



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA

Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA

Mention : GENIE CIVIL

Parcours : Science et Ingénierie des Matériaux

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE LICENCE

MATERIAUX MINERAUX

Contribution à la valorisation des déchets en papier
Utilisation dans les matériaux de construction

Présenté par : ANDRIANARIMANANA Andoniaina Herizo

Encadré par : Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine

Soutenu le : 13 Avril 2018

Promotion 2017



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA

Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA

Mention : GENIE CIVIL

Parcours : Science et Ingénierie des Matériaux

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE LICENCE

MATERIAUX MINERAUX

Contribution à la valorisation des déchets en papier *Utilisation dans les matériaux de construction*

Présenté par : ANDRIANARIMANANA Andoniaina Herizo

- **Président du jury :** Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy
- **Directeur de mémoire :** Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine, Maitre-Assistant
- **Examineurs :** Monsieur ANDRIAMAHANDRY Solohery

Monsieur ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain

Promotion 2017

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce au Seigneur tout puissant qui m'a donné la force, le courage, la santé tout au long de mes études et pendant la préparation et la réalisation du présent travail.

Ce moment de soutenance de ce mémoire de fin d'études est aussi pour moi une importante occasion de remercier tous ceux qui m'a apporté leurs conseils, appuis et soutiens sans lesquels ce mémoire n'aurait abouti à ses fins. Ainsi, je tiens à exprimer mes sincères remerciements :

- A Monsieur RAJAONARISON Eddie Frank, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe-Vakinankaratra (IES-AV) pour son grande responsabilité envers notre école.
- A Monsieur RANDRIANARIVELO Lanja, chef de Mention Génie civil de l'IES-AV pour ses lourdes tâches de diriger le département.
- A Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine, malgré ses nombreuses occupations, qui a accepté de m'encadrer ; pour les conseils, les remarques et encouragement qu'il m'a donné tout au long de cette étude ; un grand merci pour sa disponibilité, et sa patience;
- A Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Maître de conférences pour le grand honneur qu'elle me fait en présidant le jury de cette soutenance.
- A Monsieur ANDRIAMAHANDRY Solohery, et Monsieur ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain, Enseignant ESPA qui ont accepté avec bienveillance de juger ce travail,
- A tout le personnel du laboratoire du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, sis à Tsimbazaza, pour la réalisation des essais physiques.
- Au responsable et à tous les personnels du bloc technique Ankatso pour leurs aides et l'accès aux matériels nécessaires pendant notre étude.

L'expression de mes sincères reconnaissances va également à tous les enseignants de l'Institut d'Enseignement Supérieur Vakinankaratra – Antsirabe, qui m'ont transmis leur savoir tout au long de ces trois années d'études, tous mes amis et camarade de classe pour leur solidarité et collaboration unique. Mes parents pour leur soutien moral, financier face aux difficultés, et enfin, un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce mémoire.

Puisse Dieu vous combler de sa Générosité ! Merci !

SOMMAIRE

Remerciements

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

liste des photos

Liste de l'abréviation et symbole

Introduction générale

Partie 1 : Etudes Bibliographiques

CHAPITRE I : Recyclage des papiers carton

CHAPITRE II : La latérite

CHAPITRE III : La chaux et la technique de stabilisation

CHAPITRE IV : Effet de la chaux sur la stabilisation de la latérite

: Etudes Expérimentales

CHAPITRE V : Caractérisation de la matière première

CHAPITRE VI : Réalisation de l'éprouvette

CHAPITRE VII : Caractérisation des produits finis

CHAPITRE VIII : Résultat et interprétation

CHAPITRE IX : Application au matériau de construction

Conclusion générale

bibliographies

webographies

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: LA STRUCTURE DE LA CELLULOSE	5
FIGURE 2 : MONOMERE DE GLUCOSE	6
FIGURE 3 : INTENSITE DE LATERISATION [22]	15
FIGURE 4 : UN TAMIS POUR L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE	34
FIGURE 5 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	35
FIGURE 6 : LIMITES D'ATTERBERG, APPAREIL DE CASAGRANDE ET BOUDIN DE TERRE	36
FIGURE 7 : CARACTERISTIQUE PHYSIQUE DE LA CHAUX	40
FIGURE 8 : PREPARATION DES PAPIERS CARTON	43
FIGURE 9 : COURBE DE LA MASSE VOLUMIQUE	51
FIGURE 10 : VARIATION DE L'ABSORPTION D'EAU.....	52
FIGURE 11 : COURBE DE L'ESSAI DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	53
FIGURE 12 : SCHEMA DU MOULE.....	57
FIGURE 13 : FABRICATION DE LA BRIQUE	57

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CLASSIFICATION DES LATERITES SELON A. LACROIX 1923 [23]	14
TABLEAU 2 : CLASSIFICATION DE LA CHAUX	21
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUE PHYSIQUE DE LA CHAUX	22
TABLEAU 4 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA LATERITE DE VONTOVORONA	33
TABLEAU 5 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE	34
TABLEAU 6 : LIMITE D'ATTERBERG	37
TABLEAU 7 : FORMULATION DES EPROUVETTES.....	44
TABLEAU 8 : RESULTATS OBTENUS DE LA MASSE VOLUMIQUE	51
TABLEAU 9 : RESULTATS OBTENUS DE L'ESSAI D'ABSORPTION D'EAU.....	52
TABLEAU 10 : RESULTATS L'ESSAI DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION 1	53
TABLEAU 11 : RESULTATS L'ESSAI DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION 2	54

LISTE DES PHOTOS

PHOTO 1 : UNE CUVETTE.....	38
PHOTO 2 : UN TAMIS	38
PHOTO 3 : UNE BALANCE	38
PHOTO 4 : UNE REGLE GRADUEE	38
PHOTO 5 : UNE PRESSE ET UNE MOULE.....	38
PHOTO 6 : UNE TABLE VIBRANTE	38
PHOTO 8 : LATERITE HUMIDE	39
PHOTO 7 : LATERITE SECHE.....	39
PHOTO 9 : LATERITE BROYE.....	39
PHOTO 12: TAMISAGE 1.....	40
PHOTO 11: TAMISAGE 2.....	40
PHOTO 10 : LATERITE FINE	40
PHOTO 13 : CHAUX CRISTAL	40
PHOTO 14 : HACHAGE DU PAPIER CARTON	41
PHOTO 15 : PESAGE DU PAPIER CARTON	41
PHOTO 16 : TREMPAGE DU PAPIER CARTON	42
PHOTO 17 : PAPIER CARTON APRES BROYAGE ET DECHIQUETAGE.....	42
PHOTO 18 : SECHAGE DE LA PATE DE PAPIER CARTON	43
PHOTO 19 : PESAGE DE LA CHAUX	44
PHOTO 20 : PESAGE DE LA LATERITE.....	44
PHOTO 21 : PESAGE DE LA PATE DE PAPIER CARTON	44
PHOTO 22 : DEBUT DU MELANGE.....	45
PHOTO 23 : LA PATE.....	45
PHOTO 24 : LA MOULE CYLINDRIQUE.....	46
PHOTO 25 : LA PRESSE.....	46
PHOTO 26 : LA TABLE VIBRANTE.....	46
PHOTO 28 : EPROUVETTE OBTENUE.....	46
PHOTO 27 : DEMOULAGE.....	46
PHOTO 29 : EPROUVETTES HUMIDE	47
PHOTO 30 : EPROUVETTES SECHE.....	47
PHOTO 31 : EPROUVETTES FAITES.....	48
PHOTO 32 : IMMERSION DE L'ECHANTILLON DANS L'EAU ET PESAGE HUMIDE	49
PHOTO 33 : APPAREIL DE MESURE DES RESISTANCES MECANIQUES – TESTWELL.....	50
PHOTO 34 : ECRASEMENT DE L'ECHANTILLON	50
PHOTO 35 : LA LATERITE FINE.....	58
PHOTO 36 : PAPIER CARTON APRES BROYAGE ET DECHIQUETAGE.....	58
PHOTO 37 : MOULE DE LA BRIQUE COMPRESSE.....	59

PHOTO 38 : DEMOULAGE DE LA BRIQUE 1	59
PHOTO 39 : DEMOULAGE DE LA BRIQUE 2.....	59
PHOTO 40 : BRIQUE APRES SECHAGE.....	60

NOTATIONS

A : Absorption d'eau en pourcentage

F: Force ou charge maximale en Newton

L: Longueur en centimètre

M: Masse en gramme

R: Résistance mécanique en MégaPascal

S: Surface en mètre carré

V: Volume en millilitre

ρ : Masse Volumique en gramme par centimètre cube

W: Teneur en eau en pourcentage

Introduction générale

L'utilisation des emballages dans notre vie quotidienne se propage et prend une grande partie. On peut avoir des emballages métalliques, qui sont principalement de l'aluminium, très utilisés grâce à son efficacité contre les contaminants, l'humidité et l'oxygène. On a aussi les emballages en polymères, principalement les films plastiques, qui sont moins coûteux et se présente en grande quantité. Et les emballages en papier, très utilisés comme les cartons, ils sont utilisés principalement pour le transport des marchandises et du stockage.

Tenue de son faible cout et de son faible poids, les emballages en papier sont très utilisés en masse, et les déchets de carton s'accroît de jour en jour, en plus les déchets des journaux et des papiers bureautiques. En tenant compte des ce dégâts, la revalorisation et recyclage des papiers sont nécessaire, non seulement pour la propreté mais aussi pour réduire le besoin en bois dans la première fabrication des papiers.

Plusieurs systèmes sont déjà mise en place pour le recyclage, afin d'avoir un nouveau papier pour emballage, cahiers recyclés, etc. Son valorisation peut-être thermique, ou utilisé comme nouveau matériau.

À travers ce mémoire, nous allons prendre part sur la valorisation des déchets en papier, pour avoir un nouveau matériau destiné à être utiliser dans le domaine de construction. C'est dans ce contexte que nous avons choisi le thème de ce mémoire qui s'intitule « Contribution à la valorisation des déchets en papier-cartons : utilisation dans les matériaux de construction ».

Pour mieux cerner le sujet, cette étude a été scindée en 2 grandes parties : dans la première partie consacrée aux études bibliographiques, qui permet de percevoir les généralités sur le recyclage des papiers carton, quelques notions sur la latérite et la stabilisation de la latérite par la chaux.

En deuxième partie, nous allons voir l'étude expérimentale, qui sera consacrées à la caractérisation des matières premières utilisé, ensuite la fabrication de l'éprouvette. Les essais faites et leur caractérisation seront quant à elles mises en exergue dans la dernière chapitre, suivi de l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

Partie 1 :

Etudes Bibliographiques

Dans cette partie, on va rappeler les notions d'information nécessaire concernant les matières premières utilisé avant d'analyser les propriétés de leur association. L'objectif de ces chapitres est donc de rappeler brièvement la généralité sur la latérite, la notion sur la stabilisation de la latérite par la chaux et le recyclage des papiers cartons.

CHAPITRE I : RECYCLAGE DES PAPIERS CARTON

I.1 Généralités : [22], [28]

Le papier et carton sont deux matériaux fibreux de composition identique, fabriquée à partir de fibres cellulosiques végétales et animales. Ces fibres sont principalement extraites du bois provenant des déchets de papiers et cartons d'origine industrielle ; ou des chutes de sciage du bois d'œuvre destiné à la menuiserie, à l'ameublement ou à la construction.

Ils se différencient par le poids de ce matériau, pour le carton, les matériaux sont de forte grammage c'est-à-dire entre 224 et 500g.m⁻². Sa production ne cesse d'augmenter alors que sa valorisation est insuffisante.

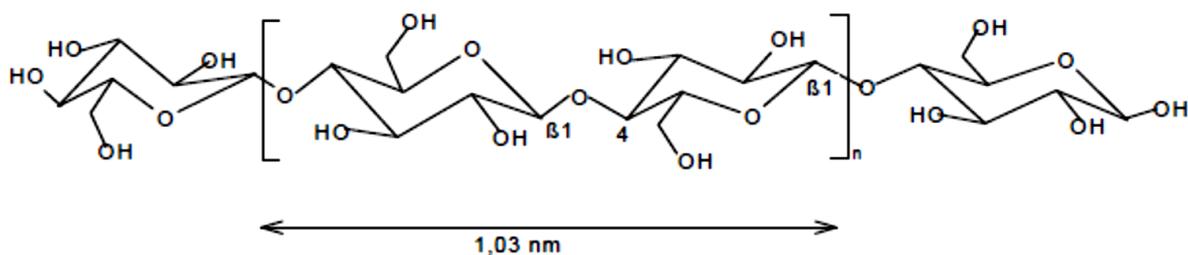


Figure 1: La structure de la cellulose

Le bambou, le chanvre, le lin, le bois sont les matières de base nécessaires à la fabrication du papier et du carton. On retrouve dans les fibres de ces végétaux un constituant commun : la cellulose.

I.2 La cellulose

La formule brute de la cellulose est $(C_6H_{10}O_5)_n$ où n compris entre 200 et 14000. C'est un glucide constitué d'une chaîne linéaire de molécules de D-Glucose et principal constituant des végétaux et en particulier de la paroi de leurs cellules. La cellulose est une excellente fibre.

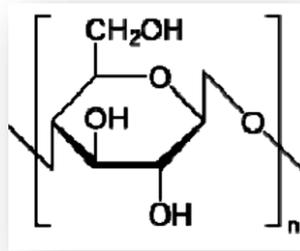


Figure 2 : Monomère de glucose

1.2.1 Propriétés [23], [28]

La cellulose a une grande inertie chimique : elle est insoluble dans l'eau et dans des solvants organiques. La cellulose est aussi douée d'une grande résistance mécanique.

Formule brute : $(C_6H_{10}O_5)_n$

Masse molaire : $162,141 \pm 0,007 \text{ g.mol}^{-1}$, C : 44,45%, H : 6,22%, O : 49,34%

T° de fusion (décomposition) : $> 150^\circ\text{C}$

Masse volumique : 200 à 400 kg.m^{-3}

1.2.2 La fibre cellulosique est une importante matière première industrielle : [23]

Dans la papeterie, elle sert à la fabrication de la pâte à papier ;

Dans la construction, elle peut servir également (en tant que fibre) de liant dans le domaine de la stabilisation de terre.

Après transformation dans l'industrie chimique, elle peut servir à la fabrication de fibres textiles artificielles : acétate de cellulose, viscose...

1.2.3 Les objectifs de la valorisation des déchets cellulosiques [24]

La valorisation des déchets cellulosiques est nécessaire pour les raisons suivantes :

- Utilisation maximale des ressources naturelles exploitées : tous les matériaux reconstitués à base de bois contribuent à une exploitation plus rationnelle de la ressource forestière.

- Protection de l'environnement : le recyclage de papier/carton économise les ressources naturelles, diminue les émissions de CO₂
- Réduction de volume des déchets à traiter : des tonnes de papiers et cartons récupérés et recyclés sont autant de déchets en moins à éliminer. Récupérer à part les vieux papiers et les cartons, permet à réduire le volume des déchets.
- Trouver de nouveaux débouchés aux déchets collectés : utiliser des fibres cellulosiques dans de nouveaux domaines d'application. On peut envisager l'élaboration de nouveaux matériaux à partir de la valorisation de ces déchets.

I.3 Les papiers carton : [25], [27]

I.3.1 Structure du papier :

Le papier se caractérise par sa structure à plusieurs échelles (fibreuse, microscopique). Il est constitué d'un enchainement de fibres couchées dans des plans successifs. Ces fibres donnent une cohésion au papier uniquement grâce à des liaisons hydrogènes. Lors des contacts fibre-fibres, ces liaisons se créent. Sans ces liaisons hydrogènes, la feuille de papier n'aurait aucune tenue mécanique. L'élimination de ces liaisons par trempage d'une feuille dans l'eau montre toute leur importance.

Une feuille de papier classique de format A₄, possède environ 150000 fibres. Les liaisons hydrogène qui se créent lors des contacts fibre-fibre sont de l'ordre de 5 millions dans cette feuille. Ce sont les fibres végétales issues du bois qui constituent plus de 90% de la masse de ces fibres. Les 10% restants sont issues d'autres végétaux : paille, coton, lin, chanvre, jute...

I.3.2 Structure du carton :

Issu de la transformation de la cellulose, du bois ou d'autres matières végétales, tout comme le papier, le carton est essentiellement considéré pour sa rigidité, une valeur qui est en fonction de l'épaisseur et du module d'élasticité. La structure du carton varie en fonction de son procédé de fabrication.

En effet, il peut être fabriqué:

- soit par contre collage de feuilles de papier sec au moyen d'une matière adhésive telle que l'amidon ou une résine synthétique ;
- soit suivant la méthode multi jets qui consiste en une association de trois à sept jets de pâte de composition identique ou différente.

De ce fait, la structure du carton dérive de celle du papier : les produits bas de gamme (c'est-à-dire les plus légers, environ 225g/m²).

I.3.3 Usages des cartons

Depuis l'origine, il est utilisé comme matériau support de réalisations artistiques dans l'emboitage de luxe, la reliure, l'encadrement, ... Les papiers carton sont utilisés principalement comme emballage, utilisé aussi dans l'industrie de l'édition, et dans toutes les industries de cartonnage (pour la qualité d'isolant phonique, électrique et mécanique du carton).

I.4 Valorisation des déchets [12], [24], [25]

- La valorisation est un processus visant à améliorer la valeur d'un objet.
- La valorisation des déchets c'est l'ensemble des traitements ou utilisations qui permettent de leur trouver un débouché ayant une valeur économique positive, c'est-à-dire les procédés par lesquels on transforme un déchet matériel ou organique en un nouveau matériau.

Comme le recyclage, le compostage, la transformation en énergie ou valorisation énergétique.

Les types de valorisation sont:

- ❖ La récupération des matières premières
- ❖ L'emploi comme matière première de substitution
- ❖ La valorisation énergétique

I.4.1 La récupération des matières premières

La récupération, réutilisation et le recyclage sont les formes de valorisation matière. La récupération des déchets solides composites nécessite des opérations (le broyage, la fragmentation, le criblage et /ou la classification) tandis que la récupération des produits organiques nécessite des transformations chimiques ou biochimiques.

I.4.2 La réutilisation comme matières premières de substitution

Cette valorisation touche particulièrement le domaine de matériaux. Généralement, les déchets n'auront pas à subir de traitement très particulier préalablement à leur réutilisation, sauf pour certains modes de conditionnement. La réutilisation sera le plus souvent dépendante d'une composition chimique et de propriétés physiques particulières nécessaires à l'introduction du déchet dans une chaîne de fabrication donnée.

I.4.3 La valorisation énergétique

La valorisation énergétique concerne essentiellement les déchets organiques mais aussi les résidus inorganiques contenant du carbone. Elle consiste à exploiter les gisements d'énergie contenus dans les déchets par incinération (énergie thermique) ou par méthanisation (les procédés à basse température).

I.4.4 Valorisation des déchets en compostage :

Le compostage qui est un procédé biologique qui consiste à traiter des déchets organiques (Déchets fermentescibles de déchets ménagers, déchets verts, boues de stations d'épuration), les restes alimentaires ou le papier afin de réaliser un résidu solide, riche en humus, semblable à du terreau : le compost.

I.4.5 Origine des déchets des produits en papiers cartons

Les vieux papiers cartons ou les produits à base de papiers cartons récupérés ont différentes origines :

- Les industries qui utilisent les papiers cartons comme matière première avec les chutes de fabrication et de transformation (imprimeurs, édition, presse, administrations, grandes surfaces)
- La récupération volontaire organisée par les collectivités locales auprès des ménages ou la récupération directe auprès des industriels producteurs d'emballages, de journaux, et des magasins

I.4.6 Les types de déchets à valoriser :

Les déchets cellulosiques sont les déchets de bois comme les copeaux et les sciures ; pour les papiers/cartons, plusieurs qualités peuvent être valorisées :

- les papiers et cartons mêlés : mélange de diverses sortes de papiers et de cartons contenant moins de 40% de journaux et illustrés ;
- les emballages de grands magasins : constituent en majorité de cartons ondules (au moins 70%), de cartons plats et de papiers d'emballage usages ;
- les ondules récupérés : caisses et feuilles usagées et rognures de carton ondulé ;
- les archives couleurs : correspondance à base de papier, d'impression et diverses, imprime ou non, tels que couvertures rigides et papiers carbone ;
- les déchets de papier qui englobe les journaux ;
- les papiers des imprimeries ;
- Les déchets de carton des usines de fabrication d'emballage.

I.5 Valorisation des déchets de papier/carton [24]

I.5.1 Ouate de cellulose

La ouate de cellulose est issue du recyclage des journaux papiers. Ils sont mis en tout petits morceaux et traités au sel de bore. La cellulose devient imputrescible et ininflammable. Cela en fait un excellent isolant thermique et phonique et assure un très bon déphasage (en été, la fraîcheur extérieure de la nuit n'est restituée que le midi du jour suivant).

I.5.2 Papier toilette

Le papier toilette fait partie des produits obtenus par la valorisation des déchets de papier/carton.

I.5.3 Fibres cellulosiques de récupération

Les fibres cellulosiques de récupération (papiers, journaux, emballages, cartons...) consistent d'une grande part des déchets urbains, et des ordures ménagères.

I.6 Produits obtenus de la valorisation des déchets de papier et de carton [24]

I.6.1 Incorporation à certains matériaux

Certaines fibres cellulosiques de récupérations telles les vieux papiers peuvent être incorporés à des matériaux après pulvérisation. Il en est ainsi dans la fabrication des plaques de plâtre.

I.6.2 Fabrication de panneaux pour la construction

Le procédé comprend un broyage des déchets tel quel suivi d'une séparation de fer, des métaux non ferreux et des verres, un séchage par passage dans un cyclone : il y a séparation des parties lourdes et des parties légères, ces dernières étant directement utilisées pour la fabrication des panneaux. Ces panneaux sont susceptibles d'utilisation pour la réalisation de murs extérieurs décoratifs.

I.6.3 Les papiers kraft

Les papiers Kraft Imprégnés de résine phénolique sont appliqués sur les panneaux bois (contreplaqués et panneaux de particules) pour en améliorer la qualité de surface avant finition ou réaliser des moules pour couler le ciment.

CHAPITRE II : LA LATERITE

II.1 Définition : [1], [2]

Nombreux écrivains et chercheurs ont adopté la définition de la « latérite ».

- Un géologue appelé BUCHANAN (1807) a suggéré la première fois le mot latérite pour désigner un matériau qui s'endurcit en l'exposant à l'air, un matériau qui peut être utilisé comme brique, servant à la construction. D'où le nom de la latérite du latin « later » = brique.
- La latérite est un sol de couleur rouge, meuble, un matériau fortement altéré. C'est aussi un mélange des proportions en oxyde de fer, de l'alumine, de quartz, de kaolinite et des autres constituants minéraux. Elle provient du profond d'un profil de l'érosion des roches silicatées ou carbonatées, sous l'effet des différents facteurs (agents atmosphériques, climat, température, eau, ...), subissant à des réactions chimiques avec les éléments constitutifs de la roche. Elle peut se former dans les régions tropicales chaudes et humides.

II.2 Formation de la latérite [3]

II.2.1 Origine

La latérisation s'est formée à partir de l'altération de la roche mère, c'est un long processus se déroulant pendant des millions d'année.

Ce phénomène est caractérisé par la mise en solution des éléments constitutifs de la roche qui sont :

- soient entraînés par les eaux de circulation,
- soient recombinaés entre eux pour donner de minéraux argileux.

Le départ de la silice due au lessivage de la roche mère est accompagné d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'alumine (Al_2O_3). Ces sesquioxydes, après dessiccation et induration, constituent la latérite.

II.2.2 Facteur de transformation

Certains facteurs ont une influence prépondérante sur la formation du sol latéritique et sur l'altération des roches, comme : le climat (température), l'eau, la topographie (érosion), les roches mères, la végétation (bactéries), âge, les couvertures végétales.

Les réactions chimiques qui résultent entre ces facteurs et les constitutions de la roche, peuvent être : des dissolutions, des échanges d'ions, des hydratations, des carbonatations, des oxydations ou des réductions.

II.3 Les compositions chimiques et minéralogiques de la latérite [4], [5]

Les composants des latérites sont :

- Le fer est souvent formé de :
Goethite (FeOOH ou $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$),
Magnétite (Fe_3O_4)
Hématite (Fe_2O_3) ;
- L'Alumine qui se présente sous forme d'hydroxyde :
La gibbsite ou hydragillite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) est le minéral le plus fréquent ; le boehmite (AlOOHK) est moins reconnu et souvent en quantité moindre.
L'aluminium existe également sous une forme combinée à la silice (la teneur en alumine influe sur la plasticité du matériau) dans la kaolinite ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$) pour le demi maille.
- La silice est un constituant sous forme combinée :
Il se présente aussi sous forme de quartz à l'état combiné, joue le rôle d'éléments dégraissants et tient une place importante dans le squelette du produit fini. ;
Le Titane qui est sous forme d'ilménite FeTiO_3 .
Le Manganèse qui apparaît aussi sous forme d'oxyde en faible quantité.

II.4 Classification de la Latérite [6].

On peut classer les latérites en plusieurs types :

II.4.1 Classification de Martin et Doyenne

Selon MARTIN et DOYENE, 1930, la classification est basée sur le ratio silice-alumine et le ratio silice-sesquioxyde pour classer les sols latéritiques et non latéritiques, c'est la Relation empirique d'estimation du degré de latérisation d'un profil latéritique.

$$Ki = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102}} \qquad \frac{S}{R} = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}}$$

Avec : Ki : le ratio silice-alumine.

$\frac{S}{R}$: Le ratio silice-sesquioxyde de fer et d'aluminium.

Si, on a : $\frac{S}{R} < 1,33$: on dit que les latérites sont vraies.

$1,33 < \frac{S}{R} < 2$: roches latéritiques.

$\frac{S}{R} > 2$: minéraux non latéritiques.

II.4.2 Classification de A. Lacroix

La classification de Lacroix est illustrée dans le tableau :

Tableau 1 : Classification des latérites selon A. LACROIX 1923 [23]

Classes	Teneur en minéraux latéritiques (Oxydes, hydroxydes de kaolinites)
Latérites vraies	100 % à 90 %
Latérites argileuses	90 % à 50 %
Kaolinites et argiles latéritiques	50 % à 10 %
Kaolinites et argiles	Inférieure de 10 %

II.4.3 Intensité de latérisation [7]

On peut aussi classer les latérites selon l'intensité de latérisation notée ρ telle que :

$$\rho = \frac{\% \text{ en poids de } SiO_2 \text{ (combinée)}}{\% \text{ en poids d' } Al_2O_3 \text{ (combinée)}} \times 1.7$$

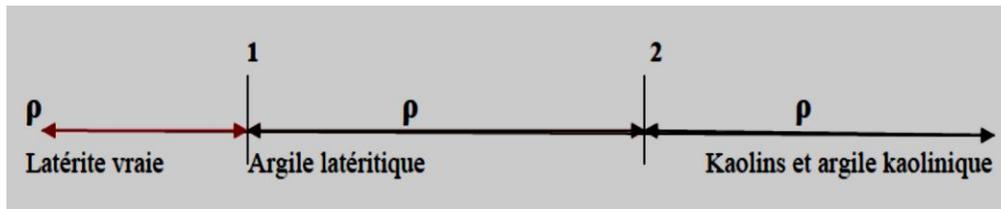


Figure 3 : Intensité de latérisation [22]

II.5 Caractéristiques des sols latéritiques [8], [9]

II.5.1 Caractéristique spécifique

Le phénomène d'induration est l'une des caractéristiques spécifiques des latérites. L'induration des latérites est supposée liée, depuis déjà fort longtemps, à l'évolution des sesquioxydes constitutifs. Ces derniers se précipiteraient, se concentreraient et se cristalliseraient sous l'action de la dissociation.

Autrement dit, l'induration est le durcissement rapide et important de sols latéritiques exposés à l'air.

II.5.2 Couleur

Les latérites possèdent diverses couleurs : brun, jaune, rouge, ocre, rose et noir. Ces couleurs dépendent des compositions minéralogique et chimique des latérites. La couleur rouge est la plus fréquente, surtout à Madagascar

II.6 Utilisation de la latérite : [3], [21]

La latérite est un matériau très exploitée dans divers branches, elle a des nombreuses possibilités d'utilisation.

- Les paysans utilisent la latérite remuée avec l'eau, avec la boue très visqueuse, pour confectionner leurs murs.
- Les latérites sont aussi utilisées dans les constructions routières. Elles peuvent servir à la réalisation de la couche de base et / ou de la couche de fondation.
- Elle peut servir à la fabrication : des briques réfractaires, tuile, des carreaux, de la poterie, dans la fabrication de la moule de la fonderie.
- On peut aussi mélanger la latérite avec d'autres matériaux pour renforcer la structure. Les bois, pierre, fibres végétaux, bouse de zébu ou de blanc d'œufs ... sont utilisés pour renforcer la terre.

CHAPITRE III : LA CHAUX ET LA TECHNIQUE DE STABILISATION

III.1 La stabilisation : [8], [10], [11], [13], [14]

III.1.1 Définition :

La stabilisation est l'ensemble des procédés du traitement des sols permettant d'améliorer les caractéristiques et les propriétés du sol faces aux charges physiques donné.

On dit que le sol est stable, s'il peut supporter à des applications particulières, c'est – à dire sans rupture et sans déformation permanente.

III.1.2 Objectifs :

Stabiliser la terre a pour objectif d'améliorer la perméabilité, de réduire la plasticité et la porosité, d'améliorer la résistance à la compression et à la cohésion de la terre pour obtenir les meilleurs caractéristiques mécanique.

La stabilisation contribue sur l'augmentation de la densité, stabilité du matériau et sur l'amélioration de la cohésion entre les grains : la réduction de volume des vides entre les particules, le colmatage des vides, l'amélioration des liens entre les particules, augmentation de la densité sèche.

III.1.3 Types de stabilisation

Il y a trois façons possibles de stabiliser la terre.

III.1.3.1. Stabilisation mécanique

Elle consiste à modifier la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité du sol par un compactage maximum obtenue avec la teneur en eau optimum du sol à considérer.

III.1.3.2. Stabilisation physique

C'est la modification des propriétés de la terre en intervenant sur sa texture par addition de fraction des grains différents, le sable par exemple (correction de la granularité par tamisage)

III.1.3.3. Stabilisation Chimique

Dans cette technique, le sol est stabilisé en additionnant avec d'autres minéraux ou produits chimiques. L'action de ces produits entre les constituants du sol résulte de la réaction physicochimique qui conduit à la modification de la texture et la propriété du sol à stabiliser.

III.1.4 Les stabilisants :

Les additifs ou stabilisants utilisés sont en général des matériaux qui sont, souvent des liants qui permettent d'améliorer les performances physiques, chimiques et mécaniques des sols. Ils sont classés en deux catégories : les stabilisants minéraux et organiques.

III.1.4.1. Les stabilisants minéraux

Ce sont des poudres de matériaux minéraux finement broyés, qui sont mélangés avec de l'eau, et forment une pâte plastique qui fait prise et durcie. Les ciments, les chaux, et les pouzzolanes sont les plus répandus parmi les principaux liants minéraux.

L'ajout de ces liants contribue à réduire la sensibilité à l'eau du matériau ainsi que à améliorer ses caractéristiques mécaniques.

III.1.4.2. Les stabilisants organiques

Ce sont des liants hydrocarbonés ou des produits chimiques naturels ou artificiels d'origine organique susceptible d'agir sur la structure ou les propriétés hydrophiles du matériau à stabiliser.

III.1.5 .Mécanisme de la stabilisation [10]

III.1.5.1. La densification

Il y a deux manières différentes pour densifier :

- manipuler la terre mécaniquement de façon à évacuer un maximum d'air en pétrissant et en comprimant la terre.
- combler un maximum de vides par d'autres grains.

Il s'agit d'une intervention directe sur la texture.

III.1.5.2. L'armement

Il s'agit d'introduire une armature généralement constituée de fibres d'origine végétale (paille), animale (poils, bouse), minérale ou synthétique (fibres de synthèse) dans la latérite. Ce moyen crée un réseau de fibres omnidirectionnel qui améliore la résistance à la traction et au cisaillement du sol et contribue aussi à réduire le retrait.

III.1.5.3. L'enchaînement

On introduit dans la structure de la terre une matrice tridimensionnelle inerte et résistante qui va s'opposer à tout mouvement de la terre.

Il s'agit d'une action de consolidation par cimentation qui résulte d'un remplissage des vides par un liant insoluble capable d'enrober les particules dans la latérite.

Les principales réactions de consolidations ont lieu dans le stabilisant lui-même, entre le stabilisant et la fraction sableuse de la terre. On observe cependant des réactions secondaires entre le stabilisant et la fraction argileuse et ce moyen peut modifier le comportement mécanique du matériau.

III.1.5.4. Lier

Dans ce cas, la matrice inerte introduite dans la terre inclut les argiles. On connaît deux mécanismes qui donnent le même résultat :

- une matrice inerte est formée par les argiles : on utilise les charges négatives et positives des plaquettes argileuses ou leur composition chimique pour les lier entre elles par l'intermédiaire d'un stabilisant qui joue le rôle de liant ou rôle de catalyseur de cette liaison.
- une matrice inerte est formée par les argiles : un stabilisant réagit avec l'argile et forme un nouveau matériau insoluble et inerte par précipitation, une sorte de ciment, c'est une réaction pouzzolanique obtenue avec la chaux, une réaction lente essentiellement dépendante de la quantité et de la qualité d'argile.

III.1.5.5. L'hydrofugation

On modifie l'état de l'eau interstitiel et on réduit la sensibilité des plaquettes d'argile à l'eau.

Ce moyen qui fait intervenir des produits (chlorure de calcium, acide aminé quaternaire ou résine) ou bien l'échange ionique contribue à éliminer au maximum l'absorption à l'adsorption de l'eau.

III.2 La chaux

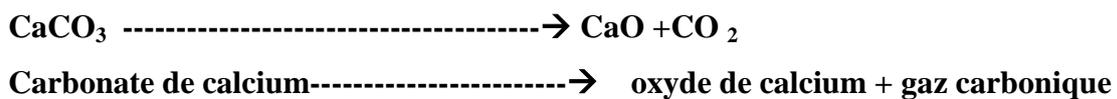
III.2.1 Définition : [15], [16], [26],

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur porté à une température de plus de 1000 degrés, utilisée depuis l'antiquité. Il se produit alors une réaction chimique c'est-à-dire le calcaire se décompose en chaux vive et en gaz carbonique.

La chaux se définit comme la variété physique ou chimique sous laquelle se présente l'oxyde de calcium, soit à l'état d'oxyde plus ou moins pur (CaO), soit sous forme d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ obtenu après hydratation, soit en mélange avec des éléments argileux (chaux hydrauliques).

III.2.2 Réaction chimique

La première étape est la calcination ; on chauffe le calcaire à 900 °C à 1200 °C, nous obtenons de la chaux vive, essentiellement de CaO ainsi qu'un fort dégagement de CO₂ selon l'équation :



Nous observons également une perte de poids dû au dégagement de gaz carbonique. La deuxième étape est l'extinction ; la chaux aérienne ou chaux éteinte est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. On dit aérienne car elle réagit avec le CO₂ de l'air, suivant l'équation chimique :



La troisième phase est la carbonatation où l'on absorbe le gaz carbonique. L'équation s'y rapportant est :



Hydroxyde de calcium + Gaz carbonique -----> Carbonate de calcium + eau

La chaux hydraulique est constituée en plus de silicate et d'aluminate car elle provient à l'origine de calcaire moins pure. Elle est désignée hydraulique car elle durcit en présence d'eau.

III.2.3 Classification [17]

On peut classer la chaux en deux types distincts qui se différencient l'un de l'autre :

- les chaux aériennes qui ont la propriété de durcir à l'air mais non à l'eau ;
- les chaux hydrauliques ont la possibilité de durcir non seulement à l'air, mais aussi sous l'eau.

On peut classer les chaux suivant la proposition de Vicat grâce à un indice d'hydraulicité qui est donné par le rapport des éléments les plus acides aux éléments les plus basiques. Suivant les valeurs de *i*, les chaux sont plus ou moins hydrauliques.

L'indice de l'hydraulicité est défini comme suit :

$$i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Tableau 2 : Classification de la chaux

Type de chaux	Pourcentage d'argile	Indice d'hydraulicité <i>i</i>	Durée de prise sous l'eau
Grasse	~ 0	0-0.1	6
Faiblement hydraulique	5-8	0.1-0.16	15-30 jours
Moyennement hydraulique	8-15	0.16-0.30	10-15 jours
Hydraulique	15-20	0.30-0.40	2-4 jours
Eminemment hydraulique	20-30	0.40-0.50	Inférieur à 2 jours

III.2.4 Caractéristiques et propriétés chimiques : [15]

Les caractéristiques et propriétés chimiques de la chaux sont les suivantes :

- La chaux est un matériau alcalin qui réagit avec les acides pour former des sels de calcium.
- Elle absorbe les gaz acides, comme le dioxyde de soufre et le gaz carbonique.
- Elle réagit sous certaines conditions avec la silice ou les silicates naturels.

Ainsi, la réaction avec la silice sous pression permet de fabriquer des briques de silicate de calcium ; la réaction avec les matériaux argileux est utilisée pour la stabilisation des sols.

- La chaux réagit chimiquement sous haute température avec les impuretés des métaux et sert au raffinage de ces métaux.
- Grâce à la finesse et à la forme des particules de la chaux hydratée, la pâte de chaux est plastique et constitue avec du sable des mortiers et enduits très plastiques dont la solidité augmente avec le temps par décarbonations.
- Grâce à son alcalinité et à ses réactions avec les sols, la chaux permet de corriger l'acidité des sols et constitue un fertilisant important.

III.2.5 Caractéristiques physiques : [15]

Tableau 3 : Caractéristique physique de la chaux

	Chaux aérienne		Chaux hydraulique
	Chaux grasse	Chaux maigre	
Indice d'hydraulicité	0-0,10	0-0,15	0,10-0,50
Poids spécifique (T/ m ³)	2,2-2,3	2,3-2,5	2,6-2,9
Densité apparente	0,5-0,7	0,6-0,9	0,7-0,10
Surface spécifique du Blaine (Cm ² / g)	8000-12000	5000-9000	3000-8000

III.2.6 Utilisation de la chaux : [18], [15]

En principe, la chaux a pour fonction de :

- Diminuer le pourcentage d'eau contenu dans le sol humide ;
- Floculer les argiles du sol ;
- Permettre le passage d'une structure plastique à une composition stable et grumeleuse ; Laisser l'eau à s'échapper.

Ensuite, elle peut être utilisée aussi dans divers secteur d'activité, comme dans :

- Le bâtiment et travaux publics (fondation, chaussée, enduit, mortier,...) ;
- L'industrie (papetière, pharmaceutique, fabrication des engrais, épuration d'eau,...) ;
- L'agriculture (pH du sol, insecticide,...)
- la chaux et l'environnement (traitement des eaux, traitement des fumés ...)

CHAPITRE IV : EFFET DE LA CHAUX SUR LA STABILISATION DE LA LATERITE

IV.1 Stabilisation à la chaux [16]

L'étude de valorisation des latérites a été reprise par RANAIVONIARIVO en 1992. Dans ce cadre, l'auteur a précisé qu'après la cuisson, les latérites calcinées sont mélangées à la chaux de quantité bien définie et l'ensemble est mélangé avec une quantité d'eau optimisée. Le produit fini obtenu constitue un liant comparable au ciment PORTLAND.

IV.1.1 Principe :

La stabilisation à la chaux consiste en une incorporation de chaux vive ou éteinte au matériau à traiter. L'action de la chaux concerne les particules argileuses contenues dans le sol.

IV.1.2 Action de la chaux sur le sol :

La chaux réagit sur l'argile par échange ionique entre les cations Na^+ et K^+ existant dans l'argile et les cations Ca^{++} d'apport, et par floculation des particules argileuses, provoquée par les forces électriques mises en jeu par l'apport d'ions Ca^{++} et OH^- ;

Les modifications géotechniques :

- augmentation de la limite de plasticité ;
- l'indice de plasticité I_p diminue ;
- le gonflement diminue ;
- la perméabilité diminue.

Ces modifications apparaissent pour des dosages en chaux très faibles, de l'ordre de 0,5 % à 1,5 % en laboratoire, suivant le sol traité.

IV.2 Théorie de la réaction chimique entre le sol et la chaux. **[19], [20]**

Lors du mélange de la chaux et avec le sol, il se produit à court terme, une dessiccation, la chaux subit une réaction d'hydratation qui abaisse la teneur en eau du mélange.

A long terme, des réactions chimiques assez complexes s'observent. Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de bases :

IV.2.1 Dessiccation. (Absorption d'eau)

La réaction d'hydratation de la chaux s'écrit :



Cette réaction dégage de la chaleur , ou est exothermique et s'en suit de la perte d'une quantité d'eau du sol qui est trois fois supérieure à celle nécessaire pour hydrater la chaux : une forte évaporation se dégage et on voit souvent fumer les mélanges fraîchement malaxés. En moyenne, pour 1% de la chaux ajouté, on peut constater une diminution de la teneur en eau de 1 à 1,5%.

IV.2.2 Echange cationique

L'addition de la chaux à une terre humidifiée correspond à un apport important d'ions de calcium. Par un phénomène d'échange cationique, ces ions de calcium se substituent aux cations échangeables (magnésium, sodium, hydrogène...) de la terre.

IV.2.3 Flocculation et agglomération

L'échange cationique et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle conduisent à la flocculation et agglomération des particules fines de la terre. Ainsi, il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine de la terre. La structure et la texture de la terre changent.

IV.2.4 Carbonatation

La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde atmosphérique pour former du carbonate de calcium. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

IV.2.5 Réaction pouzzolanique

C'est le mécanisme le plus important influençant la stabilisation à la chaux. Les propriétés de résistances du matériau sont dues essentiellement à une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et à la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates d'aluminium et de calcium qui ciment les grains entre eux.

IV.3 Caractérisation des terres stabilisées [3], [10]

La détermination des caractéristiques des terres stabilisées est basée sur l'étude des relations entre la structure et les propriétés des matériaux. Le but est de savoir les performances mécaniques du matériau et ses principales caractéristiques d'utilisation.

IV.3.1 La résistance à la compression

La résistance à la compression se traduit par la charge limite par unité de surface à laquelle la brique peut résister sans être écrasée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_{max}}{S}$$

R_C : la résistance à la compression exprimée en Bar ;

F_{max} : force de compression maximale supportée exprimée en daN ;

S : surface du bloc étudiée exprimée en cm^2 . $s = \frac{\pi d^2}{4}$

Il est à signaler que **1bar = 1,02daN / cm²**

IV.3.2 Résistance à la traction

C'est la charge limite par unité de section que le matériau peut supporter sans rupture. Cette résistance peut être déduite de la résistance à la compression.

$$R_t = \frac{R_c}{10}$$

IV.3.3 Résistance au cisaillement

C'est la sollicitation conventionnelle correspondante à la rupture de l'éprouvette soumise à un essai de flexion. On en déduit la résistance au cisaillement par :

$$R_{cis} = \frac{10R_c}{3}$$

R_{cis} : la résistance aux cisaillements (Bar) ;

R_c : la résistance à la compression (Bar).

IV.3.4 Retrait ou test d'Alcock

On mesure la longueur avant et après le séchage du matériau et la différence entre ces longueurs marque le retrait d'un matériau. Il est exprimé en pourcentage et donné par la formule suivante :

$$r = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100$$

L_i : Longueur initiale

L_f : Longueur finale

IV.3.5 Absorption d'eau

C'est la détermination du poids d'eau qui occupe les vides dans un bloc. On immerge les blocs à étudier dans l'eau pendant 48 heures. C'est le rapport de la différence de masse avant et après l'immersion qui détermine l'absorption d'eau.

$$A = \frac{M_e}{M_s} \times 100 \rightarrow A = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Avec :

M_e : Masse d'eau

M_h : Masse à l'état humide de la brique

M_s : Masse à l'état sec de la brique

IV.3.6 La masse volumique

On définit également la masse volumique sèche qui est la masse de la matière sèche contenue dans l'unité de volume. Diplôme la masse de grains. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$\rho_{éch} = \frac{M_{éch}}{V_{éch}}$$

$$V_{éch} = \frac{\pi d^2}{4} \times h$$

Avec $\rho_{éch}$: masse volumique de l'échantillon

$M_{éch}$: masse de l'échantillon

$V_{éch}$: volume de l'échantillon

Partie 2 :

Etudes Expérimentales

Dans cette partie, nous décrivons les méthodes utilisées, le matériel et les moyens de mise en œuvre pour former un matériau de construction à base de la latérite et du papier carton. Ainsi, cette partie va nous éclaircir sur l'identification et la caractérisation physique, chimique et minéralogique de la matière première utilisé ; ensuite, sur la préparation des différents traitements et leur application sur les échantillons ; puis, la caractérisation mécanique et le contrôle de tous les produits finis.

CHAPITRE V : CARACTERISATION DE LA MATIERE PREMIERE

Nous avons utilisé les matières premières suivantes :

- la latérite de Vontovorona qui constitue le matériau de base,
- la chaux Crystal
- les déchets de papiers carton.

Dans notre travail, nos échantillons de latérite proviennent de Vontovorona, commune rurale d'Alakamisy Antananarivo.

La connaissance des caractéristiques, surtout les caractéristiques physiques de la latérite, permettra de soulever une idée sur la potentialité de cette terre pour la fabrication d'un matériau de construction. Pour l'identifier, on devrait pratiquer quelques essais. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de laboratoires.

V.1 Caractéristiques physiques de la latérite de Vontovorona :

V.1.1 Mesure de la teneur en eau

Le but de celle-ci est de déterminer le poids d'eau contenu dans le sol. La caractérisation se fait par la méthode de la pesée, c'est-à-dire qu'on mesure le poids d'eau qui est la différence entre le poids du sol humide (naturellement) et le poids du sol sec (obtenu par le passage du sol humide dans une étuve de 105°C).

La teneur en eau noté W est alors obtenu par la relation :

$$W (\%) = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids du sol sec}} \times 100$$

V.1.2 Mesure du poids volumiques spécifiques

La détermination du poids volumiques spécifiques solides consiste à mesurer le poids et le volume des grains solides et à en déterminer le rapport. L'essai se réalise à l'aide d'un pycnomètre et l'échantillon ne doit pas contenir des éléments supérieurs à 4 mm

Le poids volumique des particules solides est donné par la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{M_2 - M_0}{V_0 - \frac{(M_1 - M_2)}{\rho_{w0}} \times k'} \times g$$

Avec γ_s : poids volumiques spécifiques solides en kN/m^3

M_0 : Masse de pycnomètre vide en g

M_1 : Masse de pycnomètre + échantillon sec + eau en g

M_2 : Masse de pycnomètre + échantillon sec en g

V_0 : Volume de pycnomètre en ml

g : Accélération de la pesanteur 10m/s^2

k' : Coefficient de correction de température qui est égale 1

ρ_{w0} : Masse volumique de l'eau distillée

Les données suivantes rappellent quelques caractéristiques physiques de la latérite de Vontovorona.

- Teneur en eau $W = 3,41 \%$
- Densité apparente $\gamma_d = 1,43 \text{ T/m}^3$
- Masse volumique apparente $\rho = 1,34 \text{ T/m}^3$
- Poids volumiques spécifique $\gamma_s = 2,78 \text{ T/m}^3$
- Couleur : Rouge

V.2 Composition chimique de la latérite de Vontovorona

V.2.1 But

On détermine les éléments majeurs constituant la latérite par la méthode de dosage.

V.2.2 Principe

On fait une méthode d'attaque de la latérite par du sulfate acide de potassium (KHSO_4). Et c'est à partir de la liqueur d'attaque obtenue qu'on fait les dosages des éléments de la latérite.

L'ensemble des résultats des analyses chimiques de la latérite de Vontovorona est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Composition chimique de la latérite de Vontovorona

Eléments	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P.F
Proportion en pourcentage massique (%)	20,81	28,20	25,75	0,01	0,02	17,87

V.3 Test granulométrique

V.3.1 But

L'analyse granulométrie par tamisage permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent le sol.

V.3.2 Principe

L'analyse consiste à séparer et classer les différents grains constituant l'échantillon à l'aide d'un tamis selon leur diamètre. Puis, le pourcentage des grains obtenus pour chaque tamis sont évalués.

➤ Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités soit sous leur forme numérique, soit sur leur forme graphique, c'est-à-dire la courbe granulométrique. Elle concerne les granulats d'un diamètre entre 80mm à 0.8mm.

Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis et le tamisât ou passant désigne la partie qui traverse le tamis.



Figure 4 : Un tamis pour l'analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage de la latérite de Vontovorona sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Analyse granulométrique

Module AFNOR (M)	Ouverture des tamis en mm	Refus cumulées en g	Refus cumulées en %	Tamis cumulées en %
31	1,000	13,00	5,20	94,80
29	0,630	38,00	15,20	84,80
26	0,315	96	38,40	61,60
23	0,160	163	65,20	34,80
20	0,080	210	84,00	16,00
–	FT	250	100,00	–

La courbe suivante (figure 5) présente l'analyse granulométrique par tamisage de la latérite de Vontovorona

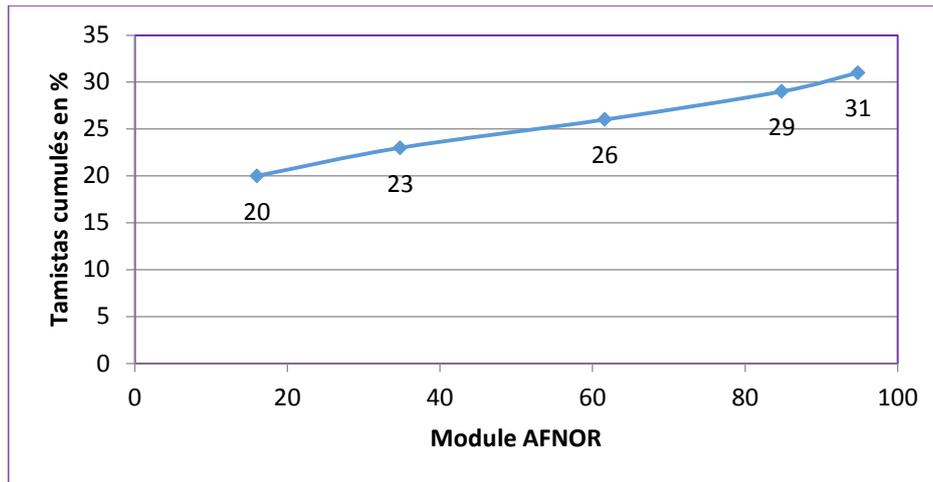


Figure 5 : Analyse granulométrique

V.4 La limite d'Atterberg :

V.4.1 But

La limite d'Atterberg, qui consiste à caractériser la cohésion d'un sol avec la teneur en eau, elle a pour but de calculer la limite de liquidité et la limite de plasticité afin d'en déduire l'indice de plasticité I_p .

V.4.2 Principe

La détermination de la limite d'Atterberg se fait en 2 parties :

➤ La limite de Liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique, on cherche la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol remanié placé dans une coupelle doit se refermer sur un centimètre de longueur sous l'effet d'environ 25 chocs répétés.

Préalablement, le matériau argileux est lavé au tamis de maille de 400 μm puis conservé pendant 24 h dans l'eau. Après décantation, il est laissé sur une plaque de plâtre pour séchage et homogénéisation avant d'être placé dans l'appareil de Casagrande où une rainure est creusée dans la coupelle comportant l'échantillon. La manivelle est tournée à une vitesse de 2 chocs par seconde jusqu'à ce que la rainure se ferme sur un centimètre.

➤ **La limite de plasticité**

La limite de plasticité est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide, on cherche la teneur pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionnée manuellement se fissure.

La limite de plasticité est déterminée grâce à la pâte argileuse du dernier essai de la limite de liquidité.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$W_P = (P_h - P_s) * 100$$

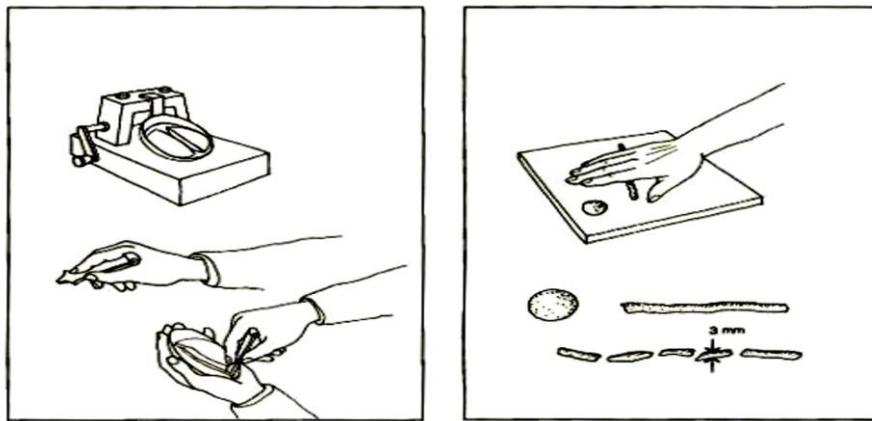


Figure 6 : Limites d'Atterberg, appareil de Casagrande et boudin de terre

➤ **L'indice de plasticité**

C'est la différence entre la limite de liquidité et celle de plasticité. Elle est donnée par la formule suivante :

$$(\%) I_p = W_L - W_P$$

Les types de sols selon la valeur d'indice de plasticité

Si $I_p < 1$: sol pulvérulent

$1 \leq I_p \leq 7$: sable Argileux

$7 \leq I_p \leq 17$: argile Sableux

$I_p \geq 17$: argile

➤ **L'indice de consistance**

C'est une variable, puisque la teneur en eau naturelle peut changer d'un jour à l'autre, ou d'une saison à l'autre.

La valeur de l'indice de consistance est obtenue par l'expression :

$$I_c = (W_L - W) / I_p$$

La consistance du sol selon la valeur de son indice

Si $I_c = 0$: liquide

$0 < I_c < 1$: plastique

$I_c = 1$: solide Plastique

$I_c > 1$: solide Ou semi- solide

Le tableau ci-après récapitule les résultats de limites d'Atterberg sur l'échantillon :

Tableau 6 : Limite d'Atterberg

LIMITE		INDICE	
Liquidité (%)	Plasticité (%)	Plasticité (%)	Consistance
35,95	24,35	11,60	1,83

La latérite de Vontovorona est moyennement plastique ($5 < I_p < 15$ et $W_L < 50$), l'indice de consistance de l'échantillon de latérite est supérieur à 1, ce qui implique que l'échantillon est semi-solide.

CHAPITRE VI : REALISATION DE L'EPROUVETTE

VI.1 Les matériels utilisés

Divers matériels et équipements ont été conçus dans ce travail. Ils sont nécessaires pour la réalisation des essais de fabrication des matériaux.



Photo 1 : une cuvette



Photo 2 : un tamis



Photo 3 : une balance



Photo 4 : une règle graduée



Photo 5 : une presse et une moule



Photo 6 : une table vibrante

VI.2 La préparation des matières premières utilisées

VI.2.1 La latérite

VI.2.1.1. Extraction

La latérite de Vontovorona a été extraite à l'aide d'une pelle. Il est nécessaire d'ôter les matériaux organiques à la surface du sol et d'extraire la latérite en profondeur pour éviter l'humus.

VI.2.1.2. Séchage

La latérite est encore humide, il faut d'abord la sécher. Nous avons la séché à l'air libre, à l'abri de l'humidité.



Photo 8 : Latérite humide



Photo 8 : Latérite sèche

VI.2.1.3. Broyage

Après le séchage, la technique de broyage permet de saupoudrer la matière première utilisée jusqu'à l'obtention des particules fines. Dans notre cas, on a fait le broyage manuel pour la latérite.



Photo 9 : Latérite broyé

VI.2.1.4. Tamisage

La terre ainsi broyée va passer dans un tamis, dont le tamisage est effectué à l'aide d'un tamis de 1 mm. On le fait pour éliminer les particules de granulométrie indésirable.



Photo 12: Tamisage 1



Photo 12: Tamisage 2



Photo 12 : Latérite fine

Voici un schéma résumant toutes ces étapes

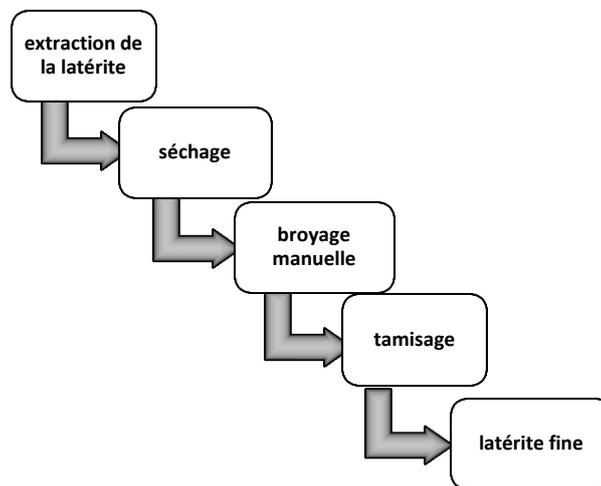


Figure 7 : Caractéristique physique de la chaux

VI.2.2 La chaux

Pendant toute notre étude, on a choisi d'utiliser la chaux commerciale CRISTAL.



Photo 13 : Chaux cristal

VI.2.3 Les papiers carton :

VI.2.3.1. Collecte des papiers carton

Elle permet la mise en commun de papiers carton d'origines diverses : comme les emballages industriels, les papiers des imprimeries, les emballages commerciaux, les vieux papiers, ...

VI.2.3.2. Hachage

Ce système consiste à morceler les papiers carton, favorisant la meilleure intégration de l'eau lors du trempage du papier carton dans l'eau.



Photo 14 : hachage du papier carton

VI.2.3.3. Pesage

Les papiers carton sont pesés à sec. Pour l'expérience, nous utilisons une balance électronique



Photo 15 : pesage du papier carton

VI.2.3.4. Trempage

Cette étape consiste à mélanger et humidifier les papiers et carton dans l'eau. Dans 1 Kg de pâte de papier, nous avons 250 g des papiers carton et 750 g d'eau.



Photo 16 : Trempage du papier carton

VI.2.3.5. Temps de repos

Le temps de repos est nécessaire pour faciliter le broyage du papier carton mouillé. Dans notre cas, le temps de repos était environ à 2 jours.

VI.2.3.6. Déchiquetage et broyage

Après le temps de repos, on procède ensuite au broyage et déchiquetage manuelle en petites morceau du papier carton.

Voici une photo montrant les déchets obtenus après broyage :



Photo 17 : Papier carton après broyage et déchiquetage

VI.2.3.7. Séchage

Nous allons séparer le solide et liquide afin de diminuer la quantité d'eau, car un excès d'eau peut rendre la pâte moelleuse et un manque d'eau peut rendre la pâte trop sèche. Nous avons séché la pâte de papier carton après son broyage.



Photo 18 : Séchage de la pâte de papier carton

Le diagramme suivant montre les étapes de la préparation du papier en carton.

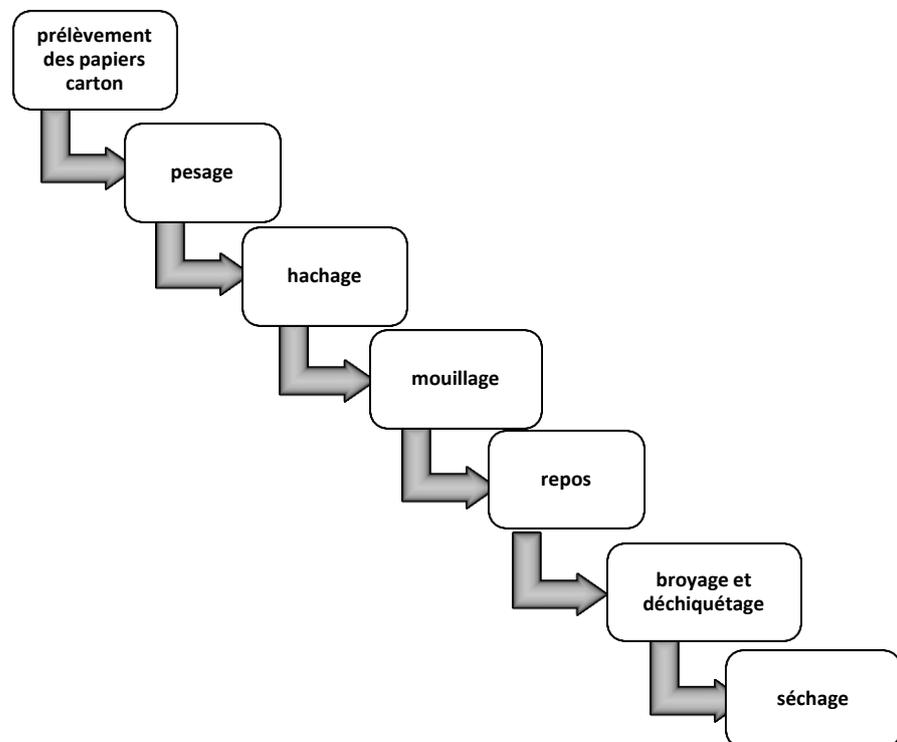


Figure 8 : Préparation des papiers carton

VI.3 Dosage

Avant de procéder au mélange des matières premières ; la chaux, la latérite, les papiers carton ont été pesée avec du balance électronique taré afin de respecter les proportions voulues.



Photo 21 : Pesage de la chaux



Photo 21 : Pesage de la latérite



Photo 21 : Pesage de la pate de papier carton

Nous avons effectué 6 formulations : le témoin (sans papier carton et de la chaux), et d'autres échantillons en variant la proportion des 2 constituants ce qui permettent d'apprécier l'effet de la stabilisation et l'effet sur l'ajout du papier carton. Le taux du chaux + papier carton sont fixés à 15% en masse de la latérite et l'eau à 20% en masse de la latérite.

Le tableau suivant regroupe les proportions des mélanges pour l'essai à réaliser :

Tableau 7 : Formulation des éprouvettes

essai	Latérite [g]	Chaux [g]	Papier carton [g]
N° 1	400	00	00
N° 2	340	40	20
N° 3	340	45	15
N° 4	340	50	10
N° 5	340	55	05
N° 6	340	60	00

VI.4 Homogénéisation du mélange

Dans un premier temps, la latérite est mélangée à sec avec les constituants. Lorsque le mélange est bien homogène, on ajoute une quantité d'eau en fonction de la teneur en eau optimum et à la proportion exacte des essais à faire. La spatule est utilisée pour le mélangeage, pour avoir une pâte.



Photo 22 : Début du mélange



Photo 23 : la pate

VI.5 Le moulage et démoulage :

VI.5.1 Les matériels utilisés

VI.5.1.1. Moule

La moule utilisé pour la confection de l'éprouvette est une moule cylindrique de dimensions intérieures : Diamètre $d = 5 \text{ cm}$;

Hauteur $h = 10 \text{ cm}$.

VI.5.1.2. Presse manuelle et table vibrante

Nous avons utilisé la presse manuelle et la table vibrante pour la confection de toutes les éprouvettes.



Photo 24 : La moule cylindrique



Photo 25 : La presse



Photo 26 : La table vibrante

VI.5.2 Le moulage

Le moulage doit se faire dans un moule préalablement huilé avant d'y introduire la pâte ainsi préparée, pour faciliter le démoulage de l'éprouvette et pour éviter le collage de la pâte aux matériels utilisés.

Il consiste à remplir la moule cylindrique de la pâte ainsi préparée avec un compactage à l'aide d'une presse et la table vibrante. Cela est dû au fait que l'objectif du compactage est de réorganiser les particules du sol pour qu'elles puissent bien se lier entre elles. Cela entraîne une augmentation de la densité de l'ensemble compacté et une diminution de sa perméabilité.

VI.5.3 Le démoulage

L'opération de démoulage se présente à la fin de toutes les opérations, il consiste à retirer verticalement le moule et en appuyant la pâte par la presse jusqu'à ce que le produit sorte légèrement du moule qu'il contient.



Photo 28 : Démoulage



Photo 27 : Eprouvette obtenue

VI.6 Séchage

Après l'obtention des éprouvettes, les éprouvettes obtenues vont sécher à l'air libre à l'abri de la chaleur, pendant 7 jours, avant d'être stocké.



Photo 29 : Eprouvettes humide

Après une semaine (7 jours), les éprouvettes seront prêtes, afin de connaître leurs caractéristiques physico-chimiques.



Photo 30 : Eprouvettes sèche

CHAPITRE VII : CARACTERISATION DES PRODUITS FINIS

Ce chapitre va nous décrire les propriétés qui peuvent nous donner des idées sur les qualités ou les imperfections des matériaux que nous avons formulés.

Les essais de base pour la caractérisation des produits finis sont :

- La masse volumique ;
- L'absorption d'eau ;
- La résistance à l'écrasement.

Le but de ces essais est de caractériser le matériau, afin de leur attribuer des utilisations qui leur sont convenables et adéquates.



Photo 31 : Eprouvettes faites

VII.1 La masse volumique

La masse volumique des échantillons a été mesurée sur les briques séchées à 7 Jours.

Le principe de mesure est de :

- Calculer le volume de l'échantillon ;
- Peser l'échantillon sec ;

La masse volumique est obtenu par :

$$\rho_{éch} = \frac{M_{éch}}{V_{éch}}$$

Avec : $M_{éch}$: masse de l'échantillon

$V_{éch}$: volume de l'échantillon

VII.2 Essai d'absorption d'eau

Le principe de mesure est de :

- Peser les échantillons secs
- Immerger les échantillons dans l'eau pendant 24 heures, durée pendant laquelle, dans la plupart des essais, on obtient le poids constant.
- Peser les éprouvettes humides



Photo 32 : Immersion de l'échantillon dans l'eau et pesage humide

Le taux d'absorption d'eau est défini par :

$$A = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Avec : Mh : masse humide

Ms : masse sèche

VII.3 La résistance à la compression

L'essai d'écrasement permet de mesurer la résistance à la compression des échantillons. Ils sont écrasés à plat. L'appareillage utilisé pour déterminer les valeurs de la résistance à la compression de nos éprouvettes est une presse universelle TESTWELL du laboratoire de RDM Bloc Technique Ankatso. La force de pression est réglée à 2000daN.

Le principe est de soumettre un échantillon de bloc à une compression jusqu'à la rupture. L'objectif est de déterminer la résistance nominale en compression de l'éprouvette.

- Poser l'échantillon entre les plateaux de la presse
- Appliquer la charge jusqu'à la rupture complète de l'échantillon

- Relever la charge maximale supportée par l'échantillon au cours de l'essai qui est lue sur le cadran de la machine TESTWELL.

Voici la machine de TESTWELL utilisée pour mesurer la résistance à la compression.

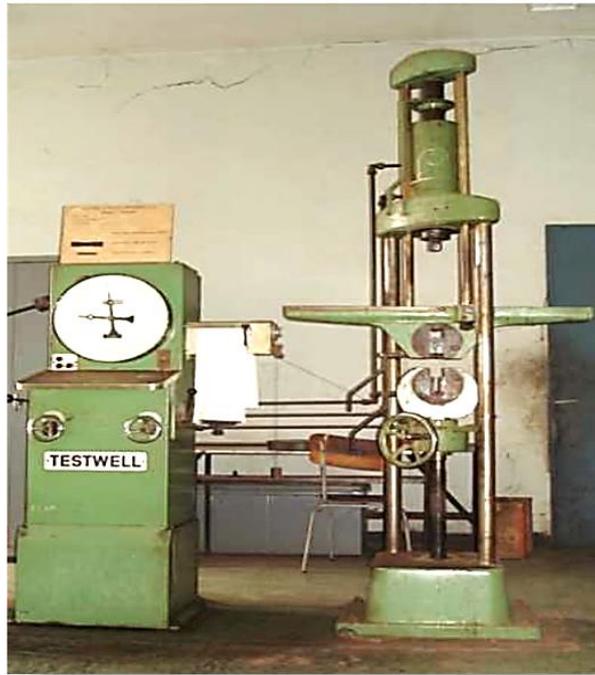


Photo 33 : Appareil de mesure des résistances mécaniques – TESTWELL



Photo 34 : Ecrasement de l'échantillon

La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F_{max}}{S}$$

CHAPITRE VIII : RESULTAT ET INTERPRETATION

Les analyses des essais mécaniques sur la résistance des matériaux, la comparaison des résultats entre les différents essais sont exposées dans cette partie. Elles permettent d'ouvrir la discussion sur la qualité de notre travail.

VIII.1 Résultat

VIII.1.1 La masse volumique

Les résultats des mesures pour la masse volumique sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Résultats obtenus de la masse volumique de l'éprouvette séchée à 7 jours

essai	Masse échantillon sèche [g]	Masse volumique [g / cm ³]
N° 1	208	1,89
N° 2	223	1,33
N° 3	255	1,33
N° 4	264	1,45
N° 5	261	1,39
N° 6	308	1,63

La courbe ci-dessous illustre l'évolution de la masse volumique de l'éprouvette selon les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus.

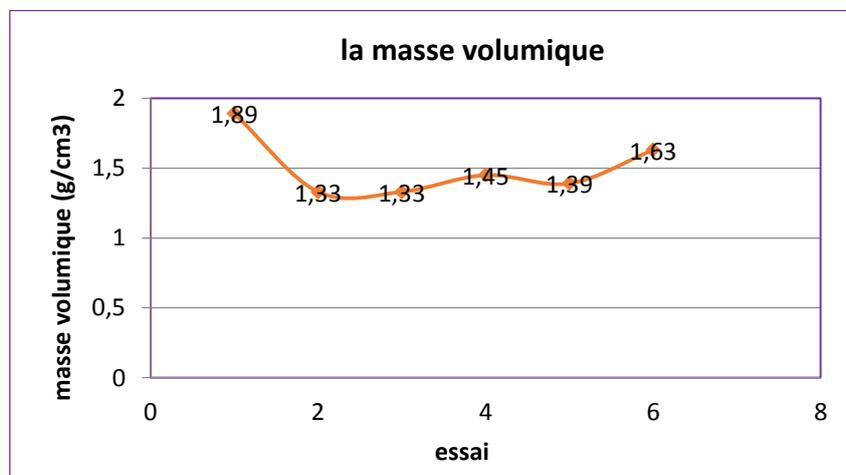


Figure 9 : Courbe de la masse volumique

VIII.1.2 Essai d'absorption d'eau

L'immersion des échantillons dans l'eau pendant 24 heures, permet d'obtenir les résultats suivants :

Tableau 9 : Résultats obtenus de l'essai d'absorption d'eau

essai	m_i [g]	m_2 [g]	A [%]
N° 1	208	211	01,44
N° 2	223	270	21,07
N° 3	255	297	16,47
N° 4	264	305	15,53
N° 5	261	296	13,40
N° 6	308	315	02,27

Les figures suivantes montrent respectivement l'évolution de l'absorption d'eau des échantillons :

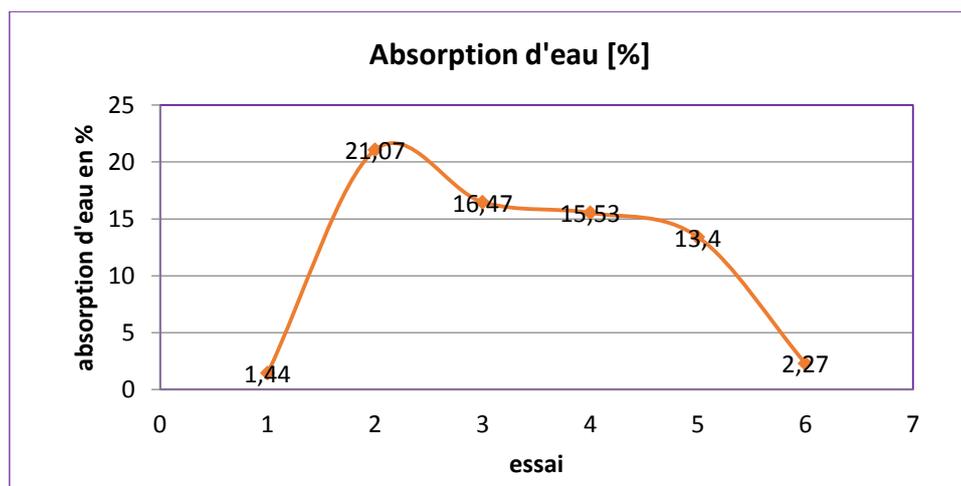


Figure 10 : Variation de l'absorption d'eau

VIII.1.3 La résistance à la compression

Les résultats des essais de compression effectués sur tous les échantillons sont donnés dans les tableaux ci-dessous. La surface de compression de l'éprouvette est $S = 19.63 \text{ cm}^2$

Tableau 10 : Résultats l'essai de la résistance à la compression 1

essai	Latérite [g]	Chaux [g]	Papier carton [g]	Rc maximal [MPa]
N° 1	400	00	00	0,178
N° 2	340	40	20	0,101
N° 3	340	45	15	0,224
N° 4	340	50	10	0,219
N° 5	340	55	05	0,173
N° 6	340	60	00	0,163

La courbe représentative de la variation de la résistance à la compression de l'éprouvette, selon les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus, est représentée par la courbe suivante :

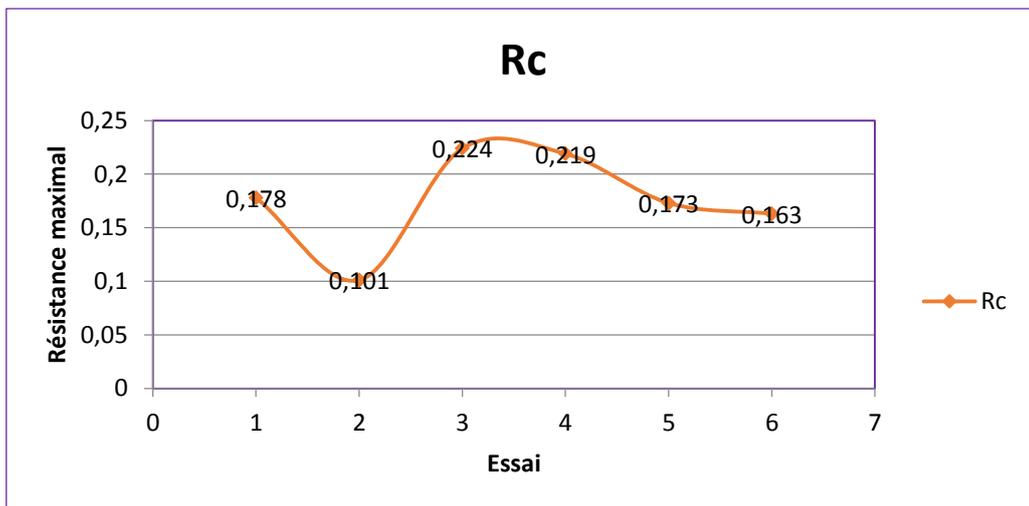


Figure 11 : Courbe de l'essai de la résistance à la compression

VIII.2 Interprétation et discussions

A partir des analyses et résultats précédentes, cette étude concernant la stabilisation de la latérite avec la valorisation du papier carton incite plusieurs discussion, dans ce cas, l'objectif de cette discussion sert à :

- Remarquer l'évolution d'un état, les changements qui apparaissent,
- interpréter les résultats obtenues ;
- prendre ou en tirer la conclusion

VIII.2.1 Interprétations

VIII.2.1.1. Généralités

Durant l'étude expérimentale, nous essayons de fabriquer des éprouvettes à partir des différentes proportions de la composition (la latérite, la chaux, le papier carton). Et c'est à partir de cette expérience qu'on a pu constater la différence de la couleur des éprouvettes sèches, ainsi que son aspect morphologique selon leurs compositions faites.

On remarque aussi, que le poids des éprouvettes N°1 et N°6, c'est-à-dire l'essai témoin et l'essai sans ajout de papier carton, ne varient que peu.

VIII.2.1.2. Interprétations sur la résistance à la compression :

La variation des proportions des constituants aux essais, nous mène à des différentes valeurs de la résistance à la compression.

Le tableau ci-dessous nous donne les proportions et valeur de compression :

Tableau 11 : Résultats l'essai de la résistance à la compression 2

essai	Latérite [%]	Chaux [%]	Papier carton [%]	Rc maximal [MPa]
N° 1	100	0	0	0,178
N° 2	85	10	5	0,101
N° 3	85	11,25	3,75	0,224
N° 4	85	12,5	2,5	0,219
N° 5	85	13,75	1,25	0,173
N° 6	85	15	0	0,163

La résistance à la compression de l'éprouvette se trouve entre [0,178 – 0,224] MPa, équivaut à (1,78 – 2,24) Bars.

Ainsi :

- Pour une proportion de (100-10-5), une chute de la résistance à la compression a été observée.
- Pour l'essai N°3, la résistance atteint une valeur maximale de 0,224 MPa.
- La valeur moyenne de la résistance à la compression est égale à 0,176 MPa

VIII.2.1.3. Interprétations sur l'essai d'absorption :

La figure 10 montre la variation d'absorption d'eau de différents essais, cette variation est en fonction de la compacité de l'éprouvette, plus que l'éprouvette est plus compacte, le taux d'absorption d'eau diminue mais si l'éprouvette est moins compacte, alors, le taux d'absorption d'eau augmente.

Ainsi :

- Dans ces essais, les essais 1 et 6 ont le taux d'absorption d'eau le plus bas ;
- tandis que l'essai 2 présente le taux d'absorption d'eau la plus élevée ;
- la valeur moyenne de l'absorption est de 11,69%

VIII.2.1.4. Interprétations sur la masse volumique :

La figure 9 illustre l'évolution de la masse volumique de l'éprouvette de différents essais en fonction des proportions de différents essais faits. Dans ces essais, la masse volumique de l'essai témoin et l'essai 6 (sans papier carton) présentent la plus élevée. Comme l'essai N° 2 et N° 3 ont la masse volumique le plus bas.

VIII.2.2 Discussion

VIII.2.2.1. Discussion sur la résistance à la compression :

La résistance à la compression atteint une valeur maximale de 0,224 MPa, pour l'essai N°3. La diminution de la résistance est due à la diminution du taux de de papier utilisé, même si la proportion en chaux a été augmentée. Pour l'essai N°6, pour une proportion de 15% en chaux, ce qui est le maximale pour notre études, la valeur de la compression est encore inférieur que celle de l'essai N°3.

Le papier en carton présente alors une propriété stabilisant, car elle augmente la résistance de compression pour notre échantillon. Pour notre étude, le taux idéal est de 3,75%.

VIII.2.2.2. Discussion sur l'essai d'absorption :

D'après la figure 10, le taux d'absorption d'eau présente une grande différence pour les différents essais. Pour les échantillons contenant du papier, le taux d'absorption est de 6 à 10 fois supérieures que celle des échantillons à 0% de papier. Les éprouvettes deviennent de plus en plus perméables par rapport à l'éprouvette témoin. Le papier à l'intérieur des éprouvettes faites absorbent de l'eau jusqu'à sa saturation.

VIII.2.3 Conclusion

Les essais de stabilisation de la latérite nous donnent de bons résultats. Le test de la résistance a montré que, pour une proportion de 3,75%, on a une valeur maximale, pour le cas de notre étude. Toutefois, notre échantillon est très vulnérable à l'eau, le taux d'absorption s'accroît avec l'augmentation de la proportion en papier. L'augmentation de la chaux est alors nécessaire, pour maîtriser l'eau contenant dans l'échantillon.

CHAPITRE IX : APPLICATION AU MATERIAU DE CONSTRUCTION

Dans ce travail, on a fabriqué une brique compressé, et on a utilisé une moule parallélépipédique de dimension 22 Cm de longueur, 11Cm de largeur et 10 Cm de hauteur.

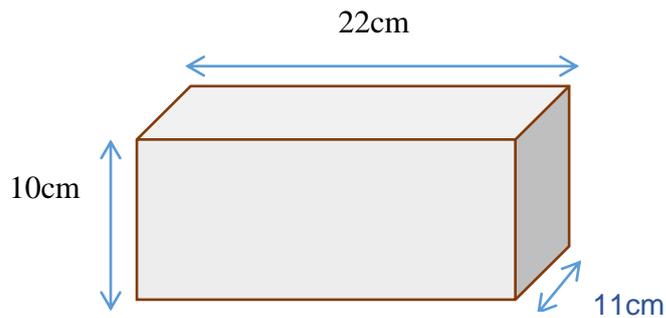


Figure 12 : Schéma du moule

IX.1 Le procédé général de fabrication de la brique :

Le procédé de la fabrication de la brique est décrit selon le diagramme ci-dessous :

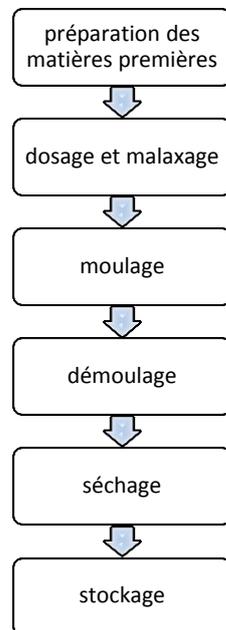


Figure 13 : Fabrication de la brique

IX.2 Fabrication de la brique compressée:

IX.2.1 Préparation des matières premières :

Dans le présent travail, après extraction, séchage, et broyage, la latérite est tamisée pour avoir des particules fines.

Les papiers carton sont trempés dans l'eau pendant 2 jours, pour qu'ils deviennent facile à densifier afin d'avoir des pâtes à papier, puis les séché pour diminuer la quantité d'eau.



Photo 35 : La latérite fine



Photo 36 : papier carton après broyage et déchetage

IX.2.2 Dosage et malaxage :

Après avoir préparé les matières premières, on peut passer à la production. On mélange à sec la latérite fine avec du papier carton séché et quelque ajout de la chaux. L'eau est obligatoirement nécessaire pour la liaison des trois matières, alors on humidifie le mélange à la teneur en eau optimal du moulage. Ensuite, on procède au malaxage afin d'avoir la consistance requise (une pâte : ni trop liquide, ni trop onctueux). Le malaxage se fait manuellement avec de la spatule.

IX.2.3 Moulage :

Après l'homogénéisation de la pâte, on passe maintenant au moulage. Elle consiste à introduire la pâte ainsi préparé dans le moule à brique, mais avant d'y verser, le moule doit préalablement lubrifié. Le matériau va prendre une forme dans un moule bien déterminé.



Photo 37 : Moule de la brique compressé

IX.2.4 Pressage et Démoulage :

Cette opération consiste à presser le mélange à l'aide de la machine TESTWEL d'Ankatso, qui permet au compactage de la matière. Enfin, pour le démoulage, la machine à piston presse facilement la matière jusqu'à ce que la brique sorte du moule qu'il contient.



Photo 38 : Démoulage de la brique 1



Photo 39 : Démoulage de la brique 2

IX.2.5 Séchage :

Le séchage se fait naturellement en mettant les briques à l'abri du soleil , à l'air ambiant car l'action des rayons solaires peut entraîné leur fissuration. De plus, le brique doit être protégé contre la pluie et l'humidité pour favoriser leur maturation. Il suffit donc de trouver un endroit espacé et aéré pour les sécher.



Photo 40 : Brique après séchage

Conclusion générale

Actuellement, la préoccupation de l'homme se penche de jours en jours, sur la protection de l'environnement. Le traitement des déchets est l'un des sujets qui occupe une grande place pour les chercheurs. Pendant notre étude, on a choisi de faire la revalorisation des papiers cartons, car ces matériaux existent en grande quantité en tant que déchets d'emballage, dans la vie courante des Malgaches.

Des recherches ont été déjà faites sur le recyclage ou la régénération des papiers, mais on pense d'apporter notre contribution de recherche sur la revalorisation de ces matériaux. On a choisi d'utiliser les déchets de papiers comme élément stabilisant et charge de la latérite, pour obtenir un nouveau matériau à utiliser comme matériau de construction.

Six essais ont été faits durant notre expérimentation, et on a pu conclure que pour l'essai N°3, qui a pour proportion 11,25% de chaux, 3,75% de papier, et 85% de latérite ; que l'on peut avoir un maximum sur la résistance en compression après séchage. L'absorption d'eau pour les éprouvettes contenant du papier, pose un peu de problème, car elle absorbe et retient l'eau, ce qui fragilise le matériau.

Notre nouveau matériau présente une bonne caractéristique mécanique, la force de compression a été doublée par rapport au témoin. Grâce à cette propriété, on peut suggérer l'utilisation de ce nouveau matériau, pour la construction d'une plaque, ou d'un mur de bâtiment.

Pour avoir un matériau plus concurrentiel, une étude plus profonde doit être faite, pour augmenter la caractéristique physico-chimique du matériau. On projette de faire une transformation de papier en poudre, ou en fibre afin de réduire l'absorption d'eau ; et ça va aussi augmenter la caractéristique isophonique du matériau.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] HOUBEN Hugo, Guillaud Huber, DAYRE Michel ; «L'encyclopédie de la construction en terre» Marseille : parenthèses, vol.1, 1989
 - [2] Mahamadou SOULEY ISSIAKOU : « Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au NIGER » thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université de bordeaux
 - [3] RANAIVOARIVONY Faratiana Hélie, « étude de valorisation de la patate douce : application à la stabilisation des terres argileuses »promotion 2012, mémoire fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie chimique
 - [4] ANDRIAMIHAJA RAKOTOARILINA B. « Etude chimique des latérites des Hauts plateaux de Madagascar ». Thèse de 3^{ème} cycle en Chimie minérale. Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, 1988
 - [5] SEGALEN P. Les sols ferrallitiques et leur répétition géographique. Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et Thèses. Tome 1, 2, 3, Paris, 1994.
 - [6] La Croix : « Minéralogie de Madagascar : latérite et terre rouge », Tome II, 1923.
 - [7] AUTRET Paul, Latéritiques et Graveleux latéritique, 1983, 37p
 - [8] RATOVONDRAHONA Joahary Hasina, RAKOTONIRINA Zo Ny Aina: « Essai de fabrication d'une résine minérale par le procédé de géopolymerisation » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondie
 - [9] RAFIDINIAINA Lôlô Henri : « Banques de données pluridisciplinaires sur les latérites » Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Ingénierie et Gestion de Projets Industriels, 2008
 - [10] RAKOTONDRAVALY Désiré Alphonse, « Essai de fabrication de briques en terre stabilisée, à base de stabilisants routiers, cas de la latérite de VONTOVORONA », DEA Sciences des Matériaux 2003
 - [11] RAKOTONIRINA Zo Ny Aina et RATOVONDRAHONA Joahary Hasina, « Etude de fabrication de matériaux de construction en terre stabilisée par extrusion », Mémoire de fin d'étude : Génie chimique 1999
 - [13] DOAT Patrice, HAYS Alain, HOUBEN Hugo, MATUK Silvia et VITOUX François, (1979). Construire en terre
 - [14] U.WYSS., (2005). La construction en matériaux locaux
 - [15] RANDRIANJATOVO Sizaza Brucia : Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Licence en Science et Ingénierie des Matériaux. « contribution à l'étude de la production de la chaux à l'échelle artisanale, cas d'un four a meule amélioré » Promotion 2015
 - [16] RAZANAJATOVO Harinivo Olsynthique : « étude comparative et amélioration des productions de la chaux de Belobaka Mahajanga et d'Ambatosokay Ambatondrazaka » : mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur matériaux Promotion 2012
-

- [17] cours Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine S5-AU 2016-2017 « LIANT MINERAUX »
- [18] P.DELAGE et B.A.SCHREFLER. (2001)
- [19] ZAFINDRALAMBO Herizo Michael « Contribution à l'élaboration et caractérisation physico-chimiques d'une brique de polystyrène expansé », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master 2, 2016
- [20] MAHAMAT SALEH IBRAHIM YACOUB, « Etude comparative entre l'amélioration des briques en terre comprimée stabilisée par le ciment et la chaux éteinte », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, promotion 2009 / 2010
- [21] RANDRIANANTENAINA Lovaritiana, « contribution à l'étude de la stabilisation de la latérite par le purin de bœuf », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'ingénieur en génie chimique, promotion 2012
- [22] ANDRIAMAMONJISOA José Laurent « Proposition de valorisation des déchets solides industriels », Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de master 2, 2016
- [23] RABETAFIKA Heriniaina « Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau latérite renforcé par des fibres cellulosiques »
- [24] RAMAROLAHY Andry Heriniaina « contribution à l'étude de valorisation des déchets cellulosiques en matériaux de construction », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'ingénieur Science et Ingénierie des Matériaux, 2008
- [25] RANDRIAMAHEFA Andrianalison Misa « Contribution à l'étude de valorisation des déchets papiers-cartons en briques de liant-papiers » ; Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieure en génie chimique, 2011
- [28] ANDRIAMANAMPISOA Tsiry Angelos, « Contribution à la valorisation des déchets papiers cartons : le liant –papier », Mémoire de fin d'Etudes

WEBOGRAPHIES

- [12] www.dechets.Picardie.com, consultée le 7 Mars 2018
 - [26] [www. Ciment.wikibis.com](http://www.Ciment.wikibis.com), consultée le 16 Janvier 2018
 - [27] <https://fr.m.wikipedia.com>, consultée le 12 Mars 2018
-

Table des matières

Remerciements.....	i
Sommaire	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux.....	iv
liste des photos.....	v
notationsvii	
Introduction générale	1
Partie 1 : Etudes Bibliographiques.....	3
CHAPITRE I : Recyclage des papiers carton	5
I.1 Généralités : [22], [28].....	5
I.2 La cellulose.....	5
I.2.1 Propriétés [23], [28]	6
I.2.2 La fibre cellulosique est une importante matière première industrielle : [23].....	6
I.2.3 Les objectifs de la valorisation des déchets cellulosiques [24].....	6
I.3 Les papiers carton : [25], [27]	7
I.3.1 Structure du papier :.....	7
I.3.2 Structure du carton :.....	7
I.3.3 Usages des cartons	8
I.4 Valorisation des déchets [12], [24], [25]	8
I.4.1 La récupération des matières premières.....	9
I.4.2 La réutilisation comme matières premières de substitution.....	9
I.4.3 La valorisation énergétique.....	9
I.4.4 Valorisation des déchets en compostage :	9
I.4.5 Origine des déchets des produits en papiers cartons.....	9
I.4.6 Les types de déchets à valoriser :.....	10
I.5 Valorisation des déchets de papier/carton [24].....	10

I.5.1	Ouate de cellulose	10
I.5.2	Papier toilette	11
I.5.3	Fibres cellulosiques de récupération	11
I.6	Produits obtenus de la valorisation des déchets de papier et de carton [24]	11
I.6.1	Incorporation à certains matériaux.....	11
I.6.2	Fabrication de panneaux pour la construction	11
I.6.3	Les papiers kraft.....	11
	CHAPITRE II : La latérite	12
II.1	Définition : [1], [2]	12
II.2	Formation de la latérite [3]	12
II.2.1	Origine.....	12
II.2.2	Facteur de transformation.....	13
II.3	Les compositions chimiques et minéralogiques de la latérite [4], [5]	13
II.4	Classification de la Latérite [6].	14
II.4.1	Classification de Martin et Doyenne	14
II.4.2	Classification de A. Lacroix.....	14
II.4.3	Intensité de latérisation [7].....	15
II.5	Caractéristiques des sols latéritiques [8], [9].....	15
II.5.1	Caractéristique spécifique	15
II.5.2	Couleur.....	15
II.6	Utilisation de la latérite : [3], [21]	16
	CHAPITRE III : La chaux et la technique de stabilisation	17
III.1	La stabilisation : [8], [10], [11], [13], [14]	17
III.1.1	Définition :	17
III.1.2	Objectifs :	17
III.1.3	Types de stabilisation	17
III.1.4	Les stabilisants :	18
III.1.5	Mécanisme de la stabilisation [10].....	18
III.2	La chaux	20

III.2.1	Définition : [15], [16], [26],	20
III.2.2	Réaction chimique.....	20
III.2.3	Classification [17]	21
III.2.4	Caractéristiques et propriétés chimiques : [15].....	22
III.2.5	Caractéristiques physiques : [15]	22
III.2.6	Utilisation de la chaux : [18], [15]	23
CHAPITRE IV : Effet de la chaux sur la stabilisation de la latérite		24
IV.1	Stabilisation à la chaux [16]	24
IV.1.1	Principe :	24
IV.1.2	Action de la chaux sur le sol :	24
IV.2	Théorie de la réaction chimique entre le sol et la chaux. [19], [20]	25
IV.2.1	Dessiccation. (Absorption d'eau).....	25
IV.2.2	Echange cationique	25
IV.2.3	Floculation et agglomération.....	25
IV.2.4	Carbonatation	26
IV.2.5	Réaction pouzzolanique	26
IV.3	Caractérisation des terres stabilisées [3], [10].....	26
IV.3.1	La résistance à la compression	26
IV.3.2	Résistance à la traction	27
IV.3.3	Résistance au cisaillement.....	27
IV.3.4	Retrait ou test d'Alcock.....	27
IV.3.5	Absorption d'eau	28
IV.3.6	La masse volumique.....	28
: Etudes Expérimentales.....		30
CHAPITRE V : Caractérisation de la matière première		31
V.1	Caractéristiques physiques de la latérite de Vontovorona :.....	31
V.1.1	Mesure de la teneur en eau	31
V.1.2	Mesure du poids volumiques spécifiques.....	32

V.2	Composition chimique de la latérite de Vontovorona	33
V.2.1	But	33
V.2.2	Principe.....	33
V.3	Test granulométrique	33
V.3.1	But	33
V.3.2	Principe.....	33
V.4	La limite d'Atterberg :	35
V.4.1	But	35
V.4.2	Principe.....	35
	CHAPITRE VI : Réalisation de l'éprouvette	38
VI.1	Les matériels utilisés	38
VI.2	La préparation des matières premières utilisées	39
VI.2.1	La latérite.....	39
VI.2.2	La chaux	40
VI.2.3	Les papiers carton :	41
VI.3	Dosage	44
VI.4	Homogénéisation du mélange	45
VI.5	Le moulage et démoulage :	45
VI.5.1	Les matériels utilisés	45
VI.5.2	Le moulage	46
VI.5.3	Le démoulage	46
VI.6	Séchage.....	47
	CHAPITRE VII : Caractérisation des produits finis	48
VII.1	La masse volumique	48
VII.2	Essai d'absorption d'eau.....	49
VII.3	La résistance à la compression	49
	CHAPITRE VIII : Résultat et interprétation.....	51
VIII.1	Résultat	51
VIII.1.1	La masse volumique	51
VIII.1.2	Essai d'absorption d'eau.....	52

VIII.1.3	La résistance à la compression	52
VIII.2	Interprétation et discussions	53
VIII.2.1	Interprétations	54
VIII.2.2	Discussion.....	55
VIII.2.3	Conclusion.....	56
CHAPITRE IX	: Application au matériau de construction.....	57
11 cm	57
IX.1	Le procédé général de fabrication de la brique :	57
IX.2	Fabrication de la brique compressée:	58
IX.2.1	Préparation des matières premières :.....	58
IX.2.2	Dosage et malaxage :.....	58
IX.2.3	Moulage :.....	59
IX.2.4	Pressage et Démoulage :	59
IX.2.5	Séchage :	60
	Conclusion générale.....	61
	bibliographies.....	63
	webographies	64

Auteur: ANDRIANARIMANANA Andoniaina Herizo

Adresse: Bâtiment 413 G, Cité D Camps Michelier Antsirabe

Téléphone: 033 50 184 75

Titre : « Contribution à la valorisation des déchets en papier - Utilisation dans les matériaux de construction »

Nombre de pages : 62

Nombre de figures : 13

Nombre de photos : 40

Nombre de tableaux: 11

RESUME

L'objectif de cette étude consiste à valoriser les déchets en papier carton. C'est une étude préliminaire qui essaye de stabiliser la latérite, en mélangeant la latérite avec de la chaux, pour avoir un nouveau matériau de construction.

Les recherches et essais mécaniques ont prouvé que, les éprouvettes de proportion 3,75% en masse possèdent une résistance maximale. Mais, par rapport à l'abondance des papiers, les éprouvettes absorbent plus d'eau, et qui peut être nuisible à la qualité de notre matériau.

La valorisation de déchets de papiers est très réussie, même si on l'a utilisé à l'état brut. Afin de donner un meilleur résultat, on projette de traiter les déchets en papier pour donner les fibres cellulosiques, qui pourraient donner une meilleure caractéristique du nouveau matériau.

Mots clés: latérite, stabilisation, valorisation, papier carton

ABSTRACT

The objective of this study is to recycle paper cardboard waste. This is a preliminary study that trying to stabilize laterite, by mixing with the lime, to have a new stronger material.

The research and mechanical tests have shown that the 3, 75 mass % test pieces have a maximum strength. But, compared to the abundance of papers, specimens absorb more water, which can be detrimental to the quality of our material.

The recovery of waste paper was very successful, even if it was used in the raw state. In order to give a better result, we plan to process the waste paper to have a cellulosic fiber, which could give a better characteristic of the new material.

Key words: Paper, waste, recycle, laterite

Encadreur: Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine