edificación NTE E. 080*. Lima, Perú: MTC.
- Ragouilliaux, A., Coussot, P., & Université Pierre et Marie Curie (Paris). (2007). *Etude rhéophysique de systèmes émulsions inverses / argile organophile: Applications aux boues de forage pétrolier*. S.l.: s.n.
- Rigassi, V. (1995). *Compressed earth blocks: Vol. 1*. Braunschweig: Vieweg.
- Rigassi, V., & Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien (Eschborn). (1995). *Compressed earth blocks*. Braunschweig: Vieweg.
- Röhlen, U., Ziegert, C., & Mochel, A. (2013). *Construire en terre crue: Construction, rénovation, finitions*. Paris: Éd. « Le Moniteur ».
- Sabuni, E. (1995). *Research into the potentialities of rice husk ash cement for application in rural Tanzania* », Pays-Bas

- Saint, M. L., Kalombo, T. J.-L., Centre d'études pour l'action sociale (Kinshasa, Congo), & Institut géographique du Congo. (2005). *Atlas de l'organisation administrative de la République démocratique du Congo: (fonds de plan de l'Institut géographique du Congo)*. Kinshasa: Centre d'études pour l'action sociale.
- SAZ. Standards Association Zimbabwe Standard (SAZS). (2001). *Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures*. Harare: Standards Association of Zimbabwe.
- Schure, J.M., Ingram, V.J., Marien, J.N., Nasi, R., & Dubiez, E. (2001). *Woodfuel for urban centres in the Democratic Republic of Congo*. (CIFOR brief 7).
- 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 d'Etat, Université de Nancy I., 241 p.
- 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, 1983. 42 p.
- Smith, E. W., & Austin, G. S. (1989). *Adobe, pressed-earth, and rammed-earth industries in New Mexico*. Socorro: New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources.
- Stroeven, P., Bui, D. D., & Sabuni, E. (January 01, 1999). Ash of vegetable waste used for economic production of low to high strength hydraulic binders. *Fuel*, 78, 2, 153-159.
- Tack, L. (August 01, 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.
- Tardy, Y. (1993). *Pétrologie des latérites et des sols tropicaux*. Paris: Masson.
- Thompson, M. R. (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division* 92(SM5): 26.
- Thorez, J. (1976). *Practical identification of clay minerals: A handbook for teachers and students in clay mineralogy*. Dison: Lelotte.
- Tucker, M., & Hardy, R. 1988. *X-ray powder diffraction of sediments*. In : Tucker M. (ed.) *Techniques in sedimentology*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 191-228.
- Van Balen, K. (2005). Carbonatation reaction of lime, kinetics at ambient temperature. *Cement and Concrete Research* 35 : 647–657.
- Van Damme, H. (2002). L'eau et sa représentation. In: COUSSY O., FLEUREAU J-M. *Mécanique des sols non saturés*. Hermès Science Publications, pp. 23-68.
- Verhasselt, A. (1993). *Caractérisation de la pouzzolanité des cendres volantes*. Paris.
- Villar-Cocina, E., Valencia-Morales, E., Gonzalez-Rodriguez, R., & Hernandez-Ruiz, J. (January 01, 2003). Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model. *Cement and Concrete Research*, 33, 4, 517.

Waswa-Sabuni, B., Syagga, P. M., Dulo, S. O., & Kamau, G. N. (January 01, 2003). Rice Husk Ash Cement – An alternative pozzolana cement for Kenyan building Industry. *Journal of Civil Engineering, Jkuat*, 8, 1, 13.

Wetshondo O.D. (2012). *Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)*. Thèse de doctorat, Université de Liège, 340p.

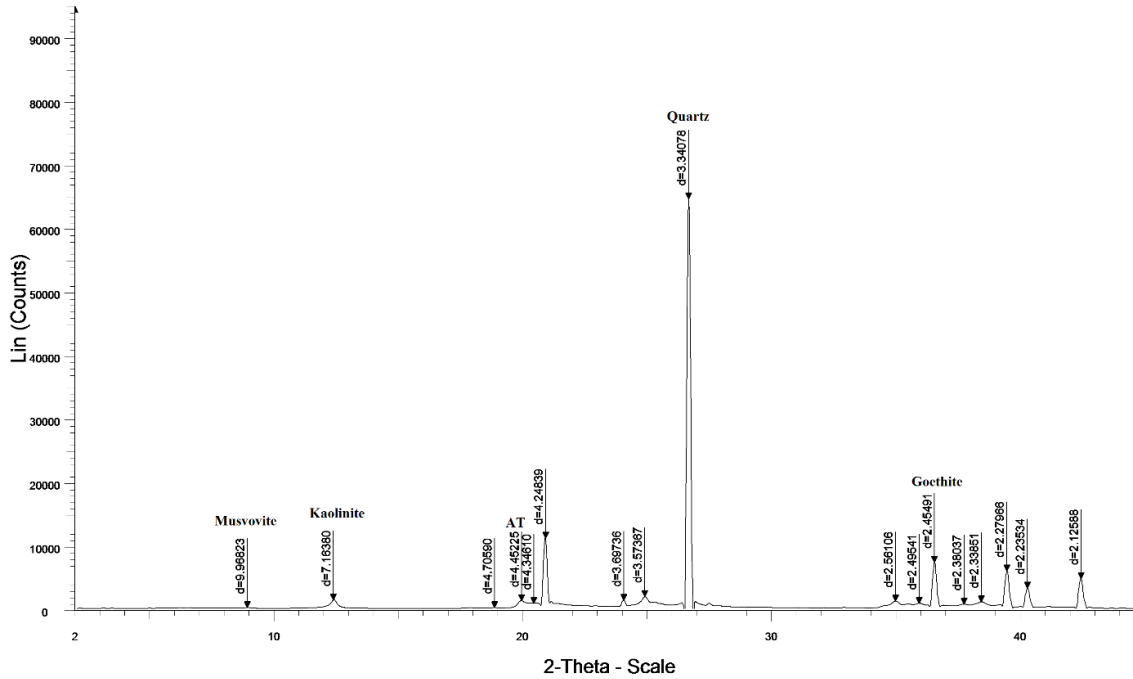
Zhang, M. H., Lastra, R., & Malhotra, V. M. (January 01, 1996). Rice-Husk Ash Paste and Concrete: Some Aspects of Hydration and the Microstructure of the Interfacial Zone between the Aggregate and Paste. *Cement and Concrete Research*, 26, 6, 963.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (December 01, 2002). Composition and functional properties of rice. *International Journal of Food Science & Technology* 37, 8, 849-868.

Annexes

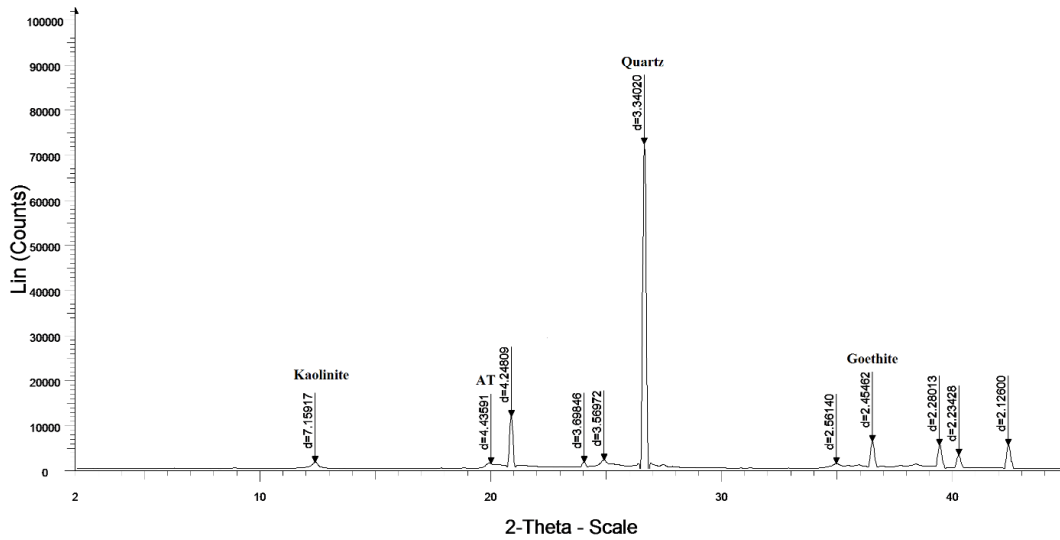
Annexe 1 : Diffractogrammes sur poudre totale

C2CECOMAF



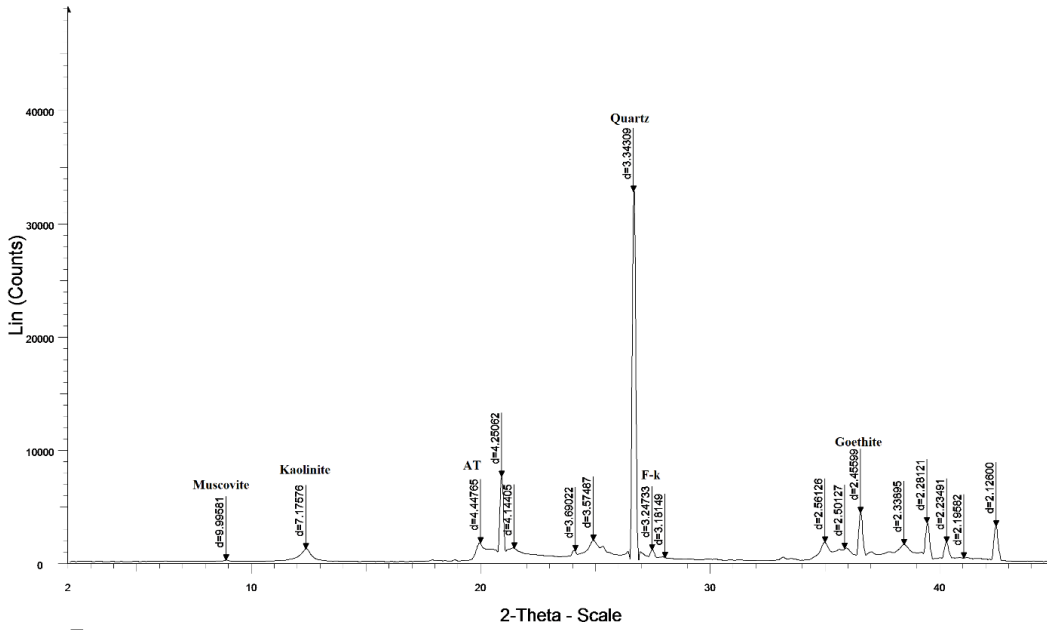
C2CECOMAF - File: C2CECOMAF_1014.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C2LUTENDELE1



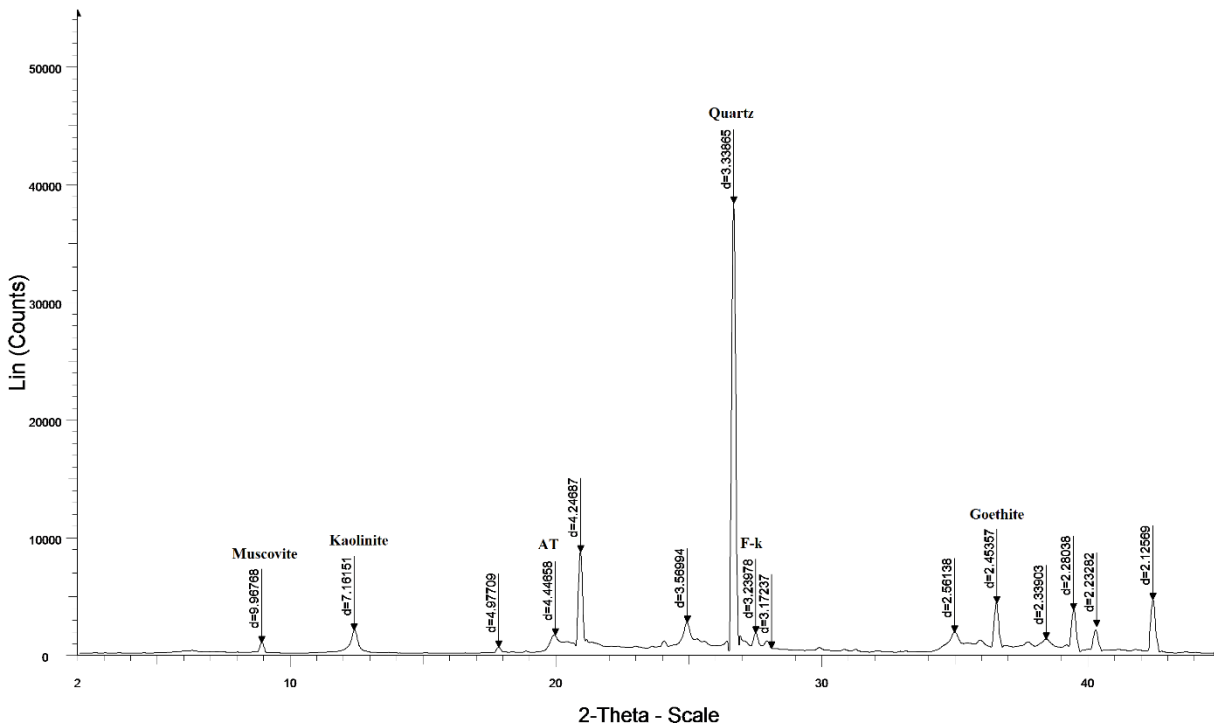
C2LUTENDELE1 - File: C2LUTENDELE1_1013.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Background 0.000,0.000 | Import

C2LUTENDELEII



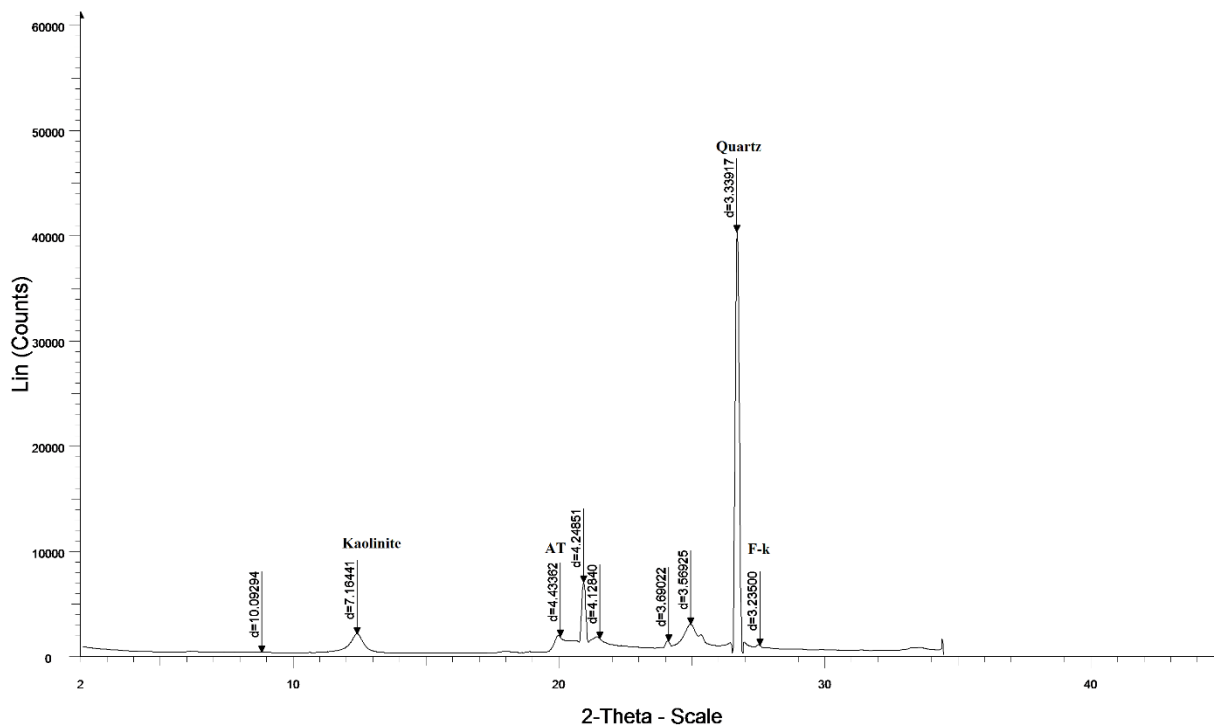
C2LUTENDELEII - File: C2LUTENDELEII_1002.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - T
 Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Background 0.000,0.000 | Import

C2LUTENDELEIII



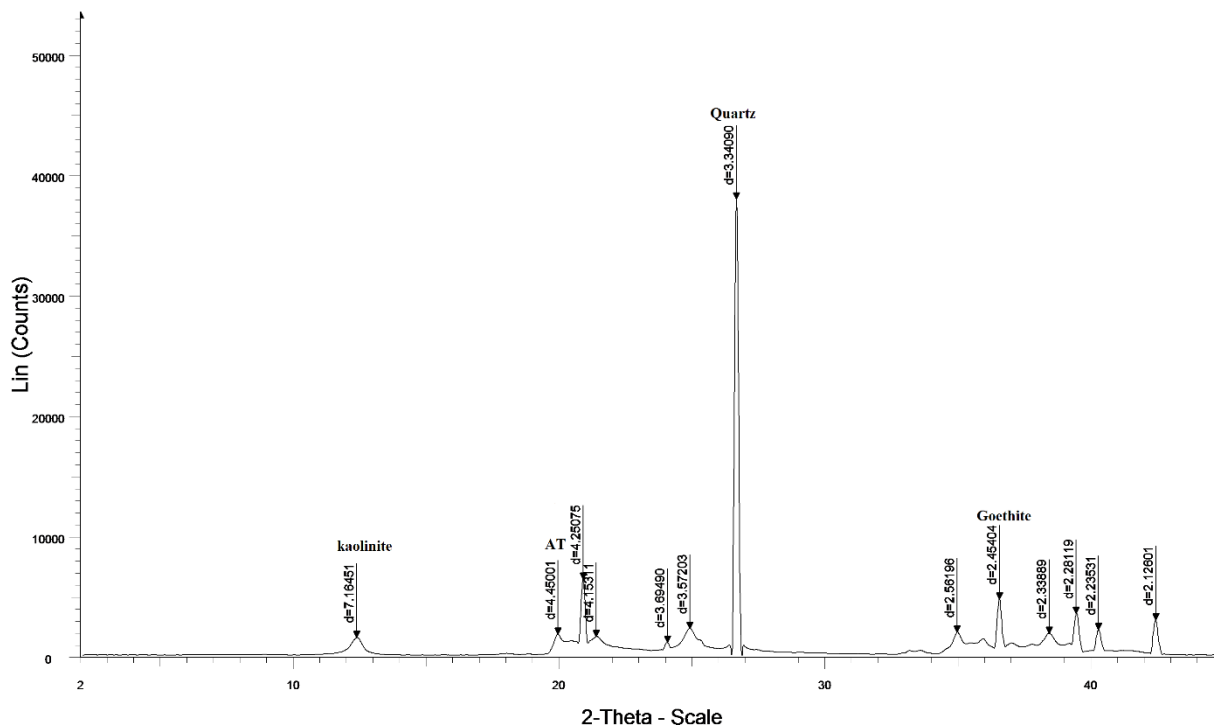
C2LUTENDELEIII - File: C2LUTENDELEIII_1007.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° -
 Operations: Background 0.000,0.000 | Smooth 0.150 | Import
 C2LUTENDELEIII - File: C2LUTENDELEIII_1007.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° -
 Operations: Background 0.000,0.000 | Background 0.000,0.000 | Smooth 0.150 | Import

C2NSAYA1I



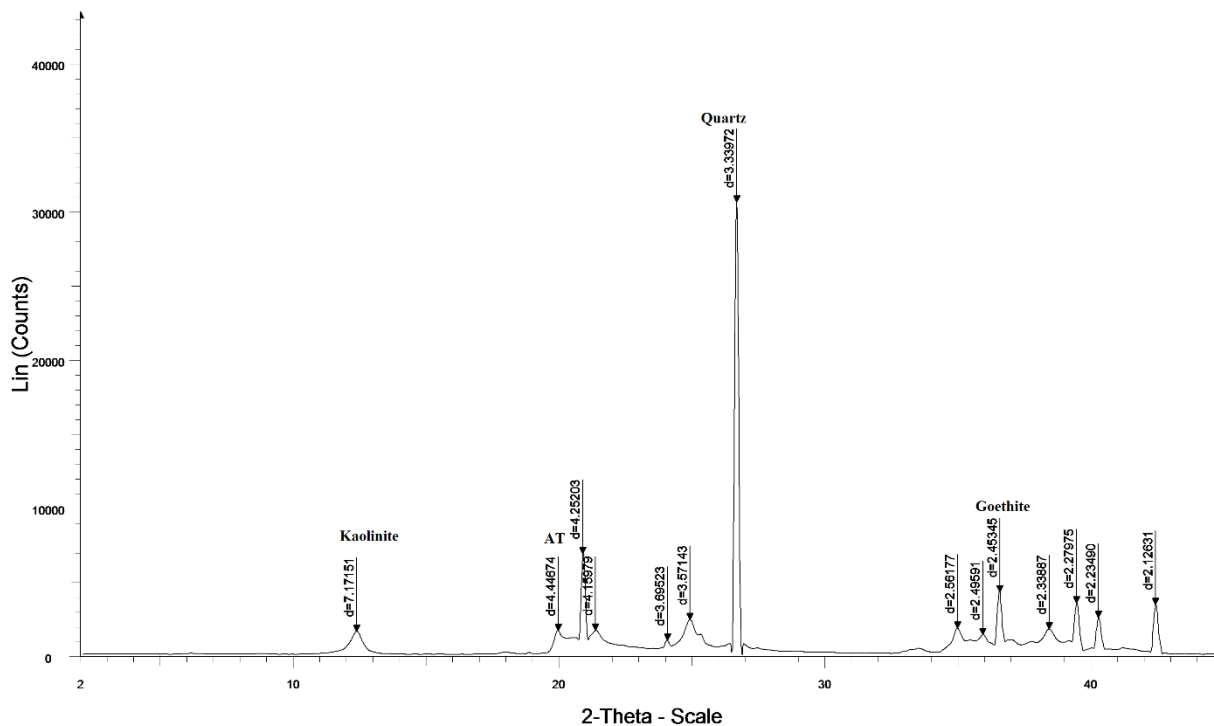
C2NSAYA1I - File: C2NSAYA1I_1003.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.00
Operations: Smooth 0.150 | Import

C2NSAYA1II



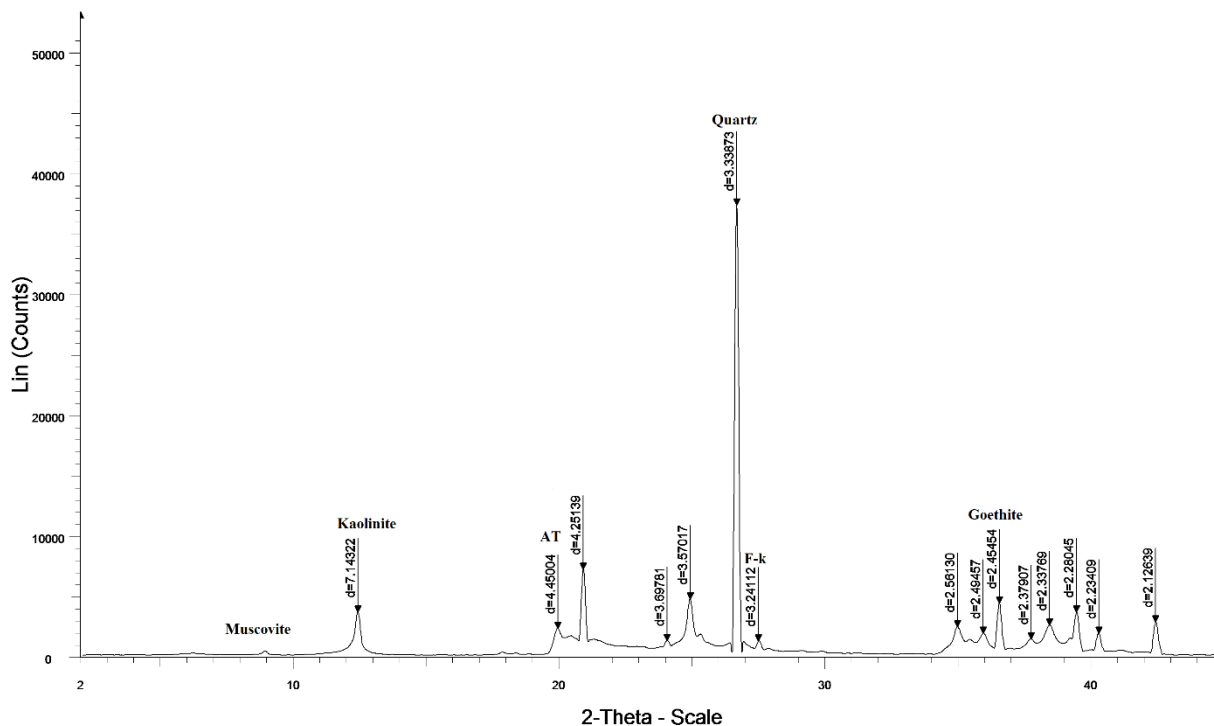
C2NSAYA1II - File: C2NSAYA1II_1010.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.0
Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C2NSAYA2II



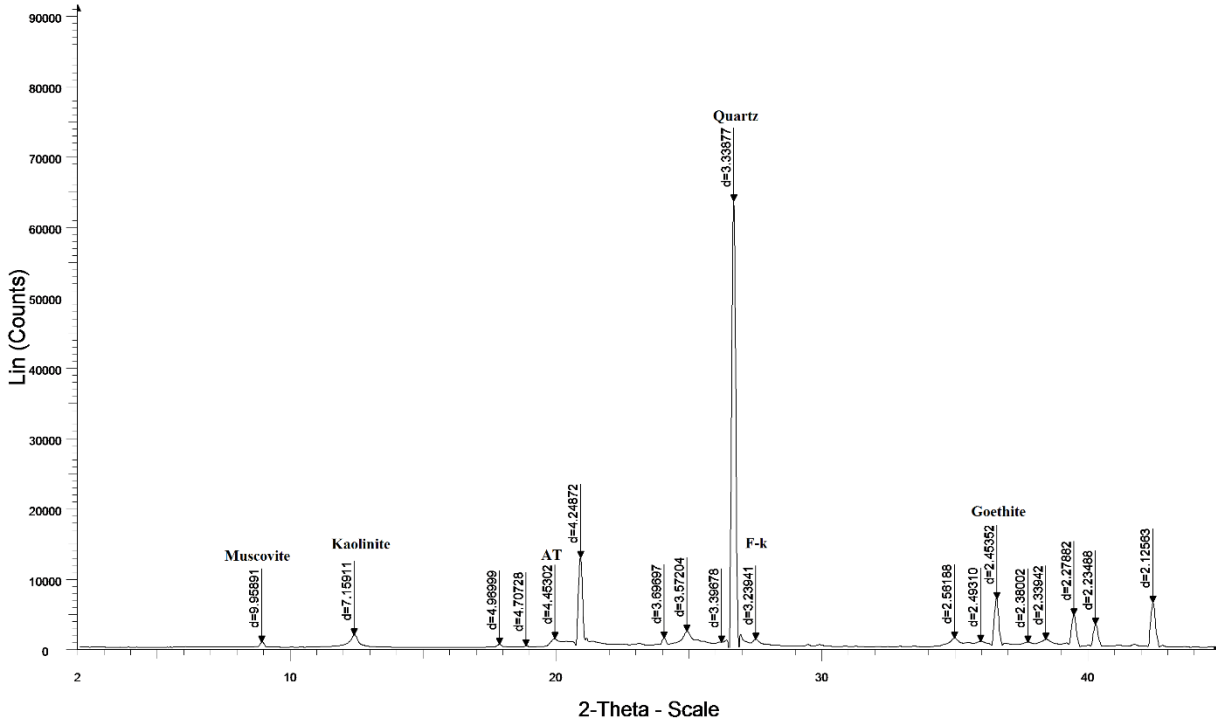
C2NSAYA2II - File: C2NSAYA2II_1001.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C3CECOMAF



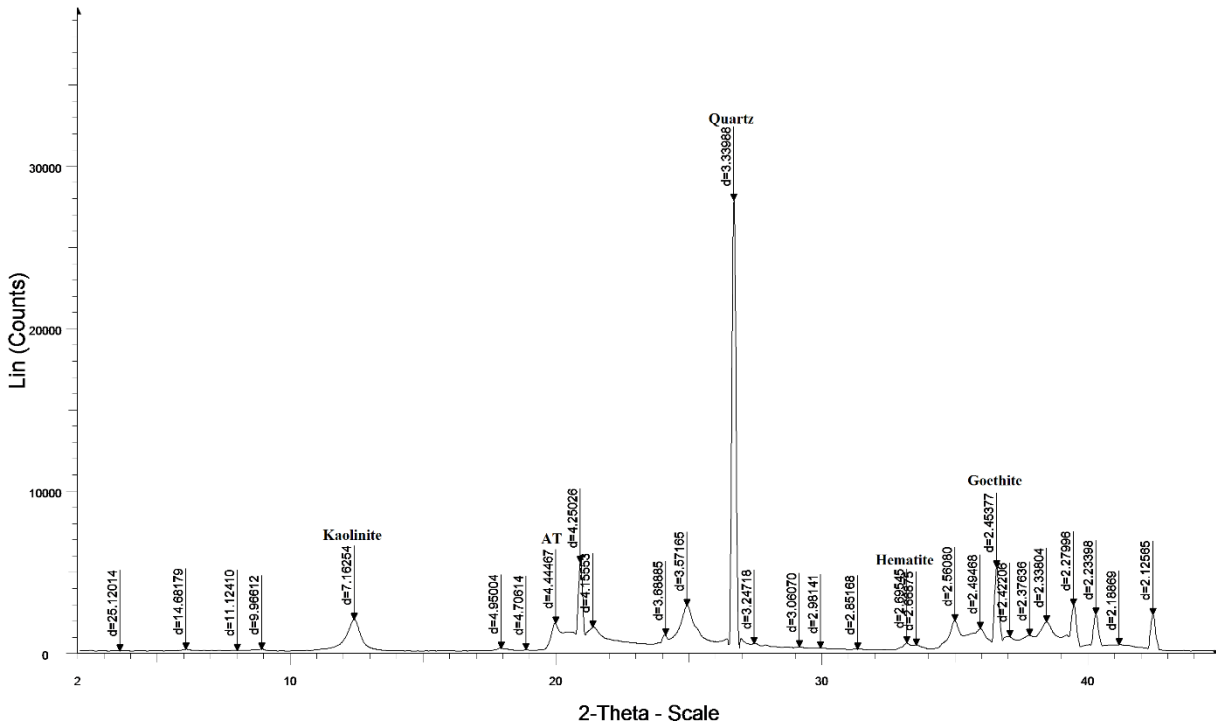
C3CECOMAF - File: C3CECOMAF_1009.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C3KIMBANGUIII



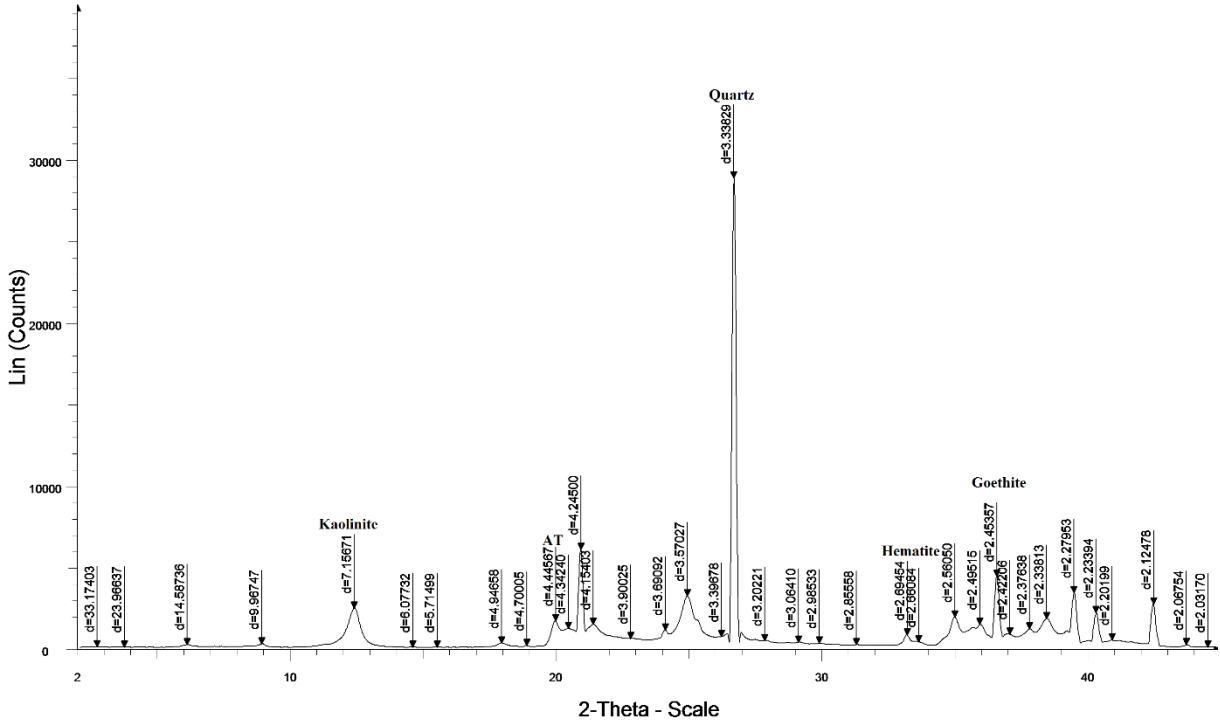
C3KIMBANGUIII - File: C3KIMBANGUIII_1006.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Stop time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Th Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C3NSAYA1I



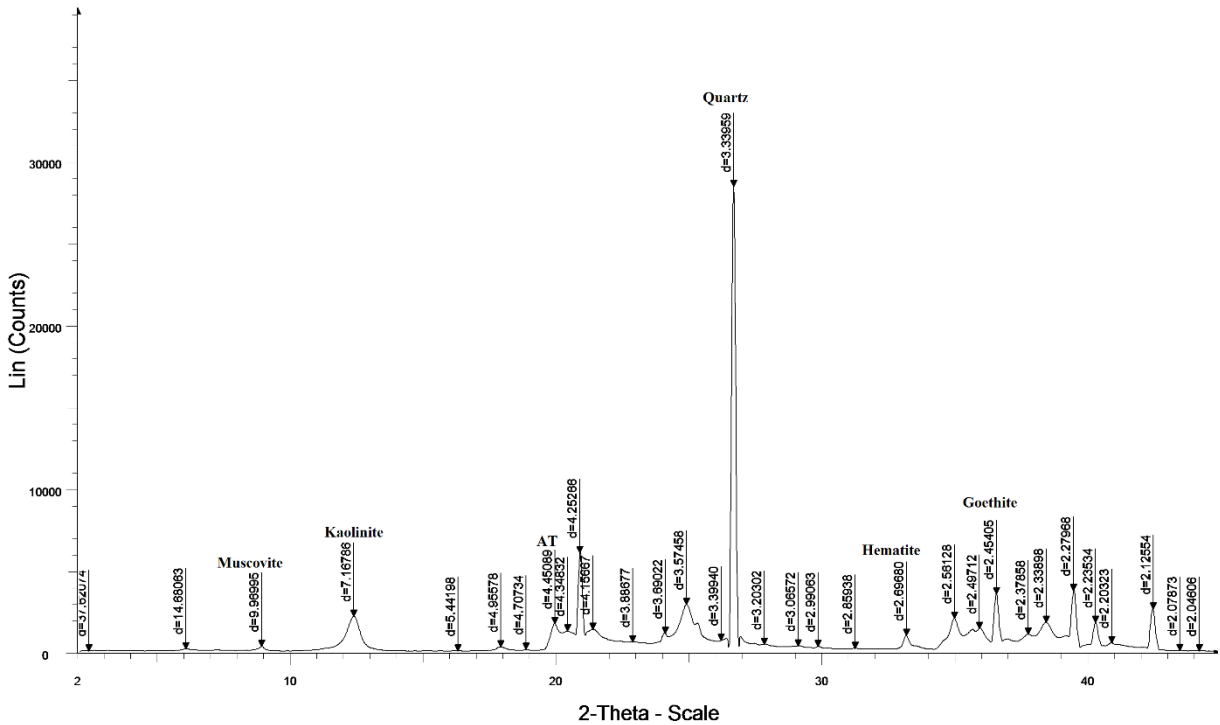
C3NSAYA1I - File: C3NSAYA1I_1012.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.00 Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C3NSAYA1II



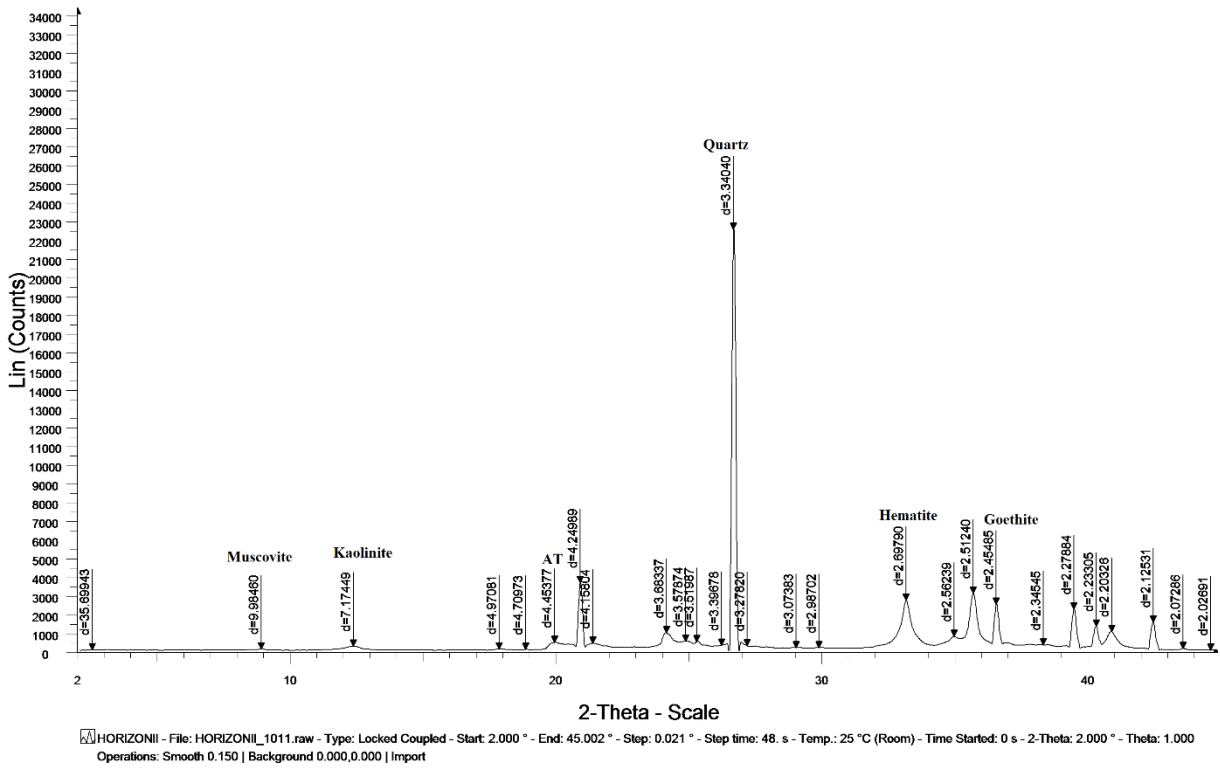
C3NSAYA1II - File: C3NSAYA1II_1004.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.
Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

C4NSAYA1II

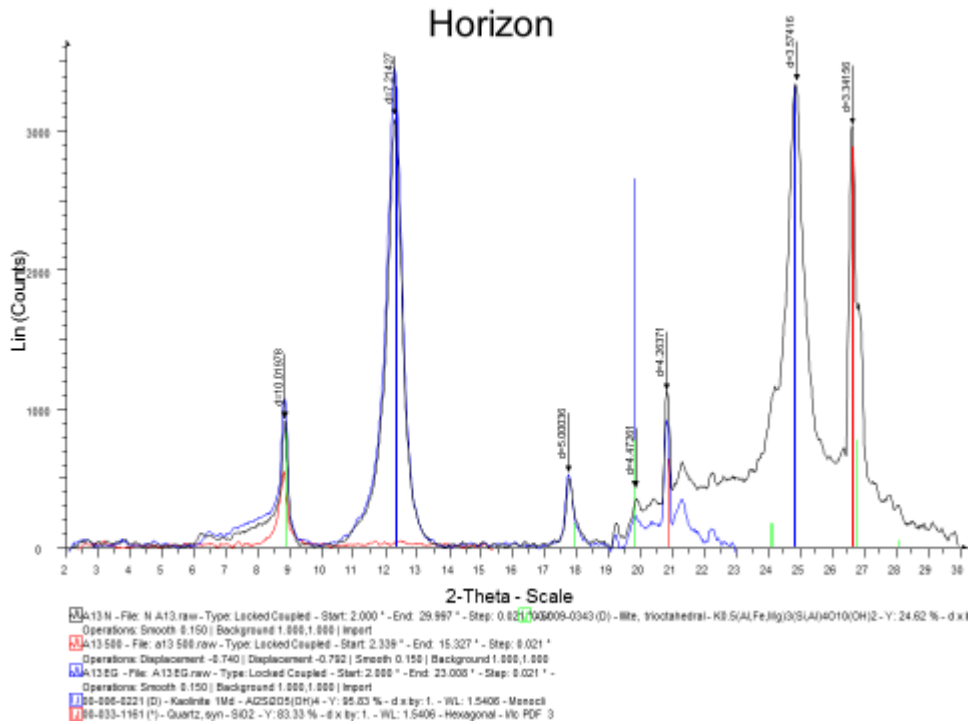


C4NSAYA1II - File: C4NSAYA1II_1008.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 45.002 ° - Step: 0.021 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.0
Operations: Smooth 0.150 | Background 0.000,0.000 | Import

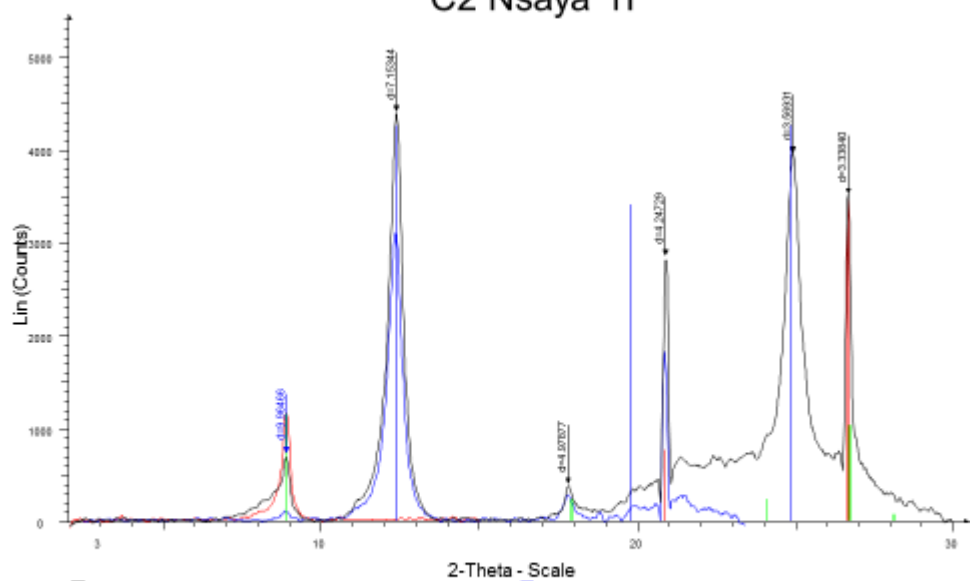
HORIZONII



Annexe 2 : Diffractogrammes sur fraction argileuse



C2 Nsaya 1I



A12N - File: N A12.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 29.997 ° - Step: 0.021 ° - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

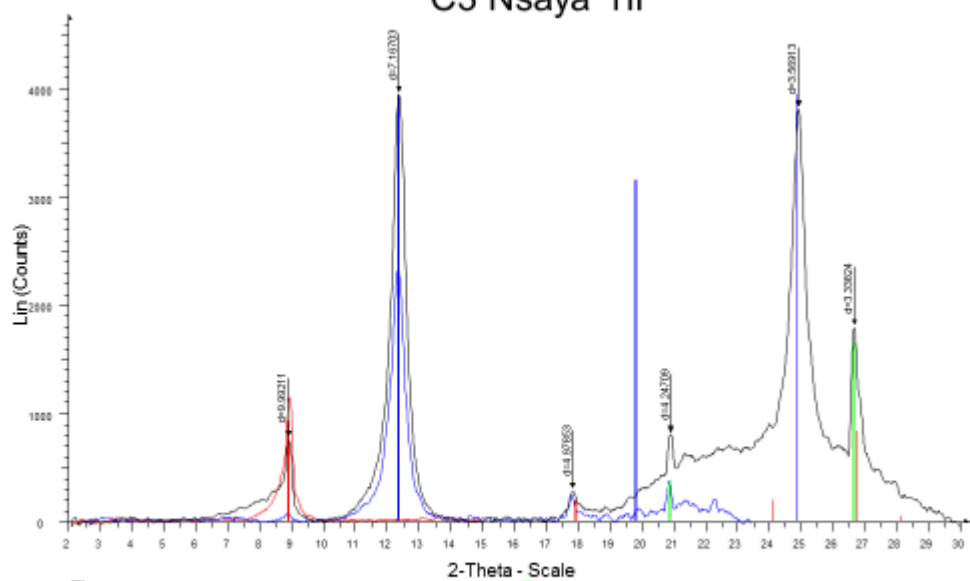
A12S88 - File: e12 588.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.888 ° - End: 14.991 ° - Step: 0.021 ° - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

A12EG - File: A12EG.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.423 ° - End: 23.422 ° - Step: 0.021 ° - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Displacement -0.522 | Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

00-033-1161 (*) - Quartz, sym - SiO2 - Y: 73.17 % - d x by: 1 - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

06-066-4343 (D) - Illite, triclinic - K0.5(Al,Fe,Mg)3(Si,Al)4(OH)2 - Y: 26.14 % - d x by: 1 - Wavelength: 1.5406 - Monoclinic - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

C3 Nsaya 1II



A11N - File: N A11.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.000 ° - End: 29.997 ° - Step: 0.021 ° - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

A11S88 - File: e11 588.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.888 ° - End: 14.991 ° - Step: 0.021 ° - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

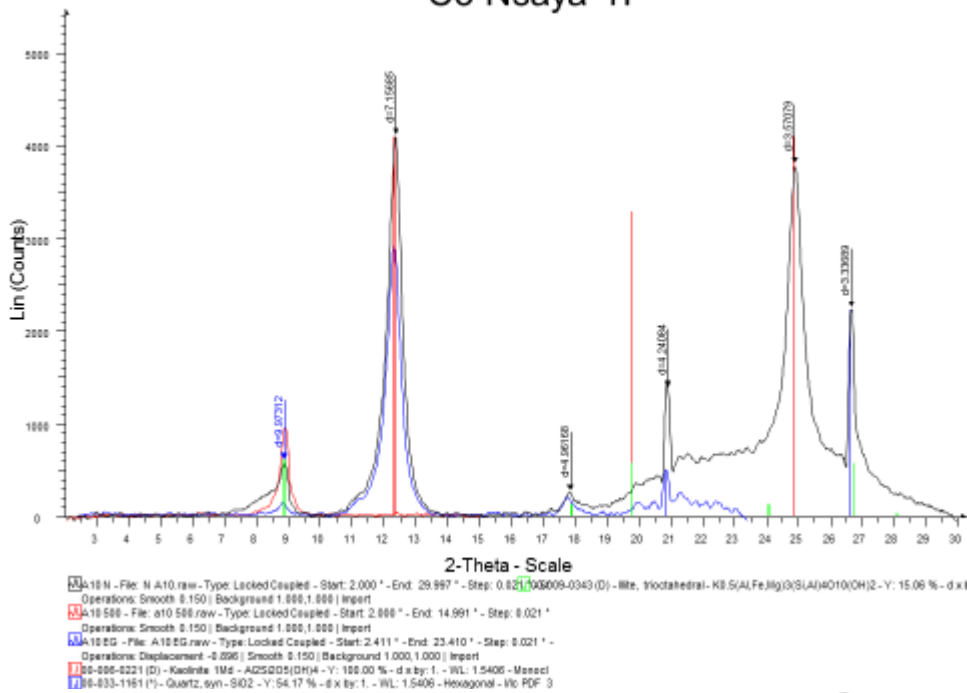
A11EG - File: A11EG.raw - Type: Locked Coupled - Start: 2.411 ° - End: 23.410 ° - Step: 0.021 ° - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Displacement -0.096 | Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

00-033-1161 (*) - Quartz, sym - SiO2 - Y: 41.67 % - d x by: 1 - Wavelength: 1.5406 - Hexagonal - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

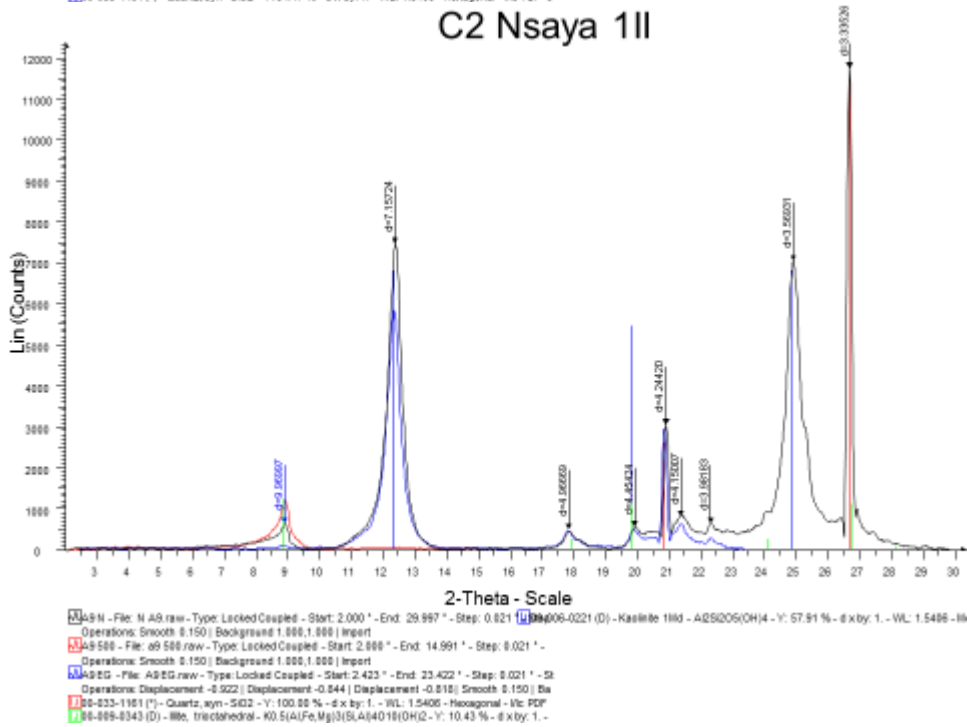
06-066-4343 (D) - Illite, triclinic - K0.5(Al,Fe,Mg)3(Si,Al)4(OH)2 - Y: 23.45 % - d x by: 1 - Wavelength: 1.5406 - Monoclinic - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

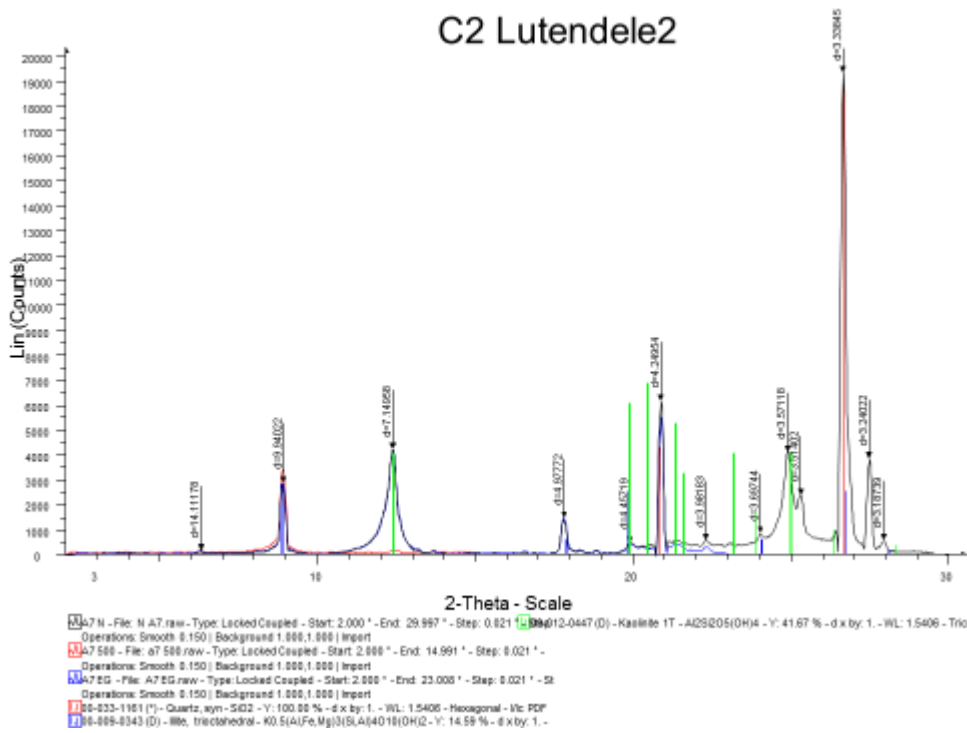
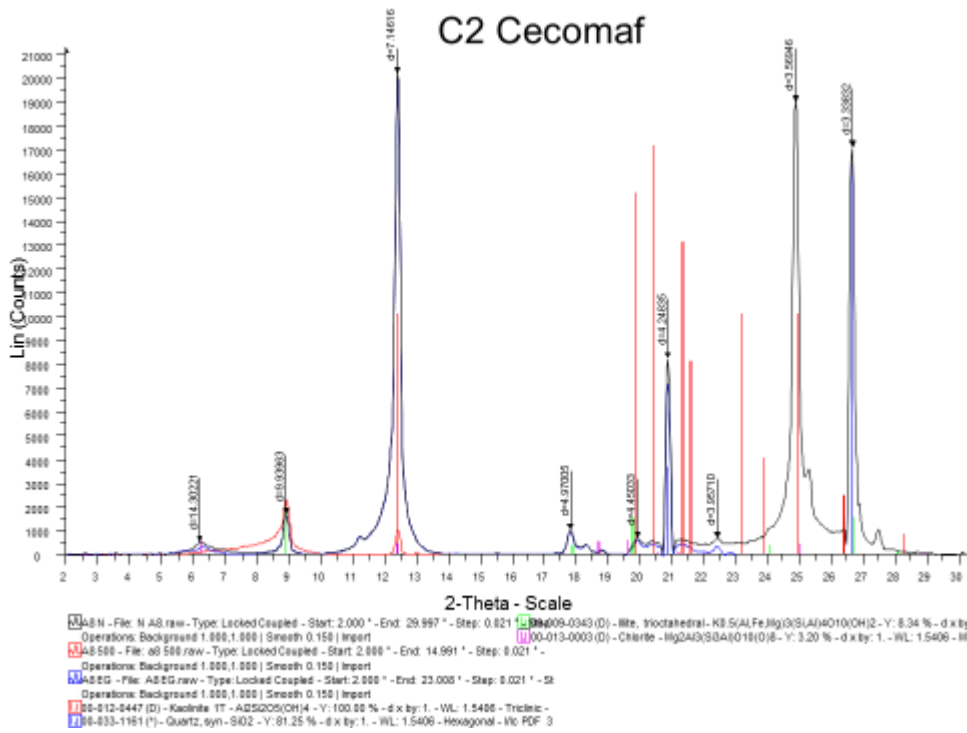
06-066-8221 (D) - Kaolinite 1M6 - Al2Si2O5(OH)4 - Y: 100.00 % - d x by: 1 - Wavelength: 1.5406 - Monoclinic - R0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import

C3 Nsaya 1I

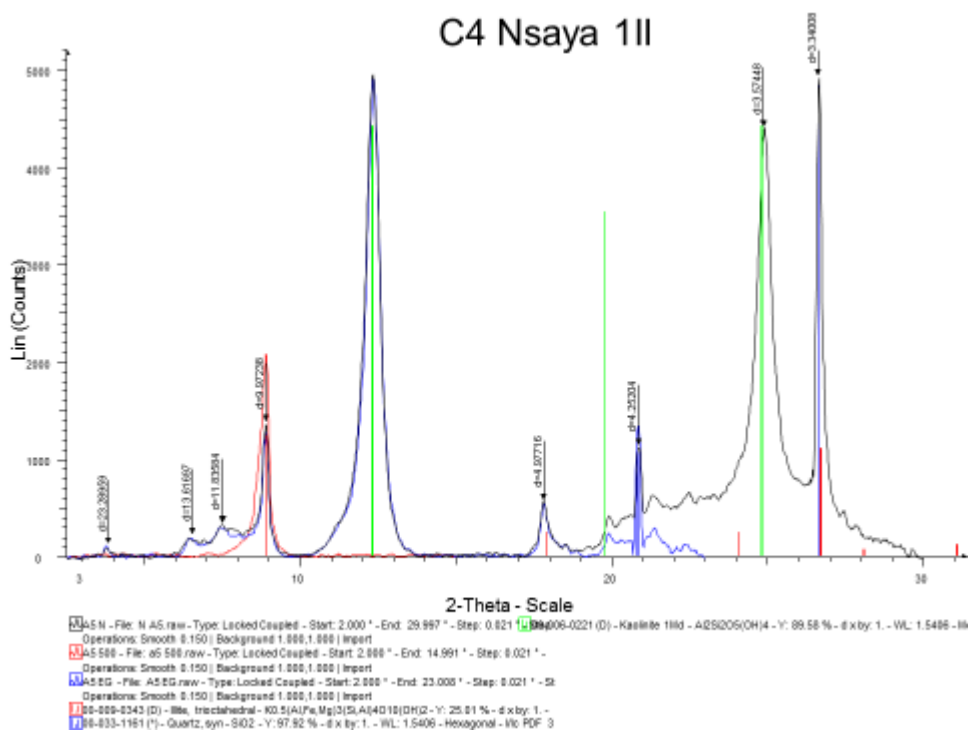


C2 Nsaya 1II

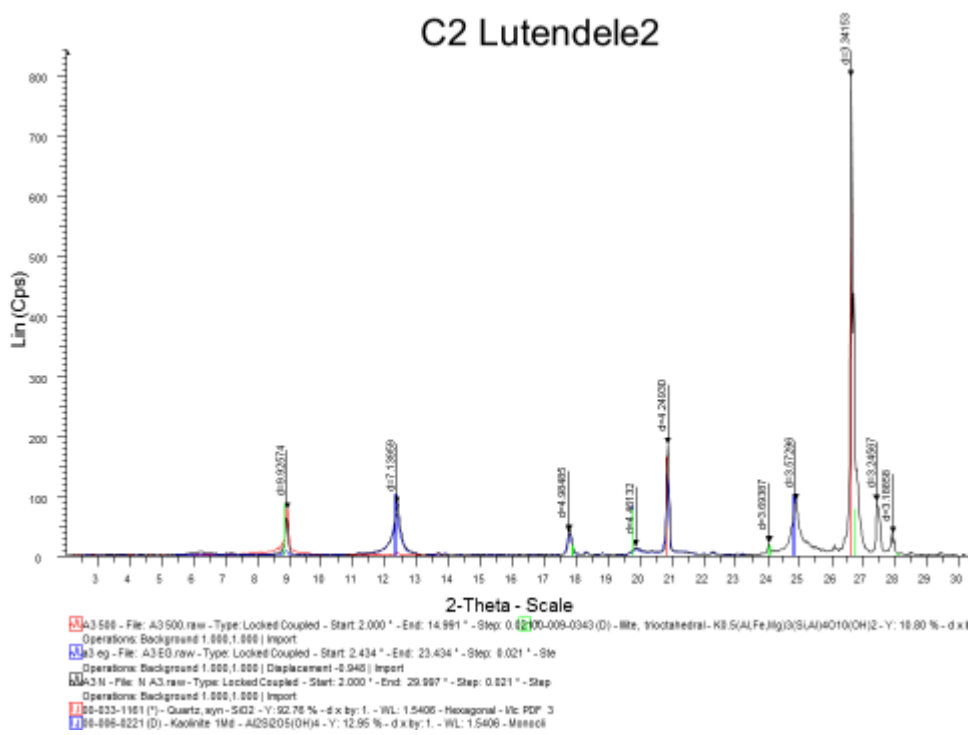




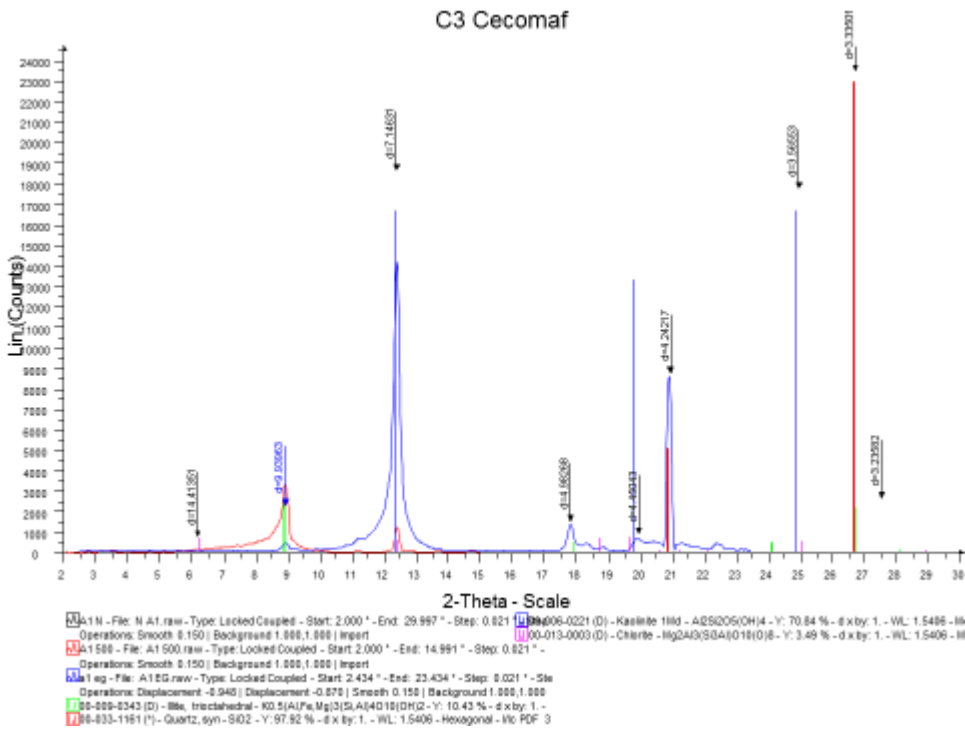
C4 Nsaya 1II



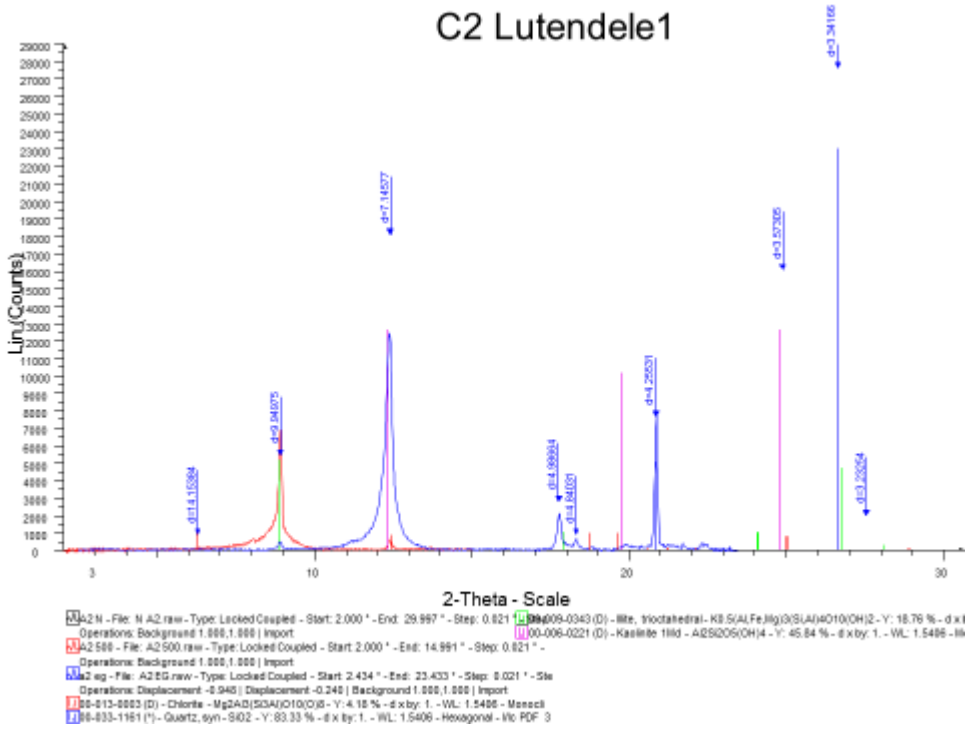
C2 Lutendele2



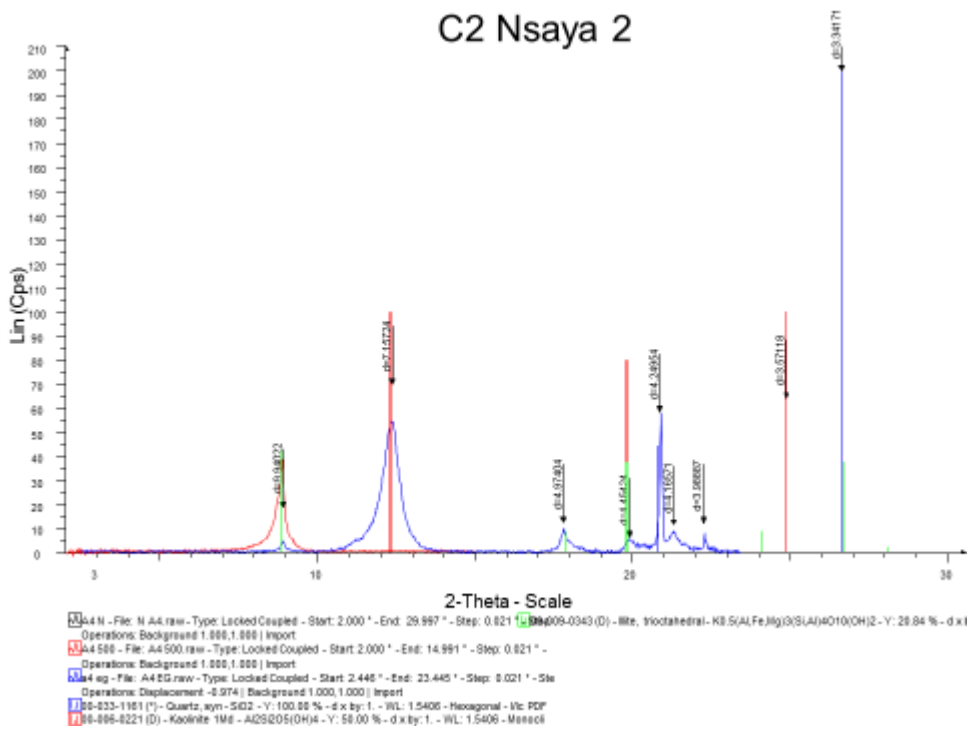
C3 Cecomaf



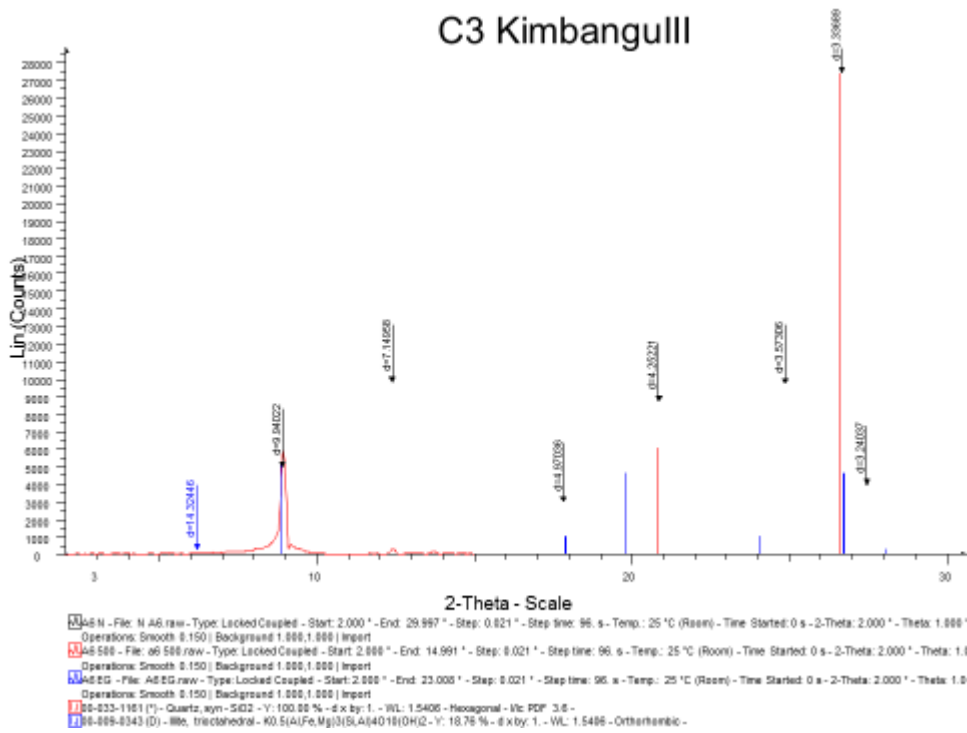
C2 Lutendele1



C2 Nsaya 2



C3 Kimbangulll



Annexe 3 : Estimation semi-quantitative des minéraux présents dans la poudre totale

Echantillons	Minéraux	facteur correctif	intensité	intensité corrigée	somme d'intensité	%
C2 Nsaya II	Q	1	4000	4000		56
	AT	20	150	3000		42
	F-k	2,8	50	140	7140	2
C3 Nsaya II	Q	1	2600	2600		39
	AT	20	200	4000	6600	61
C2 Nsaya III	Q	1	3700	3700		52
	AT	20	170	3400		48
	G	0	0	0	7100	0
C3 Nsaya III	Q	1	3000	3000		50
	AT	20	150	3000	6000	50
Horizon	Q	1	2300	2300		53
	AT	20	100	2000		46
	M	0,95	30	28,5	4328,5	1
C4 Nsaya III	Q	1	2900	2900		42
	AT	20	200	4000		58
	M	0,95	40	38	6938	1
C2 Nsaya 2	Q	1	3000	3000		47
	AT	20	170	3400		53
	G	0	0	0	6400	0
C2 Cecomaf	Q	1	6500	6500		68
	AT	20	150	3000		32
	G	0	0	0	9500	0
C3 Cecomaf	Q	1	3800	3800		44
	AT	20	230	4600		53
	M	0,95	40	38		0
	F-k	2,8	100	280	8718	3
C2 Lutende1	Q	1	7300	7300		71
	AT	20	150	3000		29
	G	0	0	0	10300	0
C2 Lutende2	Q	1	3200	3200		43
	AT	20	200	4000		53
	F-k	2,8	100	280	7480	4
C2 Lutende3	Q	1	3800	3800		52
	AT	20	150	3000		41
	M	0,95	100	95		1
	F-k	2,8	150	420	7315	6
C3 KimbanguIII	Q	1	6300	6300		58
	AT	20	200	4000		37
	M	0,95	150	142,5		1
	Fk	2,8	150	420	10862,5	4

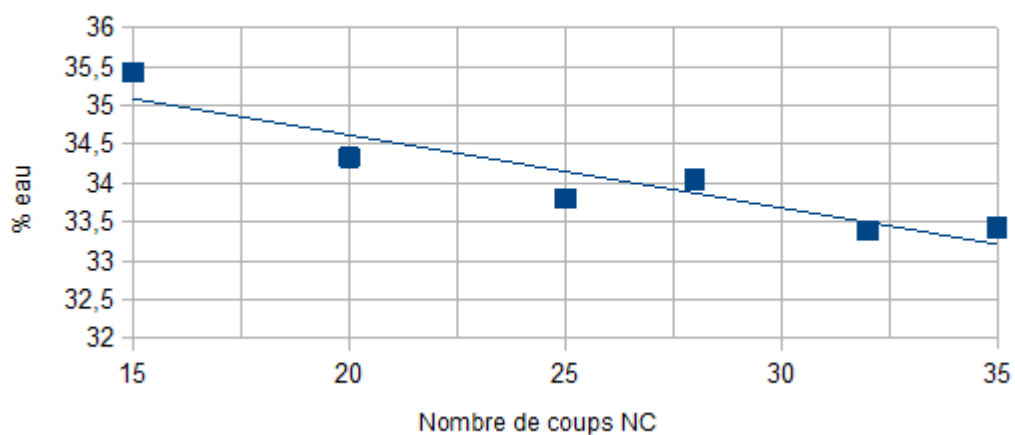
Annexe 4 : Estimation semi-quantitative des minéraux présents dans la fraction argileuse

échantillons	minéraux	facteurs correctifs	coups	intensité corrigé	%
C3ndjili cecomaf	chlorite	0,34	65	22,1	1
	illite	1	250	250	16
	kaolinite	0,7	1850	1295	83
	quartz	1	0	0	0
	total			1567,1	100
c2 lutendele I	chlorite	0,34	75	25,5	2
	illite	1	350	350	22
	kaolinite	0,7	1775	1242,5	77
	quartz	1	0	0	0
	total			1618	100
c2 lutendele III	illite	1	65	65	49
	chlorite	0,34	10	3,4	3
	kaolinite	0,7	90	63	48
	quartz	1	0	0	0
	total			131,4	100
c2 Nsaya2 III	illite	1	18	18	27
	kaolinite	0,7	70	49	73
	quartz	1	0	0	0
	total			67	100
C4 Nsaya 1 II	illite	1	1320	1320	27
	10-14V	0,4	300	120	2
	kaolinite	0,7	4910	3437	70
	quartz	1	0	0	0
	total			4877	100
C3 lutendele kimbanguiste III	illite	1	5000	5000	43
	chlorite	0,34	250	85	1
	kaolinite	0,7	9500	6650	57
	quartz	1	0	0	0
	total			11735	100
c2 lutendele II	illite	1	3000	3000	50
	chlorite	0,34	200	68	1
	kaolinite	0,7	4200	2940	49
	quartz	1	0	0	0
	total			6008	100
C2 ndjili cecomaf	illite	1	1500	1500	9
	chlorite	0,34	500	170	1
	kaolinite	0,7	20200	14140	89
	quartz	1	0	0	0
	total			15810	100
c2 nsaya1 II	illite	1	600	600	10
	kaolinite	0,7	7400	5180	90
	quartz	1	0	0	0
	total			5780	100
c3 nsaya 1 I	illite	1	600	600	17
	kaolinite	0,7	4100	2870	83

	quartz	1	0	0	0
	total			3470	100
c3 nsaya 1 II	illite	1	700	700	20
	kaolinite	0,7	3900	2730	80
	quartz	1	0	0	0
	total			3430	100
c2 nsaya 1 I	illite	1	610	610	17
	kaolinite	0,7	4350	3045	83
	quartz	1	0	0	0
	total			3655	100
Horizon	illite	1	900	900	29
	10-14V	0,4	50	20	1
	kaolinite	0,7	3050	2135	70
	quartz	1	0	0	0
	total			3055	100

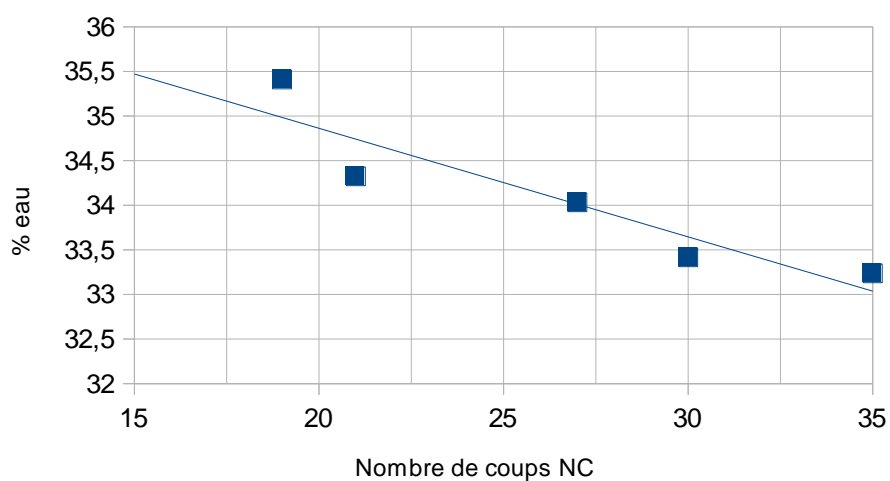
Annexe 5 : Détermination des limites d'Atterberg

C3 Nsaya 1II

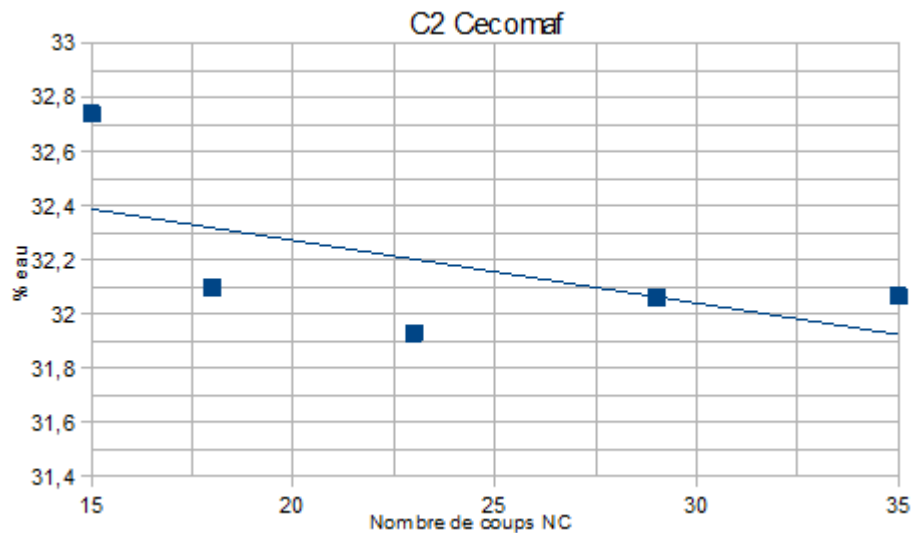


Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	4,886	3,706	1,18	24,1506345	23,7308772
2	3,893	2,963	0,93	23,8890316	
3	3,844	2,954	0,89	23,1529657	

C2 Nsaya 1II

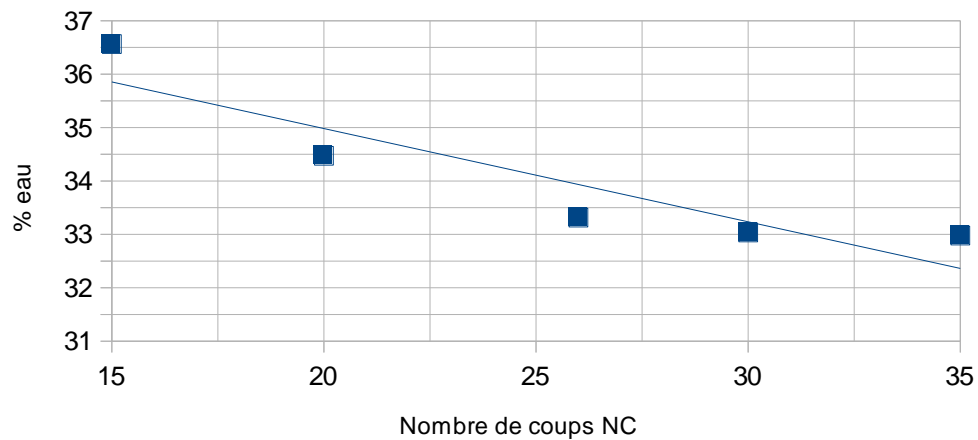


Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	3,811	3,041	0,77	20,2046707	17,9926579
2	3,369	2,803	0,566	16,8002375	
3	2,339	1,942	0,397	16,9730654	



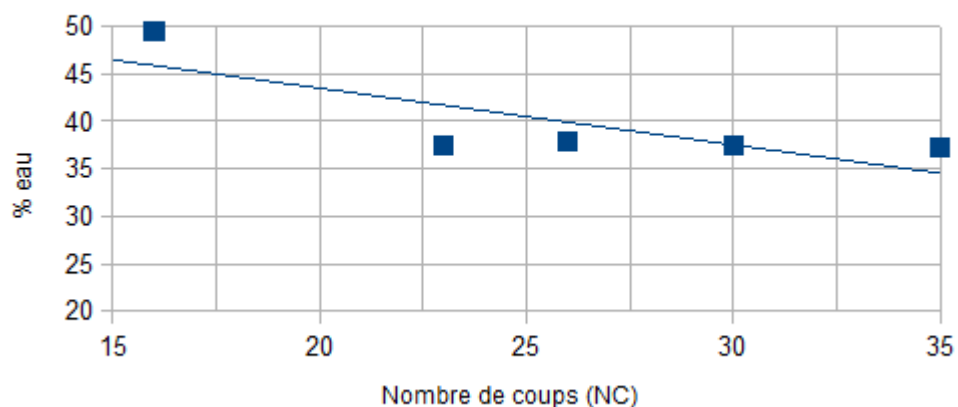
Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	3,436	2,596	0,84	24,4470314	20,0716306
2	4,605	3,005	1,6	34,7448426	
3	3,91	3,87	0,04	1,0230179	

C4 Nsaya 1II



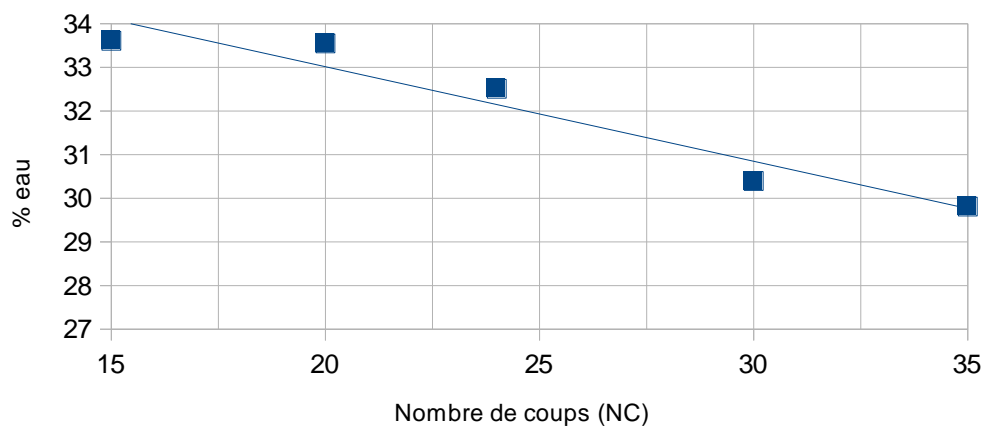
Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	3,408	2,628	0,78	22,8873239	22,6418366
2	3,347	2,607	0,74	22,1093517	
3	4,623	3,563	1,06	22,9288341	

C3 Cecomaf



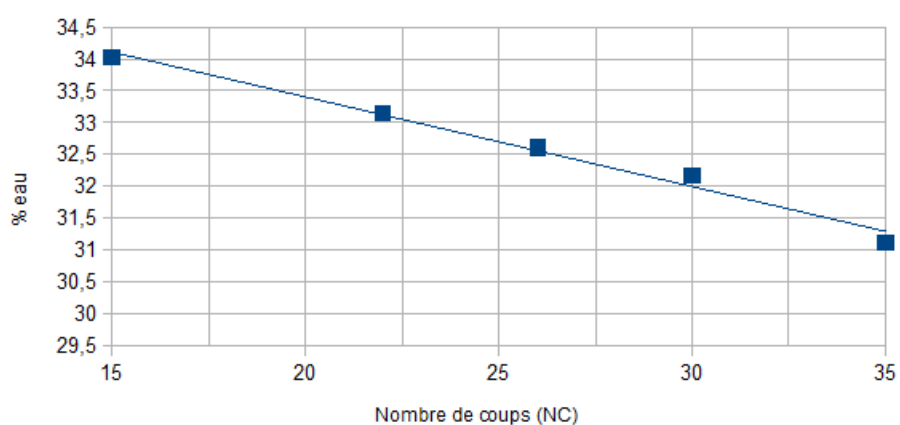
Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	2,945	2,202	0,743	25,229202	26,3915807
2	2,2	1,605	0,595	27,0454545	
3	3,513	2,568	0,945	26,9000854	

C2 Lutendele2



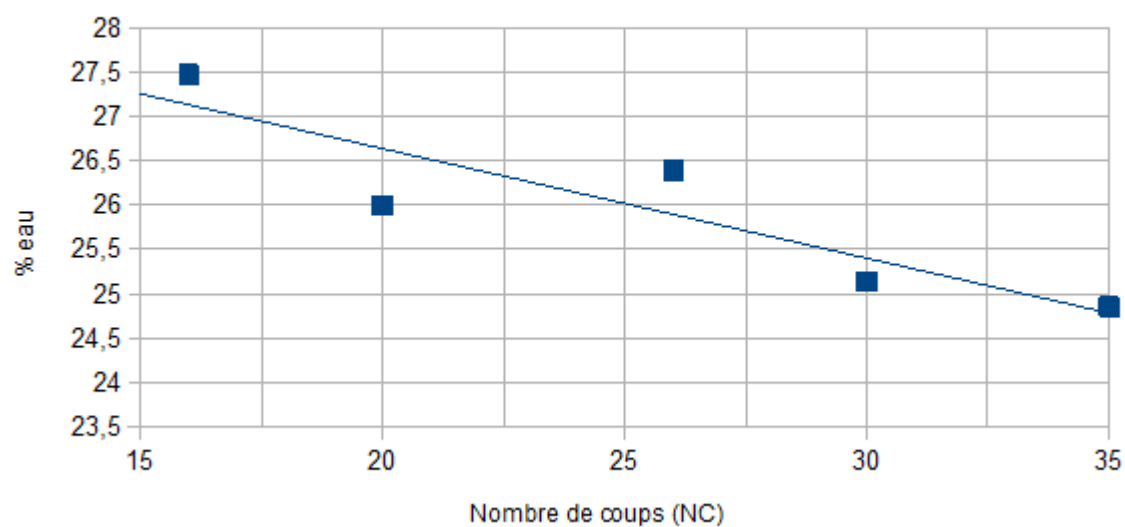
Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	2,911	2,073	0,838	28,7873583	28,5110659
2	3,37	2,395	0,975	28,9317507	
3	2,754	1,988	0,766	27,8140886	

C2 Lutendele3



Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	3,387	2,56	0,827	24,4168881	23,6592469
2	2,098	1,589	0,509	24,2612011	
3	2,296	1,784	0,512	22,2996516	

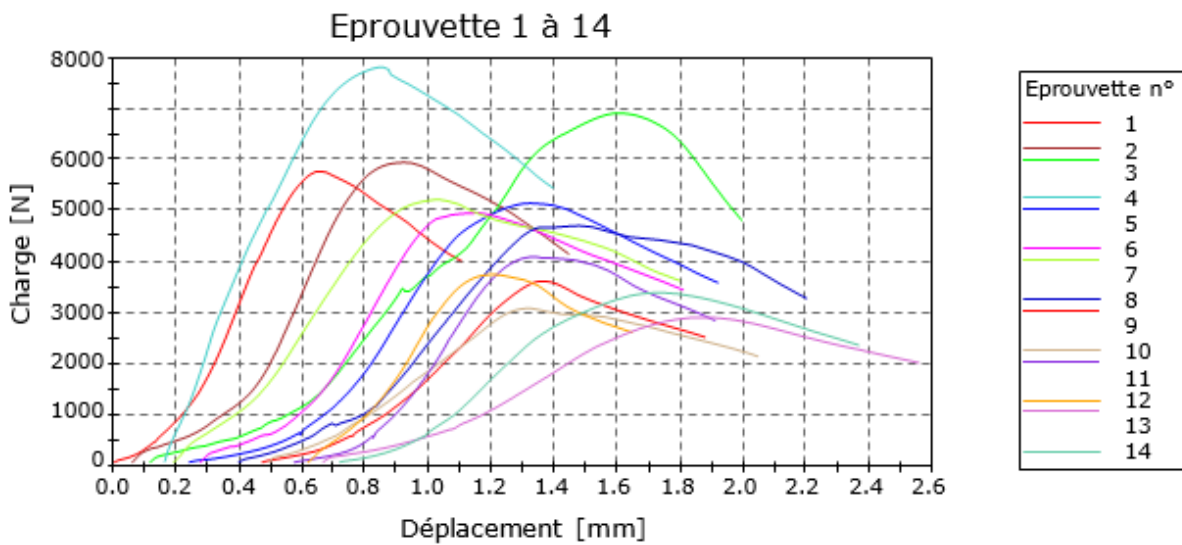
C3 Kimbangulll



Essais	Masse échantillon humide	Masse échantillon sec	Masse eau	Teneur eau (%)	Limite de plasticité
1	2,29	1,814	0,476	20,7860262	20,037525
2	2,931	2,341	0,59	20,1296486	
3	2,839	2,294	0,545	19,1969003	

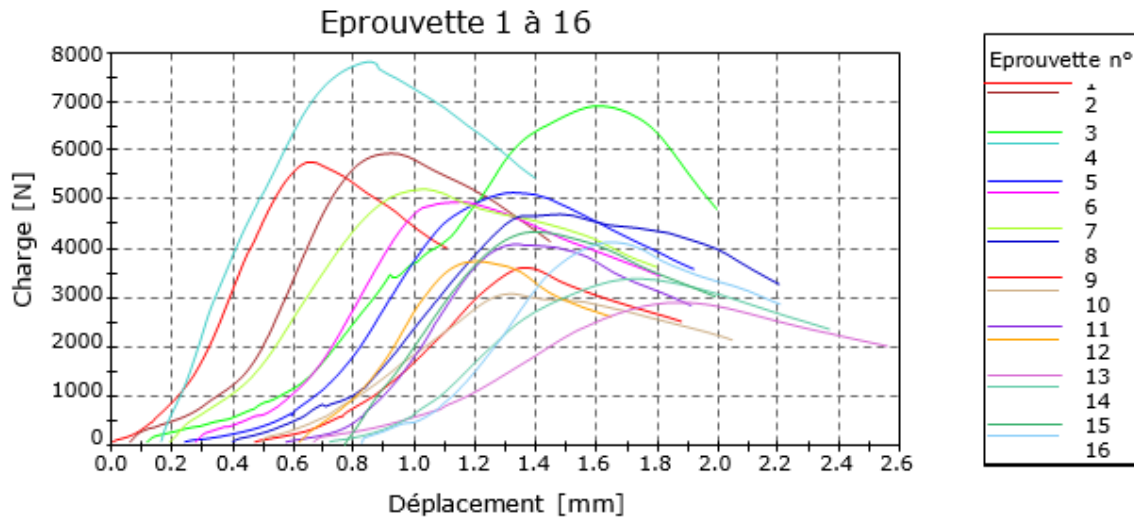
Annexe 6 : Résultats des essais mécaniques

N° Rapport	Arsene compression
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	
Vitesse	14,4 kN/min
Opérateur	ADA
Date	20/05/15
Température (°C)	22,1
Humidité (%)	44,5
Etat	28 jours
Type	Argile



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]	
	1	C2C-A	40,00	38,53	5777	3,75
	2	C2C-B	40,00	38,53	5952	3,86
	3	C2L2-A	40,00	39,31	6913	4,40
	4	C2L2-B	40,00	39,31	7813	4,97
	5	C2L2-M1A	40,00	40,00	5154	3,22
	6	C2L2-M1B	40,00	40,00	4969	3,11
	7	C2L2-M2A	40,00	40,00	5224	3,27
	8	C2L2-M2B	40,00	40,00	4718	2,95
	9	C3N1-1A	40,00	39,72	3634	2,29
	10	C3N1-1B	40,00	39,72	3101	1,95
	11	C3N1-2A	40,00	38,63	4102	2,65
	12	C3N1-2B	40,00	38,63	3765	2,44
	13	C3N1-CA	40,00	40,00	2928	1,83
	14	C3N1-CB	40,00	40,00	3412	2,13
	Moyenne		40,00	39,46	4819	3,06
	Ecart-type		0,00	0,62	1451,80	0,94

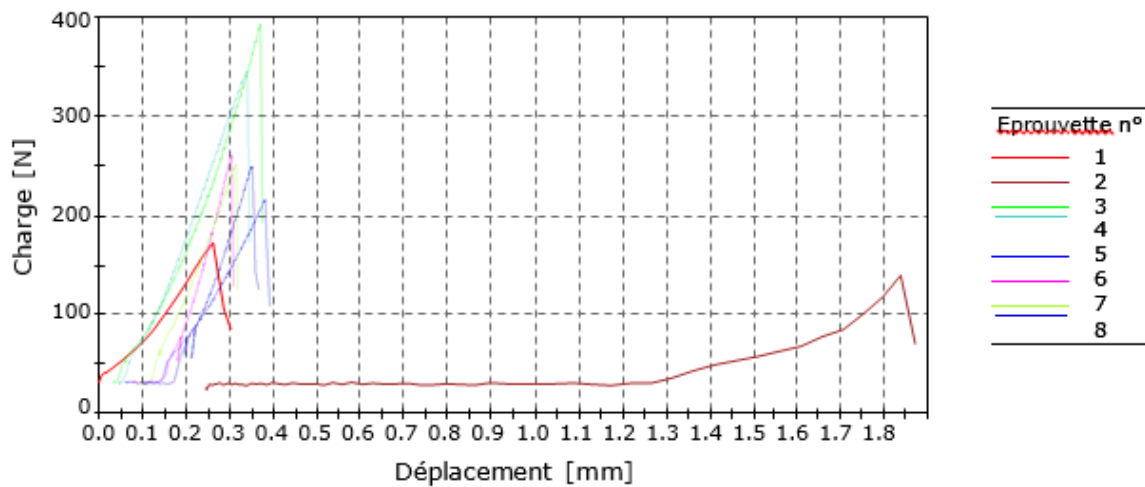
N° Rapport	Arsene compression
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	
Vitesse	14,4 kN/min
Opérateur	ADA
Date	27/05/15
Température (°C)	22,1
Humidité (%)	44,5
Etat	35 jours
Type	Argile



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]	
	1	C3N1-M1A	40,00	40,00	5777	3,61
	2	C3N1-M1B	40,00	40,00	5952	3,72
	3	C3N1-M2A	40,00	39,57	6913	4,37
	4	C3N1-M2B	40,00	39,57	7813	4,94
	5	C2C-M1A	40,00	39,15	5154	3,29
	6	C2C-M1B	40,00	39,15	5551	3,54
	7	C2C-M2A	40,00	39,26	4425	2,82
	8	C2C-M2B	40,00	39,26	5247	3,34
	9	C2N1-1A	40,00	40,00	3839	2,40
	10	C2N1-1B	40,00	40,00	4175	2,61
	11	C2N1-2A	40,00	40,00	4337	2,71
	12	C2N1-2B	40,00	40,00	4135	2,58
	13	C2N1-M1A	40,00	39,49	4328	2,74
	14	C2N1-M1B	40,00	39,49	4269	2,70
	15	C2N1-M2A	40,00	38,87	4358	2,80
	16	C2N1-M2B	40,00	38,87	4150	2,67
	Moyenne		40,00	39,54	5026	3,18
	Ecart-type		0,00	0,42	1129,34	0,71

Rapport n°	Arsene argile flexion
Date	20/05/15
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	300, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	22,4
Humidité relative (%)	43,5
Type	Argile
Etat	28 jours

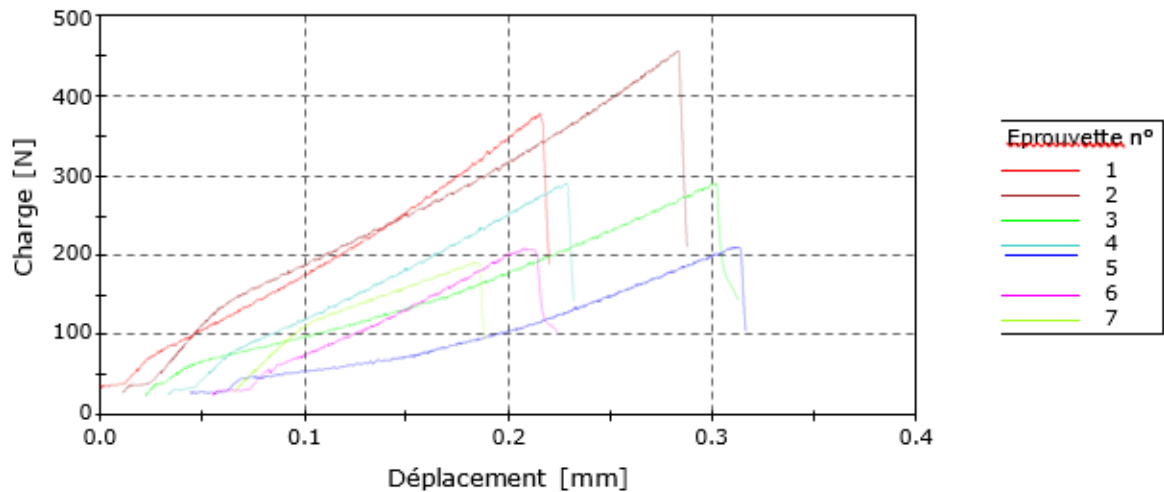
Eprouvette 1 à 8



	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]	
	1	C3N1-M1	40,03	39,19	358,89	173,2	0,42	1430
	2	C3N1-M2	39,57	37,47	344,08	140,5	0,38	1450
	3	C2C-M1	39,15	38,23	362,02	396,1	1,04	1512
	4	C2C-M2	39,26	38,51	365,49	348,7	0,90	1511
	5	C2N1-1	40,31	38,91	439,88	217,7	0,54	1753
	6	C2N1-2	40,75	38,85	444,67	262,6	0,64	1755
	7	C2N1-M1	39,49	38,83	384,31	254,2	0,64	1566
	8	C2N1-M2	38,87	38,91	379,69	251,3	0,64	1569
Moyenne			39,68	38,61	384,88	255,5	0,65	1568
Ecart-type			0,6	0,5	37,5	84,5	0,2	124,6

Rapport n°	Arsene argile flexion
Date	27/05/15
Opérateur	ADA
Norme	
Vitesse:	300, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	21,6
Humidité relative (%)	48,5
Type	Argile
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 7



	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]	
	1	C2C	38,53	38,29	399,19	380,5	1,01	1691
	2	C2L2	39,31	36,30	328,68	459,2	1,33	1440
	3	C2L2-M1	40,10	38,19	340,64	292,3	0,75	1390
	4	C2L2-M2	40,02	38,20	336,87	292,5	0,75	1377
	5	C3N1-1	39,72	38,02	414,75	212,2	0,55	1717
	6	C3N1-2	38,63	38,04	407,06	210,8	0,57	1731
	7	C3N1-C	40,47	37,17	381,73	193,2	0,52	1586
Moyenne			39,54	37,74	372,70	291,6	0,78	1562
Ecart-type			0,7	0,7	36,5	98,7	0,3	157,3