

1.4. Bilan des encadrements et animation des équipes de recherche

1.4.1. Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)

1. **RAKOTOMAVO Fanambinantsoa Harimanana**, 2010 « *Contribution à l'étude et à l'amélioration des traitements physiques des eaux usées* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement - Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
2. **RAKOTOARISON Solofohery Haja**, 2010 « *Contribution au traitement et à la valorisation des ordures ménagères – Cas de la Commune urbaine d'Antananarivo* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement - Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
3. **AMARILLIS Kamil Abdallah**, 2014 « *Contribution à l'étude de la valorisation par compostage des déchets solides de la Commune rurale d'Andoharanofotsy* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
4. **RALINIRINA Holisoa Rantsaniaina**, 2014 « *Contribution à la valorisation des minerais de fer en vue de la synthèse de ferrate et de sulfate ferrique appliqués dans le traitement des eaux* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
5. **MANDIMBISOA Maholy**, 2014 « *Installation d'une unité pilote de valorisation des déchets plastiques en matériaux de construction : tuile et brique* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
6. **RANDRIANANTENAINA Lovaritina**, 2014 « *Etude de faisabilité d'un projet de production d'huile à l'échelle artisanale améliorée implanté à Ambohidanerana- Commune urbaine de Soavinandriana, Région Itasy* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
7. **RANAIVOJAONA Mbololontsoa Sendrahasina**, 2014 « *Contribution à l'amélioration du secteur assainissement incluant la gestion d'excréta en milieu défavorisé – Cas de Belanitra* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.

8. **NAMBAVELO Dyno, 2014** « *Contribution à l'étude de la stabilisation de la latérite par le purin de bœufs additionné d'engrais azoté et de sucre* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
9. **RAJAONESY Philippe Henintsoa Lalaina, 2015** « *Conception et étude comparative de faisabilité de mise en place de deux modèles de biodigesteurs pilotes de méthanisation : plug flow et cloche flottante pour le traitement des effluents d'une porcherie dans la Région Vakinankaratra* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
10. **RALIBERA Andriamifidy Gérard, 2015** « *Evaluation multicritère des stratégies d'évaluation des stratégies d'approvisionnement en énergie des ménages à Madagascar* » DEA en Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.

1.4.2. Diplôme de Master

RAHOASA Judicaëla Elisane, 2016 « *Contribution à l'étude de la stabilisation biotechnologique de la latérite : activation par la vinasse de canne à sucre* » Master II en génie des procédés chimiques et industriels, Ecole Supérieure Polytechnique – Université d'Antananarivo.

1.4.3. Diplôme d'ingénieur

1. **RATSANDRAHIANA Elynda Margaux, 2013** « *Contribution à l'élaboration d'une unité pilote d'extraction des principes actifs des plantes : cas de tabac et vetiver* » Diplôme d'ingénieur en génie chimique, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.
2. **RANDRIANANTENAINA Lovaritina, 2013** « *Contribution à l'étude de la stabilisation de la latérite par le purin de bœuf – Cas de la latérite de Vontovorona* » Diplôme d'ingénieur en génie chimique, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo.
3. **ANDRIANTSITOHAINA Faly Fiononana José, 2014** « *Contribution à la fabrication des matériaux composites à base de balle de riz et de déchets plastiques* » Diplôme d'ingénieur en science et ingénierie des matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo.

1.4.3. Thèse

1. **RAJOELISON Falihery, 2016/2017** « *Etude de traitement des eaux polluées par les métaux lourds par phytoremédiation* » Ecole doctorale Ingénierie et géosciences – Ecole supérieure Polytechnique – Université d’Antananarivo (En cours)

Directeur de thèse : Professeur ANDRIANAIVORAVELONA Jaconnet Oliva

Encadreur : RAMAROSON Jean de Dieu

1.5. Activités pédagogiques (enseignements, ...)

Enseignant vacataire à la mention génie des procédés chimique et industriel de l’Ecole Supérieure Polytechnique – Université d’Antananarivo.

Unité d’enseignement : *Littérature scientifique*

Elément constitutif : *Valorisation des travaux de recherche (2 crédits)*

1.6. Responsabilités pédagogiques et administratives

Membre du bureau permanent du Collège des chercheurs

Membre correspondant de l’Akademia Malagasy

2. DOCUMENT DE SYNTHESE

TRAVAUX DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ANNEXES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES PHOTOS	vi
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. GENERALITES SUR LA LATERITE	4
1.1. DEFINITION	4
1.2. FORMATION DE LA LATERITE	4
1.3. INTENSITE DE LATERISATION :	6
1.4. CLASSIFICATION DES LATERITES	6
1.5. STRUCTURE DE LA LATERITE	8
1.6. CONSTITUANTS DES LATERITES :	9
1.7. UTILISATIONS	10
2. STABILISATION.....	12
2.1. PRINCIPE.....	12
2.2. OBJECTIFS	13
2.3. DIFFERENTES TECHNIQUES DE STABILISATION	13
2.4. MECANISME DE STABILISATION DE LA LATERITE	17
2.5. LES STABILISANTS	18
3. METHODE D'ANALYSE ET DE CARACTERISATION DU SOL.....	19
3.1. ANALYSE PHYSIQUE	19
3.2. ANALYSE CHIMIQUE :	24
3.3. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES	24
3.4. ANALYSE MINERALOGIQUE	29
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA LATERITE	32
1. LOCALISATION DU LIEU DE COLLECTE DES ECHANTILLONS.....	33
2. MODE DE COLLECTE DES ECHANTILLONS.....	34
2.1. COLLECTE POUR LA CARACTERISATION.....	34
2.2. COLLECTE POUR LES ESSAIS DE STABILISATION.....	35

3. RESULTATS ET INTERPRETATION.....	35
3.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	35
3.2. COMPOSITION CHIMIQUE ELEMENTAIRE	39
3.3. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES	41
3.4. COMPOSITION MINERALOGIQUE.....	42
TROISIEME PARTIE : ETUDE DE LA STABILISATION DE LA LATERITE PAR LES MICRO-ORGANISMES.....	45
1. PROCESSUS DES ESSAIS DE STABILISATION.....	46
1.1. CONFECTION ET PREPARATION DES MATERIELS.....	47
1.2. COLLECTE ET PREPARATION DES MATIERES PREMIERES ET CONSOMMABLES	48
1.3. DOSAGE DES MATIERES PREMIERES ET CONSOMMABLES	50
1.4. REDUCTION MICROBIENNE.....	53
1.5. MOULAGE/DEMOULAGE DES EPROUVETTES	54
1.6. SECHAGE ET PRISE	56
1.7. CARACTERISATION DES PRODUITS FINIS	58
2. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	59
2.1. REDUCTION MICROBIENNE.....	59
2.2. CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES.....	63
2.2.2.Caractéristiques des éprouvettes obtenues par séchage sous atmosphère contrôlé	75
2.2.3.Comparaison des résultats obtenus par rapport aux normes.....	79
2.2.4.Etude comparative par rapport à d'autres modes de stabilisation	82
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	85
BIBLIOGRAPHIE/ WEBOGRAPHIE	88
ANNEXES	91

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : DIFFRACTION DE RAYONS X	92
ANNEXE 2 : METHODE D'ANALYSE CHIMIQUE	95
ANNEXE 3 : LIMITE D'ATTBERG	97
ANNEXE 4 : ESSAI PROCTOR.....	98
ANNEXE 5 : CLASSIFICATION DE LA LATERITE PAR CRATerre.....	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des latérites selon LACROIX.....	7
Tableau 2: constituants majeurs de la latérite	9
Tableau 3 : Classification adoptée par l'AFNOR, basée sur l'analyse granulométrique	23
Tableau 4 : Classification des sols suivant la valeur de leur indice de plasticité.....	26
Tableau 5 : Conditions des essais PROCTOR selon la norme NF P 94 – 093.	27
Tableau 6 : Norme de qualité d'un sol selon l'indice de portance C.B.R.	28
Tableau 7 : Coordonnées géographiques des lieux de prélèvement des latérites.....	33
Tableau 8 : Teneur en eau des échantillons de latérite étudiés	35
Tableau 9: Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage de la latérite 1 et 2 de Vontovorona.....	36
Tableau 10 : Résultat de l'analyse granulométrique par sédimentation de la latérite 1 de Vontovorona.....	38
Tableau 11 : Composition chimique des latérites étudiées	40
Tableau 12 : Caractéristiques géotechniques des échantillons prélevés	41
Tableau 13 : Résultat de l'analyse minéralogique de la latérite 1.....	43
Tableau 14 : Composition de chaque échantillon	51
Tableau 15 : Normes ANTBM sur les briques.....	79
Tableau 16 : Résistance à la compression maximale des essais N° 4, 5, 6, 9, 10, 11 et 12	80
Tableau 17 : Résultats de la comparaison par rapport à d'autres modes de stabilisation	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Structure de la latérite selon RAZAFIMANDIMBY	8
Figure 2: Colonne de tamis	20
Figure 3 : Localisation des lieux de prélèvement des latérites.....	34
Figure 4 : Courbes granulométrique de la latérite 1 et 2 de Vontovorona	37
Figure 5 : Évolution de la distance de l'enfoncement en fonction de la force d'enfoncement à 25 coups pour latérite 1	42
Figure 6 : Diffractogramme de rayons X de la latérite 1 de Vontovorona.....	43

Figure 7 : Schéma du processus de stabilisation de la latérite par les micro-organismes.....	46
Figure 8 : Evolution de la quantité de fer réduit par les micro-organismes en fonction du temps de traitement, par rapport à la teneur en fer ferrique initiale de la latérite, pour les essais N° 1 et 2.....	60
Figure 9 : Evolution de la quantité de fer réduit par les micro-organismes en fonction du temps de traitement par rapport à la teneur en fer ferrique initiale de la latérite pour les essais N° 5 à 861	
Figure 10 : Evolution de la quantité de fer réduit par les micro-organismes en fonction du temps de traitement, par rapport à la teneur en fer ferrique initiale de la latérite, pour les essais N° 9 à 12.....	62
Figure 11 : Evolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 1 à 4 en fonction du temps.....	64
Figure 12 : Evolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 1 à 4 en fonction du temps	65
Figure 13 : Evolution de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de traitement.....	66
Figure 14 : Evolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 4 à 8 en fonction du temps.....	67
Figure 15 : Evolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais n° 4 à 8 en fonction du temps.....	69
Figure 16 : Evolution de la porosité des éprouvettes des essais n° 4 à 8 en fonction du temps....	70
Figure 17 : Evolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 4, et de 9 à 12 en fonction du temps.....	72
Figure 18 : Evolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 4 et de 9 à 12 en fonction du temps	73
Figure 19 : Evolution de la porosité des éprouvettes des essais N° 4 et de 9 à 12 en fonction du temps de traitement	74
Figure 20 : Variation de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve des essais N° 4,6, 10 et 11.....	75
Figure 21 : Variation de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve des essais N° 4, 6, 10 et 11	77
Figure 22 : Variation de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve des essais N° 4, 6, 10 et 11	78
Figure 23 : Comparaison de la résistance à la compression à l'état sec des essais par rapport aux normes ANTBM.....	80
Figure 24 : Comparaison de la résistance à la compression à l'état humide des essais par rapport aux normes ANTBM	81

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Lavage lors de l'analyse granulométrique par tamisage.....	21
Photo 2 : Mise œuvre de l'analyse granulométrique par sédimentation	22
Photo 3 : Rouleaux de mortier.....	26
Photo 4 : Appareil Casagrande.....	26
Photo 5 : Moule utilisé	28
Photo 6 : Essai Proctor	28
Photo 7 : moule chargé de latérite avant saturation dans le bac à imbibition	29
Photo 8 : Latérite de Vontovorona utilisée au cours de notre investigation.....	35
Photo 9 : Les Bioréacteurs.....	47
Photo 10 : Moule et piston	48
Photo 11 : Presse hydraulique TESTWELL multifonctionnelle permettant le compactage et le test des résistances mécaniques (Bloc Technique Ankatso)	55
Photo 12 : Quelques échantillons d'éprouvettes obtenus.....	56
Photo 13 : Séchage à l'air libre des éprouvettes.....	57
Photo 14 : Séchage sous atmosphère contrôlé des éprouvettes.....	58

INTRODUCTION

Depuis des années, les malgaches ont construit leurs ouvrages à partir des matériaux naturels, et après évolution de leur mode de vie, ils ont pratiqué les méthodes traditionnelles pour fabriquer des matériaux de construction dont certains restent encore sur le marché d'aujourd'hui tels que les briques en terre crue, les briques et tuiles en terre cuite. Les murs en terre crue, appelés « Tamboho » qui subsistent encore dans les zones périphériques d'Antananarivo, après plusieurs décennies d'existence font partie de ces ouvrages.

A Madagascar, l'utilisation du sol latéritique, une ressource naturelle abondante sur le territoire, offre une alternative de choix pour palier aux manques de matériaux de construction ou aux prix trop élevés de ces produits. Cependant, les qualités mécaniques médiocres des matériaux fabriqués à partir de cette ressource ne lui permettent d'être utilisé que dans les constructions peu sollicitées mécaniquement.

Toutefois, pour développer la politique de construction à Madagascar, la valorisation des latérites comme matériau de construction dans le domaine de l'habitat (fondation, soubassement, mur, pilier) et de la route (couche de base et fondation) est une nécessité.

Plusieurs travaux de recherche ont déjà donné des résultats satisfaisants du point de vue de l'amélioration de la résistance mécanique et la réduction de la sensibilité à l'action de l'eau sur les matériaux latéritiques. La stabilisation chimique (par le ciment, la chaux, les polymères...) de la latérite fait partie de ces travaux. Toutefois, le coût de fabrication du matériau obtenu avec cette technologie est élevé, car il faut y ajouter le prix du stabilisant qui est encore cher, actuellement.

Un liant à base d'oxyde de fer et de silice active a été élaboré par RANDRIANA et consorts en 2004. Toutefois, la résistance mécanique obtenue n'est pas satisfaisante par rapport aux produits stabilisés cités ci-dessus.

Ainsi, nous proposons dans le cadre de ce travail, la stabilisation de la latérite par les micro-organismes. Ce procédé est à la fois moderne et moins cher, car les microorganismes s'y substituent aux produits chimiques. Le procédé est simple. Il ne nécessite que de matériels simples.

Ainsi, cette nouvelle technologie permet :

- de stabiliser la latérite à moindre coût. En effet, le procédé n'utilise pas de matières premières chères telles les produits chimiques ou les combustibles ;
- d'améliorer la qualité technique des matériaux de construction obtenus à partir de la latérite ;
- d'atténuer les impacts négatifs de la fabrication de matériaux de construction sur l'environnement car le procédé n'emploie pas de stabilisant chimique tels que la chaux ou le ciment dont le procédé de fabrication nécessite une cuisson à haute température qui émet des gaz à effet de serre ;
- d'économiser des devises car nous n'avons plus besoins d'importer de produits chimiques pour la stabilisation de la latérite.

Aussi, la rédaction de l'ouvrage est la suivante :

La première partie de cet ouvrage, relatif à l'étude bibliographiques traite d'abord, les généralités sur la latérite, la stabilisation ; ensuite, les méthodes d'analyse et de caractérisation du sol.

La deuxième partie montre les études des caractéristiques de la latérite utilisée dans le cadre de ce travail à savoir : l'analyse physique, l'analyse chimique, la détermination des caractéristiques géotechniques et l'analyse minéralogique.

La troisième partie traite d'une façon détaillée l'étude de la stabilisation de la latérite par les micro-organismes et la caractérisation des produits obtenus.

Nous avons terminé la rédaction par la conclusion générale et les perspectives d'avenir de ce travail.

PREMIERE PARTIE :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. GENERALITES SUR LA LATERITE

1.1. DEFINITION [1]

Le mot latérite vient du nom latin « later » qui signifie brique. D'après BUCHANAN (1807), c'est un des meilleurs matériaux de construction, possédant de grande quantité de fer, de couleur variant du jaune au rouge plus ou moins foncée et même noire.

Selon MUKERJI, les latérites sont des terres très altérées qui contiennent des proportions importantes mais très variables d'oxyde de fer et d'aluminium, ainsi que du quartz et d'autres minéraux.

On rencontre les latérites surtout dans les régions tropicales, subtropicales et équatoriales. Elles recouvrent 33% de la surface terrestre.

1.2. FORMATION DE LA LATERITE [2]

La latérite est formée par altération de roche mère dont la caractéristique essentielle réside dans la mise en solution puis le départ de la silice. Ce phénomène de lessivage s'accompagne d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme d'oxydes (Fe_2O_3 et Al_2O_3). Certains facteurs ont une influence prépondérante sur l'altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent, ce sont :

- le climat (pluviométrie, température)
- la topographie (érosion),
- la végétation (matière organique, bactéries,...).

1.2.1. Le phénomène de latérisation :

Le phénomène d'altération de la roche mère se présente sous trois formes qui sont les altérations physique, mécanique ou chimique. La première altération se traduit par la fragmentation de la roche mère. Elle est essentiellement due aux grands écarts de températures journalières ou saisonnières qui font alterner des contraintes de traction et de compression dans la roche en des temps relativement courts. Lors de la deuxième altération, l'eau de pluie, le principal agent, pénètre dans les fractures, dans les fissures ou dans les pores de la roche mère. Elle réagit ensuite

avec les constituants de la roche. Les réactions chimiques qui en résultent peuvent être des dissolutions, des échanges d'ions, des hydratations, des carbonatations, des hydrolyses, des oxydations ou des réductions.

1.2.2. Les principaux facteurs :

Les facteurs qui influent sur le phénomène de latérisation sont :

- **Le climat :**

Le phénomène de latérisation est beaucoup plus favorisé par un climat tropical ou équatorial. Les grands écarts de températures journalières ou saisonnières associés au bilan hydraulique et à la prédominance de l'activité bactérienne conduisent à la destruction de minéraux argileux formés. Le processus s'arrête au niveau de la formation de ces minéraux argileux dans les régions tempérées.

- **L'eau :**

L'action de l'eau est primordiale sur le devenir du produit final. L'excès de l'eau entraîne un lessivage des éléments tels que CaO, MgO, Na₂O, K₂O et SiO₂. Une déficience en eau conduit en une accumulation d'oxyhydroxyde, principalement du fer et de l'alumine.

- **La topographie :**

L'accumulation d'eau, élément responsable de l'altération de la roche mère et de la coloration des latérites, dépend de la topographie. Sur une forte pente, la terre a une couleur plutôt rouge dû à la présence des oxydes de fer. Elle est plus proche du brun et du jaune que du rouge lorsque la pente diminue, ceci est due à la présence des oxyhydroxydes de fer de type goethite Fe₂O₃, H₂O ou limonite 2Fe₂O₃, 3H₂O. La latérite tendra vers le gris ou le noir en arrivant dans la zone plate.

- **Les roches mères :**

Le produit de l'altération varie avec la nature de la roche mère. Cette nature influe surtout sur la formation de l'argile, un des constituants de la latérite.

- **La végétation :**

Le rapport entre le climat et les latérites débouche nécessairement sur le rapport entre le type de végétation et les latérites. D'après GLUKA et ESHART (1974), la latérite ne peut se former que sous végétation forestière et que l'induration suivrait la disparition de la couverture végétale. C'est ainsi que les latérites durcies sont plus répandues dans les régions de savane. Les formes nodulaires sont très courantes dans les régions forestières.

La végétation influe donc davantage sur la nature de l'eau : elle se charge en acides organiques et en anhydride carbonique par la décomposition de l'humus.

1.3. INTENSITE DE LATERISATION [3]:

Nous pouvons classifier les latérites selon l'intensité de latérisation notée ρ donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{\% \text{ en poids de } SiO_2 \text{ (combinée)}}{\% \text{ en poids d'Al}_2O_3 \text{ (combinée)}} \times 1,7$$

dont :

$\rho = 2$ pour les kaolins et les argiles kaolinites

$1 < \rho < 2$ pour les argiles latéritiques

$\rho < 1$ pour les latérites vraies

1.4. CLASSIFICATION DES LATERITES [4]

1.4.1. Classification de LACROIX

C'est une classification basée sur la teneur en minéraux latéritiques proposée par LACROIX en 1923.

Tableau 1: Classification des latérites selon LACROIX

Classes	Teneur en matériaux latéritiques (oxydes, hydroxydes et kaolinites)
Latérites vraies	90 à 100%
Latérites argileuses	50 à 90%
Kaolinites et argiles latéritiques	10 à 50%
Kaolinites et argiles	<10%

Source: ABD-EL MALIK 2002 [7]

1.4.2. Classification pédologique

Les latérites ou sols latéritiques sont abondantes à Madagascar et recouvrent la plus grande partie du socle cristallin. Elles sont classées en plusieurs types tels que:

- Les ferrisols: caractérisés par une prédominance d'argile kaolinique et quelque fois de gibbsite en présence de gels amorphes de silice et d'alumine. Nous pouvons trouver de la goethite et de l'halloysite sur les sites volcaniques en quantité variable.
- Les sols ferralitiques: riches en matières organiques avec une forte représentativité des gibbsites et de l'halloysite.
- Les sols tropicaux ferrugineux: riches en kaolinite et ne contiennent ni de gibbsite, ni d'halloysite, ni d'allophe. Les matières organiques sont très rares.

1.4.3. Classification basée sur les ratios silice- alumine et silice–sesquioxydes :

Cette classification est basée sur le ratio silice – alumine et plus tard le ratio silice – sesquioxyde pour classer les sols latéritiques et non latéritiques (MARTIN et DOYENE, 1930) :

$$K_l = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$$

ou

$$K'_l = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

dont :

- $K_i < 1,33$: Latérite vraie
- $1,33 < K_i < 2$: Roche latéritique
- $2 < K_i$: Minéraux non latéritique

1.5. STRUCTURE DE LA LATÉRITE [3], [5], [6]

RAZAFIMANDIMBY (1987) a décrit la structure de la latérite comme étant la suivante:

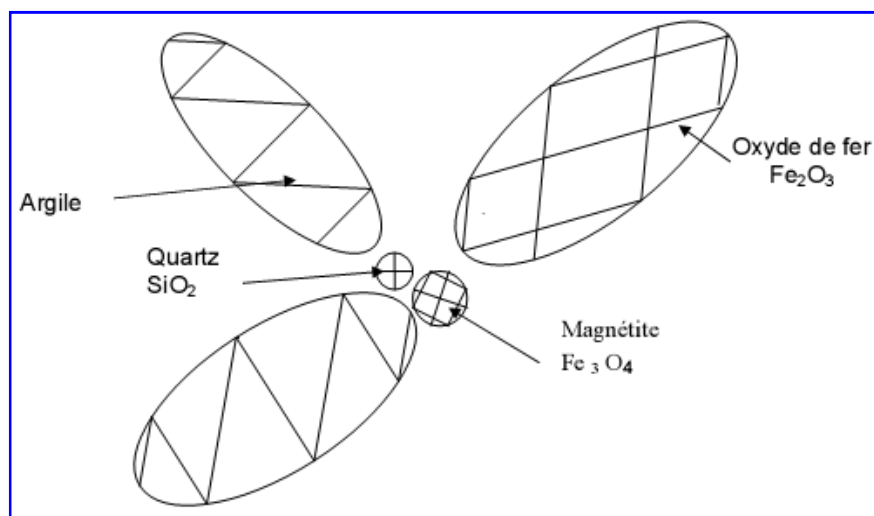


Figure 1: Structure de la latérite selon RAZAFIMANDIMBY

Selon SEGALIN (1994), les latérites possèdent au moins deux formes de structures : la structure pisolithique et la structure vermiforme.

1.5.1. Structure pisolithique

Dans ce type de structure, le fer forme des nodules discrets. On distingue les pisolithes rayées et non rayées :

- Les pisolithes rayées peuvent se former par précipitation alternée de couches riches en aluminium et de couches riches en fer.
- Les pisolithes non rayées sont des sphérules petites et bien rondes (0,5 cm de diamètre). Elles deviennent souvent plus grandes lorsque ces nodules se forment dans la saprolite (2 cm de diamètre). Ces pisolithes peuvent devenir des pisolithes rayées par un processus de diffusion qui est courant lors d'une bauxitisation.

1.5.2. Structures vermiforme

Un type de structure peut se présenter dans la saprolite par précipitation directe du fer limonitique. Des cavités vermiformes irrégulières se présentent aussi dans les blocs de latérites pisolithiques.

1.6. CONSTITUANTS DES LATERITES :

Les latérites sont constituées :

- de FER qui se présente soit sous forme de goethite (FeOOH ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), d'hématite (Fe_2O_3), ou de magnétite (Fe_3O_4) ;
- d'ALUMINIUM qui se présente sous forme d'oxyde. La gibbsite ou hydrogibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ est le minéral le plus fréquent; le boehmite (AlOOH) est moins reconnu et souvent en quantité moindre. L'aluminium existe également sous une forme combinée à la silice dans la kaolinite $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ pour la demi-maille. Le silicium est de ce fait un constituant habituellement sous forme combinée. Il se présente aussi sous forme de quartz.
- de TITANE qui est sous forme d'ilménite FeTiO_3 .
- de MANGANESE qui apparaît aussi sous forme d'oxyde en faible quantité.

Le tableau suivant récapitule les différents éléments majeurs présents dans la latérite.

Tableau 2: constituants majeurs de la latérite

Elément	Oxydes et hydroxydes de fer	Oxydes et hydroxydes d'aluminium	Minéraux argileux	Minéraux siliceux
Commun	Goethite	Gibbsite	Kaolinite	Quartz
	Limonite	Boehmite (plus rare)	Halloysite (plus rare)	
	Hématite			
Rares	Maghétite	Diaspore	Illite	
	Magnétite	Corindon	Montmorillonite	

Source: ABD-EL MALIK 2002 « étude de stabilisation de la latérite par la paille de riz approche biochimique » Mémoire d'ingénieur, ESPA. [7]

1.7. UTILISATIONS [8]

1.7.1. Construction traditionnelle Malagasy

- **Fabrication de murs traditionnels ou « Tambohon'ny Ntaolo »**

Les murs traditionnels sont très fréquents, voire typiques des Hautes Terres Malagasy. Les latérites demeurent le matériau de base de ces murs dont le mode opératoire de fabrication est le suivant :

- les paysans utilisent la latérite de leur localité, ils arrosent le tas de latérite remuée avec l'eau, ils piétinent le tas arrosé en utilisant des bœufs tout en ajoutant de l'eau jusqu'à ce que le matériau latéritique devient une pâte très visqueuse rendant difficile le déplacement des bœufs. Avec cette boue très visqueuse, les paysans confectionnent des murs par étage constitué d'une couche de 75 cm de hauteur ;
- la différence de retrait entre l'ancienne couche plus ou moins sèche et la nouvelle couche est l'origine des fissures horizontales. Pourtant, même sans toiture ou chapeau efficace aux intempéries (pluie, cyclone), ces murs restent et peuvent durer des siècles.

- **Enduit traditionnel**

Le matériau de base est toujours la latérite, on y ajoute de gros sable et de la bouse de vache.

L'analyse du mécanisme de stabilisation des murs et des enduits traditionnels nous conduit à l'hypothèse que les éléments suivants joueraient des rôles principaux dans le mécanisme de stabilisation traditionnelle :

- l'oxyde de fer des latérites ;
- la silice active des latérites ;
- la bouse de vache qui serait utile en tant que nourriture des microorganismes ferro-réducteurs.

- **Fabrication des blocs de terre**

La construction traditionnelle en terre crue à Madagascar est à base de :

- latérite mélangée à la bouse de zébu ;
- latérite additionnée de blanc d'œuf ;
- latérite mélangée de la paille et de bouse de zébu ;
- latérite macérée avec le tronc d'un bananier et de la bouse de zébu ;

Le compactage mécanique, par le moyen d'une presse, de la latérite convenablement mouillée, permet d'améliorer les performances mécaniques des blocs.

L'incorporation de chaux ou de ciment à la pâte permet, non seulement d'améliorer les résistances mécaniques des blocs mais leur confère également une plus grande stabilité à l'eau; ceci grâce aux hydrates formés par hydratation du ciment, et les réactions entre la kaolinite et la Gibbsite de la latérite et la chaux incorporée ou libérée par le ciment hydraté. Ces réactions peuvent être accélérées par l'activation thermique préalable de la latérite.

- **Utilisation des latérites en agriculture**

La latérite peut être utilisée comme engrais grâce à sa faculté de libérer rapidement des éléments nutritifs pour le sol. Elle a aussi une grande capacité à emmagasiner l'eau et les éléments fertilisants.

- **Utilisation en métallurgie**

Plusieurs métaux rares et nobles peuvent être extraits des latérites tels que: l'aluminium, le chrome, le magnésium, le mercure, le titane.

La latérite peut aussi être utilisée dans la fabrication de moules de fonderie, comme filler additif dans la fabrication de métaux, résines et plastiques.

- **Utilisation en céramique**

La latérite peut servir à la fabrication de briques réfractaires, de carreaux ou même de poterie où la couleur a une importance primordiale et à la synthèse des zéolites.

- **Utilisation dans le domaine routier**

L'abondance des latérites dans les régions tropicales rend nécessaire leur utilisation dans la construction de routes. Elles sont aussi bien utilisées en couche de base qu'en couche de fondation.

- Couche de base : stabilisation mécanique (compactage) ;
- Couche de fondation : stabilisation mécanique et stabilisation physico-chimique à froid (traitement au ciment, à la chaux ou d'autres stabilisants).

- **Latérite stabilisée à la chaux**

La stabilisation des latérites à la chaux permet de valoriser les sols argileux latéritiques.

Le mélange sol chaux peut alors être utilisé soit directement en couche de roulement, soit seulement comme corps de chaussée selon l'intensité du trafic routier.

- **Latérite stabilisée au TOPSIL**

Le TOPSIL est un stabilisant Sud-Africain dont l'efficacité est en phase d'expérimentation dans plusieurs régions de l'île notamment sur le tronçon de route latéritique reliant VOHIPARARA-IRONDRO.

2. STABILISATION

2.1. PRINCIPE

Le principe de la stabilisation est de modifier la propriété d'un système terre-eau-air afin d'obtenir des propriétés compatibles à des applications particulières.

2.2. OBJECTIFS [9]

Les principaux objectifs sont :

- l’obtention de meilleures caractéristiques mécaniques en augmentant la résistance à la compression sèche et humide, la résistance à la traction et au cisaillement ;
- l’obtention de meilleure cohésion ;
- la réduction de la porosité et les variations de volume ;
- l’amélioration de la résistance à l’érosion, au vent et à la pluie (imperméabilisation).

2.3. DIFFERENTES TECHNIQUES DE STABILISATION [10]

Il existe plusieurs types de stabilisation de la latérite qui peuvent être appliqués seul ou en général couplés.

2.3.1. Stabilisation chimique

Le principe est d’ajouter d’autres matériaux ou d’autres produits chimiques dans la terre pour en modifier sa propriété. Il existe une réaction physico-chimique entre les constituants actifs de la terre et les matériaux. Cela entraîne la formation de nouvelles phases au sein de la texture de la terre enrobée au maximum de grains inertes.

2.3.2. Stabilisation physique :

Les propriétés d’une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture: mélange contrôlé de fractions de grains différents. La stabilisation physique s’obtient par traitement thermique, par déshydratation et par un traitement électrique qui favorise un drainage de la terre lui conférant de nouvelles qualités structurales.

2.3.3. Stabilisation mécanique :

Le principe de la stabilisation mécanique est de modifier les propriétés de la terre en intervenant sur sa structure, c'est-à-dire que nous modifions la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité.

2.3.4. Stabilisation biotechnologique [11], [12] [13], [14], [15], [16]

Le but est de transformer la propriété d'un matériau par le biais des agents biologiques dont la finalité est de modifier la structure de la latérite pour améliorer la qualité du matériau.

2.3.4.1. Les microorganismes:

Il existe plusieurs familles et genres de micro-organismes dans le sol, tels que des eucaryotes (champignons, algues et protozoaires) et des procaryotes (bactéries et cyanobactéries). Leur biodiversité est considérable avec une densité atteignant jusqu'à 10^4 à 10^6 unités par grammes de sols. Leur distribution est favorisée par la présence de substrats énergétiques (essentiellement des résidus végétaux), d'éléments minéraux ainsi que de nombreux facteurs physiques et chimiques caractérisant chaque sol, notamment la structure, l'aération, le pH, la température et la teneur en eau.

Les microorganismes du sol jouent deux rôles essentiels :

- d'une part, ils sont responsables de diverses transformations chimiques et même physiques qui se déroulent dans le sol;
- d'autre part, ils agissent directement ou indirectement sur la nutrition des plantes.

La plupart de ces bactéries sont des anaérobies facultatifs comme le cas de *Bacillus polymyxa*, *Bacillus circulans*, *Sporogènes de Clostridium* et *Aerobactera érogences*, qui sont responsables de la réduction du fer ferrique en anaérobiose.

2.3.4.2. Les matières favorisant la réduction:

La réduction est favorisée par l'ajout aux microorganismes d'un ou plusieurs aliments énergétiques (sucre, matière végétale verte diverse,...). KALAKUTSKII en 1959, trouve que les

produits provoquant la réduction du fer sont des produits élaborés au cours de la fermentation du glucose.

2.3.4.3. Les facteurs écologiques dominants:

Le milieu de culture des microorganismes doit contenir des substances indispensables à leur croissance et leur production. Les paramètres physico-chimiques comme le pH, la température convenables, le potentiel d'oxydo-réduction et l'humidité doivent être optimaux.

- *Le pH:*

Le pH optimum pour la croissance de la plupart des bactéries anaérobies se situe aux environs de 6,4 à 7,4 et la majorité des espèces ne peuvent se développer que dans des milieux très acides ou très alcalins. Toutefois, certaines bactéries non seulement tolèrent, mais «préfèrent» des conditions acides ou fortement acides (organismes acidophiles).

- *La température:*

Généralement, un type de bactérie croît plus rapidement à une certaine température : c'est la température optimale de croissance. La vitesse de croissance se réduit lorsque la température s'écarte de cet optimum.

Étant donné que la réduction biologique du fer est la conséquence de l'activité de ces microorganismes, ainsi la croissance bactérienne serait proportionnelle à la quantité de fer ferreux [Fe II] produite. La température optimale de cette croissance est alors comprise entre 35°C et 40°C.

- *Le potentiel d'oxydo-réduction :*

Le processus de réduction biologique n'apparaît que dans des conditions moyennement réductrices.

Quelques auteurs comme FLAIG et SCHARRER considèrent que la réduction du fer Fe^{3+} débute vers $E = 22$ à 25 mV où $E = E^\circ/29 + 2\text{pH}$. Ces limites correspondent à

$E^\circ = 406 \text{ à } 496 \text{ mV}$ pour $\text{pH} = 4$.

Ce potentiel d'oxydo-réduction d'un sol est en relation avec la tension d'oxygène du milieu. Ainsi, en anaérobiose, le potentiel d'oxydo-réduction du milieu est faible, donc un milieu réducteur.

- *L'humidité :*

La teneur en oxygène du sol est partiellement sous la dépendance de l'humidité puisque ce facteur régit, dans une grande mesure, la diffusion de l' O_2 . Les besoins en oxygène des bactéries varient en fonction de la nature de leur métabolisme. Les bactéries qui ne se développent qu'en présence d'oxygène sont dites aérobies «stricts» ou «obligatoires», pour marquer leur dépendance absolue vis-à-vis de ce gaz. Leur source principale d'énergie est la respiration et l'oxygène moléculaire, l'ultime accepteur d'électron, est réduit en eau.

Les bactéries qui croissent normalement en présence d'oxygène mais peuvent quand même se développer en anaérobiose (c'est-à-dire en absence d'oxygène) s'appellent les anaérobies facultatives. Elles tirent de l'énergie de l'oxydation des substrats mais emploient aussi la voie fermentaire.

Dans les sols très humides, la réduction du fer peut se développer très vigoureusement si les autres conditions fondamentales sont réunies.

Dans le milieu naturel, le processus de réduction biologique n'apparaît qu'anaérobiose ou semi-anaérobiose, c'est-à-dire pour des sols saturés en eau de façon permanente ou temporaire.

2.3.4.4. Le mécanisme de transformation d'oxyde de fer ferreux en fer ferrique par les microorganismes:

Divers mécanismes ont été invoqués:

- la destruction du complexant du fer ferreux par les microorganismes;
- l'oxydation déterminant la destruction du complexant avec variation locale du pH et du potentiel redox;
- l'oxydation puis l'assèchement et la fixation de l'hydroxyde sur un hydroxyde déjà existant.

2.4. MECANISME DE STABILISATION DE LA LATERITE [5]

Le principe est de modifier les propriétés de la terre en intervenant sur sa structure c'est-à-dire qu'on modifie la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité.

2.4.1. Densifier

Pour densifier la terre, nous avons deux façons différentes :

- Manipuler la terre mécaniquement pour évacuer le maximum d'air en pétrissant et en comprimant la terre.
- Combler le maximum de vide en introduisant d'autres grains.

2.4.2. Armer

Le but est d'introduire une armature généralement constituée de fibres d'origine végétale (paille), animale (poils, bouse), minérale ou synthétique (fibres) dans la latérite pour créer un réseau de fibres omnidirectionnelles. Ce dernier améliore la résistance à la traction et au cisaillement de la terre et contribue aussi à réduire le retrait.

2.4.3. Enchaîner

C'est l'introduction d'une matrice tridimensionnelle inerte et résistante qui va s'opposer à tout mouvement du sol. Il s'agit d'un mouvement de consolidation par cimentation qui résulte du remplissage des vides par un liant insoluble capable d'enrober les particules dans la latérite.

2.4.4. Lier

Il y existe deux mécanismes pour lier:

- Une matrice inerte est formée par les argiles. Nous utilisons les charges négatives et positives des plaquettes argileuses ou leur composition chimique pour les lier entre elles par l'intermédiaire d'un stabilisant, celui-ci jouant le rôle de catalyseur de cette liaison.

- Une matrice inerte est formée avec les argiles; un stabilisant qui réagit avec l'argile et forme un nouveau matériau (une sorte de ciment) insoluble et inerte par précipitation; c'est une réaction pouzzolanique obtenue avec la chaux.

Cette réaction est lente et essentiellement dépendante de la qualité et de la quantité d'argile.

2.4.5. Imperméabiliser

C'est la réduction de l'eau de gonflement par retrait pendant le cycle répété de moulage-séchage. L'imperméabilisation se fait par deux moyens:

- Tous les vides ou les pores et les fissures sont remplis d'une matière sensible à l'eau.
- Une matière est dispersée dans la terre qui au moindre contact avec l'eau va gonfler et obstruer les accès aux pores.

2.4.6. Hydrofuger

On modifie l'état de l'eau interstitielle et on réduit la sensibilité des plaquettes d'argiles à l'eau. Ce moyen qui fait intervenir des produits chimiques (résine ou acide aminé quaternaire, chlorure de sodium) et l'échange ionique contribue à l'élimination au maximum de l'absorption et l'adsorption de l'eau.

2.5. LES STABILISANTS

En général, les stabilisants sont des liants qui permettent une amélioration des performances physiques et mécaniques d'un matériau donné. Ils sont classés en deux catégories:

2.5.1. Les stabilisants minéraux

Ce sont des poudres de matériaux minéraux finement broyés, qui sont mélangés avec de l'eau, forment une pâte plastique qui fait prise et durcit. Parmi les principaux liants minéraux, les plus répandus sont le ciment, la chaux, et les pouzzolanes. Il existe également des silicates solubles et des ciments géopolymères. L'ajout de ces liants permet l'obtention de matériaux ayant une sensibilité à l'eau réduite ainsi que des caractéristiques mécaniques améliorées.

2.5.2. 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.

Exemple: Les feuilles de bananiers pourries, l'urine de bétail, la bouse de vache, la silice active additionnée de l'urée, la paille (utilisée dans la brique d'adobe).

3. METHODE D'ANALYSE ET DE CARACTERISATION DU SOL

Le sol est constitué par un mélange de particules élémentaires de dimensions différentes. Par conséquent, il possède de propriétés différentes.

La caractérisation du sol consiste donc à :

- faire l'analyse physique,
- effectuer l'analyse chimique,
- déterminer les caractéristiques géotechniques,
- réaliser l'analyse minéralogique.

3.1. ANALYSE PHYSIQUE [4]

3.1.1. Teneur en eau

Le but de cette manipulation est de déterminer la teneur en eau de l'échantillon.

3.1.1.1. Définition

C'est le rapport, exprimé en pourcentage du poids de l'eau que le sol contient par rapport au poids du sol sec.

$$W(\%) = \frac{\text{Poids de l'eau}}{\text{Poids du sol sec}} \times 100$$

Avec : Poids de l'eau = Poids du sol humide – Poids du sol sec

3.1.1.2. *Principe*

La détermination du poids sec de l'échantillon du sol se fait par la pesée de celui-ci après un séjour dans une étuve réglée à 105 °C, jusqu'à poids constant.

3.1.2. Analyse granulométrique [17]

3.1.2.1 *But*

Le but de l'analyse granulométrique est de classer le sol suivant les dimensions des grains qui le constituent. L'analyse se fait en deux parties :

- par tamisage pour les grains de diamètre supérieur à 80 μm ;
- par sédimentation pour les grains de diamètre inférieur à 80 μm .

3.1.2.2. *Analyse granulométrique par tamisage*

- **But de l'essai:**

L'essai consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon en fonction de leurs caractéristiques (poids et dimension).

- **Principe :**

Nous faisons passer un échantillon de sol à travers une série de tamis à mailles carrées emboîtées les unes dans les autres (les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas).

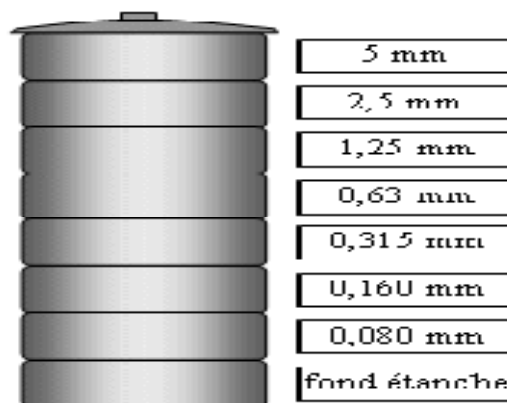


Figure 2: Colonne de tamis

On répartit les grains, par vibration, sur les différents tamis selon leur grosseur. A la fin de cette opération, on recueille dans chaque tamis la partie de l'échantillon qui y a été arrêtée (le refus) et on le pèse à sec, ce qui permet de calculer le pourcentage du refus pour ce tamis:

$$\text{Pourcentage de refus}(\%) = \frac{\text{Poids du refus}}{\text{Poids total de l'échantillon}} \times 100$$

On peut aussi calculer le pourcentage de la partie de l'échantillon passée à travers les mailles de ce tamis (le tamisât):

$$\text{Tamisat}(\%) = 100 - \text{Refus}(\%)$$

Les résultats de l'analyse sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on porte:

- en abscisse, les diamètres des particules,
- en ordonnée, les pourcentages en poids des tamisât cumulés.



Photo 1: Lavage lors de l'analyse granulométrique par tamisage

3.1.2.3. Analyse granulométrique par sédimentation [4], [17]

Cette méthode utilise la différence de vitesse de décantation des particules d'un sol préalablement mises en suspension dans l'eau. Les particules les plus grosses se déposent les premières et les plus fines les dernières. Sa vitesse de chute est donc fonction du diamètre des grains et donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{g(\rho_s - \rho_l)}{18\eta} \cdot D^2$$

Avec :

V: vitesse de chute de la particule (m/s)

D: diamètre de la particule (m)

ρ_s : masse volumique des particules solides (kg /m³)

ρ_l : masse volumique du liquide (kg /m³)

g: accélération de la pesanteur (m/s)

η : Viscosité dynamique (kPa .s.)

Quelques traitements appropriés sont nécessaires avant d'effectuer cette analyse par sédimentométrie à savoir:

- addition de l'acide chlorhydrique dilué pour l'élimination du fer,
- ajout d'eau oxygénée pour la destruction des matières organiques ;
- addition du flocculant comme l'hexamétaphosphate de sodium pour la dispersion des particules : annulation des forces électrostatiques entre les feuillets d'argile.

On mesure la variation de la densité de la suspension dans le temps à une hauteur donnée. Cette densité indique la concentration en particules ayant un diamètre égal ou inférieur à un diamètre D appelé diamètre équivalent, donnée par la relation de STOKES :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_s - \rho_l)} \cdot \frac{H_r}{t}} \quad \text{avec} \quad V = \frac{H_r}{t}$$

Avec, **H_r** densité de la suspension ;

t: temps de décantation



Photo 2 : Mise œuvre de l'analyse granulométrique par sédimentation

Le tableau 3 ci-dessous nous montre la classification basée sur l'analyse granulométrique selon AFNOR :

Tableau 3 : Classification adoptée par l'AFNOR, basée sur l'analyse granulométrique

Dénomination	Diamètre	Méthode analytique à employer
Cailloux	> 20 mm	Par tamisage
Gravier	5 à 20 mm	
Sable grossier	2 à 5 mm	
Sable moyen	0,2 à 2 mm	
Sable fin	0,06 à 0,2 mm	
Limon	2 à 60 μm	Par sédimentation
Argile	< 2 μm	

Source : AFNOR/ Analyse granulométrique

3.1.3. Masse volumique apparente ρ

La masse volumique est le rapport de la masse totale d'une certaine quantité de sol et son volume, c'est-à-dire la somme des masses des grains, de l'eau et de l'air que contient ce volume. Nous définissons également la masse volumique sèche qui est la masse de la matière sèche contenue dans l'unité de volume, c'est-à-dire la masse des grains. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{kg}/\text{m}^3]$$

m : masse de l'échantillon

V : volume de l'échantillon

3.1.4. Masse spécifique γ_s

La masse spécifique est la mesure de la masse du sol rapportée à son volume. Sa détermination se fait avec un pycnomètre.

3.1.5. Densité apparente γ_d

C'est la masse volumique apparente d'un sol donné rapportée à celle de l'eau.

$$\gamma_d = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}}$$

3.2 ANALYSE CHIMIQUE :

Le but de cette analyse est de déterminer les différents constituants ainsi que la perte au feu de la latérite. Le principe repose alors sur le dosage des éléments de la latérite présents dans la liqueur obtenue après attaque de la latérite par du sulfate acide de potassium (KHSO_4) (cf. Annexe 2).

3.3. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

3.3.1. Limites d'ATTERBERG [5]

3.3.1.1. *Principe*

L'essai est effectué sur la fraction granulaire inférieure à 0,42 mm appelée mortier. A un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide. En 1905, Atterberg a défini des teneurs en eau fixant les limites entre les trois états.

3.3.1.2. *Limite de liquidité W_L*

La limite de liquidité W_L est la teneur en eau qui caractérise la transition entre l'état plastique et l'état liquide. Elle est définie comme la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un échantillon se referme dans une coupelle secouée 25 fois. W_L est compris entre 25% à 45%, idéalement proche de 27%.

Principe de l'essai:

Elle se mesure par l'appareil de CASAGRANDE. L'échantillon de terre est préalablement tamisé au tamis d'ouverture 0,42mm et humidifié pour former une pâte. La pâte est étalée dans la coupelle de CASAGRANDE (épaisseur max 1cm) et divisée en 2 parties par un outil spécial à rainurer. Grâce à la manivelle, la coupelle est soulevée à une hauteur de 1cm puis retombe sur le

socle. Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle la rainure se referme sur 1cm lorsque la coupelle tombe 25 fois sur le socle.

3.3.1.3. Limite de plasticité W_p

La limite de plasticité W_p est la teneur en eau qui caractérise la transition entre un état plastique et un état solide. Elle est définie comme la teneur en eau pour laquelle un rouleau de terre réalisé à la main se brise lorsqu'il a un diamètre de 3mm.

W_p est compris entre 10% à 25%, idéalement proche de 17%.

Principe de l'essai :

- Former un rouleau de terre, à la main, sur une plaque de marbre ou de verre.
- Lorsque le rouleau se brise à un diamètre de 3 mm, les morceaux obtenus sont pesés, puis séchés à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant.

Nous calculons alors la teneur en eau W_p :

$$W_p = \frac{P_0 - P_1}{P_1} \times 100$$

Avec, P_0 : poids du sol humide

P_1 : poids du sol sec

3.3.1.4. Indice de plasticité I_p

Il donne l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol se trouve à l'état plastique,

$$I_p = W_L - W_p$$

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol. I_p est compris entre 7 et 25, idéalement proche de 9.

Tableau 4 : Classification des sols suivant la valeur de leur indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Peu plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Source : Analyse granulométrie [5]



Photo 4 : Rouleaux de mortier



Photo 3 : Appareil Casagrande

3.3.2. Essai Proctor

Lorsqu'on compacte de façon identique des échantillons d'un même sol à des teneurs en eau différentes W , nous constatons que la masse volumique apparente du sol sec (densité sèche) varie et passe par un maximum qui est obtenue pour une teneur en eau bien déterminée, dénommée teneur en eau optimale.

3.3.2.1. But de l'essai

L'essai PROCTOR a pour but de déterminer, pour un compactage normalisé d'intensité donnée, la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale correspondante.

3.3.2.2. Principe

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée et suivant un processus bien défini, un échantillon de matériaux à étudier. Nous déterminons sa teneur en

eau et son poids volumique sec après compactage. Nous répétons plusieurs fois de suite l'opération afin de faire évoluer la masse volumique des matériaux; ensuite nous traçons la courbe représentative du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau dont l'abscisse est la teneur optimale de PROCTOR et l'ordonnée le poids volumique sec optimal de PROCTOR.

Pour ces essais, nous pouvons utiliser, selon la finesse des grains du sol, deux types de moule :

- Le moule PROCTOR: utilisable pour les sols fins.
- Le moule C.B.R: utilisable dans tous les cas.

Avec chacun de ces moules, nous pouvons effectuer deux types d'essai (choix par rapport à l'énergie de compactage) :

- L'essai PROCTOR NORMAL ;
- L'essai PROCTOR MODIFIÉ

Le choix de l'énergie de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

- Essai PROCTOR normal : faible résistance souhaitée, du type de remblai peu chargé. Le compactage se fait en trois couches d'épaisseur égale.
- Essai PROCTOR modifié: forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière. Le compactage se fait en cinq couches d'épaisseur égale.

Tableau 5 : Conditions des essais PROCTOR selon la norme NF P 94 – 093.

Essais	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de couches	Nombre de coups par couche	Énergie de compactage kJ/m ³
Proctor Normal	2,49	30,50	3	25 (moule Proctor)	587
				55 (moule C.B.R)	533
Proctor modifié	4,54	45,70	5	25 (moule Proctor)	2.680
				55 (moule C.B.R)	2.435

Source : www.cours-génie-civil.com



Photo 6 : Essai Proctor



Photo 5 : Moule utilisé

3.3.3. Essai de portance ou essai CBR_(Californian Bearing Ratio)

Le CBR est un essai de poinçonnement réalisé dans des conditions bien définies sur des échantillons moulés suivant la méthode de PROCTOR avec des énergies et des teneurs en eau déterminées. L'eau joue un rôle important sur la capacité portante des sols, à une teneur déterminée, après saturation à 96 heures dans le bac à imbibition.

L'indice portant CBR exprime en pourcentage le rapport entre les pressions, produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part, la qualité du sol étudié est déterminée par la norme indiquée dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Norme de qualité d'un sol selon l'indice de portance C.B.R.

Indice de portance C.B.R.	Qualité de sol
< 5	Très mauvais
5 à 10	Mauvais
10 à 15	Moyen
15 à 30	Bon
> 30	Très bon



Photo 7 : moule chargé de latérite avant saturation dans le bac à imbibition

3.4. ANALYSE MINÉRALOGIQUE

Nous avons effectué l'analyse minéralogique par diffraction X, dans le but d'en déterminer les constituants minéralogiques de la latérite à stabiliser.

L'enregistrement du spectre a été effectué au laboratoire de la cimenterie de l'HOLCIM/Madagascar sis à Ibity-Antsirabe et l'appareillage utilisé est un diffractomètre de rayons X.

3.4.1. Définition [18]

Technique de base de la caractérisation des matériaux, la diffraction de rayons X permet la détermination des phases minérales micro et poly-cristallines des matériaux. Cette méthode n'est applicable qu'à des matériaux composés d'un nombre relativement important de cristaux aux orientations non préférentielles (céramiques, roches et monocristaux).

La **cristallographie aux rayons X** ou **diffractométrie de rayons X (DRX)**, on utilise aussi souvent, l'abréviation anglaise **XRD** pour *X-ray diffraction*) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de **radiocristallographie**. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique.

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontre le cristal provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés, il est possible d'obtenir une image tridimensionnelle de la densité électronique dans le cristal. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie et d'autres informations.

3.4.2. Méthode [18]

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, on fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X.

Les rayons X, comme toutes les ondes électromagnétiques, provoquent un déplacement du nuage électronique par rapport au noyau dans les atomes. Ces oscillations induites provoquent une ré-émission d'ondes électromagnétiques de même fréquence : ce phénomène est appelé diffusion Rayleigh.

La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques angströms), les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou au contraire très faible ; ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction des rayons X.

Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées « pics de diffraction », peuvent être déterminées très simplement par la formule suivante, dite loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Avec :

- d = distance interréticulaire, c'est-à-dire distance entre deux plans cristallographiques ;
- θ = demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur) ;

- n = ordre de réflexion (nombre entier) ;
- λ = longueur d'onde des rayons X.

Comme les plans cristallographiques peuvent être repérés par les indices de Miller, on peut indexer les pics de diffraction selon ces indices.

L'identification des phases présentes dans un échantillon se fait par comparaison de son spectre (positions et intensités des raies diffractées) avec des spectres de phases connues. Afin de pouvoir comparer des spectres obtenus à partir de différentes radiations (λ) on utilise, au lieu des angles $2\theta_{hkl}$, les valeurs d_{hkl} , qui sont une propriété caractéristique du cristal. La procédure d'identification des phases se présente donc comme suit:

1. mesure des angles θ_{hkl} sous lesquels des intensités diffractées sont observées ;
2. calcul des valeurs de d_{hkl} correspondantes, d'après la loi de Bragg ;
3. comparaison des valeurs de d_{hkl} obtenues avec celles de substances connues ;
4. comparaison des intensités relative des pics dans les spectres donnés avec celles de substances connues.

DEUXIEME PARTIE :
ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA
LATERITE

Ce chapitre décrit les études expérimentales que nous avons entreprises pour déterminer les caractéristiques de la latérite utilisée, dans le cadre de ce travail. Il s'agit de :

- l'analyse physique ;
- l'analyse chimique ;
- la détermination des propriétés géotechniques ;
- l'analyse minéralogique

1. LOCALISATION DU LIEU DE COLLECTE DES ECHANTILLONS

Nous avons commencé le travail par la collecte des échantillons. Les latérites que nous avons utilisées ont été collectées dans deux zones différentes :

- La première a été prélevée à 1 km au sud-ouest du Campus Universitaire de l'ESPA, près du centre de loisir CNAPS Vontovorona, au mois de février 2012, que nous désignons par « latérite 1 » ;
- La deuxième a été collectée dans l'enceinte de l'ESPA à Vontovorona, au mois de février 2014, que nous désignons par « latérite 2 ».

Les coordonnées géographiques de ces lieux de prélèvement sont données dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Coordonnées géographiques des lieux de prélèvement des latérites

Nom de l'échantillon	Latitude sud	Longitude Est
Latérite 1	18°58'51,34''	47°24'42,96''
Latérite 2	18°97'08,51''	47°42'50,47''

Le photo-satellite suivant montre le lieu de collecte des échantillons :



Source : Google earth, février 2014

Figure 3 : Localisation des lieux de prélèvement des latérites

Nous avons choisi d'étudier la latérite de Vontovorona dans ces deux zones différentes parce que, d'après l'étude bibliographique, les latérites de ces zones ont des teneurs en fer différentes, nous allons donc déterminer l'influence de la teneur en fer de ces échantillons au cours de notre travail dont la finalité est de déterminer l'effet de la teneur en fer sur la qualité du produit fini obtenu par la stabilisation de la latérite par les micro-organismes.

2. MODE DE COLLECTE DES ECHANTILLONS

2.1. COLLECTE POUR LA CARACTERISATION

La réalisation d'une fosse pédologique est indispensable en vue d'établir la fiche d'identité du sol représentatif de la latérite à étudier. Pour ce faire, une fosse pédologique de taille 40 cm x 40 cm a été creusée dont la profondeur arrive jusqu'à 60 cm pour les échantillons destinés à la caractérisation au laboratoire.

2.2. COLLECTE POUR LES ESSAIS DE STABILISATION

Pour la latérite destinée à la réalisation des essais de stabilisation, on a encore creusé une autre fosse pédologique de dimension 80 cm x 80 cm et de profondeur 100 cm sur les mêmes sites de collecte de l'échantillon pour la caractérisation.



Photo 8 : Latérite de Vontovorona utilisée au cours de notre investigation

3. RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Les caractéristiques physiques que nous avons déterminées dans le cadre de ce travail sont la teneur en eau, la granulométrie, la masse volumique apparente, la masse spécifique et la densité apparente.

3.1.1. Teneur en eau

La teneur en eau des deux échantillons de latérite de Vontovorona est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Teneur en eau des échantillons de latérite étudiés

Echantillon	Latérite 1	Latérite 2
Teneur en eau (%)	13,1	5,45

La latérite 1 contient beaucoup plus d'eau que la latérite 2. La différence est peut être due aux conditions climatiques au moment de prélèvement des échantillons.

3.1.2. Granulométrie

Le but est de mesurer la taille des particules élémentaires qui constituent l'ensemble des grains des substances diverses et la définition des fréquences statistiques des différentes tailles des grains dans l'ensemble étudié.

3.1.2.1. Composition granulométrique par tamisage

Le résultat de l'analyse granulométrique par tamisage des échantillons de latérite prélevés à Vontovorona est résumé dans le tableau ci-dessous:

Tableau 9: Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage de la latérite 1 et 2 de Vontovorona

Module AFNOR	Ouverture du tamis (µm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant cumulés (%)
LATERITE 1				
37	4000	0	0	100
31	1000	10,4	5,2	94,8
28	500	50,4	25,2	74,8
25	250	62,8	31,4	68,6
22	125	90,4	45,2	54,8
20	80	108	54	46
	PAN	200	100	0
LATERITE 2				
37	4000	0	0	100
31	1000	7,26	3,63	96,37
28	500	8,9	4,45	95,55
25	250	32,62	16,31	83,69
22	125	40,08	20,04	79,96
20	80	51,3	25,65	74,35
	PAN	200	100	0

Les courbes granulométriques des latérites de Vontovorona sont représentées par la figure ci-dessous.

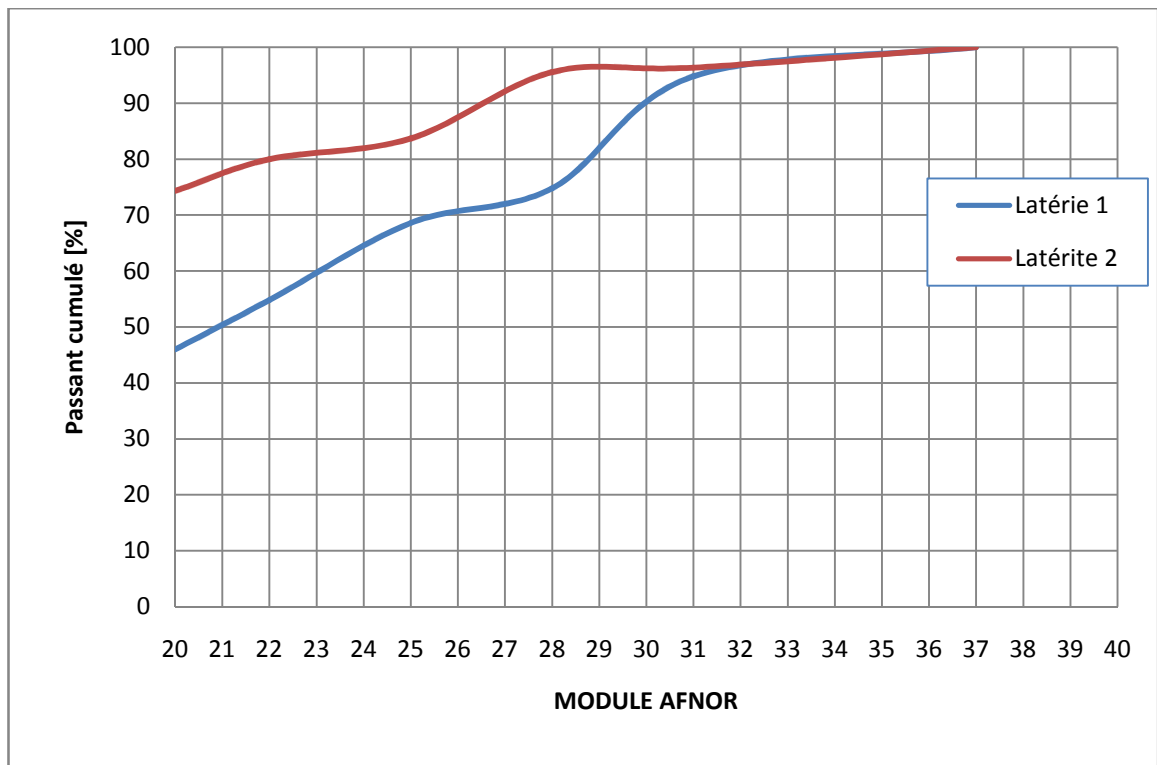


Figure 4 : Courbes granulométrique de la latérite 1 et 2 de Vontovorona

Le résultat montre que nos latérites ont une granulométrie fine et serrée. Plus de 46 % des éléments ont des dimensions inférieures à 80 μm et les éléments grossiers sont en quantité très faibles. Les deux types de latérites présentent donc un excès de particules fines. Ainsi, un apport de sable plutôt grossier est recommandé afin d'améliorer la partie creuse supérieure.

3.1.2.2. *Composition granulométrique par sédimentation*

Le résultat de l'analyse granulométrique par sédimentation de la latérite 1 de Vontovorona est donné dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Résultat de l'analyse granulométrique par sédimentation de la latérite 1 de Vontovorona

Durée de chute (mn)	0,5	1	2	5	10	20	40	80	240	1440
Lecture de densimètre	26,0	24,5	21,0	17,5	14,0	10,5	8,5	7,0	6,5	6,0
Température (°C)	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	18,2	18,6	19,5	17,4
Correction Ct+Cm+Cd	-0,40	-0,40	0,40	-0,40	0,40	-0,40	0,40	-0,35	-0,20	-0,40
Lecture corrigée	25,6	24,1	20,6	17,1	13,6	10,1	8,1	6,7	6,3	5,6
Diamètre équivalent D (µm)	68	47	34	21	15	11	8	6	3	1
% grains < D	95,7	90,1	76,9	63,9	50,8	37,8	30,3	25,0	23,5	20,9
% grains/échantillon total	94,0	88,0	75,0	63,0	51,0	37,0	29,7	24,5	23,0	20,5

La latérite 1 n'entre pas dans la norme du fuseau de limite de Brique de terre Stabilisée. Cela nécessite un apport de sable comme correction granulométrique.

3.1.3. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente de la latérite de Vontovorona utilisée dans le cadre de ce travail est de :

- o 1,78 t/m³ pour la latérite 1 ;
- o 1,45 t/m³ pour la latérite 2.

On a constaté un écart de 0,33 t/m³ sur la masse volumique des deux échantillons. Elle est peut être due à la teneur en eau des échantillons.

3.1.4. Masse spécifique

La masse spécifique des deux échantillons de latérite de Vontovorona employée dans le cadre de ce travail est de :

- o 3,02 t/m³ pour la latérite 1 ;
- o 2,78 t/m³ pour la latérite 2.

On constate un écart de 0,24 t/m³ entre la masse spécifique des deux échantillons, probablement due à la teneur en eau.

3.1.5. Densité apparente

La densité apparente des deux échantillons de latérite de Vontovorona utilisée pour la réalisation des essais de stabilisation est de :

- o 1,78 pour la latérite 1 ;
- o 1,45 pour la latérite 2.

La latérite 1 est plus dense que la latérite 2, l'écart est de 0,33.

3.2. COMPOSITION CHIMIQUE ELEMENTAIRE

Le but de l'analyse chimique est de déterminer les proportions des différents constituants ainsi que la perte au feu de la latérite. Le principe repose alors sur le dosage des éléments de la latérite présents dans la liqueur obtenue après attaque de la latérite par du sulfate acide de potassium (KHSO₄) (cf. Annexe 2).

Le tableau suivant donne la teneur, sous formes oxydes en éléments chimique des deux échantillons de latérite utilisés dans le cadre de ce travail :

Tableau 11 : Composition chimique des latérites étudiées

Eléments	Latérite 1	Latérite 2
SiO ₂ (%)	31,54	13,80
Al ₂ O ₃ (%)	25,94	45,70
CaO (%)	Trace	Trace
MgO (%)	Trace	Trace
Fe ₂ O ₃ (%)	26,01	15,70
TiO ₂ (%)	4,40	2,20
SO ₃ (%)	Trace	Trace
K ₂ O (%)	Trace	Trace
Cr ₂ O ₃ (%)	Trace	Trace
MnO (%)	0,21	Trace
Na ₂ O (%)	0,09	Trace
P ₂ O ₅ (%)	0,51	Trace
Perte au feu (%)	11,29	19,00

Le tableau montre que nos latérites sont très riche en oxyde de fer III (Fe₂O₃), nous constatons également la différence entre la teneur en fer des deux échantillons : la latérite 1 a une teneur en fer très élevée, de l'ordre de 26,01%, tandis que la latérite 2 est constituée de 15,70% d'oxyde de fer, seulement.

De plus, nous remarquons la quantité importante des autres éléments comme l'oxyde d'aluminium et l'oxyde de silicium. Et d'après la classification de **Martin** et **Doyen**, qui se base sur la formule suivante :

$$K'_i = \frac{\frac{\text{SiO}_2}{60}}{\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{102} + \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{160}}$$

Après calcul, nous avons trouvé :

- K_i' (latérite 1)= 1,29
- K_i' (latérite 2)= 0,42

Nos latérites peuvent être classées comme des latérites vraies c'est-à-dire $K_L < 1,33$

3.3. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Les résultats de l'analyse des caractéristiques géotechniques des latérites que nous avons utilisé au cours de ce travail, comme la masse volumique sèche, les limites d'ATTERBERG, l'essai de compressibilité de PROCTOR sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Caractéristiques géotechniques des échantillons prélevés

Caractéristiques physique et mécanique		Latérite 1	Latérite 2
Masse volumique	Sèche ρ_s (t/ m ³)	1,57	1,33
Limites d'ATTERBERG	Limite de liquidité W_L (%)	62,10	35,95
	Limite de plasticité W_p (%)	40,10	24,35
	Indice de plasticité I_p (%)	22,00	11,60
Essai de compressibilité de PROCTOR	Teneur en eau optimale W_{opt} (%)	26,00	20,35
	Masse volumique sec maximal $\gamma_{d_{opt}}$ (t/ m ³)	1,62	1,75
Essai de portance ou essai CBR	Enfoncement en 2,5 mm (%)	30,30	-
	Enfoncement en 5 mm (%)	31,00	-

D'après la classification précédente (cf Page 25, tableau 4), l'échantillon dénommé « latérite 1 » étudié ici peut être classé comme sol ayant une plasticité forte ($15 < I_p < 40$). La teneur en eau optimale est de 26%. L'indice de portance à prendre en compte est de 31%.

Le résultat nous montre que cet échantillon de sol est de très bonne qualité si on devrait l'utiliser dans la construction des ouvrages ou de matériau en terre.

L'échantillon dénommé « latérite 2 » peut être classé comme sol ayant une plasticité moyenne ($5 < I_p < 15$). La teneur en eau optimale est de 20,35%.

Le résultat de l'analyse montre que l'échantillon dénommé « latérite 2 » est de qualité moyenne si on devrait l'utiliser dans la construction des ouvrages ou de matériau en terre.

La classification suivant la masse volumique sèche (cf Annexe 5), montre que nos deux échantillons ont une appréciation assez médiocre.

Selon la zone préférentielle des Blocs de Terre Stabilisée (FITZ, 1959) (cf Annexe 5), nos échantillons sont classés comme suit :

- Latérite 1 : fortement cohésif ;
- Latérite 2 : moyennement cohésif ;

La figure suivante montre la valeur de la distance de l'enfoncement et l'effort de cet enfoncement à 25 coups pour la latérite 1 :

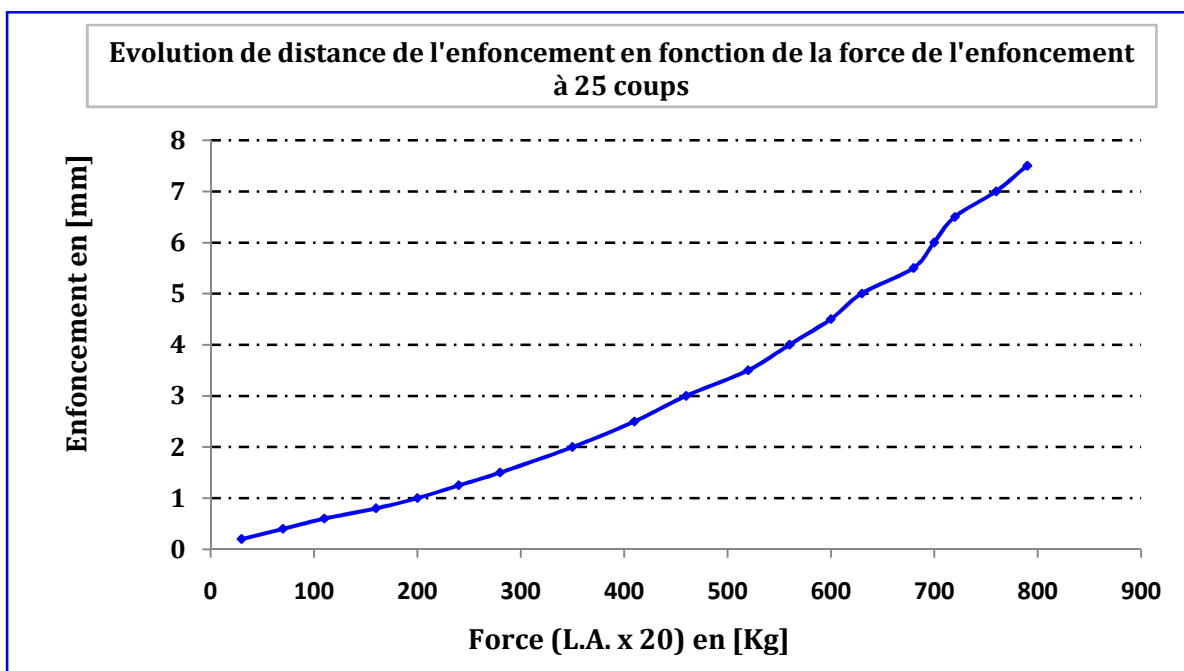


Figure 5 : Évolution de la distance de l'enfoncement en fonction de la force d'enfoncement à 25 coups pour latérite 1

Pendant, la saturation dans le bac de l'imbibition, il n'y a aucune variation de hauteur sur le comparateur. Donc, l'échantillon dénommé « latérite 1 » n'a pas gonflé. Ceci est dû à sa faible teneur en argile.

3.4. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Le résultat de l'analyse par diffraction de rayon X de la latérite 1 de Vontovorona est présenté par la figure 6 et le tableau 13 suivant :

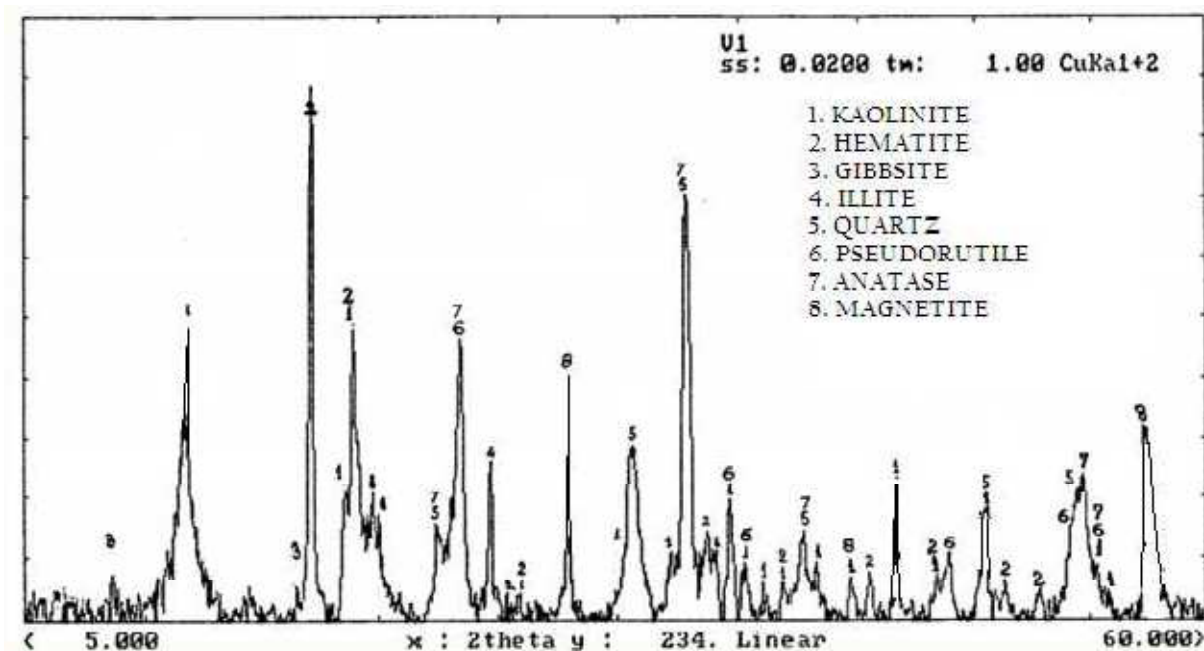


Figure 6 : Diffractogramme de rayons X de la latérite 1 de Vontovorona

Tableau 13 : Résultat de l'analyse minéralogique de la latérite 1

Minéraux	Intensités des raies observées
KAOLINITE	Raies intenses
ILLITE	Raies de très faible intensité
GIBBSITE	Raies très intenses
MAGHEMITE	Raies de faible intensité
HEMATITE	Raies moyennement intenses
QUARTZ	Raies de très faible intensité
ANATASE	Raies moyennement intenses
RUTILE	Raies intenses
MONTMORILLONITE	Raies de faible intensité
GOETHITE	Raies de faible intensité
SILICE AMORPHE	Raies de faible intensité
PSEUDORUTILE	Raies de faible intensité

Le résultat de l'analyse minéralogique par diffractométrie de rayons X de la latérite 1 de Vontovorona montre la présence de la kaolinite, la gibbsite, l'illite, le quartz, l'hématite, l'anatase et le pseudorutile dans l'échantillon. D'autres formes d'oxydes ont été aussi décelées tels que la maghémite et la goethite. Mais le minéral le plus abondant est la gibbsite.

TROISIEME PARTIE :

ETUDE DE LA STABILISATION DE LA LATERITE PAR LES MICRO-ORGANISMES

Dans ce chapitre, nous avons effectué les études systématiques de la stabilisation de la latérite par les activités des micro-organismes.

L'objectif de ce chapitre est donc de maîtriser au niveau laboratoire les paramètres influençant la réduction du fer ferrique en fer ferreux par les micro-organismes.

1. PROCESSUS DES ESSAIS DE STABILISATION

Le processus de stabilisation de la latérite par les micro-organismes peut être schématisé comme suit :

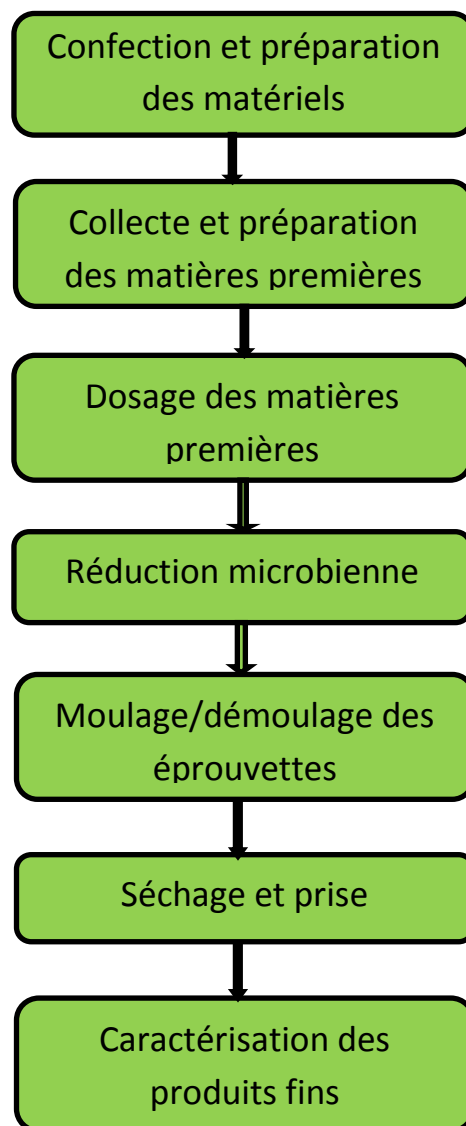


Figure 7 : Schéma du processus de stabilisation de la latérite par les micro-organismes

1.1. CONFECTION ET PREPARATION DES MATERIELS

1.1.1. Les bioréacteurs

Ils ont été fabriqués à partir de cuves rectangulaires en polyéthylène de capacité 20 litres, bien lavées avec de savon pulvérisé et de l'eau chaude jusqu'à l'élimination totale de trace d'huile qu'elles contiennent, puis séchées. Ces cuves sont coupées au 4/5^{ème} de leur hauteur à l'aide de lame de scie à métaux avec une certaine précision. Elles sont numérotées.

Les bioréacteurs ont été remplis de matière première jusqu' au 3/4 de leur hauteur.



Photo 9 : Les Bioréacteurs

1.1.2. La Confection du moule

Nous avons utilisé un moule cylindrique, fabriqué à partir d'un tuyau GALVA, dans l'atelier du Bloc Technique de Vontovorona.

Les dimensions du moule sont les suivantes :

- diamètre intérieur : 50 mm
- hauteur : 150 mm.



Photo 10 : Moule et piston

Un système de démoulage est aussi soudé à la moitié de la hauteur de ce moule. Il est fabriqué à partir d'un fer rond. Ceci a pour finalité de rendre facile le démoulage afin d'obtenir des éprouvettes de forme bien structurée.

1.2. COLLECTE ET PREPARATION DES MATIERES PREMIERES ET CONSOMMABLES

Les matières premières et consommables utilisés dans le cadre de ce travail sont : la latérite, le purin, le sable, le sucre, l'urée, l'oxyde de fer et l'eau.

1.2.1. La latérite

La latérite utilisée dans le cadre de ce travail a été extraite manuellement à VONTOVORONA. (Cf coordonnées géographiques, Chapitre 2, paragraphe 2, sous paragraphe 2.2).

Après avoir été extraite de la carrière, la terre est déchargée et stockée dans un endroit bien espacé et bien aéré pour faciliter la manipulation.

Après l'extraction, la latérite contient des débris organiques. La préparation de la latérite consiste alors à enlever ces débris qui pourraient affecter la qualité des matériaux obtenus.

1.2.2. Le purin :

Le purin est un liquide qui s'égoutte des fumiers. Ce liquide provient de l'urine produite par les animaux, de la pluie qui lessive les fumiers lors de leur entreposage à l'extérieur et de l'eau

formée pendant la décomposition des fumiers. Le purin est généralement chargé d'éléments solubles.

Il contient des matières organiques très fine susceptibles de s'insérer entre les particules du sol et former des agrégats (FOSTER, 1981). Cette matière organique soluble est facilement décomposable par les microorganismes du sol qui en font des acides (MEEK et al., 1979). Les minéraux du purin sont solubles en majeure partie.

Il est aussi chargé de nombreux micro-organismes vivants. C'est pourquoi, il est utilisé comme source de micro-organismes et de nutriments pour activer la vitesse de croissance des micro-organismes.

Le purin utilisé dans le cadre de ce travail a été collecté dans la ferme des éleveurs qui se trouve à proximité du Campus Universitaire de Vontovorona.

1.2.3. Le sable

Le sable a été prélevé au niveau de la rivière d'Andromba (à l'Est de Campus Universitaire). Il a été utilisé pour la correction granulométrique des latérites qui ont une granulométrie fine et serrée. Après la collecte, nous avons séché puis tamisé et récupéré les parties utiles telles que :

- Sable ayant un diamètre compris entre 0,08 mm et 1mm, classe 0/1;
- Sable ayant un diamètre compris entre 0,08 mm et 2,5mm, classe 0/2,5.

Après le tamisage, nous avons éliminé les grains fins qui collent sur les grains de sable moyens, par lavage.

1.2.4. Le sucre

Nous avons utilisé le sucre de canne dans le cadre de ce travail. Il est utilisé comme nutriment pour les micro-organismes afin d'activer la réduction microbienne. Il est acheté auprès d'une épicerie de la zone d'étude.

1.2.5. L'urée

Il est utilisé comme d'azote pour améliorer les activités bactériennes. Il est acheté auprès de distributeurs de produits chimiques de la Capitale.

1.2.6. L'oxyde de fer

Il est utilisé pour corriger la teneur en oxyde de fer de la latérite. Il est acheté auprès d'une quincaillerie de Vontovorona.

1.2.7. L'eau

Nous avons prélevé l'eau dans la rivière d'Andromba, qui se trouve à proximité du Campus Vontovorona qui est exempt de produit chimique (sans traitement physico-chimique) pour la réalisation de notre expérience.

La raison du choix de cette eau de rivière est d'éviter l'inhibition des activités bactériennes par les microorganismes présents dans la latérite par les produits chimiques.

1.3. DOSAGE DES MATIERES PREMIERES ET CONSOMMABLES

Elle consiste à peser et mélanger les différentes matières qui constituent chaque échantillon utilisé pour la maîtrise des paramètres influençant la stabilisation de la latérite par les micro-organismes.

Douze (12) échantillons ont été préparés dont la composition est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Composition de chaque échantillon

N°	Latérite1 (%)	Latérite2 (%)	Sable (%)	Oxyde de fer (%)	Sucre (%)	Urée (%)	Purin de bœuf
1	100	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	saturation
3	95	-	5 (0,08- 2,5mm)	-	-	-	saturation
4	95	-	5 (0,08 - 1 mm)				saturation
5	-	95	5 (0,08 - 1 mm)	-	-	-	saturation
6	-	90	5 (0,08 - 1 mm)	5	-	-	saturation
7	-	85	5 (0,08 - 1 mm)	10	-	-	saturation
8	90		5 (0,08 - 1 mm)	5	-	-	saturation
9	90	-	5 (0,08 - 1 mm)	-	5	-	saturation
10	85	-	5 (0,08 - 1 mm)	-	10	-	saturation
11	85	-	5 (0,08 - 1 mm)	-	5	5	saturation
12	80	-	5 (0,08 - 1 mm)	-	5	10	saturation

Le but de ces différents essais d'expérimentations est de déterminer les paramètres optimaux de la stabilisation de la latérite par les micro-organismes.

1.3.1. Essai N° 1 : Latérite 1 + eau de rivière

Cet essai a pour but de vérifier la réaction de réduction biologique du fer sans amorçage et sans correction de la granulométrie.

1.3.2. _Essai N°2 : Latérite 1 + eau + purin de zébu

Il consiste à vérifier la réaction de réduction microbienne de latérite en activant la réaction par le purin qui est une source de micro-organismes et de nutriment.

1.3.3. Essai N°3 : latérite 1 95%+ Sable 5% (0,08 - 2,5 mm) + eau + purin

Il a pour finalité de déterminer la performance du matériau lorsqu'on améliore la granularité par l'apport de sable de dimension variable. D'après l'analyse granulométrique et l'analyse chimique déjà effectués, notre échantillon contient une forte proportion d'éléments fins et une quantité assez faible en silice, il suffit donc d'améliorer cette granularité par l'apport de sable. Nous avons ajouté 5% de sable sur la latérite à stabiliser pour avoir un taux de 30 à 50% en silice ce qui caractérise la forte compacité du matériau. Ceci est un raisonnement mentionné dans la littérature [15].

1.3.4. Essai N°4 : latérite 1 95%+ Sable 5% (0,08 - 1 mm) + eau + purin

Cet essai est presque pareil à l'essai N°3. La seule différence réside sur la granularité du sable additionné. Il a pour but de déterminer la granularité optimale du sable pour améliorer la résistance à la compression du matériau obtenu par la stabilisation de la latérite par les micro-organismes.

1.3.5. _Essai N°5 : latérite 2 95%+ Sable 5% (0,08 - 1 mm) + eau + purin

Il a pour but de déterminer l'évolution de la résistance à la compression du matériau lorsque la teneur en fer de la latérite est faible (15,70%).

1.3.6. Essai N°6 : latérite 2 90% + Sable 5% (0,08 - 1 mm) + Fe_2O_3 5% + eau + purin

Cet essai sert à déterminer l'évolution de la résistance à la compression des matériaux obtenus lorsqu'on améliore la teneur en oxyde de fer de la latérite par un apport externe.

1.3.7. _Essai N°7 : latérite 2 95%+ Sable 5% (0,08 - 1 mm) + Fe_2O_3 10% + eau + purin

Cet essai est semblable à l'essai N°7, la seule différence réside au niveau de l'apport en oxyde de fer. Dans ce cas, l'apport est de 10% au lieu de 5% pour le précédent essai.

1.3.8. Essai N°8 : Latérite 1 90% + Sable 5% (0,08 - 1 mm) + Fe_2O_3 5% + eau + purin

Cet essai a pour objectif de déterminer la limite maximale de la teneur en oxyde de fer de la latérite à stabiliser.

1.3.9. Essai N°9 : latérite 1 90% + Sable 5% (0,08 - 1 mm) + sucre 5% + eau + purin

Il a pour finalité de déterminer l'évolution de la résistance à la compression du matériau lorsqu'on ajoute des matières carbonées (sucre), comme nutriment, pour améliorer les activités des micro-organismes.

1.3.10 Essai N°10 : latérite 1 85% + Sable 5% (0,08 - 1 mm) + sucre 10% + eau + purin

Cet essai ressemble au précédent, la seule différence réside au niveau de la quantité de sucre apportée, 10% au lieu de 5% pour le précédent essai.

1.3.11. Essai N°11 : latérite 1 85%+Sable 5% (0,8 - 1 mm)+ sucre 5% + urée 5% + eau + *purin*

Il a pour but de déterminer l'évolution de la résistance à la compression du matériau lorsqu'on ajoute de l'urée et du sucre dans la latérite pour améliorer les activités des micro-organismes. Le sucre et l'urée peuvent être utilisés comme nutriment par les micro-organismes.

1.3.12. Essai N°12 : latérite 1 80%+ Sable 5%(0,8 - 1 mm)+sucre 5% +urée 10% +eau+ *purin*

Cet essai ressemble au précédent, la seule différence réside au niveau de la quantité d'urée apportée, 10% au lieu de 5% pour le précédent essai.

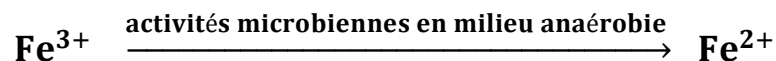
1.4. REDUCTION MICROBIENNE

Cette étape est très importante dans notre investigation. Elle est délicate et exige des conditions précises aux activités bactériennes et leur croissance qui réduisent le fer ferrique (Fe^{3+}) en fer ferreux (Fe^{2+}).

En effet, certains microorganismes tels *Bacillus polymyxa*, *Bacillus circulans*, *Sporogènes de Clostridium* et *Aerobactera érogences* peuvent utiliser le fer ferrique comme accepteur

d'électrons. La réduction du Fe^{3+} constitue une forme importante de respiration anaérobie c'est-à-dire en absence d'oxygène. Le fer ferrique peut former des complexes avec de nombreux composés organiques, ce qui lui permet par la suite de devenir soluble et à nouveau disponible comme accepteur d'électron pour les bactéries réductrices de fer ferrique. L'hydroxyde ferrique nouvellement précipité peut lui interagir avec d'autres substances non biologiques, comme des substances humiques, ce qui conduit à la réduction du fer ferrique en fer ferreux. [19], [20]

La réaction correspondante à cette réduction du fer ferrique en fer ferreux peut s'écrire comme suit:



Remarque :

Suivi de la réaction de réduction du fer ferrique en fer ferreux :

- La teneur en eau joue un rôle important pendant la réduction microbienne. Ainsi, elle a été suivie et contrôlée par addition d'une certaine quantité d'eau jusqu'à saturation totale après le prélèvement de l'échantillon utilisé pour le moulage ;
- Le moulage des éprouvettes nous permet de contrôler l'évolution de la réaction mise en jeu dans les bioréacteurs. Nous avons donc effectué le moulage des éprouvettes toutes les deux semaines.

1.5. MOULAGE/DEMOULAGE DES EPROUVETTES

1.5.1. Moulage

Le moulage consiste à couler dans un moule une pâte ou un matériau qui a subi un traitement préalable ou non pour avoir la forme souhaitée et les reliefs à exécuter.

D'une façon générale, il existe trois types de moulage :

- moulage par compression ;
- moulage par injection et injection-compression ;
- moulage par transfert.

Les caractéristiques de ces moulages sont : la facilité de mise en œuvre, la présentation de la matière à mouler (granulation, masse volumique apparente), la rapidité de réticulation (séchage et/ou cuisson) et le retrait.

Le choix de la méthode de moulage doit être fait en fonction de la quantité et du coût des pièces à produire; du risque de déformation et de tolérance dimensionnelle; du type de matière et de la nature des charges et des renforts; de la dimension des pièces; des difficultés de moulage et des opérations de finition.

Dans notre cas, la matière à mouler (latérite en forme de pâte) se présente sous forme granulaire. Un système de compression est donc indispensable pour l'obtention d'un nouveau matériau ayant un comportement adapté à des sollicitations extérieures : une bonne résistance mécanique due à la forte cohésion entre les grains. C'est la raison du choix du moulage par compactage pendant la confection des éprouvettes. Nous avons utilisé le moule réalisé et décrit auparavant (cf sous paragraphe 1.1.2) durant le travail.

L'objectif principal de ce moulage par compression est de :

- réorganiser les particules du sol pour qu'elles puissent bien se lier entre elles ;
- augmenter la densité sèche du sol, en chassant l'air qu'il contient ;
- diminuer la porosité et la perméabilité du sol.

Nous avons utilisé une presse hydraulique multifonctionnelle du Bloc Technique d'Ankatso pour le moulage et compactage des éprouvettes. Nous avons adopté une pression de compactage de 20,38 MPa (environ une force de 40 000 N avec la section d'éprouvette $1,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$). Nous avons choisi cette pression de compactage pour pouvoir comparer nos résultats par rapport aux résultats des études antérieures.



Photo 11 : Presse hydraulique TESTWELL multifonctionnelle permettant le compactage et le test de la résistance à la compression (Bloc Technique Ankatso)

1.5.2. Démoulage

Il consiste à faire sortir l'éprouvette ainsi moulée dans le moule qui le contient. Il doit être effectué soigneusement et délicatement car les éprouvettes sont plus ou moins molles à un tel point que le moindre choc risquerait de détruire les bordures.

Nous avons utilisé de l'huile au cours du moulage pour éviter le collage de la pâte à la paroi interne du moule, donc pour faciliter le démoulage.

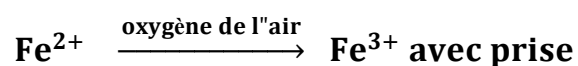


Photo 12 : Quelques échantillons d'éprouvettes obtenus

1.6. SECHAGE ET PRISE

C'est lors du séchage que s'effectue la prise qui conduit au durcissement des éprouvettes.

La prise résulte de l'oxydation du fer ferreux produit par l'action des micro-organismes sur les ions Fe^{3+} , à son tour en fer ferrique par l'oxygène de l'air.



Deux modes de séchage ont été réalisés au cours de ce travail :

- le séchage naturel
- le séchage sous atmosphères contrôlé

1.6.1. Séchage naturel

Le séchage permet l'élimination de l'eau non combinée contenue dans le mélange. Cette eau a permis le façonnage des éprouvettes, en développant la plasticité des pâtes. Elle peut être chassée en maintenant les pièces dans un endroit aéré et ensoleillé, jusqu'à ce que leur poids reste constant. Au fur et à mesure que les pâtes sèchent, leur plasticité diminue jusqu'à disparaître en même temps qu'elles prennent une solidité et une dureté relative.

C'est donc pendant le séchage que peuvent se produire les accidents de fabrication, les fissures que nous constatons assez souvent au cours du séchage des pièces moulées.

Ainsi, nous avons conservé les éprouvettes à l'ombre pendant une semaine dans un milieu bien aéré pour assurer l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} , puis les exposer dans un espace bien aéré et ensoleillé, pendant 3 semaines. Les éléments stockés sont entreposés avec soins. L'aire de séchage doit être parfaitement plane durant la première semaine de séchage pour éviter la déformation de l'éprouvette.



Photo 13 : Séchage à l'air libre des éprouvettes

1.6.2. Séchage sous atmosphère contrôlée

Il consiste à mettre les éprouvettes dans une étuve avec une certaine quantité d'eau (l'eau et les éprouvettes ne sont pas en contact direct). La température est maintenue constante à 80°C . La vapeur d'eau assure une certaine humidité dans l'étuve afin de ralentir la vitesse d'évacuation des eaux restante dans les éprouvettes. Après quelques jours, les éprouvettes deviennent rouge ce qui indique la transformation du Fe^{2+} en Fe^{3+} .



Photo 14 : Séchage sous atmosphère contrôlée des éprouvettes

1.7. CARACTERISATION DES PRODUITS FINIS

La caractérisation des produits finis que nous avons réalisés au cours de ce travail sont la détermination de la résistance à la compression et la porosité.

1.7.1. Résistance à la compression

Après le séchage, les éprouvettes subissent les essais à l'écrasement sur la presse hydraulique (Photo 11). Le principe consiste à positionner les éprouvettes entre les plateaux de la presse, puis les soumettre progressivement à une charge jusqu'à la rupture par compression (écrasement sous charge axiale).

La résistance à la compression est exprimée par la formule suivante :

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

Avec R_c : résistance à la compression (bar) ;

$f_{\max}$: force de compression maximale supportée par le matériau (daN) ;

S : section de l'éprouvette (cm²).

➤ Remarque :

Deux types de test ont été réalisés :

- Le test à l'état sec : après séchage à 28 jours les éprouvettes sont soumis au test ;

- Le test à l'état humide : après séchage à 28 jours, les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant 48 heures puis soumis au test.

1.7.2. Porosité

La porosité est le rapport du volume des vides et du volume total du matériau; c'est-à-dire le volume occupé par l'air, l'eau ou les deux fluides simultanément, au volume total de l'éprouvette.

Le principe consiste à peser une éprouvette séchée, puis l'immerger dans l'eau pendant 48 heures de temps, on pèse, ensuite cette dernière après avoir sortie de l'eau pendant 20 minutes.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$\%P = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 = \frac{P_e}{P_s} \times 100$$

Avec P_e : poids de l'eau

P_h : poids humide de l'éprouvette après 48 heures d'immersion

P_s : poids sec de l'éprouvette

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. REDUCTION MICROBIENNE

L'évolution de la réduction du fer ferrique en fer ferreux par les micro-organismes a été déterminée par la quantité de Fe^{2+} formé au cours des activités bactérienne par rapport à la quantité de Fe^{3+} initial.

2.1.1. Effet de l'activation de la réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} par l'ajout de purin

Les essais N° 1 et 2 ont été réalisés pour vérifier la réaction de réduction microbienne de latérite en activant la réaction par le purin qui est une source de micro-organismes et de nutriment.

Les résultats des essais N° 1 et 2 sont donnés par la figure suivante :

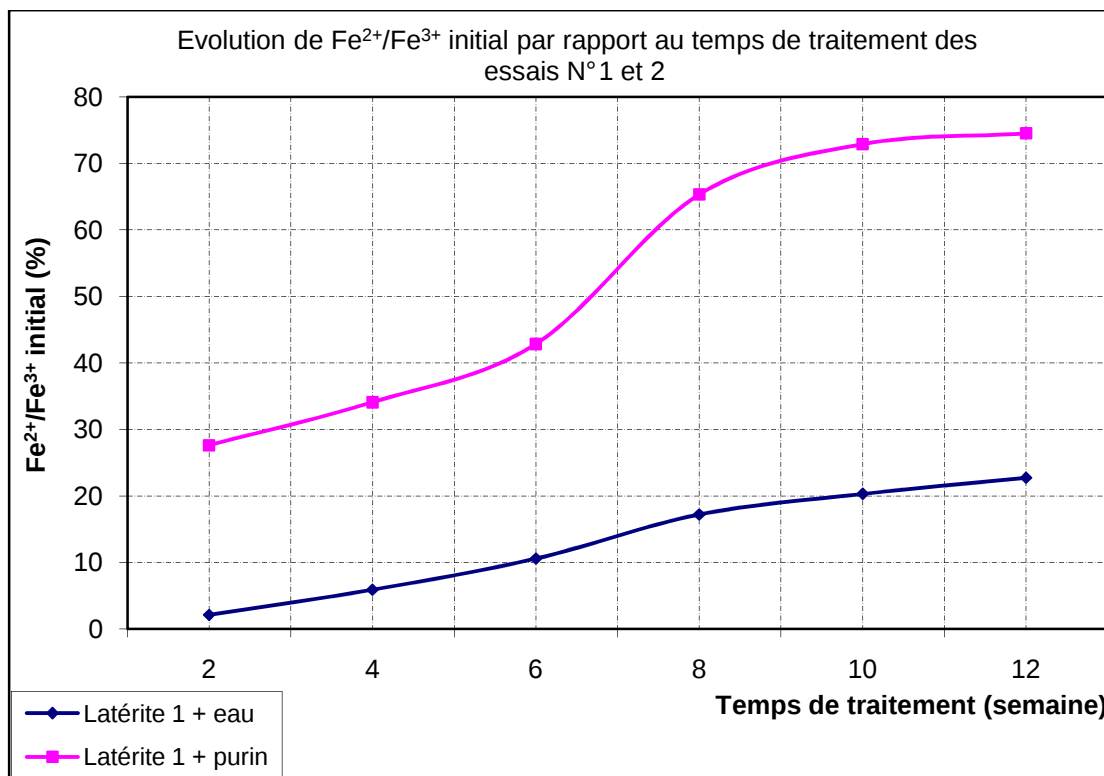


Figure 8 : Evolution de la quantité de fer réduite par les micro-organismes en fonction du temps de traitement, par rapport à la teneur en fer ferrique initiale de la latérite, pour les essais N° 1 et 2.

Le graphique ci-dessus montre que le purin apporte les éléments nécessaires à la croissance et à la multiplication rapide des micro-organismes. Il assure la densification des micro-organismes réducteurs du fer ferrique. En effet, sans purin, 23% de fer ferrique seulement ont été réduits en fer ferreux après 12 semaines de traitement. Alors que l'apport de purin augmente largement la vitesse de réduction. La vitesse de la croissance microbienne est tellement importante entre la 6^e et la 8^e semaine, le taux de fer III réduit passe de 43 à 65%. Toutefois, elle diminue peu à peu à partir de la 8^e semaine, car l'oxyde ferrique contenu de l'échantillon commence à s'épuiser, puis elle se stabilise à partir de la 10^{ème} semaine. Après 12 semaines de traitement, 75% de fer ferrique ont été réduits en fer ferreux. Donc, à partir de la 10^e semaine, les activités des micro-organismes deviennent de plus en plus faibles.

2.1.2. Effet de la teneur en fer de la latérite sur les activités bactériennes

Les essais N° 5 à 8 ont été réalisés pour étudier le comportement des micro-organismes par rapport à la teneur en oxyde de fer de la latérite ainsi que l'apport externe d'oxyde de fer pour corriger la faible teneur.

Le graphique suivant montre le résultat des essais N° 5 à 8 :

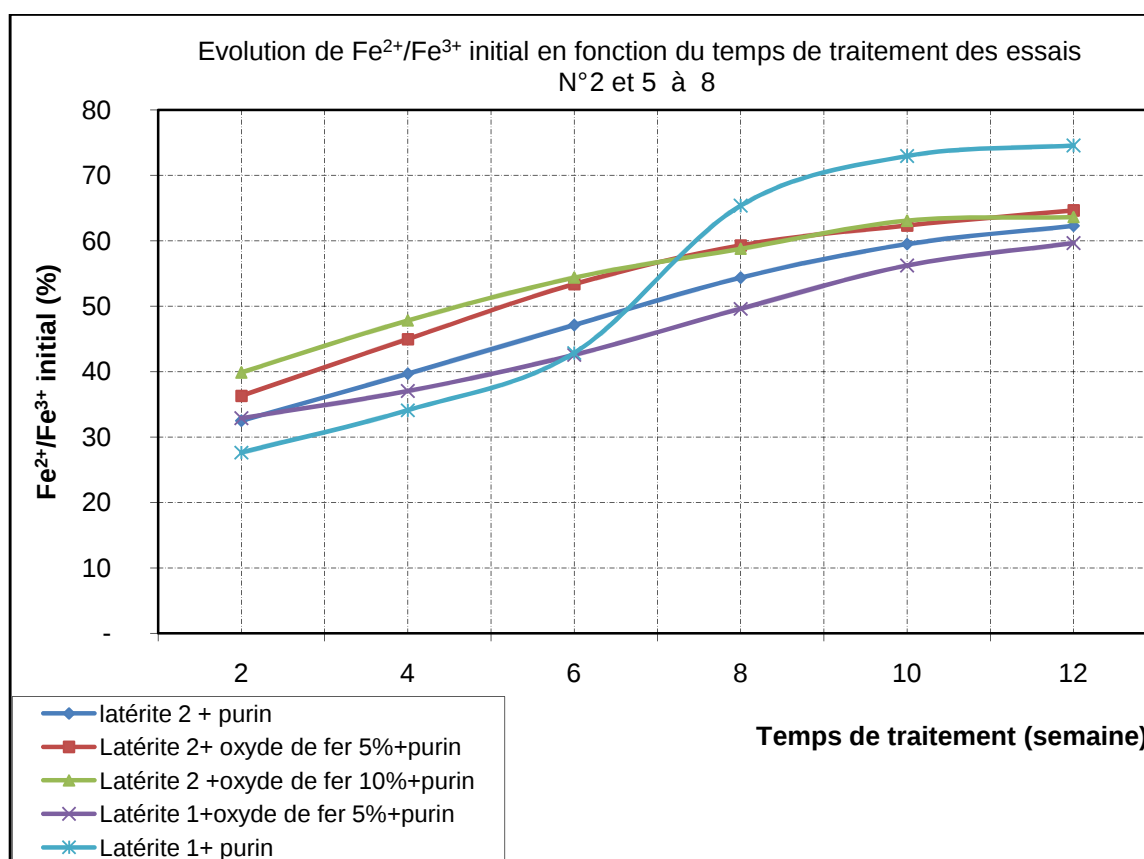


Figure 9 : Evolution de la quantité de fer réduite par les micro-organismes en fonction du temps de traitement par rapport à la teneur en fer ferrique initiale de la latérite pour les essais N° 5 à 8

Le graphique ci-dessus montre que :

- la teneur en oxyde de fer initiale de la latérite influe beaucoup sur les activités des micro-organismes pour la réduction du fer ferrique en fer ferreux. En effet, lorsque la teneur en oxyde de fer est faible, la vitesse de formation du fer ferreux croît lentement en fonction du temps (latérite 2 + purin). Cependant, lorsque la teneur en oxyde de fer est élevée, la vitesse de formation du fer ferreux croît lentement jusqu'à la 6^{ème} semaine, puis elle augmente rapidement jusqu'à la 8^{ème} semaine, ensuite elle se stabilise légèrement jusqu'à la 12^{ème} semaine (latérite 1 + purin) ;
- l'apport de 5% d'oxyde de fer à la latérite 2 (teneur en oxyde de fer 15,70%) améliore légèrement la vitesse de formation du fer ferreux. Toutefois, l'augmentation de l'apport à 10% d'oxyde de fer n'a presque pas d'impact sur la vitesse de la réduction du fer ferrique en fer ferreux ;

- l'addition de 5% d'oxyde de fer à la latérite 1 (teneur en oxyde de fer 26, 01%), à forte teneur en oxyde de fer inhibe l'activité bactérienne de la réduction du fer ferrique en fer ferreux.

2.1.3. Effet de l'ajout de sucre et de l'urée sur les activités bactériennes

Les essais N° 9 à 12 ont été réalisés pour étudier le comportement des micro-organismes par l'apport de nutriments supplémentaire tels que le sucre et l'urée, en plus de celui apporté par le purin ainsi que l'impact de cet apport sur les activités des micro-organismes réducteurs de fer ferrique en fer ferreux.

La figure suivante montre l'évolution de la vitesse de formation du fer ferreux en fonction du temps de traitement si on ajoute du sucre ou de l'urée à la latérite :

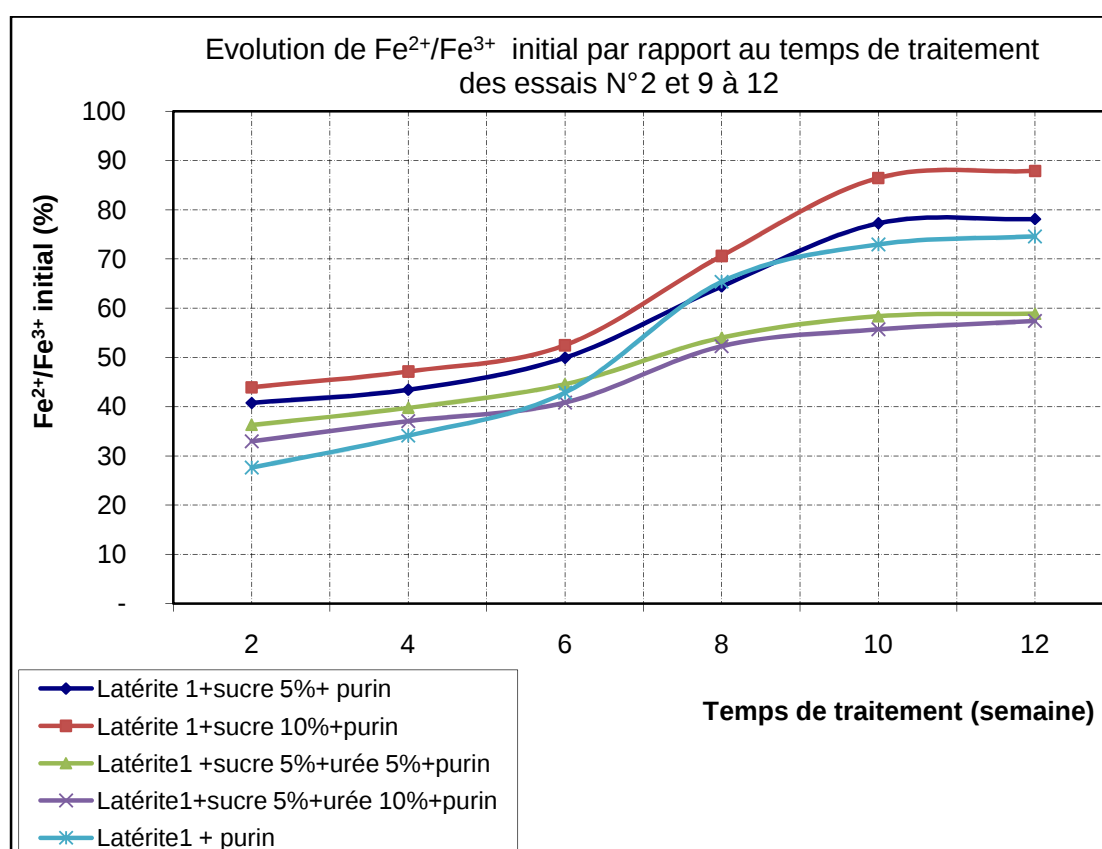


Figure 10 : Evolution de la quantité de fer réduite par les micro-organismes en fonction du temps de traitement, par rapport à la teneur en fer ferrique initiale de la latérite, pour les essais N° 9 à 12

Le graphique ci-dessus montre que :

- l'apport de sucre améliore sensiblement la réduction du fer ferrique en fer ferreux. La vitesse de formation est tellement importante entre la 6^{ème} et la 10^{ème} semaine, plus la quantité ajoutée est élevée, plus la vitesse de réduction du fer ferrique en fer ferreux s'améliore.
- l'ajout de l'urée en plus du sucre améliore légèrement la vitesse de formation de fer II jusqu'à la 6^{ème} semaine de traitement. Toutefois, cet apport inhibe l'activité bactérienne à partir de la 6^{ème} semaine, plus la quantité ajoutée est élevée, plus l'inhibition est importante.

On peut dire alors que les micro-organismes réducteurs du fer ferrique en fer ferreux n'ont besoins que des matières hydrocarbonées pour se développer, ils n'ont pas besoin de matières azotées.

2.2. CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

2.2.1. Caractéristiques des éprouvettes obtenues par le séchage naturel

2.2.1.1. *Effets de l'activation par le purin et la correction granulométrique (Essai N°1 à 4)*

Les essais N° 1 à 4 ont été réalisés pour étudier la réduction du fer III en fer II par les micro-organismes. Ils ont aussi permis de déterminer la correction granulométrique optimale de la latérite par le sable de rivière.

Les résultats obtenus ainsi que les commentaires y afférents sont les suivants :

a) *Résistance à la compression à l'état sec*

La figure suivante montre l'évolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 1 à 4 :

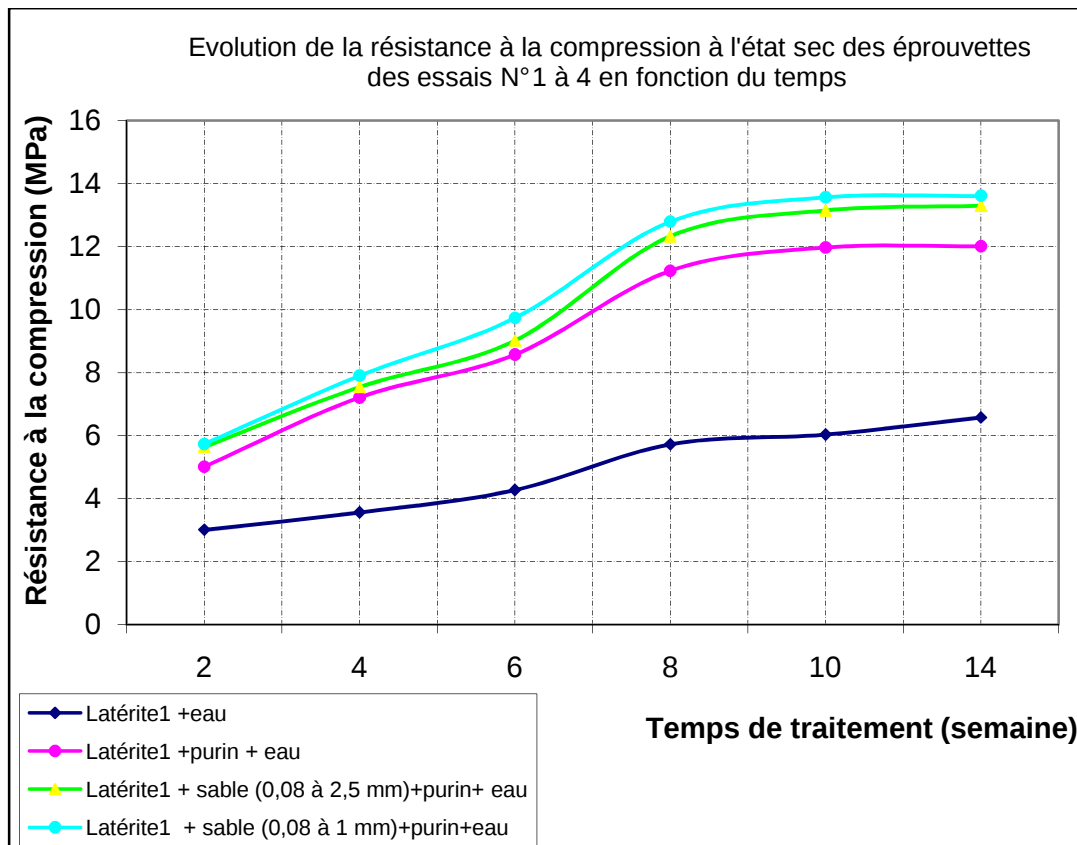


Figure 11 : Evolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 1 à 4 en fonction du temps

La figure ci-dessus montre que la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes obtenues au cours des essais N° 2 à 4, augmente progressivement en fonction du temps. Cette augmentation est beaucoup plus importante entre la 6^e et la 8^e semaine, puis elle diminue peu à peu pour se stabiliser à partir de la 10^e semaine.

Les résultats obtenus montrent bien que le mécanisme de prise des éprouvettes est causé par la réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} par les microorganismes en milieu anaérobie, suivie de son oxydation par l'oxygène de l'air pendant le séchage.

L'apport de micro-organisme par l'intermédiaire du purin accélère considérablement la prise. La résistance à la compression à l'état sec a presque doublé après 12 semaines de traitement, par l'ajout de purin. Elle est passée de 6,57 à 12,01 MPa.

Nous avons pu améliorer encore cette résistance à la compression à l'état sec en effectuant une correction granulométrique appropriée. Elle est passée de 12,01 à 13,61 MPa, soit une augmentation de 1,60 MPa par l'ajout de 5% de sable de granulométrie entre 0,08 à 1 mm.

b) *Résistance à la compression à l'état humide*

La figure suivante résume l'évolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 1 à 4 :

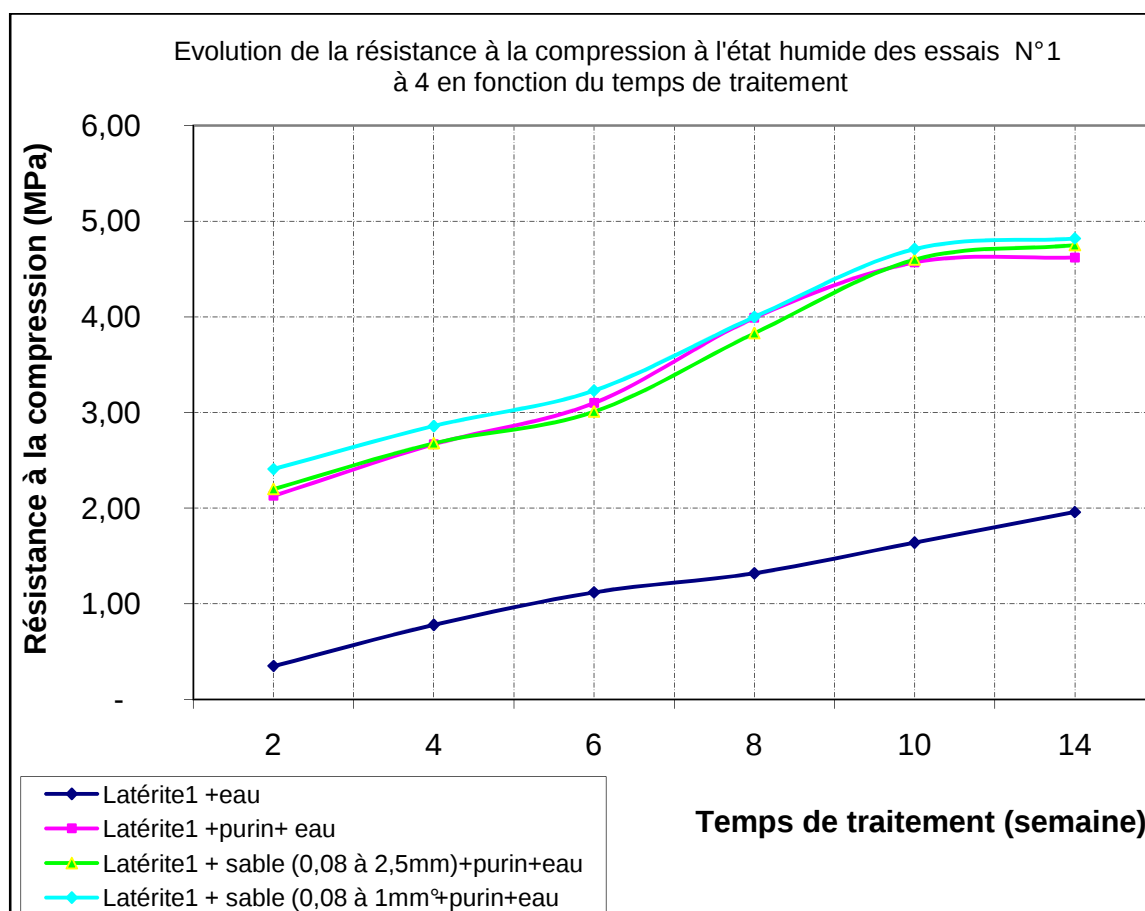


Figure 12 : Evolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 1 à 4 en fonction du temps

La figure ci-dessus montre bien que les éprouvettes obtenues par les essais N° 1 à 4 résistent à l'eau. L'ajout de purin a considérablement amélioré la résistance à la compression à l'état humide. Une augmentation de 146% de la valeur de la résistance à la compression à l'état humide a été constatée. Elle est passée de 1,96 à 4,82 MPa.

La correction granulométrique n'apporte pas grand-chose à la résistance à la compression, à l'état humide. Elle est passée de 4,62 à 4,82 MPa, soit une augmentation de 0,20 MPa seulement.

c) Porosité

L'évolution de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de traitement des essais N° 1 à 4, est donnée par la figure suivante :

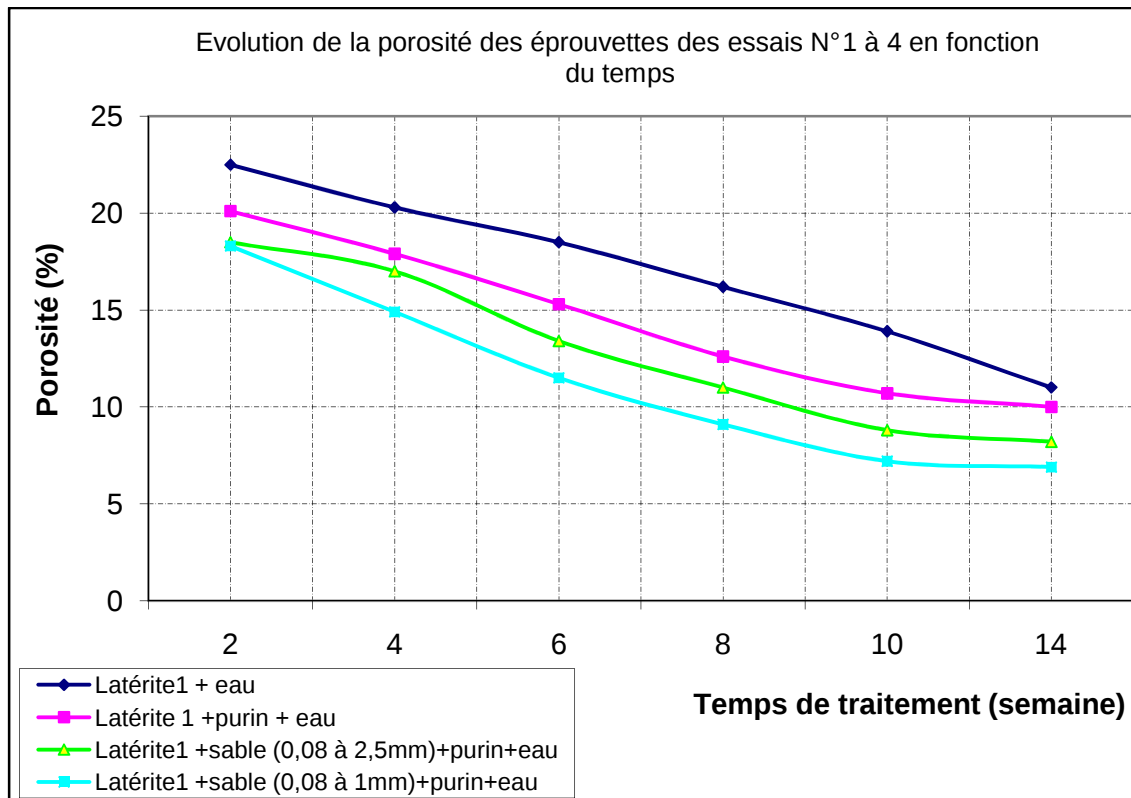


Figure 13 : Evolution de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de traitement

La figure ci-dessus montre que la porosité des éprouvettes s'améliore en fonction du temps de traitement. Cette évolution est très remarquable dans le cas du quatrième essai avec lequel nous avons ajouté du purin combiné à une correction granulométrique adéquate. Ainsi, la porosité finale (après 14 semaines de traitement) de 11% dans le premier essai (latérite1 + eau) est passée à 6,9% dans le cas du quatrième essai (latérite1 + sable (0,08 à 1mm) + purin). Un écart de 4,1% a été constaté.

Aussi, la stabilisation de la latérite par les micro-organismes diminue considérablement la porosité du matériau car le vide à l'intérieur créé reste faible. Ce phénomène a un impact important sur la qualité du matériau à résister contre l'action de l'eau car la possibilité de pénétration de celle-ci (qui altère la liaison des granulats) à l'intérieur du matériau même est très faible.

d) Conclusion

On peut dire que l'activation de la réduction microbienne de l'oxyde de fer par le purin améliore considérablement la résistance à la compression des éprouvettes. Cette activation a permis de réduire à 10 semaines le temps de traitement optimal.

La dimension optimale de sable pour la correction granulométrique de la latérite est de 0,08 à 1 mm tandis que la quantité optimale est de 5% pour la latérite de Vontovorona.

2.2.1.2. Effets de la teneur et de l'apport externe en oxyde de fer (Essais N° 5 à 8)

Les essais N° 5 à 8 ont été réalisés pour étudier l'effet de la teneur en fer de la latérite sur les résistances mécaniques à l'état sec, à l'état humide et de la porosité des éprouvettes. Ils ont aussi permis d'étudier l'effet de l'apport externe d'oxyde de fer à la latérite. Les résultats de cette étude ainsi que les commentaires y afférents sont les suivants :

a) Résistance à la compression à l'état sec

L'évolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes en fonction du temps, des essais n° 4 à 8 est donnée par la figure suivante :

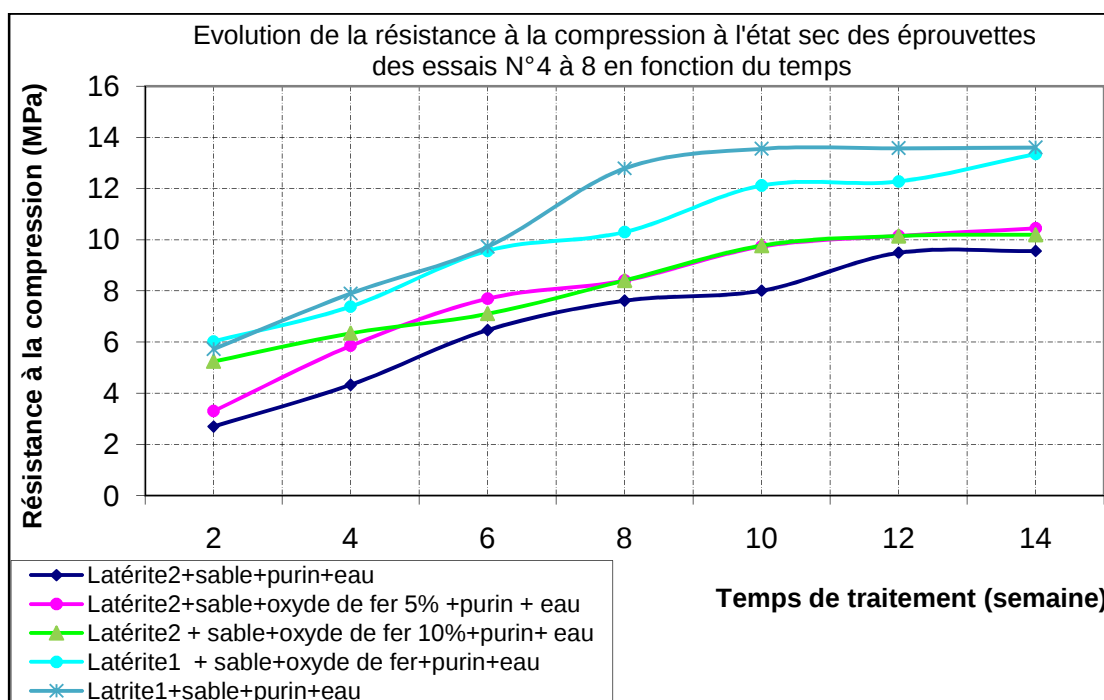


Figure 14 : Evolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 4 à 8 en fonction du temps

La figure ci-dessus montre le résultat de la stabilisation de la latérite 2 à 15,70 % d'oxyde de fer par les micro-organismes. On constate que la teneur naturel en oxyde fer de la latérite joue un rôle très important dans le processus de stabilisation, surtout sur la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes.

Plus la teneur en oxyde de fer est élevée, plus, la résistance à la compression à l'état sec est élevée. En, effet, pour la latérite de teneur en oxyde de fer à 26,01%, la résistance à la compression à l'état sec est égale à 13,6 MPa tandis que pour la latérite 2, à 15,70% d'oxyde de fer, elle est égale à 9,6 MPa, après 14 semaines de traitement, donc un écart de 4 MPa a été constaté.

C'est pour cette raison que nous avons ajouté de l'oxyde de fer à la latérite 2 pour corriger sa teneur en oxyde de fer.

Aussi l'apport de 5% d'oxyde de fer a entraînée une légère augmentation de la résistance à la compression à l'état sec. Nous avons constaté une légère amélioration de 0,9 MPa. Toutefois, l'augmentation de l'apport d'oxyde de fer à 10% a entrainé une légère diminution de la résistance à la compression à l'état sec. Elle est peut être due à la présence de l'oxyde de fer en quantité trop élevée dans la latérite qui a affecté la cohésion des granulats des éprouvettes.

De même l'ajout de 5% d'oxyde de fer à la latérite 1 a causer une légère diminution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes, soit un écart de 0,26 après 14 semaines de stabilisation par les micro-organismes.

b) Résistance à la compression à l'état humide

L'évolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes en fonction du temps, des essais n° 2 et 4 à 8 est donnée par la figure suivante :

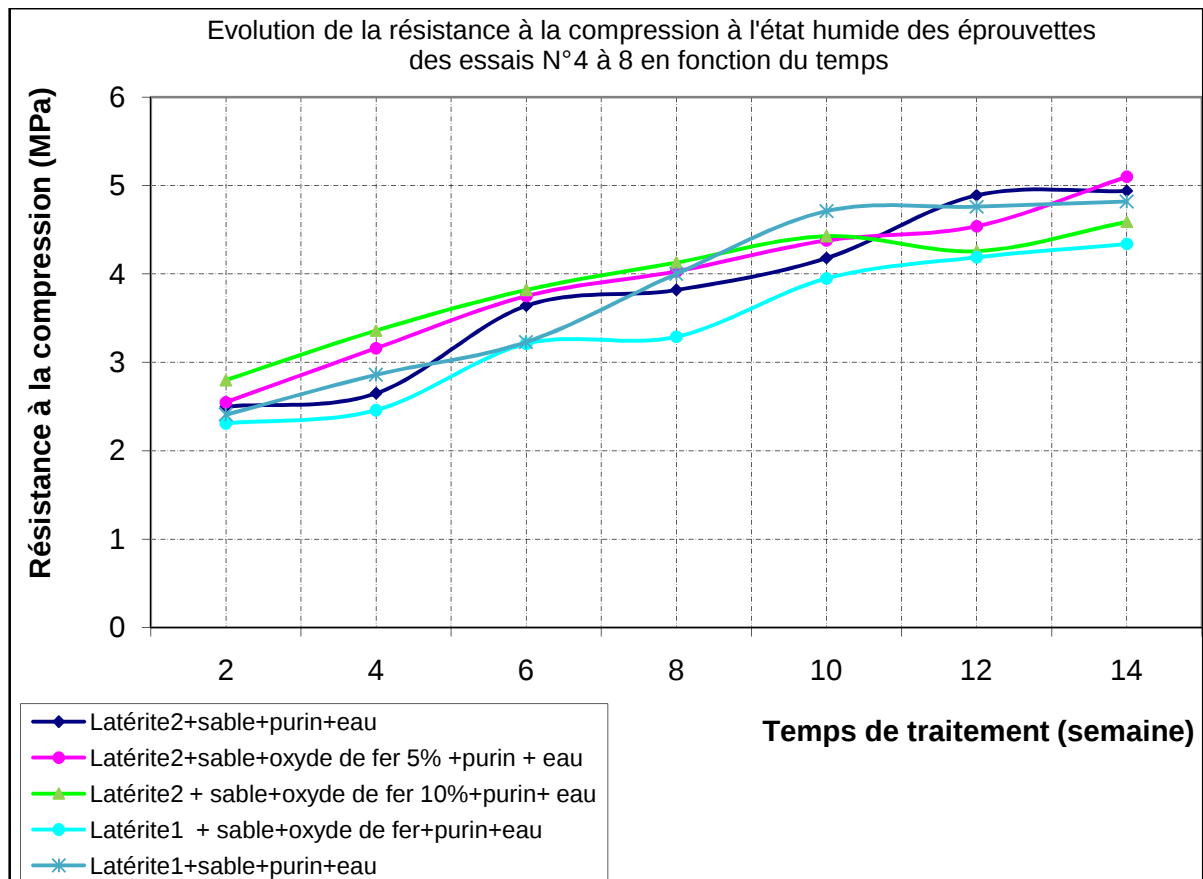


Figure 15 : Evolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 4 à 8 en fonction du temps

La figure ci-dessus montre que la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes obtenues par la stabilisation de la latérite 2 (teneur en oxyde de fer 15,70%) est meilleure que celle de la latérite 1 (teneur en oxyde de fer 26,01%). On a constaté un écart de 0,12 MPa, après 14 semaines de stabilisation par les micro-organismes. Toutefois, à la 10^{ème} semaine de traitement par les micro-organismes, la résistance mécanique à l'état humide des éprouvettes de la latérite 1 est supérieure à celle de la latérite 2. Un écart de 0,53 MPa a été constaté.

L'apport externe de 5% d'oxyde de fer à la latérite 2, améliore la résistance à l'eau du matériau. On a constaté un écart de 0,16 MPa, après 14 semaines de traitement. Tandis que l'ajout de 10% d'oxyde de fer à la latérite 2 diminue la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes. On a constaté un écart de 0,35 MPa, après 14 semaines de stabilisation par les micro-organismes.

Cependant, l'addition de 5 et 10% d'oxyde de fer à la latérite 2 a amélioré la résistance à l'eau des éprouvettes jusqu'à la 10^{ème} semaine de traitement. On a constaté un écart de 0,20 MPa pour l'ajout de 5% et de 0,25 MPa pour l'addition de 10% d'oxyde de fer.

L'ajout de 5% d'oxyde de fer à la latérite 1 affecte la résistance à l'eau des éprouvettes. Un écart de 0,48 MPa a été constaté, après 14 semaines de stabilisation.

Pour les essais N° 7 et 8, la diminution de la résistance à la compression à l'état humide est peut être due à la modification de la granulométrie de la latérite par la présence d'excès de fine particule dans le produit fini.

c) Porosité

La figure suivante montre l'évolution de la porosité des éprouvettes en fonction du temps, des essais n° 4 à 8 :

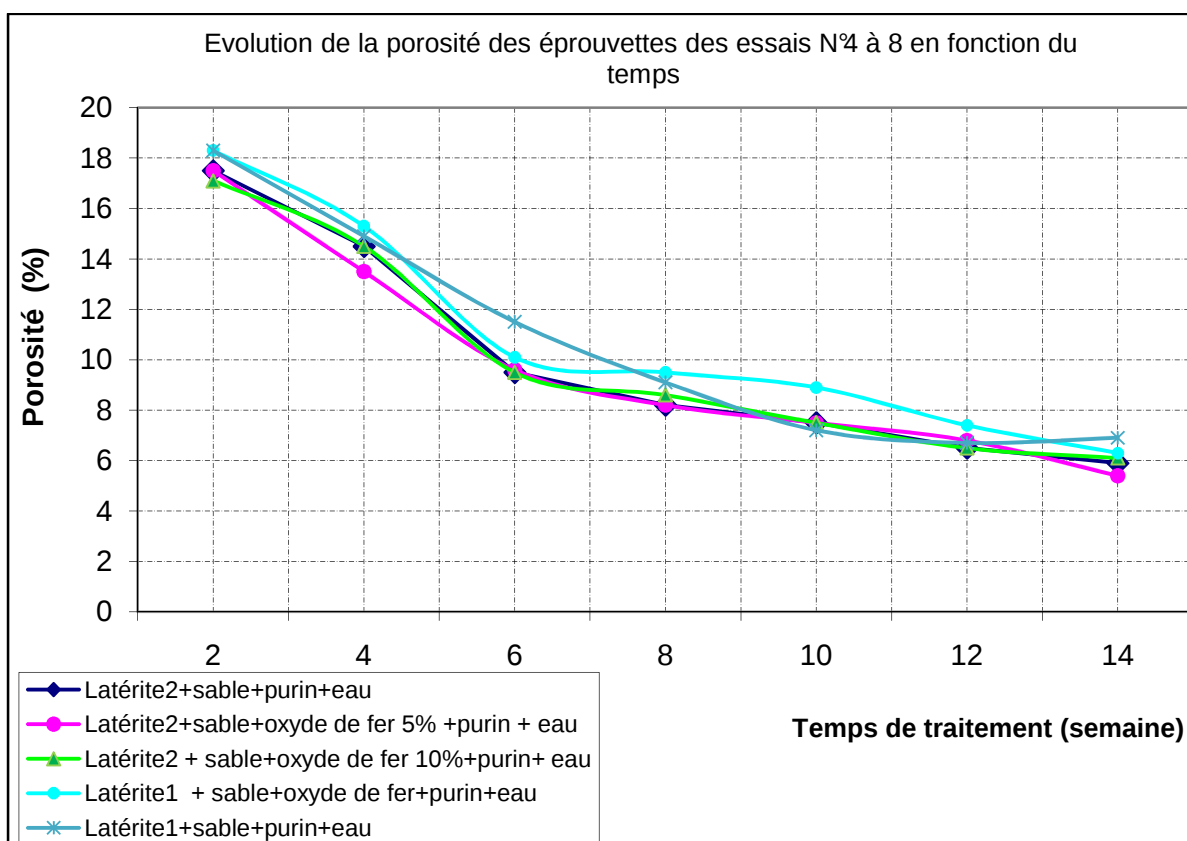


Figure 16 : Evolution de la porosité des éprouvettes des essais n° 4 à 8 en fonction du temps

Le graphique ci-dessus montre que la porosité des éprouvettes obtenues par la stabilisation de la latérite 2 est meilleure que celle de la latérite 1. On a constaté un écart de 1%, après 14 semaines de stabilisation par les micro-organismes.

L'apport externe de 5% d'oxyde de fer a encore amélioré la porosité de la latérite 2. On a constaté un écart de 0,5%, après 14 semaines de stabilisation. Toutefois, l'ajout de 10% d'oxyde de fer augmente la porosité des éprouvettes de 0,2%.

L'apport de 10% d'oxyde de fer à la latérite 1 améliore la porosité des éprouvettes obtenues à partir de cette latérite. On a constaté une augmentation de 0,3% après 14 semaines de stabilisation par les micro-organismes.

d) Conclusion

On peut en déduire pour conclure cette série d'essais que :

- l'apport d'oxyde de fer externe en quantité élevée peut affecter la résistance à la compression à l'état sec du matériau obtenu à partir du procédé de stabilisation de la latérite par les micro-organismes ;
- la teneur en oxyde de fer élevée, à l'état naturel de la latérite aura un impact important sur la résistance à la compression à l'état sec des matériaux obtenus par la stabilisation par les micro-organismes ;
- la teneur en oxyde de fer à l'état naturel de la latérite n'a pas d'impact direct sur la résistance à la compression à l'état humide du matériau obtenu par la stabilisation par les micro-organismes.
- l'apport externe de 10% d'oxyde de fer modifie la granularité de la latérite 2 qui affecte la qualité mécanique du matériau obtenu.

2.2.1.3. Effets de l'apport de sucre et de l'urée (Essais N° 9 à 12)

Les essais N° 9 à 12 ont été réalisés pour étudier le comportement des micro-organismes par l'apport de nutriments tels que le sucre et l'urée, en plus de celui apporté par le purin ainsi que l'impact de cet apport sur les résistances à la compression et la porosité des éprouvettes. Les résultats de cette étude ainsi que les commentaires y afférents sont les suivants :

a) Résistance à la compression à l'état sec

L'évolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes en fonction du temps, des essais N° 4, et de 9 à 12 est donnée par la figure suivante :

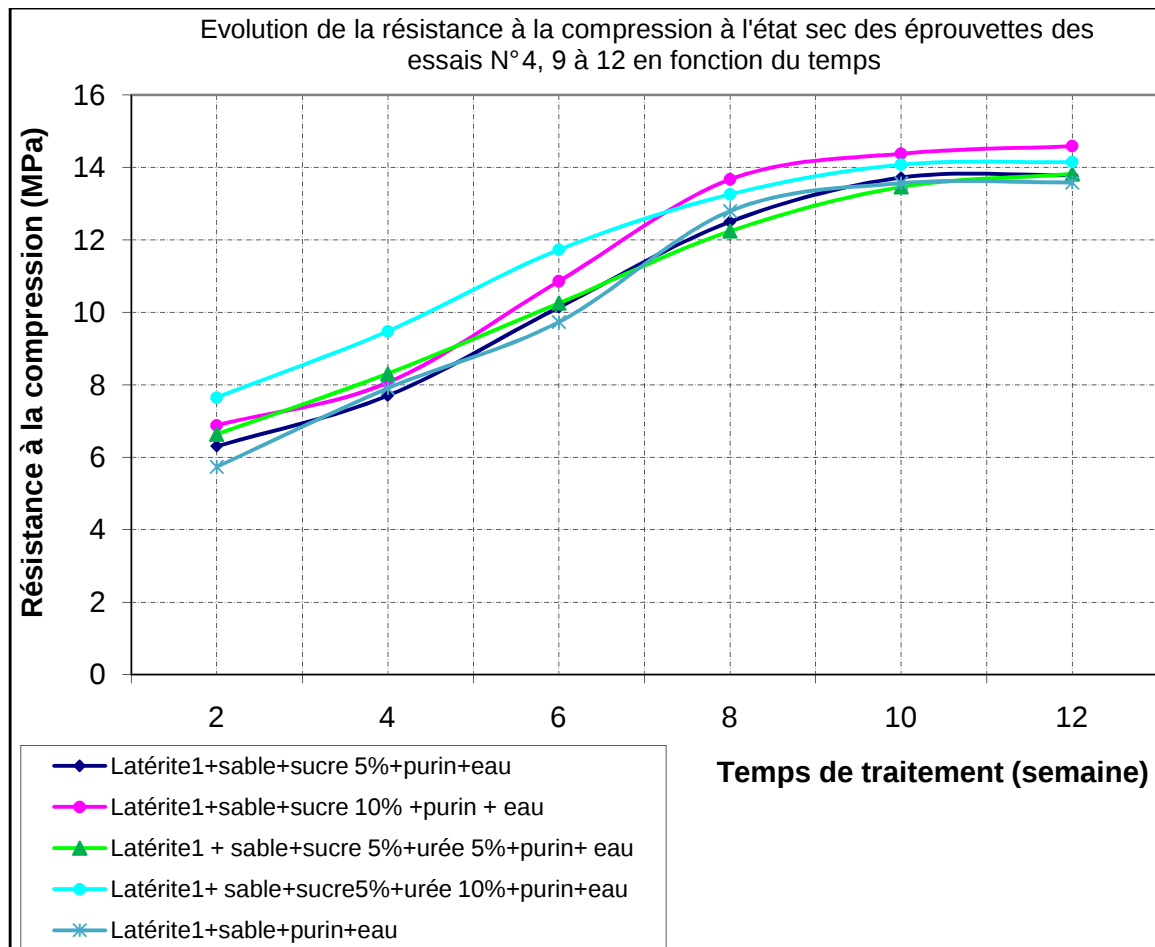


Figure 17 : Evolution de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes des essais N° 4, et de 9 à 12 en fonction du temps

La figure ci-dessus montre que l'apport de sucre a amélioré la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes. En effet l'apport de 5% de sucre a amélioré de 0,18 MPa la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes, tandis que l'ajout de 10% de sucre a donné une amélioration de la résistance à la compression à l'état sec de 0,98 MPa, après 14 semaines de traitement.

L'apport de mélange de sucre et d'urée a amélioré la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes. Cette amélioration est très importante jusqu'à la 7^{ème} semaine de traitement pour l'addition de 5% de sucre et de 10% d'urée. Toutefois, cette amélioration est moins importante par rapport à l'ajout uniquement de 10% de sucre, de la 8^{ème} jusqu'à la 14^{ème} semaine de traitement.

La résistance à la compression à l'état sec de 13,61MPa, obtenue avec l'essai N°4 (latérite 1+sable 5%+purin) après 14 semaines de traitement est atteinte après 8 semaines seulement par l'ajout de 10% de sucre ou 5% de sucre plus 10% d'urée à la latérite 1.

b) *Résistance à la compression à l'état humide*

L'évolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 4 et de 9 à 12 est résumée par la figure suivante :

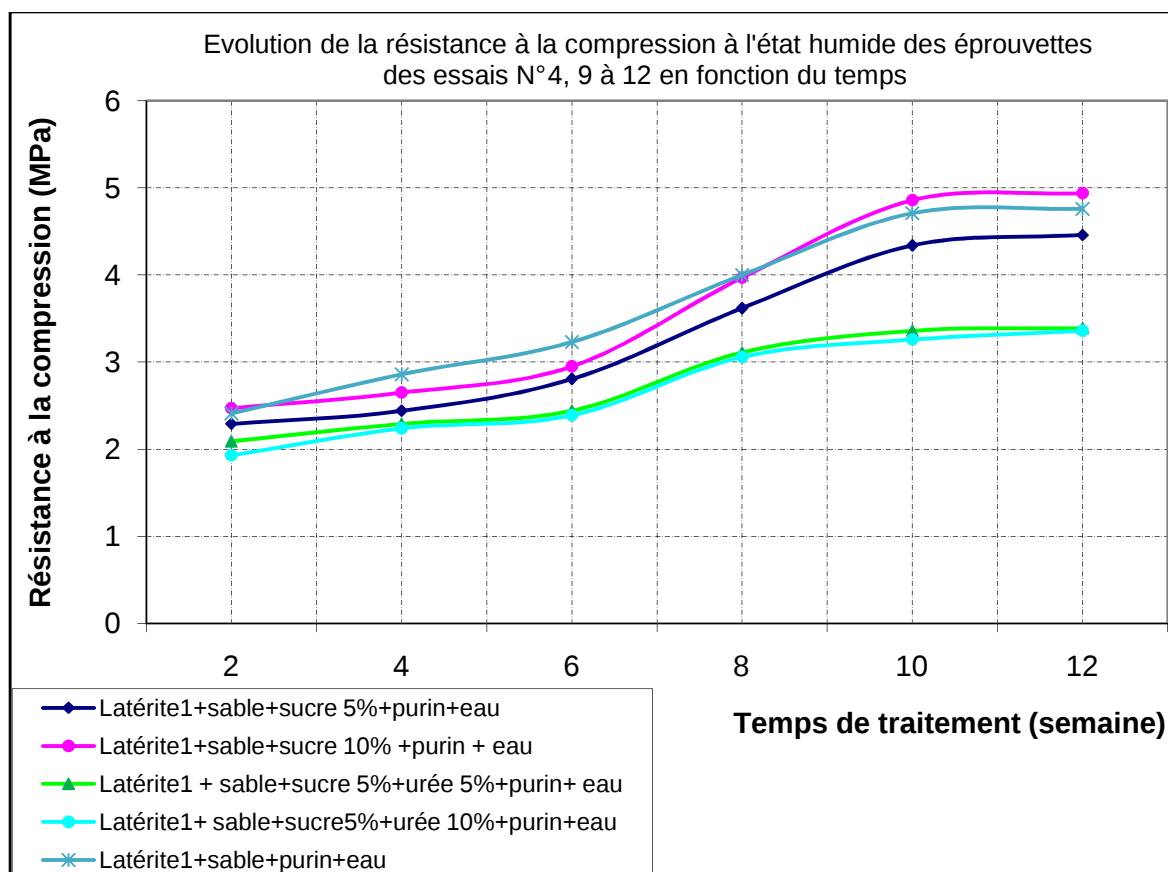


Figure 18 : Evolution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes des essais N° 4 et de 9 à 12 en fonction du temps

L'apport de 5% de sucre n'a pas amélioré la résistance à l'eau des éprouvettes. Cependant, l'ajout de 10% de sucre a entraîné une augmentation de l'ordre de 0,20 MPa de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes, après 12 semaines de traitement par les micro-organismes. On a constaté que l'addition de sucre n'a pas d'influence sur la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes jusqu'à la 8^{ème} semaine de traitement.

Toutefois, l'apport de l'urée en plus du sucre a affecté la résistance à l'eau des éprouvettes. On peut expliquer cette diminution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes par la rétention d'eau de l'urée qui affecte la liaison des agrégats qui composent le matériau.

c) Porosité

La figure suivante montre l'évolution de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de traitement des essais N° 4 et de 9 à 12 :

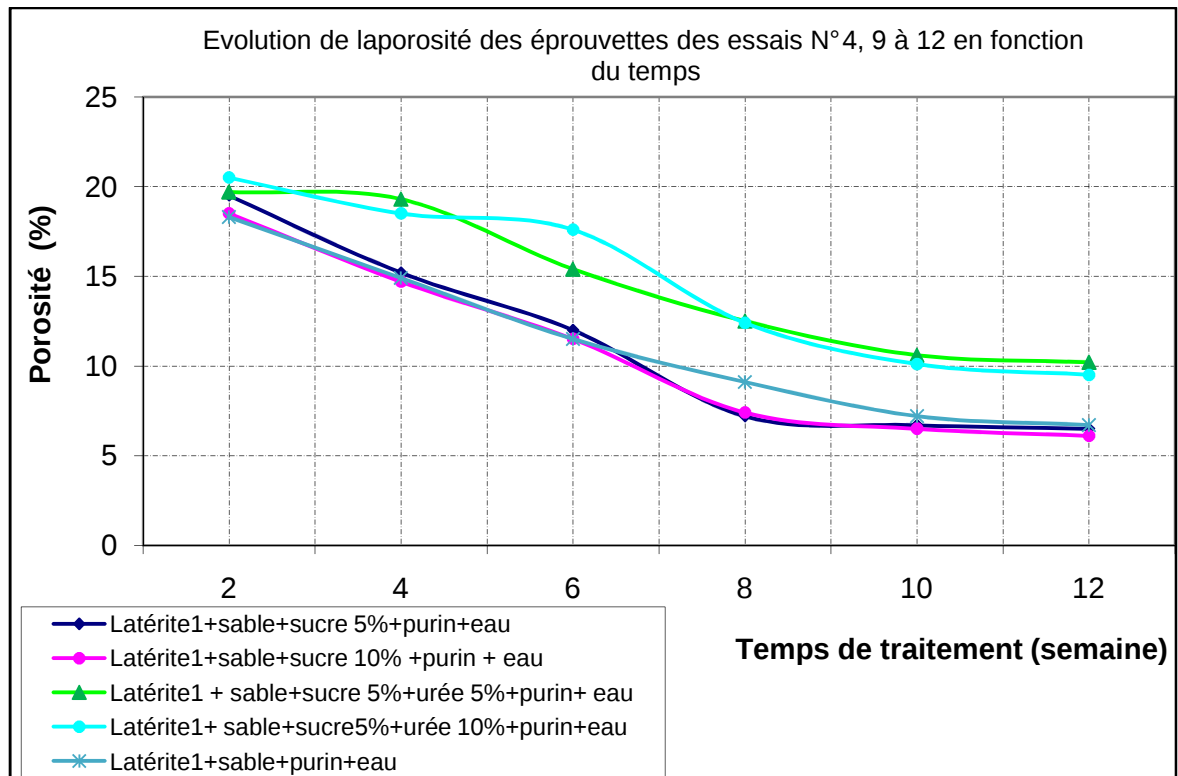


Figure 19 : Evolution de la porosité des éprouvettes des essais N° 4 et de 9 à 12 en fonction du temps de traitement

La figure ci-dessus montre que l'apport de sucre améliore nettement la porosité des éprouvettes. On a constaté une amélioration de la porosité de 0,6% pour l'ajout de 5% et de 1% pour l'apport de 10% de sucre, après 12 semaines de traitement.

Toutefois, le mélange de l'urée au sucre affecte la porosité des éprouvettes. On a constaté un écart maximal de 4,1%, ce qui confirme la diminution de la résistance à l'eau de ces éprouvettes additionnées d'urée.

d) Conclusion

Les résultats des essais N° 9 à 12 ont montré que les micro-organismes ont besoin de nutriment carboné pour se développer. Cependant, les micro-organismes n'utilisent ce nutriment qu'à partir de la 8^{ème} semaine de traitement.

L'addition de l'urée améliore la résistance à la compression à l'état sec jusqu'à la 8^{ème} semaine de traitement. Toutefois, elle affecte la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes.

2.2.2. Caractéristiques des éprouvettes obtenues par séchage sous atmosphère contrôlée

Nous avons effectué des essais de séchage sous atmosphère contrôlée pour étudier la durée et les effets du séchage (effets de l'oxydation du fer II en fer III) sur la résistance à la compression et la porosité des éprouvettes. Les essais qui ont fait l'objet de cette étude sont les essais N° 4, 6, 10 et 11.

Les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions que ceux soumis au séchage naturel sauf que le séchage a été effectué dans une étuve à température constante de 80°C. L'étude de séchage sous atmosphère contrôlée a été réalisée après 14 semaines de traitement de la latérite par les micro-organismes.

2.2.2.1. Résistance à la compression à l'état sec

La figure suivante montre la variation de la résistance mécanique à l'état sec des éprouvettes en fonction du temps des essais N° 4, 6, 10 et 11 :

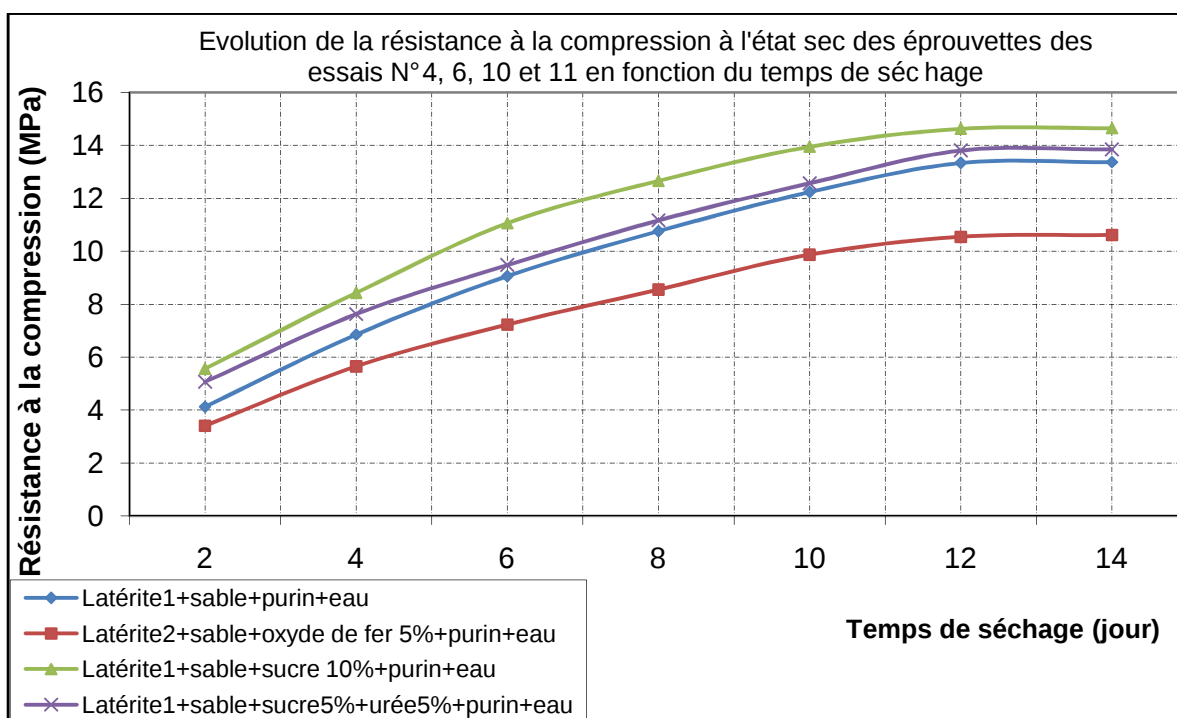


Figure 20 : Variation de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve des essais N° 4, 6, 10 et 11

Le graphique ci-dessus montre que la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes évolue rapidement avec le temps de séjours dans l'étuve. Ce phénomène est du à l'augmentation de la vitesse de la réaction d'oxydation du fer II en fer III par l'action de la température élevée dans l'étuve. Les courbes se stabilisent à partir du 12^{ème} jour de séchage. Aussi, on peut dire que la durée de séchage des briquettes sous atmosphère contrôlé est de 12 jours au lieu de 28 jours pour le séchage naturel.

Pour l'essai N° 4, la résistance à la compression à l'état sec varie de 4,12 MPa à deux jours de séchage pour atteindre 13,37 MPa après 14 jours. Si on compare la résistance à la compression à l'état sec maximale sous atmosphère contrôlé par rapport au séchage naturel, le séchage naturel est meilleur, un écart de 0,24 MPa a été constaté.

Pour l'essai N° 6, la résistance à la compression à l'état sec varie de 3,41 MPa à deux jours de séchage pour atteindre 10,61 après 14 jours. Comparé au séchage naturel, on a constaté que le séchage sous atmosphère contrôlé est meilleur par rapport au séchage naturel, un écart de 0,16 MPa a été constaté.

Pour l'essai N° 10, la résistance à la compression à l'état sec varie de 5,56 MPa à deux jours de séchage pour atteindre 14,65 MPa après 14 jours de séchage. Cette valeur de la résistance à la compression maximale à l'état sec des éprouvettes de l'essai N° 10, séché dans une étuve est presque la même que pour le séchage naturel (14,62 MPa).

Pour l'essai N° 11, la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes varie de 5,07 MPa à deux jours de séchage pour atteindre 13,85 MPa après 14 jours. Cette valeur de la résistance à la compression à l'état sec des éprouvettes séché dans une étuve est presque la même que celle séchée à l'état naturel (13,84 MPa).

2.2.2.2. *Résistance à la compression à l'état humide*

Le graphique suivant montre la variation de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve :

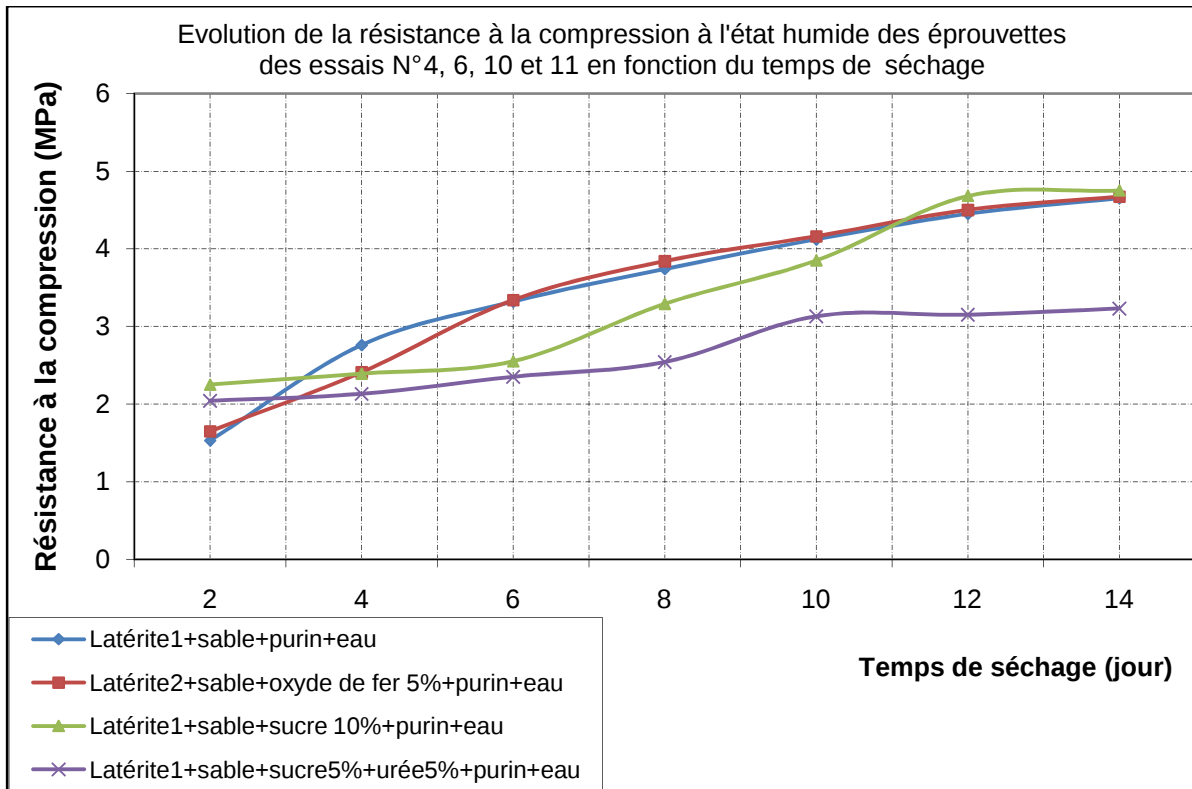


Figure 21 : Variation de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve des essais N° 4, 6, 10 et 11

Le graphique ci-dessus montre que l'évolution des courbes varie suivant les essais.

Pour les essais N° 4 et 6, la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes évolue rapidement en fonction du temps de séchage. Le séchage dans l'étuve a entraîné une légère diminution de la résistance à l'eau des éprouvettes. Un écart de 0,17 MPa a été constaté pour l'essai N° 4, et 0,43 MPa pour l'essai N° 6.

Pour l'essai N° 10, la résistance à la compression à l'état humide évolue très lentement du 2^{ème} au 6^{ème} jour de séchage. Puis, elle évolue très rapidement jusqu'au 12^{ème} jour de séchage, et se stabilise jusqu'au 14^{ème} jour. Le séchage dans l'étuve a entraîné une diminution de la résistance à la compression à l'état humide des éprouvettes. Un écart de 0,26 MPa a été constaté sur la résistance à la compression maximale à l'état humide.

Pour l'essai N° 11, la résistance à la compression à l'état humide varie lentement du 2^{ème} au 8^{ème} jour de séchage, puis elle évolue un peu plus vite jusqu'au 10^{ème} jour, ensuite, elle se stabilise jusqu'au 14^{ème} jour. Le séchage dans l'étuve affecte la résistance à l'eau des éprouvettes. Un écart

de 0,24 MPa a été constaté par rapport au séchage naturel pour la résistance à la compression à l'état humide maximale.

2.2.2.3. Porosité

La variation de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de séchage des essais N° 4, 6, 10 et 11 est donnée par la figure suivante :

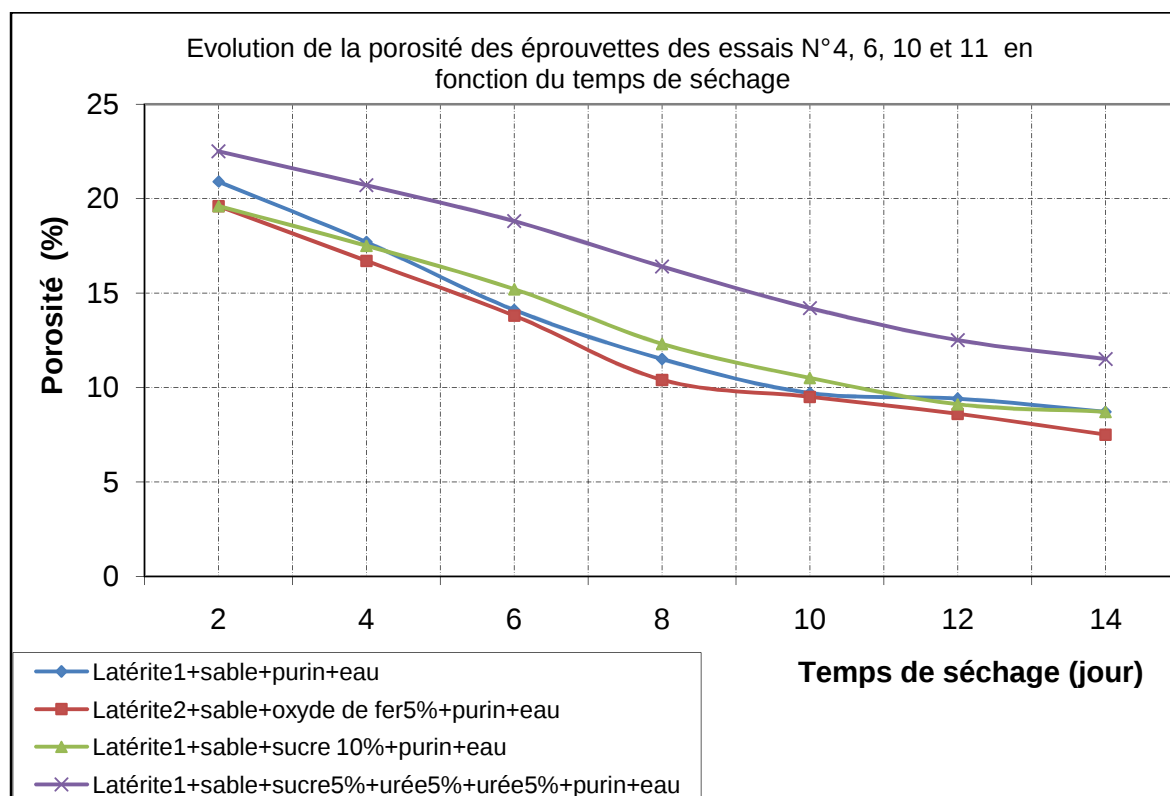


Figure 22 : Variation de la porosité des éprouvettes en fonction du temps de séchage dans l'étuve des essais N° 4, 6, 10 et 11

Le graphique ci-dessus montre une évolution rapide de la porosité du 2^{ème} au 8^{ème} jour de séchage puis cette amélioration se stabilise peu à peu jusqu'au 14^{ème} jour, pour les essais N° 4, 6 et 10. Tandis que pour l'essai N° 11, elle évolue continuellement du 2^{ème} jusqu'au 14^{ème} jour de séchage.

Nous avons constaté que le séchage dans l'étuve a augmenté la porosité des éprouvettes pour tous les essais faisant l'objet de cette étude. Ceci est peut être dû à l'évacuation trop rapide des eaux

résiduelles contenues dans les éprouvettes qui provoque la dilatation des pores pendant leur évacuation.

Aussi, un écart de la porosité de 1,8% a été constaté pour l'essai N° 4 ; 2,1% pour l'essai N° 6 ; 1,1% pour l'essai N° 10 et 2,3% pour l'essai N° 11.

2.2.3. Comparaison des résultats obtenus par rapport aux normes

Le tableau suivant montre les normes décrites dans l'Association des Normes sur les Travaux de Bâtiments à Madagascar (ANTBM) pour les briques :

Tableau 15 : Normes ANTBM sur les briques

CATEGORIE		Résistance à la compression (MPa)	
		moyenne	minimale
Briques porteurs, catégorie 1A :	à sec	7	6
	humide	5	4
Briques porteurs, catégorie 2A :	à sec	4	3
	humide	3	2
Briques de remplissage RA :	à sec	3	2
	humide	2	1,5

Afin de faciliter la comparaison, le tableau suivant rappelle quelques résultats des essais réalisés au cours de notre travail :

Tableau 16 : Résistance à la compression maximale des essais N° 4, 5, 6, 9, 10, 11 et 12

Essai	Composition de l'essai	Résistance à la compression (MPa)	
		à sec	humide
4	Latérite1 95%+ sable 5%+purin+eau	13,61	4,82
5	Latérite2 95%+sable 5% +purin%+eau	9,56	4,94
6	Latérite2 90%+sable 5%+ Fe ₂ O ₃ 5%+ purin+eau	10,45	5,10
9	Latérite1 90%+sable 5%+sucre 5%+purin+eau	13,79	4,46
10	Latérite1 85%+sable 5%+sucre 10%+purin+eau	14,62	4,95
11	Latérite1 85%+sable 5%+sucre 5%+urée 5%+purin+eau	13,82	3,39
12	Latérite1 80%+sable 5%+sucre 5%+urée 10% +purin+eau	14,15	3,36

Les figures suivantes résument la comparaison de ces résultats par rapport aux normes ANTBM :

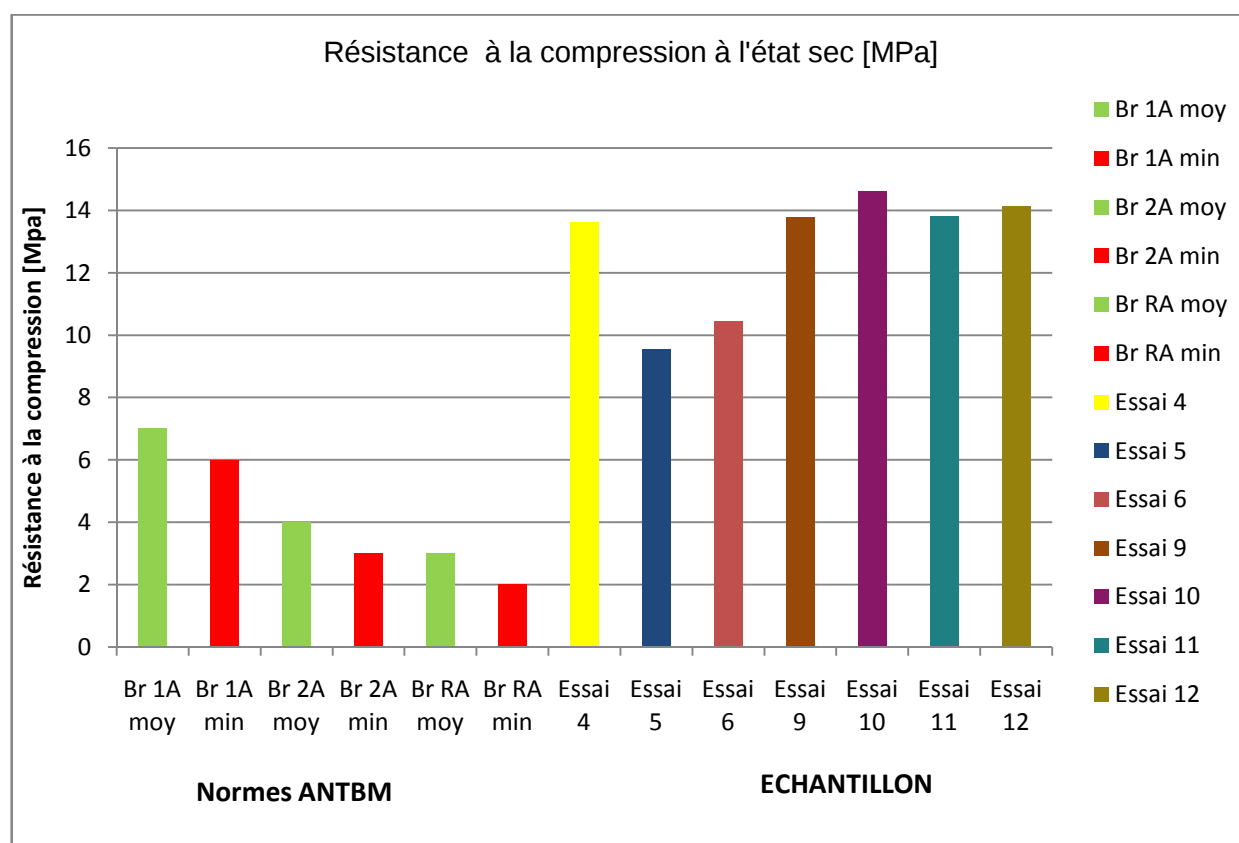


Figure 23 : Comparaison de la résistance à la compression à l'état sec des essais par rapport aux normes ANTBM

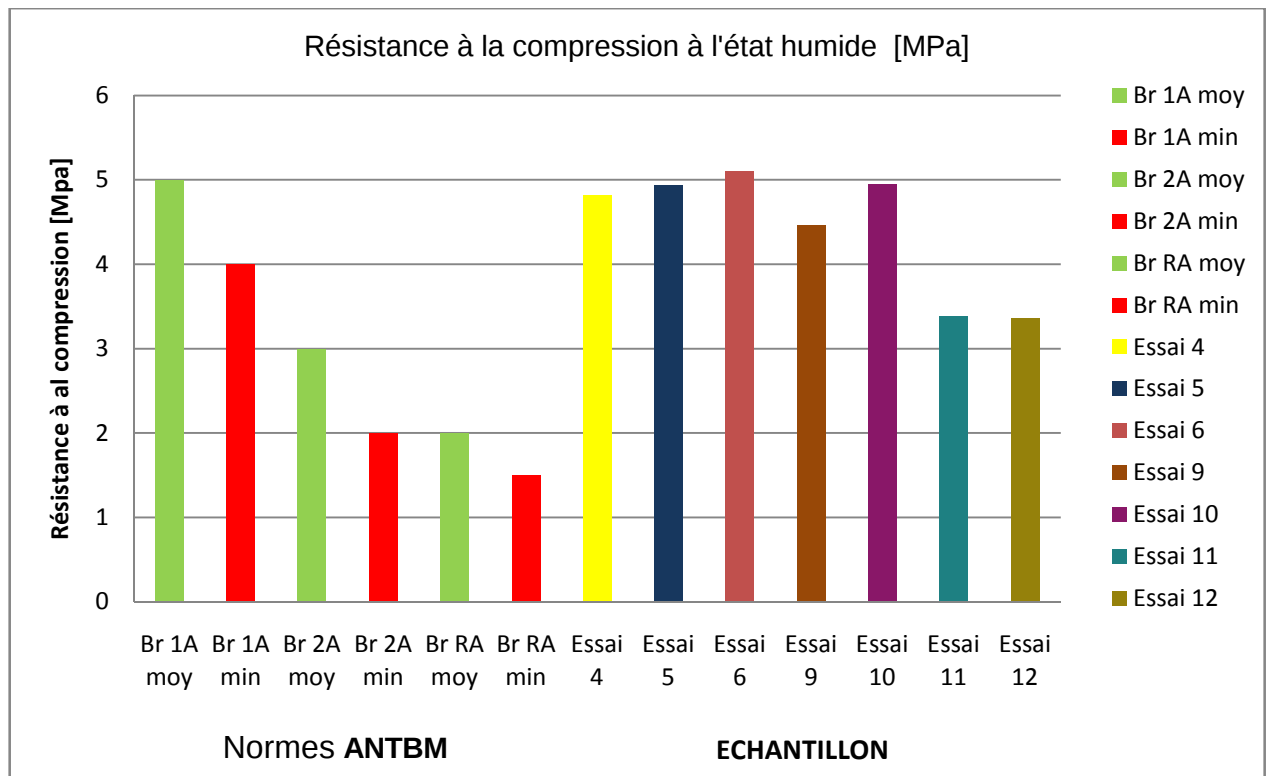


Figure 24 : Comparaison de la résistance à la compression à l'état humide des essais par rapport aux normes ANTBM

En comparant les résultats des essais N° 4, 5, 6, 9, 10, 11 et 12 par rapport aux normes ANTBM, on constate que :

- la résistance à la compression à l'état sec des briques stabilisées par les micro-organismes (quelque soit la composition) respecte largement les normes des briques porteurs catégorie 1A ;
- la résistance à la compression à l'état humide des briques stabilisées par les micro-organismes des essais N° 4, 5, 6, 7, 9 et 10 respecte la valeur minimale admise pour les briques porteurs catégorie 1A ;
- la résistance à la compression à l'état humide des briques stabilisées par les micro-organismes des essais N° 11 et 12 n'atteint pas la valeur minimale admise pour les briques porteurs catégorie 1A. Ainsi, on peut les classer dans la catégorie des briques porteurs 2A.

On peut en conclure que les briques stabilisées par les micro-organismes obtenues dans le cadre de ce travail sont des briques porteurs.

2.2.4. Etude comparative par rapport à d'autres modes de stabilisation

Afin de situer la qualité du matériau obtenu par la stabilisation de la latérite par les microorganismes, nous avons effectué quelques comparaisons avec les modes de stabilisation classique tels que l'emploi de ciment, de chaux, de polymères ou de silice active, couplée à l'urée.

Les résultats que nous allons prendre en compte sont ceux des essais N° 4, 9 et 10.

2.2.4.1. Stabilisation au ciment et à la chaux

Le ciment et la chaux sont les stabilisants classiques utilisés pour la stabilisation chimique de la latérite pour la fabrication de brique de terre stabilisée.

L'étude a été réalisée par REYDELLET Jean Christian en 2008 dans le cadre de son mémoire de DEA en génie chimique intitulé « *Contribution à l'étude des conditions optimum pour la fabrication des briques stabilisées et réalisation d'une presse* ». La latérite étudiée est celle de Vontovorona. La pression de compactage utilisée pendant le moulage des éprouvettes est de 20,38 MPa (soit une force de compactage de 40.000 N). L'essai que nous allons prendre en compte dans le cadre de ce travail est celui dont la teneur à **5% de chaux + 5% de ciment**.

Une autre étude effectuée par RABOTOVAO Oswald Marie Antonio dans le cadre de son mémoire d'ingénieur en génie chimique, intitulé « *Etude comparative de la stabilisation des latérites avec des liants : ciment et silice active additionnée de l'urée* » a été prise en compte pour la stabilisation au ciment. La pression de compactage est de 20,38 MPa (soit une force de compactage de 40.000 N), la latérite étudiée est celle de Vontovorona. Les essais que nous avons pris en compte sont :

- teneur en ciment 5% ;
- teneur en ciment 10%.

2.2.4.2. Stabilisation par le polymère Reverseal 16

Les polymères font partie des produits de stabilisation de la latérite les plus récents, actuellement.

L'étude que nous avons prise comme référence dans le cadre de ce travail a été réalisée par RAKOTONIRINA Jacques Arsène, dans le cadre de son mémoire d'ingénieur en Science des matériaux, intitulé « *Essai de stabilisation des routes en terre par l'utilisation d'émulsion* ».

polymère : cas de la latérite de Vontovorona ». La pression de compactage utilisée est de 12,76 MPa (soit une force de compactage de 25.000 N). L'essai que nous avons pris en compte pour la comparaison est celui dont la teneur en stabilisant est de 4% qui a donné le meilleur résultat.

2.2.4.3. *Stabilisation par la silice active additionnée de l'urée*

C'est une étude réalisée par RABOTOVAO Oswald Marie Antonio dans le cadre de son mémoire d'ingénieur en génie chimique, intitulé « *Etude comparative de la stabilisation des latérites avec des liants : ciment et silice active additionnée de l'urée* ». La pression de compactage est de 20,38 MPa (soit une force de compactage de 40.000 N). La latérite étudiée est celle de Vontovorona. Les essais que nous avons pris en compte sont :

- teneur en liant : 5% de silice active + urée ;
- teneur en liant : 10% de silice active + urée

2.2.4.4. *Résultats et discussions*

Le tableau suivant résume le résultat des comparaisons :

Tableau 17 : Résultat des comparaisons par rapport à d'autres modes de stabilisation

Essai	R _C à l'état sec (MPa)	R _C à l'état humide (MPa)	Porosité moyenne (%)
5% chaux + 5% ciment	11,13	3,85	17,9
5% de ciment	12,59	3,91	18,3
10 % de ciment	15,55	6,12	16,9
4% de polymère reverseal 16	6,60	2,97	12,56
5% de silice active	5,75	2,00	7,0
10% de silice active	2,78	0,98	25,7
Essai N° 4	13,61	4, 82	6,9
Essai N° 9	13,79	4,46	6,5
Essai N° 10	14,62	4,95	6,1

Source : Rabotovao O.M., ESPA 2007 ; Rakotonirina J.A., ESPA 2010 ; Reydellet J. C., 2008

D'après ce tableau, la résistance à la compression à l'état sec ou humide des éprouvettes obtenues à partir de la stabilisation par les microorganismes des essais N° 4, 9 et 10 est meilleure par rapport à la stabilisation à :

- 5% de chaux et 5% de ciment ;
- 5% de ciment ;
- 5 ou 10 % de silice active couplée à l'urée ;
- 4% de polymère Reverseal 16.

Toutefois, elle est moins bonne par rapport à la stabilisation à 10% de ciment.

Par extrapolation, la résistance à la compression à l'état sec du produit obtenu avec l'essai :

- N° 4 est équivalente à un matériau stabilisé par du ciment à 6,72%,
- N° 9 est équivalente à un matériau stabilisé à 6,82% de ciment ;
- N° 10 est équivalente à un matériau stabilisé à 7,79% de ciment.

Concernant la porosité, la stabilisation par les microorganismes est la meilleure. Même si la stabilisation à 10% de ciment a donné le meilleur résultat sur la résistance à la compression (à l'état sec ou humide), le produit obtenu présente plus de deux fois plus de pores par rapport à celui obtenu par le procédé biologique.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Les études réalisées dans le cadre de ce travail nous ont permis de démontrer qu'il est possible d'effectuer la stabilisation de la latérite par les microorganismes pour la fabrication de matériau de construction.

En effet, après une étude bibliographique sur la latérite, la technique de stabilisation, la caractérisation géotechnique, minéralogique et physico-chimique de la matière première principale, nous avons effectué des essais de stabilisation de la latérite de Vontovorona par les microorganismes. Les essais au laboratoire nous ont permis de déterminer les meilleures conditions d'obtention de matériau à base de latérite stabilisée par les microorganismes. À savoir :

- l'activation de la réduction microbienne par le purin de bœuf,
- la correction granulométrique de la latérite de Vontovorona par du sable d'une granulométrie entre 0,08 à 1mm, classe 0/1,
- le temps de réduction microbienne optimal de l'oxyde de fer est de 10 semaines, à la température ambiante,
- le temps de séchage est de 28 jours, à la température ambiante mais on peut le réduire à 14 jours à 80°C dans une étuve,
- l'addition de sucre peut améliorer encore la résistance à la compression tandis que l'apport de l'urée affecte la résistance à l'eau du matériau.

Les essais ont donné des résultats satisfaisants du point de vue résistance à la compression à l'état sec, résistance à la compression à l'état humide et au niveau de la porosité.

L'activation de la réaction par le purin de bœuf suivie de la correction granulométrique adéquate a donné les résultats suivants :

- une résistance à la compression à l'état sec de 13,61 MPa ;
- une résistance à la compression à l'état humide de 4,82 MPa ;
- une porosité de 6,9%.

L'ajout de 10% de sucre dans le mélange a amélioré ce résultat, à savoir :

- une résistance à la compression à l'état sec de 14,62 MPa ;

- une résistance à la compression à l'état humide de 4,95 MPa ;
- une porosité de 6,1%.

Comparé aux résultats obtenus par d'autres chercheurs sur la stabilisation de la latérite par du ciment, de la chaux, de la silice active couplée à l'urée ainsi que par le polymère Reverseal 16, le matériau stabilisé par les microorganismes est meilleur par rapport à la stabilisation à 5% de ciment, ou 5% de chaux + 5% de ciment ou de silice active + urée à 5% ou le Reverseal 16 à 4% du point de vue résistance à la compression (à l'état sec ou à l'état humide) et au niveau de la porosité.

Les briques obtenues par ce procédé peuvent être classées comme brique porteur catégorie 1A selon les normes ANTBM.

Ainsi, cette méthode est beaucoup plus rentable sur le plan technique, économique et financier. Elle procure aussi le meilleur résultat du point de vue protection de l'environnement.

Quelques perspectives sont en vues pour améliorer les résultats obtenus dans le cadre de ce travail à savoir :

- l'amélioration des résultats obtenus par l'utilisation de la vinasse (rejets de fabrication de sucre et d'alcool) comme nutriments mais aussi comme source de micro-organismes (substitution du sucre et de purin). En effet, la vinasse est un résidu issu des distilleries industrielles produisant de l'alcool à partir de la canne à sucre. Une tonne de canne arrivée à l'usine produit environ 30 kg de mélasse qui, si elle est distillée, produit 114 litres de vinasse (moyenne : 3 800 litres de vinasse par tonne de mélasse distillée). Elle est difficile à dépolluer à cause de leurs fortes teneurs en cendre, de leurs pH faible, de leurs fortes densités optiques et de leurs fortes DCO et DBO. Ainsi, si les résultats des essais de stabilisation ainsi obtenus sont satisfaisants, on trouve une méthode rentable pour la valoriser ;
- l'amélioration de la résistance à la compression pendant le séchage sous atmosphère contrôlé, en variant la température par exemple de 50 à 300 °C ;
- l'étude à l'échelon pilote pour déterminer les paramètres de stabilisation et de séchage à l'échelle réel de production afin de basculer facilement à l'échelon industriel pour valoriser les résultats ainsi obtenus,...

Enfin, les études ainsi réalisées peuvent être complétées par une étude microbiologique et une étude cristallographique pour approfondir l'étude des activités des micro-organismes, du séchage et de la prise.

BIBLIOGRAPHIE/ WEBOGRAPHIE

1. **MESSI A.**, 1984 « *Valorisation de la latérite du Gabon comme matériau de construction économique* », Mémoire DEA INS de Lyon.
2. **ANDRIAMIHAJA R. B.** 1988 « *Etude chimique des latérites des Hauts plateaux de Madagascar* ». Thèse de Doctorat 3ème cycle en Chimie minérale. Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
3. **RAZAFIMANDIMBY A.** 1985, « *Contribution à l'étude de quelques échantillons d'argiles Malgaches d'intérêt économique* ». Thèse de Doctorat d'État Es-sciences Antananarivo.
4. **SOUBIES François.** 1973 « *Contribution à l'étude de la pédogenèse ferralitique. Morphologie, minéralogie et évolution géochimique des formations superficielles de la cuvette d'Ambalavao (Madagascar)* ». Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier de Toulouse.
5. **F-BOURGEAT, O-AUBERE.** 1970 « *Les sols ferralitiques à Madagascar* ». C.R. Semaine Géol., Tananarive.
6. **SEGALEN P.**, 1994 « *Les sols ferralitiques et leur répétition géographique* ». Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et Thèses. Tome 1, 2, 3, Paris.
7. **ABD-EL MALIK DIT SIRADJ'EDDINE MOHAMED SAID M.**, 2006 « *Contribution à l'étude de stabilisation de la latérite par la paille de riz : Approche biochimique* », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Études Approfondie en Sciences des Matériaux, ESPA, Université d'Antananarivo.
8. **LA CROIX A.**, « *Minéralogie de Madagascar* ».
9. **LINA Z. A.**, 2008 « *Étude comparative des différentes méthodes de stabilisation de la latérite* ». Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie chimique. ESPA, Université d'Antananarivo.
10. **RIQUIER J.** *Latérite et latéritisation à Madagascar*. Pédologue de l'I.R.S.M. 3^{ème} congrès de l'ASPOI.
11. **RANDRIAMALALA T. R.** 2003 « *Aptitude au traitement chimique des sols de projet routier* ». Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Études Approfondie en Sciences des Matériaux, ESPA, Université d'Antananarivo.
12. **ROBISONARISON G. J. et al**, 1990 « *Contribution à la valorisation de latérite comme matériaux de construction* », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Études Approfondie en Chimie Minérale, ESPA, Université d'Antananarivo.

13. **RANDRIANA N. R. F.** 2004 « *Contribution à la stabilisation des latérites par élaboration d'un liant oxyde de fer et de silice active* », Thèse de Doctorat du III^{ème} Cycle, ESPA, Université d'Antananarivo.
14. **DOAT P. et al,** 1979 « *Construire en terre* », Revues Scientifiques, Collection An Architecture.
15. **RABOTOVAO O. M.** 2006 « *Étude comparative de la stabilisation des latérites avec des liants : ciment et de la silice active additionnée de l'urée* ». Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie chimique. ESPA, Université d'Antananarivo.
16. **ANDRIANARIMANANA J. C. O.** 2005 « *Recherche sur la mise au point de procédés physiques, chimiques, biologiques pour la préparation de matériaux argileux à partir de latérites malgaches* », Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle en Science des Matériaux. ESPA, Université d'Antananarivo.
17. **ANDRIAMIHAJA RAKOTOARILINA B.** 1988 « *Étude chimique des latérites des Hauts plateaux de Madagascar* ». Thèse de 3^{ème} cycle en Chimie minérale. Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
18. fr.wikipedia.org/wiki/wikipedia:accueil_principal, *diffraction de rayon X*, consulté le 01 juin 2015.
19. **BERTHELIN J. et al,** Décembre 2004 « *Biodisponibilité du fer dans les sols : rôle majeur des activités microbiennes* » Revue scientifique séance commune avec l'académie des sciences : du sol à la plante.
20. **FABIENNE B. B. (BRGM),** 2010 « *Microflore bactériennes des milieux riche en métaux et metalloïdes* ». Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Ecole doctorale de Science de la Vie et de la Santé-Université de Provence (Aix-Marseille).
18. **DREYFUS,** 1952 « *Les latérites, généralités, leur utilisation en technique routière* », RGA N° 215.
21. **RAKOTONDRAVALY D. A.,** 2003 « *Essai de fabrication de briques en terre stabilisée, à base de stabilisants routiers, cas de la latérite de VONTOVORONA* », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Études Approfondies en Sciences des Matériaux, Université d'Antananarivo.
22. **ANDRIAMANANTSOA E. et al,** 2000 « *Contribution à une étude interdisciplinaire des sols ferrallitiques malgaches ; Matériaux de construction : cas d'échantillons typiques de la Région d'Antananarivo* ». Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur en géologie. ESPA, Université d'Antananarivo.
23. **ANDRIANIRINA F. R.,** 2003 « *Contribution à l'élaboration de briques de terre Stabilisée par géopolymérisation de la matrice argileuse, cas de la latérite Vontovorona* », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Études Approfondie en Sciences des Matériaux, ESPA, Université d'Antananarivo.

24. **MILLOT Georges** 1964: *Géologie des ARGILES*.
25. **PELLIER J. L.**, 1965 « *Contribution à l'étude de minéraux argileux de Madagascar* », Thèse Doctorat, Université de Strasbourg.
26. **RAHARINIERANA H.**, 2003 « *Contribution à la valorisation de la « latérite » Caractéristiques et utilisations des latérites des environs d'Antananarivo* ». Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Études Approfondie en Sciences des Matériaux, ESPA, Université d'Antananarivo.
27. **RAKOTONDRAIBE J. et al**, 2000 « *Contribution à la valorisation de "matériau terre"- Caractéristiques et utilisation des latérites des environs d'Antananarivo* », Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie chimique. ESPA, Université d'Antananarivo.
28. **RAKOTONDRAIBE N. J.**, 2003 « *Caractérisations des argiles des régions de Diego Suarez, Tamatave, Moramanga et Analabe* », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Études Approfondies en Sciences des Matériaux.
29. **Revue scientifique** 2011 « *Les sols stabilisés-guide matériaux pays gâtine* »,
30. www.afes.fr/afes/sds/SDS214p205_MUNCH.pdf, consulté le 09 février 2012
31. www.academie-agriculture.fr/mediatheque/seances/.../20041208_resume1.pdf, consulté le 09 février 2012
32. www.google.com/search/latérites/solstropicaux/recuotion_microbienne_du_fer.html, consulté le 14 février 2012
33. www.google.com/cours/réduction_microbienne_du_fer.com.pdf, consulté le 14 mars 2012
34. **CHAMSSOUDINE H. B.**, 2009 « *Apport de la géotechnique et géophysique sur la construction de route et de bâtiment* », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme en maîtrise des sciences et techniques en géophysique appliquée, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.

ANNEXES

ANNEXE 1 : DIFFRACTION DE RAYONS X

Technique de base de la caractérisation des matériaux, la diffraction de rayons X permet la détermination des phases minérales micro et poly-cristallines des matériaux. Cette méthode n'est applicable qu'à des matériaux composés d'un nombre relativement important de cristaux aux orientations non préférentielles (céramiques, roches et monocristaux).

PRINCIPE DE LA METHODE :

L'état cristallin est caractérisé par la répartition tri périodique dans l'espace d'un motif atomique. Cette répartition ordonnée constitue des plans parallèles et équidistants que l'on nomme plans réticulaires $\{h,k,l\}$. Les distances interréticulaires sont de l'ordre de 0.15 Å - 15 Å et dépendent de la disposition et du diamètre des atomes dans le réseau cristallin. Elles sont constantes, caractéristiques du cristal et peuvent être calculées grâce à la diffraction de rayons X.

Un faisceau de rayons X monochromatique et parallèle qui frappe un cristal est diffracté dans une direction donnée par chacune des familles des plans réticulaires à chaque fois que la condition ou **loi de Bragg** est réalisée :

$n\lambda = 2d \sin \theta$: ordre de la diffraction

λ : longueur d'onde du faisceau de rayons X,
 d : distance de deux plans réticulaires,
 θ : angle d'incidence des rayons X.

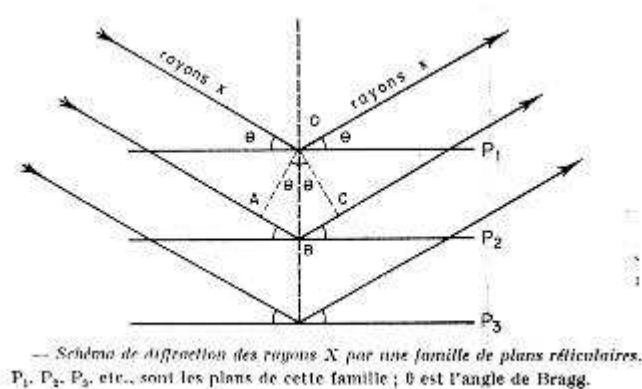


Fig.1: Schéma de diffraction de rayons X par une famille de plans réticulaires.

P1, P2, P3, sont les plans de cette famille ; θ est l'angle de Bragg. La différence de marche entre deux plans consécutifs est ici égale à $AB+BC$. Or $AB+BC = 2 OB \sin \theta$. Comme OB est la distance interréticulaire d et que $AB+BC$ doit être égale à un nombre entier de longueur d'onde λ , en posant n = nombre entier, on retrouve la formule de Bragg : $n = 2d \sin \theta$.

Pour que la diffraction se produise, il faut que les ondes diffractées par les différents plans soient en phase, c'est à dire que la différence de marche (cf.fig.1) des rayons rencontrant ces plans soit égale à un nombre entier. Dans ce cas, l'angle suivant lequel le faisceau de rayons X est dévié est égal à l'angle d'incidence θ et est caractéristique de la distance interplanaire ou interréticulaire d . Si l'on connaît la longueur d'onde λ du faisceau de rayons X, on peut mesurer à partir de l'angle θ , l'équidistance d et ainsi identifier la nature du cristal.

Diagrammes de poudres de Debye-Scherrer - Protocole et Appareillage :

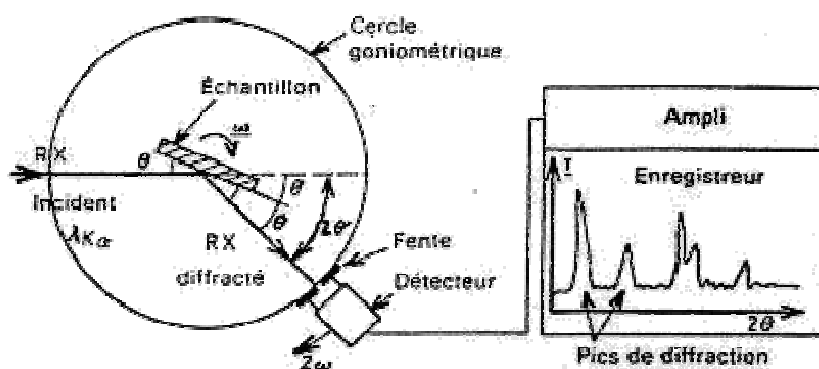


Fig.2 : Schéma d'un diffractomètre à compteur.

Le matériau est bombardé par un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles de longueur d'onde connue, produit grâce à une anticathode de cuivre (Energie du rayonnement : 8047 eV ; Longueur d'onde ($K\lambda$ 1) : 1.5405 Å). Le rayonnement émis est défini par un système de fentes (fentes Soller) et de fenêtres situées avant et après l'échantillon. Ce dernier est étalé sous forme de poudre (15 mg) sur une lame de verre qui tourne d'un mouvement uniforme autour d'un axe situé dans son plan (cercle goniométrique), permettant ainsi d'augmenter le nombre d'orientations possibles des plans réticulaires. Les particules étant orientées au hasard, il y aura toujours une famille de plan donnant lieu à la diffraction, de telle sorte que l'on obtiendra simultanément tous les faisceaux susceptibles de diffracter : ces faisceaux forment des cônes de demi-angle au sommet.

Un détecteur ou compteur (Geiger-Müller ou compteur à scintillation) mesure l'intensité du rayonnement X diffracté dans certaines directions. Il tourne autour du même axe mais à une vitesse double de celle de l'échantillon. Pour un angle d'incidence θ , l'angle mesuré par le déplacement du compteur sera donc 2θ . Un diaphragme à couteau permet d'éliminer l'effet parasite du faisceau incident dans les petits angles ($2\theta < 10^\circ$). L'enregistrement réalisé est la courbe de l'intensité des rayons X diffractés en fonction des angles de diffraction.

L'acquisition est effectuée par une unité de contrôle et le traitement des diffractogrammes ou spectres s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les données des fiches ASTM (American Society for Testing and Materials), faisant correspondre les distances interréticulaires d aux

angles 2θ enregistrés. La position des pics de diffraction permet l'identification des structures ou phases cristallines présentes et donc la détermination de la composition cristallographique de l'échantillon analysé. La position des pics peut également servir à identifier des transformations ordre-désordre tandis que la forme du pic peut permettre d'identifier des micro-déformations (taux d'écrouissage).

L'un des principaux intérêts de cette méthode est la mesure précise d'intensité et la possibilité d'effectuer des estimations semi-quantitatives, en considérant que le pourcentage d'une espèce minérale est proportionnel à l'aire des pics enregistrés sur le diffractogramme. Ces valeurs sont utilisées dans l'établissement des diagrammes d'équilibre.

ANNEXE 2 : METHODE D'ANALYSE CHIMIQUE

1. Préparation de l'échantillon de latérite avant son analyse chimique

10 g d'échantillon de latérite sont immergés dans l'acide chlorhydrique concentré pendant plusieurs jours jusqu'à la disparition de la couleur rouge.

Le premier traitement a pour but d'extraire tous les oxydes libres ou amorphes sauf celui de la silice.

La partie insoluble restante est séchée puis soumise à diverses études chimiques.

2. Dosage de la partie soluble dans l'HCl 1g d'échantillon broyé

La somme des hydroxydes ($R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$) est déterminée par gravimétrie après précipitation par l'ammoniaque et calcination.

CaO (libre), le calcium est précipité sous forme d'oxalate puis calciné.

MgO (libre), le magnésium est précipité sous forme de phosphate ammoniaco-magnésium que l'on filtre et calcine pour calculer la teneur en MgO.

Fe_2O_3 (libre), le fer est titré avec une solution de bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$, après réduction sur la colonne de JONES.

3. Dosage de la partie insoluble dans l'HCl

Après séchage de la partie insoluble, on la soumet à l'analyse chimique. Cette dernière se voit attribuer la charge de doser avec le maximum de précision possible, la plupart des éléments présents dans les sols silico-alumineux.

Les analyses chimiques sont effectuées en double sur des prises de 1,000g d'échantillon.

3.1. Détermination de l'humidité et de la perte au feu

L'humidité est déterminée par pesée avant et après séchage à poids constant à 105°C.

La perte au feu est obtenue par calcination à poids constant pendant 12 h à 950°C

3.2. *Analyse ou mise en solution*

Elle se fait par fusion alcaline avec le carbonate double de sodium et de potassium. Ce carbonate est choisi en raison de son point de fusion qui est plus bas que celui de K_2CO_3 (VOINOVITCH, 1971).

3.3. *Dosage des différentes formes de la silice*

Pour doser les différentes formes de silice, nous avons utilisé la fusion alcaline qui permet de doser la totalité de la silice, mais ne permet pas la distinction entre quartz (silice libre) et silice amorphe (ou silice combinée). Pour doser le quartz, nous avons recours à l'attaque triacide qui permet de séparer la silice sous forme de quartz et la silice combinée (BONNEVIE, 1969). Pour isoler la silice colloïdale, nous avons utilisé la méthode de CAILLERE (1956).

3.4. *Dosage du fer*

Le fer a été dosé par manganimétrie.

3.5. *Dosage des autres éléments*

Le titane a été dosé par calorimétrie à l'eau oxygène à l'aide d'un colorimètre JOVAN à 420 μ m.

Le calcium et le magnésium ont été dosés par la méthode classique: oxalate manganimétrie pour Ca et précipitation du phosphate ammoniaco-magnésium pour le Mg.

ANNEXE 3 : LIMITE D'ATTBERG

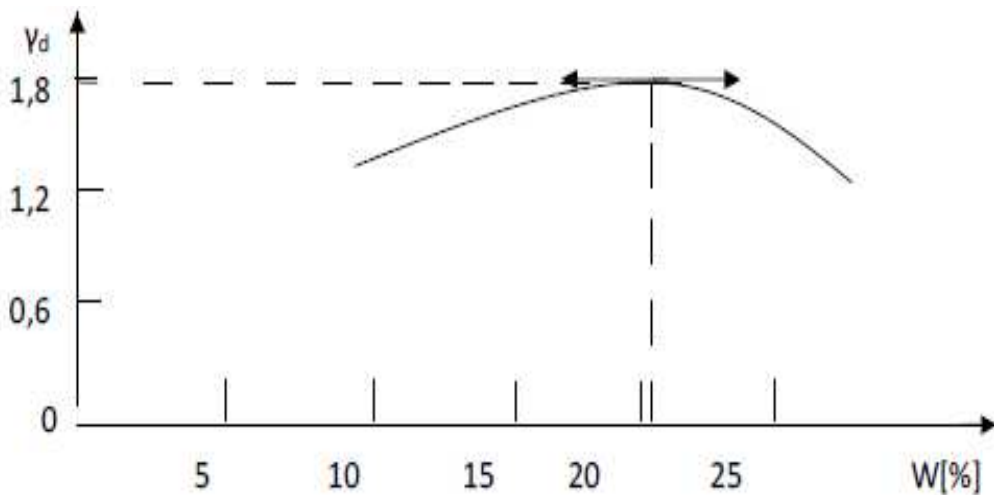
Limite de liquidité W _L LATERITE 1					Limite de liquidité W _L LATERITE 2			
Nombre de coups de la coupelle	Essai n°1		Essai n°2		Essai n°1		Essai n°2	
	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 1	Mortier2
	22		29		22		29	
1.Poids de la tare en (g)	4	4	4	4	15.7	14.3	15.5	15.6
2.Poids total humide en (g)	5.3	5.12	9.2	8.12	22.1	20.0	24.2	26.1
3.Poids total sec en (g)	4.9	4.9	7.4	6.7	19.6	17.8	20.9	22.1
4.Poids de l'eau = (2)-(3) en (g)	0.34	0.32	1.2	0.95	2.5	2.2	3.3	4.0
5.Poids du materiau sec = (3)-(1) en (g)	0.9	0.9	3.7	2.7	3.9	3.5	5.4	6.5
6.Teneur en eau = [(4)/(5)]*100 en (%)	37.77	35.55	35.29	35.18	62.1	62.3	61.5	61.2
7.Teneur en eau moyenne en (%)	36.66		35.23		62.2		61.4	
Limite de plasticité W _p LATERITE 1					Limite de plasticité W _p LATERITE 2			
Nombre de coups de la coupelle	Essai n°1		Essai n°2		Essai n°1		Essai n°2	
	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 1	Mortier2
8.Poids de la tare en (g)	4	4	4	4	15.2	14.6	15.2	14.8
9.Poids total humide en (g)	4.9	5	5.02	5	22.8	21.8	22.5	21.7
10.Poids total sec en (g)	4.72	4.8	4.9	4.9	20.6	19.4	20.4	19.7
11.Poids de l'eau = (9)-(10) en (g)	0.18	0.2	0.22	0.2	2.2	1.9	2.1	2.0
12.Poids du materiau sec = (10)-(8) en (g)	0.7	0.8	0.9	0.9	5.4	4.8	5.2	4.9
13.Teneur en eau = [(11)/(12)]*100 en (%)	24.71	25.00	24.44	22.22	40.7	39.6	39.9	40.3
14.Teneur en eau moyenne en (%)	25.35		23.33		40.1		40.1	

ANNEXE 4 : ESSAI PROCTOR

➤ Latérite 1

TENEUR EN EAU	POINT N°	1		2		3		4		5	
	Poids de la tare (g)	4		4		4		4		4	
	Poids total humide (g)	10,1	9,8	8,6	9,1	9,5	10,0	8,0	8,2	9,0	7,8
	Poids total sec (g)	9,5	9,3	8,0	8,5	8,8	9,1	7,4	7,4	8,2	7,0
	Poids de l'eau = (2)-(3) (g)	0,7	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	0,6	0,8	0,8	0,8
	Poids du matériau sec = (3)-(1) en (g)	5,5	5,3	4,0	4,5	4,8	5,1	3,4	3,4	4,2	3,0
	Teneur en eau = [(4)/(5)].100 en (%)	12,7	9,4	15,0	13,0	14,0	17,0	17,0	22,0	19,0	26,0
POIDS VOLUMIQUE	Teneur en eau moyenne (%)	22,3		24,7		27,0		29,3		23,0	
	Poids du moule (g) (7)	3722		3722		3722		3722		3722	
	Poids total humide (g) (8)	8361		8857		9249		9526		9434	
	Poids du matériau humide (8)-(7) [g]	4639		5135		5527		5804		5712	
	Volume du moule cm ³ (10)	2758,16		2758,16		2758,16		2758,16		2758,16	
	Poids du sol sec [(8)/1+w] en [g]	4176,24		4497,81		4759,92		4813,07		4649,30	
	Poids volumique humide (g/cm ³)	1,51		1,63		1,72		1,74		1,68	

Le schéma suivant montre l'évolution de poids volumique de la latérite 1



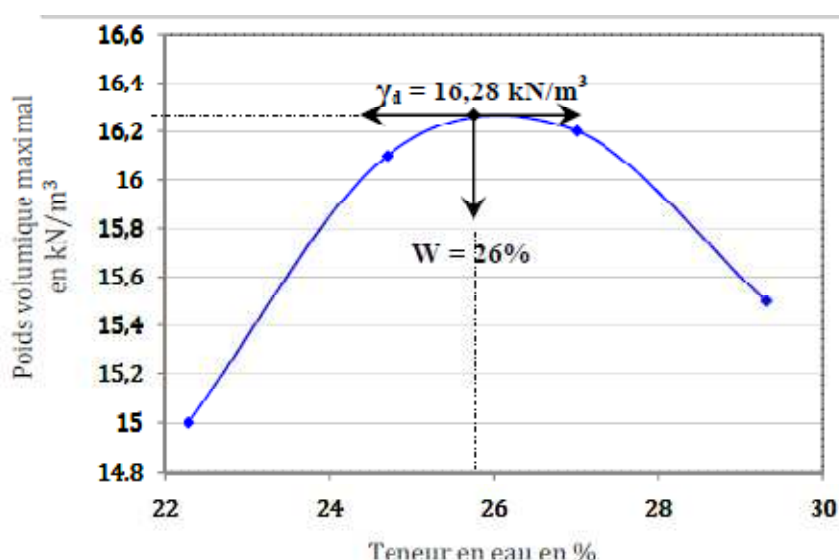
Courbe de l'évolution du poids volumique maximale en fonction de la teneur en eau:

Nous trouvons, selon cette courbe que $W_{opt} = 20,35\%$ et $\gamma_d \max = 1,75 \text{ T/m}^3$

➤ Latérite 2

TENEUR EN EAU	POINT N°	1		2		3		4	
	Masse de la tare (g)	29	30	33	29	31,5	33	31,5	30,5
	Masse totale humide (g)	254,5	238,5	291,0	221,0	265,0	261,0	298,0	271,0
	Masse totale sèche (g)	213,5	200,5	240,0	175,0	215,0	212,5	237,5	261,0
	Masse de l'eau = (2)-(3) (g)	41,0	38,0	51,0	36,0	49,5	48,5	60,5	54,5
	Masse du matériau sec = (3)-(1) (g)	184,5	170,5	207,0	146,0	184,0	179,5	206,0	186,6
	Teneur en eau = [(4)/(5)].100 (%)	22,2	22,3	24,6	24,7	26,9	27,0	29,4	29,3
	Teneur en eau moyenne (%)	22,3		24,7		27,0		29,3	
POIDS VOLUMIQUE	Masse d'eau moyenne W(g) (6)	450		570		690		810	
	N° Moule	35		35		35		35	
	Masse de la moule (g) (7)	3427		3427		3427		3427	
	Masse totale humide (g) (8)	7559		7559		7559		7559	
	Masse du matériau humide (8)-(7) [g]	4132		4523		4623		4533	
	Volume du moule (cm ³) (10)	2248,9		2248,9		2248,9		2248,9	
	Masse volumique humide (11) = (9)/(10) [g/cm ³]	18,4		20,1		20,5		20,1	
	Masse volumique humide (12) = [100*(11)]/(100+(11)) (g/cm ³)	1,50		1,61		1,62		1,55	

La figure suivante montre la courbe de l'évolution de poids volumique maximale en fonction de la teneur en eau de la latérite 2:



Courbe de l'évolution de poids volumique maximale en fonction de la teneur en eau:

La courbe montre que $W_{opt} = 26\%$ et $\gamma_d \text{ max} = 16,28 \text{ kN/m}^3$

ANNEXE 5 : CLASSIFICATION DE LA LATERITE PAR CRATERre

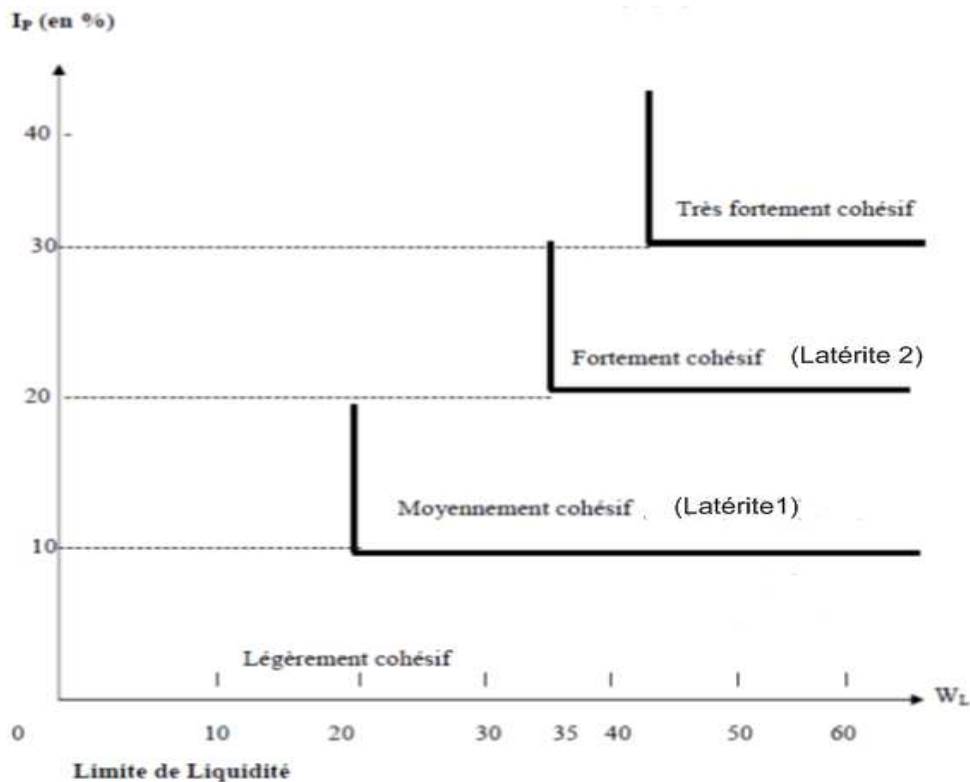
1. Classification suivant la teneur en eau optimum W_{opt} des échantillons :

W_{opt}	Appréciation	Possibilité	Place des échantillons
7 à 9	Bien		
9 à 17	Excellent	Le plus facile à stabiliser	
17 à 22	Acceptable	Difficile à stabiliser	Latérite 1
22 à 25	Eventuellement acceptable	Difficile à stabiliser	Latérite 2

2. Classification suivant la masse volumique sèche (γ_d max) des échantillons :

γ_d max (Kg/m ³)	Appréciation	Place des échantillons
1650 - 1760	Assez médiocre	Latérite1, Latérite 2
1760 - 2100	Très satisfaisant (argileux)	
2100 - 2200	Excellent (gros élément)	
2200 - 2400	Exceptionnel	

3. Cohésion des échantillons :



Nom et prénoms : RAMAROSON Jean de Dieu

Titre : « Etude de la stabilisation de la latérite par les micro-organismes : cas de la latérite de Vontovorona »

Nombre de pages : 90

Nombre de tableaux : 17

Nombre de figures : 24

Nombre de photo : 14

TENY FAMINTINANA

Ity asa fikarohana ity dia maneho ny fomba fanamafisana ny tany mena amin'ny alalan'ny asan'ny bibikely faran'izay bitika indrindra. Tsy inona izany fa ny fanodinana ny vy III ho vy II ataon'ireo bibikely amina toerana tsy misy rivotra. Izany fanodinana izany dia nohatsaraina tamin'ny alalan'ny maloton'ny omby, ny siraamy ary ny zezika "urée". Ny fanamafisana dia miseho amin'ny fiverenana vy II ho vy III rehefa azon'ny oksizen'ny rivotra. Voafaritra avokoa ireo fe-petra rehetra ahafahana manao ny fanamafiana ami'ny alalan'ny bibikely. Ny vokatra azo dia mahafa-po eo amin'ny lafiny tohitra ara-teknika sy ny fisian'ny hirika madinika. Noho izany, ny vokatra azo tamin'ireo andrana notanterahina tamin'izao asa fikarohana izao dia afaka mifaninana tsara amin'ireo akora nohamafisina tamin'ny fomba simika. Ny ny vokatra azo tamin'izao asa fikarohana izao dia mahafeno ny feninitry ny « biriky mpitondra sokajy A »

Teny manokana: *tany mena, mpanamafy, toerana tsy misy rivotra, fanamafisana amin'ny alalan'ny bibikely*

RESUME

Le présent travail consiste à étudier la stabilisation de la latérite par les micro-organismes. Il s'agit de la réduction microbienne du fer ferrique en fer ferreux en milieu. La réaction de réduction a été activée par le purin, le sucre et l'urée. La prise se manifeste par la ré-oxydation en présence de l'oxygène de l'air du fer ferreux en fer ferrique. Les paramètres de la stabilisation de la latérite par les micro-organismes ont été déterminés. Les résultats obtenus sont satisfaisant du point de vue résistance à la compression et de la porosité. En effet, les matériaux obtenus à partir des essais effectués dans le cadre de ce travail ont des propriétés techniques qui pourraient concurrencer ceux obtenus à partir de la stabilisation chimique. Comparé aux normes, les briques obtenues à partir de ce procédé peuvent être classées « brique porteuse catégorie A ».

Mots clés : *latérite, stabilisant, milieu anaérobie, et réduction microbienne*

SUMMARY

The present work is to study the stabilization of laterite by microorganisms. This is the microbial reduction of the ferric iron to ferrous iron medium. The reduction reaction was activated by manure, sugar and urea. Decision is manifested by the re-oxidation in the presence of oxygen of ferrous iron to ferric iron. The parameters of the stabilization of the laterite by microorganisms were determined. The results obtained are satisfactory from the point of view compressive strength and porosity. Indeed, the materials obtained from the tests performed as part of this work have technical properties that could compete with those obtained from chemical stabilization. Compared to standards, the bricks obtained from this process may be classified as "Class A brick carrier".

Keywords: *laterite, stabilizer, anaerobic and microbial reduction*

Directeur de HDR : RANAIVONIARIVO V. Gabriely, Professeur Titulaire à l'ESPA

Adresse de l'auteur : Lot MB 442 Mahabo, Andoharanofotsy, 102 Antananarivo

Tel 033.12.399.40/ 034.02.399.40