

## **SOMMAIRE**

- Remerciement
- Sommaire
- Liste des tableaux
- Liste des figures
- Listes des organigrammes
- Liste des courbes
- Liste des diagrammes

## **INTRODUCTION**

### **Première partie : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES**

#### **Chapitre I GENERALITE**

- I Les latérites
  - 1 Définition
  - 2 Intensité de latérisation
  - 3 Classification des latérites
  - 4 Constituants des latérites
  - 5 Structure des latérites
  - 6 Utilisation des latérites
- II Les ciments
  - 1 Définition
  - 2 Les constituants
    - 2 1 Les constituants d'un clinker
    - 2 2 Les autres constituants
    - 2 3 Les constituants secondaires
    - 2 4 Les additifs
    - 2 5 Sulfate de calcium
  - 3 Les principales catégories de ciment
    - 3 1 Classification des ciments en fonction de leur composition
    - 3 2 classification des ciments en fonction de leur résistance normale
  - 4 Description de cimenterie à Madagascar (Amboanio et Holcim d'ibity)
- III Les silices Actives
  - 1 Définition
  - 2 Analyse de transformation du paddy
  - 3 Classification de la silice suivant sa teneur

4 Variété de silice

5 Influence du fer

#### IV Technique de stabilisation

1 principe

2 Objectif

3 Moyens

4 Différents types de stabilisants

5 Stabilisation au ciment

6 Effet de stabilisation

### **Chapitre II DETERMINATION DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES**

#### I Analyse granulométrique

1 But

2 Principe

#### II Limite d'Atterberg

1 But

2 Définition

3 Principe de l'essai

#### III Essai Proctor

1 But

2 Principe de l'essai

#### IV Etude géotechnique des latérites de Vontovorona

### **Chapitre III ANALYSE CHIMIQUE**

#### I Analyse chimique des latérites

1 Dosage de SiO<sub>2</sub> par la méthode précipitation

2 Dosage de CaO par la méthode précipitation

3 Dosage de MgO par la méthode de précipitation

4 Dosage de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par la méthode de manganimétrie

5 Dosage de TiO<sub>2</sub> par spectrométrie UV

6 Dosage de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par méthode de précipitation

7 Résultats des analyses chimiques de latérite de Vontovorona

#### II Analyse du ciment

1 Composition Chimique

2 Hydraulicité

3 Méthode de détermination des éléments majeurs du ciment et du clinker

## **Deuxième partie : ETUDES EXPERIMENTALES**

### **Chapitre I ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUE DES LATERITES STABILISEES**

I Confection des éprouvettes

- 1 Pour le liant ciment
- 2 Pour la latérite avec silice active et urée
- 3 Machine de Testwell
- 4 Schéma de l'éprouvette

II Résultats

- 1 Essai avec des latérites Ambodrattrimo
- 2 Essai avec des latérites de Vontovorona
  - 2 1 Première essai
  - 2 2 Deuxième essai

III Interprétation des résultats

- 1 Latérite avec le ciment
- 2 Latérite stabilisé avec le phyllosilicate de fer
  - 2 1 Latérite non réduite
  - 2 2 Latérite réduite et silice active

IV Conclusion Partielle

## **Troisième partie : EVALUATION ECONOMIQUE ET APPROCHES ENVIRONNEMENTAUX DES LATERITES**

### **Chapitre I ETUDES COMPARATIVES DES COUTS**

I Cement et Liant

### **Chapitre II APPROCHE ENVIRONNEMENTAL**

- I Effets d'utilisation de la latérite
- II Effets d'utilisation de Ciment
- III Effet d'utilisation de la silice active
- IV Effet d'utilisation de l'urée

**CONCLUSION**

**BIBLIOGRAPHIE**

**ANNEXES**

*Rapport-gratuit.com*   
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

## Liste de tableaux

<b>tableau</b>		<b>page</b>
<b>1</b>	Classification des latérites selon LACROIX.....	4
<b>2</b>	Constituants majeurs de latérite.....	5
<b>3</b>	Désignation des différents types de ciments en fonction de leur fonction .....	11
<b>4</b>	Spécifications et valeurs garanties en fonction de la classe .....	12
<b>5</b>	Limite des classes et sous classes de résistances nouvelles .....	12
<b>6</b>	Composant de la balle de riz et la valeur calorifique.....	19
<b>7</b>	Tableau récapitulatif des valeurs bromatologiques des balles de riz .....	20
<b>8</b>	Composition chimique de cendre de balle de riz.....	21
<b>9</b>	Stabilisation selon la nature du sol.....	25
<b>10</b>	Tableau d'étalonnage du TiO <sub>2</sub> par spectrométrie UV .....	34
<b>11</b>	Résultas de l'analyse chimique des latérites de Vontovorona ....	35
<b>12</b>	Résultats de l'analyse chimique des latérites de Vontovorona après la réduction biologique dans une étuve à 30°C .....	36
<b>13</b>	Composition chimique moyenne des ciments.....	37
<b>14</b>	Composition minéralogique d'un ciment .....	37
<b>15</b>	Résultat de l'essai sur les latérites naturelles d' Ambodratrimeo .....	43
<b>16</b>	Latérite d'Ambodratrimeo et 5% ciment .....	44
<b>17</b>	Latérite naturelle de Vontovorona .....	45
<b>18</b>	Latérite de Vontovorona plus 10% de ciment .....	46
<b>19</b>	Latérite de Vontovorona plus 10% de silice+urée .....	47
<b>20</b>	Latérite de Vontovorona plus 5% de ciment .....	48
<b>21</b>	Latérite de Vontovorona plus 10% de ciment .....	49
<b>22</b>	Latérite de Vontovorona plus 10% de silice active .....	50
<b>23</b>	Classification et appréciation des latérites suivants leur teneur en eau .....	53
<b>24</b>	Tableau comparatif des échantillons non réduit et réduit .....	55
<b>25</b>	Types de déchets .....	67

<b>Figure</b>	<b>Liste de figures</b>	<b>Page</b>
<b>1</b>	Structure des latérites .....	<b>5</b>
<b>2</b>	Installation pour procédé par voie sèche .....	<b>13</b>
<b>3</b>	Installation pour procédé par voie semi-sèche (cas de la cimenterie d'Ibity).....	<b>14</b>
<b>4</b>	Installation pour procédé par voie humide (cas de la cimenterie d' Amboanio) .....	<b>15</b>
<b>5</b>	Procédé de fabrication par voie sèche et semi-sèche d'un ciment	<b>16</b>
<b>6</b>	Procédé de fabrication par voie humide et semi-humide d'un ciment.....	<b>17</b>
<b>7</b>	Limites d'ATTERBERG .....	<b>29</b>
<b>8</b>	Test de compressibilité ou essai PROCTOR .....	<b>31</b>
<b>9</b>	Méthode de détermination des éléments majeurs du ciment et du clinker .....	<b>38</b>
<b>10</b>	Protocole d'essai pour le liant ciment.....	<b>39</b>
<b>11</b>	Protocole d'essai pour les latérites avec la silice active et l'urée .....	<b>40</b>
<b>12</b>	Appareil de mesure de force de compression TESTWELL .....	<b>41</b>
<b>13</b>	Schéma simplifié d'une éprouvette.....	<b>42</b>
<b>14</b>	Porosité des latérites avec le ciment.....	<b>51</b>
<b>15</b>	Résistance à la compression à l'état sec du ciment .....	<b>52</b>
<b>16</b>	Résistance à la compression à l'état humide des latérites avec du ciment .....	<b>52</b>
<b>17</b>	Porosité des latérites avec silice active et l'urée .....	<b>55</b>
<b>18</b>	Résistance à sec de l'échéance de 28jrs pour les latérites réduites avec de la phyllosilicate de fer .....	<b>56</b>
<b>19</b>	Résistance humide de l'échéance de 28jrs pour les latérites réduites avec de la silice active et de l'urée ....	<b>56</b>
<b>20</b>	Comparaison des latérites réduite et non réduite.....	<b>57</b>
<b>21</b>	Comparaison de la résistance à sec des liants ciment et de la silice active avec urée .....	<b>57</b>
<b>22</b>	Comparaison de la résistance humide du liant ciment et de la silice active avec urée.....	<b>58</b>
<b>23</b>	Comparaison de la porosité du phyllosilicate de fer et du liant ciment .....	<b>58</b>
<b>24</b>	Schéma simplifié d'une brique .....	<b>60</b>
<b>25</b>	Vue de dessus d'un mur 33 .....	<b>61</b>
<b>26</b>	Vue de face d'un mur 33.....	<b>61</b>
<b>27</b>	Comparaison de coûts à prix moyenne de ciment et de la silice active avec l'urée.....	<b>65</b>

# Introduction

## INTRODUCTION

Ce travail se situe dans le cadre des travaux de recherche menés au sein du département du Génie Chimique afin de valoriser les latérites et de trouver des solutions alternatives à la flambée du prix de ciment à Madagascar. Ce travail est d'une grande importance pour MADAGASCAR dans la mesure où 75 % de la population malagasy baignent toujours dans la pauvreté. De plus, la grande majorité de cette population (68%) vivent en milieu rural.

Au niveau des caractéristiques socio-économiques, le RGPH (Recensement Général de la Population et de l'Habitat) a permis d'obtenir des données concernant les caractéristiques de l'habitat et le confort des logements. La plupart des logements à Madagascar sont construites avec des matériaux d'origine végétale (tige, écorce, feuille, bozaka,...). Plus de 7 logements sur 10 (72 %) ont des toits en matériaux d'origine végétale et seulement le quart ont des toits en tôle (25 %). Pour 46 % des cas, les murs sont en terre battue et plus du quart des logements (27 %) ont des murs en matériaux d'origine végétale. Les autres matériaux (ciment, planche,...) ne sont utilisés que dans les grandes villes à des faibles proportions.

Notons que 2 personnes sur 5 (42 %) vivent dans des logements dont le plancher est en terre, même dans les grandes villes, 19 % des planchers n'ont pas de revêtement. Comme pour le toit et le mur, les matériaux d'origine végétale sont principalement utilisés pour la construction du plancher.

Dans l'ensemble du pays, près de 3 personnes sur 5 (59 %) ont des logements ne comprenant qu'une seule pièce. Et dorment dans une même pièce. Même dans les grandes villes, le nombre moyen de pièces occupées est très faible.

La cause est l'augmentation des prix des matériaux de construction tels que les ciments. Il est donc nécessaire de trouver d'autres moyens pour une utilisation minimale de ces derniers. Ceci afin de motiver la population à investir beaucoup plus dans la construction, ne serait ce que pour son propre logement.

Par ailleurs, plus de la moitié de la population malagasy sont des agriculteurs ruraux. Certains de ces zones reculées sont difficiles d'accès vu l'état déplorable (ou carrément l'inexistence) des infrastructures routières.

Cette situation nous motive pour l'élaboration de notre mémoire. En effet, la stabilisation des latérites par le TOPSIL est très onéreuse.

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

Plusieurs études ont été faites à propos des latérites mais elles ne concernent que leurs propriétés et leurs structures. Notons aussi que jadis, les Ntaolo utilisaient déjà la méthode de stabilisation pour la construction des « tambohon'ny ntaolo » et qui devrait être améliorée. Actuellement les profanes ne s'intéressent plus à ces vieilles méthodes et espèrent l'évolution des nouvelles technologies plus simples, moins onéreuses mais durables ; d'où ce travail qui s'intitule :

« ETUDE COMPARATIVE DE LA STABILISATION DES LATERITES AVEC LES LIANTS : CIMENT ET LE LIANT SILICE ACTIVE ADDITIONNEE DE L'UREE ». Cette étude aidera les gens à résoudre leurs problèmes, à démarrer et à développer la politique de construction.

Pour ce faire, les analyses chimiques des latérites et les études relatives à la réduction microbienne des latérites ont été réalisées au laboratoire du Génie Chimique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A) et les optimisations des caractéristiques du liant ont été étudiées au Bloc Technique de l'E.S.P.A.

Ainsi, nous voudrions apporter notre contribution à la résolution des problèmes suscités par le biais de ce travail qui se subdivise en trois parties : la première partie est une étude bibliographique sur les latérites, les ciments et les silices actives (définitions, constituants ; analyses physique et chimique de chaque constituant ...). La deuxième partie est expérimentale. On étudiera d'abord les propriétés physiques des éprouvettes avec leurs résistances à l'état sec et état humide, ensuite on abordera les différentes études comparatives des ciments et la silice active avec l'urée. Les études des impacts environnementaux et l'évaluation économique se fera en dernier lieu : on y étudiera les coûts afin d'effectuer la comparaison, on terminera par les problèmes d'ordre environnemental pouvant être rencontrés lors de la phase de productions.

Première Partie :  
ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

## Chapitre 1 : GENERALITES

### 1.1. LES LATERITES

#### 1.1.1. Définitions



Le mot latérite vient du nom latin « later » qui signifie brique. BUCHMAN en 1807 le décrit comme étant un matériaux ferrugineux utilisé dans la construction.

L'ancienne définition basée sur le rapport  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 < 1.33$  s'est longtemps imposée ; quoique souvent contestée. Et 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. [8]

#### 1.1.2. Intensité de latérisation

On peut classifier les latérites selon l'intensité de latérisation notée  $\rho$

donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{\% \text{ en poids de } \text{SiO}_2 \text{ (combinée)}}{\% \text{ en poids de } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (combinée)}} \times 1.7$$

*Exemple :*

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

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

$\rho < 1$  pour les latérites vraies

#### 1.1.3. Classification des latérites

On classe les latérites en deux catégories selon LACROIX ; mais aussi selon la classification basée sur les ratios silice-alumine et silice sesquioxide.

Premièrement, la classification selon LACROIX est un classement suivant la teneur en matériaux latéritiques. [14]

Tableau n°01 : Classification des latérites

Classes	Teneur en matériaux latéritique (oxyde, hydroxyde et kaolinites)
Latérites vraies	100% à 90%
Latérites argileuses	90% à 50%
Kaolinites et argiles latéritiques	50% à 10%
Kaolinites et argiles	Inférieur à 10%

Deuxièmement, la classification en fonction du ratio silice-alumine et silice-sesquioxoxyde. Cette classification a été effectuée par MARTIN et DOYEN en 1930 et qui ont donné la relation:

$$Ki = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$

$$Ki' = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

#### 1.1.4. Constituants des latérites

Les latérites sont constituées de :

- FER qui se présente soit sous forme de goethite ( $FeOOH$  ou  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ), d'hématite ( $Fe_2O_3$ ), ou de magnétite ( $Fe_3O_4$ ).
- L'ALUMINIUM qui se présente sous forme d'oxyde. La gibbsite ou hydragillite ( $Al(OH)_3$ ) 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 ( $Si_2O_5Al_2(OH)_4$ ) pour le demi maille. Le silicium est de ce fait un constituant habituellement sous forme combinée. Il se présente aussi sous forme de quartz.
- LE TITANE qui est sous forme d'ilménite  $FeTiO_3$ .
- LE MANGANESE qui apparaît aussi sous forme d'oxyde en faible quantité.

Tableau n°02 : constituants majeurs de latérite [2]

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

**Source :** étude de stabilisation de la latérite par la paille de riz approche biochimique (ABD-EL MALIK)

### 1.1.5. Les structures des latérites

En 1987, RAZAFIMANDIMBY [16] a décrit la structure des latérites comme étant la suivante :

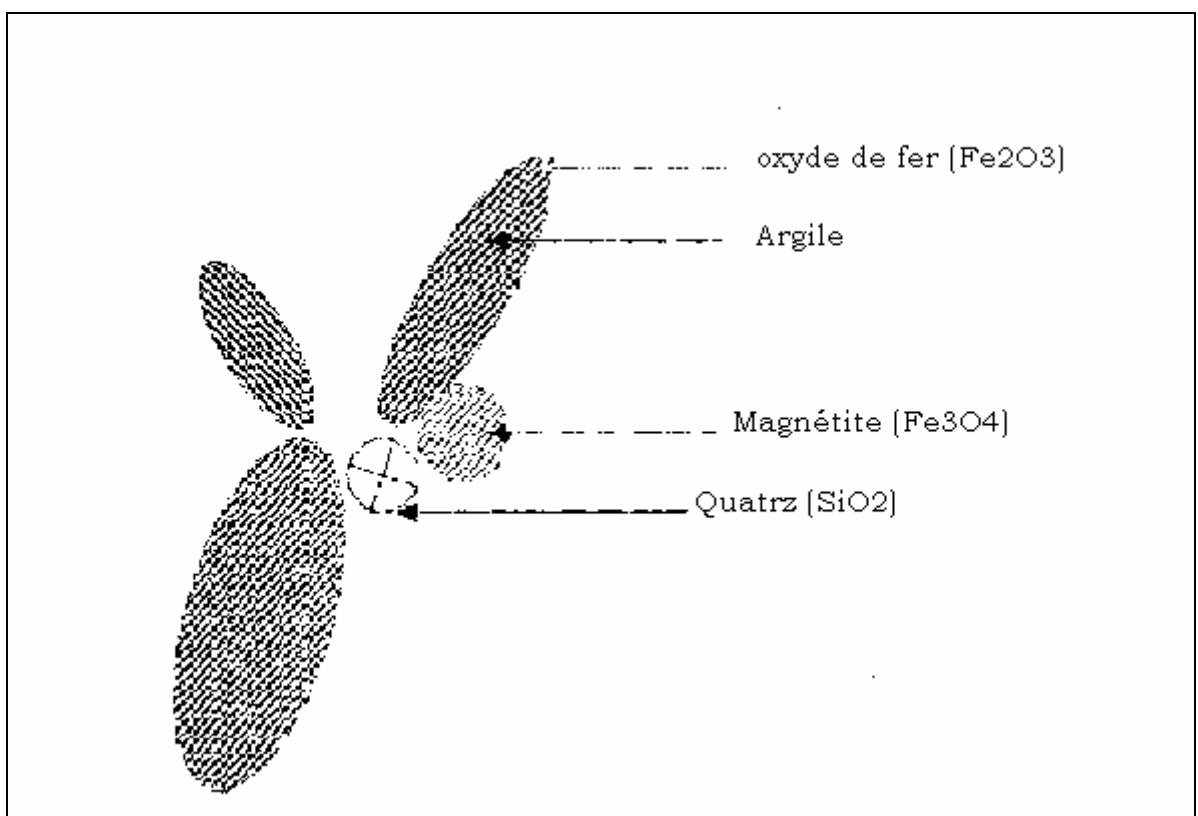


Figure n°01 : structure de latérite

### 1.1.6. Utilisation des latérites

Une possibilité d'utilisation des latérites en tant que matériaux est le domaine de la construction. Dans ce domaine, la latérite est utilisée comme brique ayant un faible pourcentage de liant. D'après un centre de recherche CRATERRE, une pression de 100 bars permet une économie de 3 à 4 % de liant ciment au lieu des 30% utilisés lors de la mise en oeuvre du béton par exemple.

## 1.2. LES CIMENTS

### 1.2.1. Définition

Le ciment est un produit moulu provenant du refroidissement du clinker. Ce dernier contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, sa température de fusion. [13]

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation transforme la pâte liante qui, à une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

### 1.2.2. Les constituants

Le ciment est constitué d'oxyde minéral dont les principaux constituants sont la chaux ( $\text{CaO}$ ) à caractère basique et la silice ( $\text{SiO}_2$ ) à caractère acide. On trouve également l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et le fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) qui sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique.

Les ciments sont constitués de plusieurs constituants qui sont entre autres :

- 1- le clinker
- 2- les constituants principaux
- 3- les constituants secondaires
- 4- les additifs
- 5- les sulfates de calcium

Expliquons brièvement chaque constituant du ciment.

### **1.2.2.1. Les constituants d'un clinker**

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

- Le silicate tricalcique       $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$       ( $\text{C}_3\text{S}$ )      (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique       $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$       ( $\text{C}_2\text{S}$ )      (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique       $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$       ( $\text{C}_3\text{A}$ )      (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétra calcique       $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$       ( $\text{C}_4\text{AF}$ )      (Ferro-aluminate tetracalrique)      (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), de la magnésie ( $\text{MgO}$ ), et diverses traces de métaux.

La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci. Au microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker comme étant trois phases. On les définit comme étant les suivantes:

A = alite (phase cristallisée) ; se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de  $50\mu$ .

B = bélite (phase vitreuse) ; se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire) ; se trouve dans le clinker sous forme impure et en phase vitreuse.

### 1.2.2.2. Les autres constituants

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. De par leurs caractéristiques chimiques ou physiques, l'ajout d'autres constituants associés au clinker modifie les propriétés du ciment.

Les constituants les plus utilisés sont: [12]

#### Calcaires

Les calcaires sont considérés comme étant les constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75% en masse.

#### Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

#### Cendres volantes (V ou W)

Elles sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques ; Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

#### Schistes calcinés

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et pouzzolaniques.

#### Fumée de silice

Les fumées de silices sont des sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes au moins à 85 % en masse. Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.

### **Fillers**

Ce sont des "constituants secondaires" des ciments, donc leurs proportions n'excèdent pas 5 % en masse dans la composition du ciment. Ils sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

#### **1.2.2.3. Les constituants secondaires**

Ces sont des matériaux minéraux naturels ou dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus ; sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux. Dans tous les cas, ils entrent dans la composition des ciments dans des proportions qui n'excèdent pas 5% en masse.

#### **1.2.2.4. Les additifs**

Les additifs sont des constituants ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale d'additifs doit être inférieure ou au plus égale à 1% en masse (exception faite des pigments). La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieur à 0.5% en masse.

#### **1.2.2.5. Sulfate de calcium**

Ce sont les gypse ou l'anhydrite, qui doivent être ajoutés en faible quantité (4-5%) aux autres constituants du ciment lors de la fabrication. Ils servent à réguler la prise.

### **1.2.3. Les principales catégories de ciment.**

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

### **1.2.3.1. Classification des ciments en fonction de leur composition**

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition [3], en cinq types principaux selon les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans la notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèses) :

- ❖ CEM I: Cement Portland (CPA),
- ❖ CEM II: Cement portland composé (CPJ),
- ❖ CEM III: Cement de haut fourneau (CHF),
- ❖ CEM IV: Cement pouzzolanique (CPZ),
- ❖ CEM V: Cement au laitier et aux cendres (CLC).

### **1.2.3.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 4. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau n°03 : Désignation des différents types de ciments en fonction de leur fonction [12]

	Ciment Portland	Ciment portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA CEM I	CPJ CEM II/A	CPJ CEM II/B	CHF CEM III/A	CHF CEM III/B	CLK CEM III/C	CPZ CEM IV/A	CPZ CEM IV/B	CLC CEM V/A	CLC CEM V/B
<b>Clinker (K)</b>	95 %	80% $\leq 94\%$	65% $\leq 79\%$	35% $\leq 64\%$	20% $\leq 34\%$	5% $\leq 19\%$	65% $\leq 90\%$	45% $\leq 64\%$	40% $\leq 64\%$	20% $\leq 39\%$
<b>Laitier (S)</b>				36% $\leq 65\%$	66% $\leq 80\%$	81% $\leq 95\%$			18% $\leq 30\%$	31% $\leq 50\%$
<b>Pouzzolanes (Z)</b>									18% $\leq$ total $\leq 30\%$	31% $\leq$ total $\leq 50\%$
<b>Cendres Siliceuses (V)</b>										
<b>Fumée de silice (D)</b>								(fumée 10%)	(fumée 10%)	
<b>Cendres calciques (W)</b>										
<b>Schistes (T)</b>										
<b>Calcaires (L)</b>										
<b>Fillers (F)</b>										

Tableau n°04 : Spécifications et valeurs garanties en fonction de la classe

CLASSE	Résistance à la compression (MPa) EN 196-				Retrait A 28 jours	Début de prise	Stabilité
	Au jeune âge		A 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Mini	Maxi	µm/m	mm	mm
<b>32.5</b>		(17.5)	/32.5 (30)	≤52.5	≤800	90	≤10
<b>32.5R</b>	/13.5 (12)	/≤	/32.5 (30)	≤52.5	≤1000	90	≤10
<b>42.5</b>	/12.5 (10)		/42.5. (40)	≤62.5	≤1000	60	≤10
<b>42.5R</b>	/20 (18)		/42.5 (40)	≤62.5	≤1000	60	≤10
<b>52.5</b>	/20 (18)		/52.5 (50)			60	≤10
<b>52.5R</b>	/30 (28)		/52.5 (50)			60	≤10

Tableau n°05 : limite des classes et sous classes de résistances nouvelles

Désignation de la classe	Sous classe éventuel	Résistance à la compression (bar)			
		2 jours minimale	A 28 jours		
			Minimales	Maximales	
<b>350</b>	-	-	250	450	
<b>450</b>	-	-	350	550	
	R (rapide)	150	350	550	
<b>550</b>	-	-	450	650	
	R (rapide)	225	450	650	
<b>THP Très hautes performances</b>	-	300	550		

### 1.2.4. Description des cimenteries à Madagascar : Holcim Ibity et d'Amboanio [12]

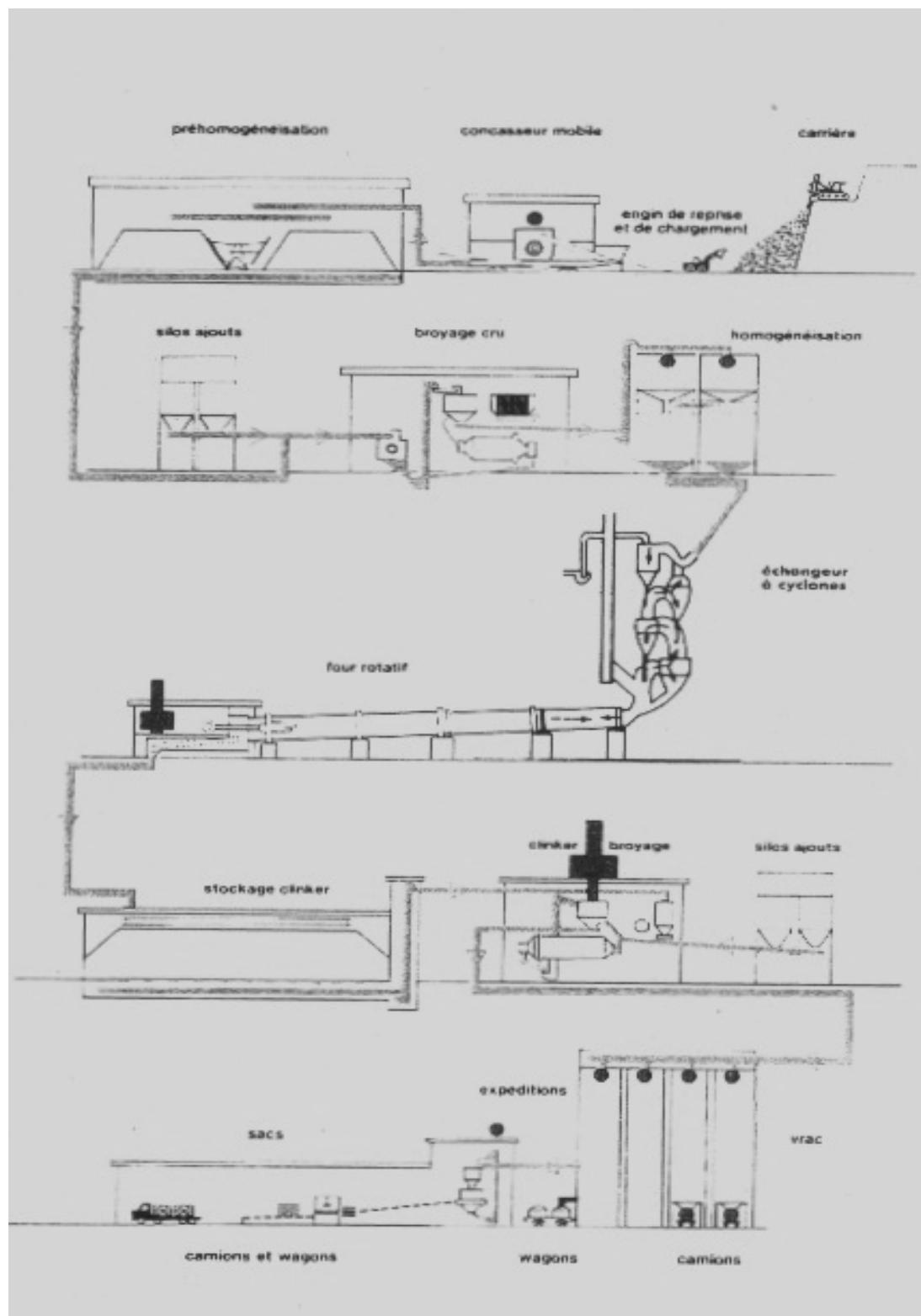


Figure n°02 : Installation pour procédé par voie sèche

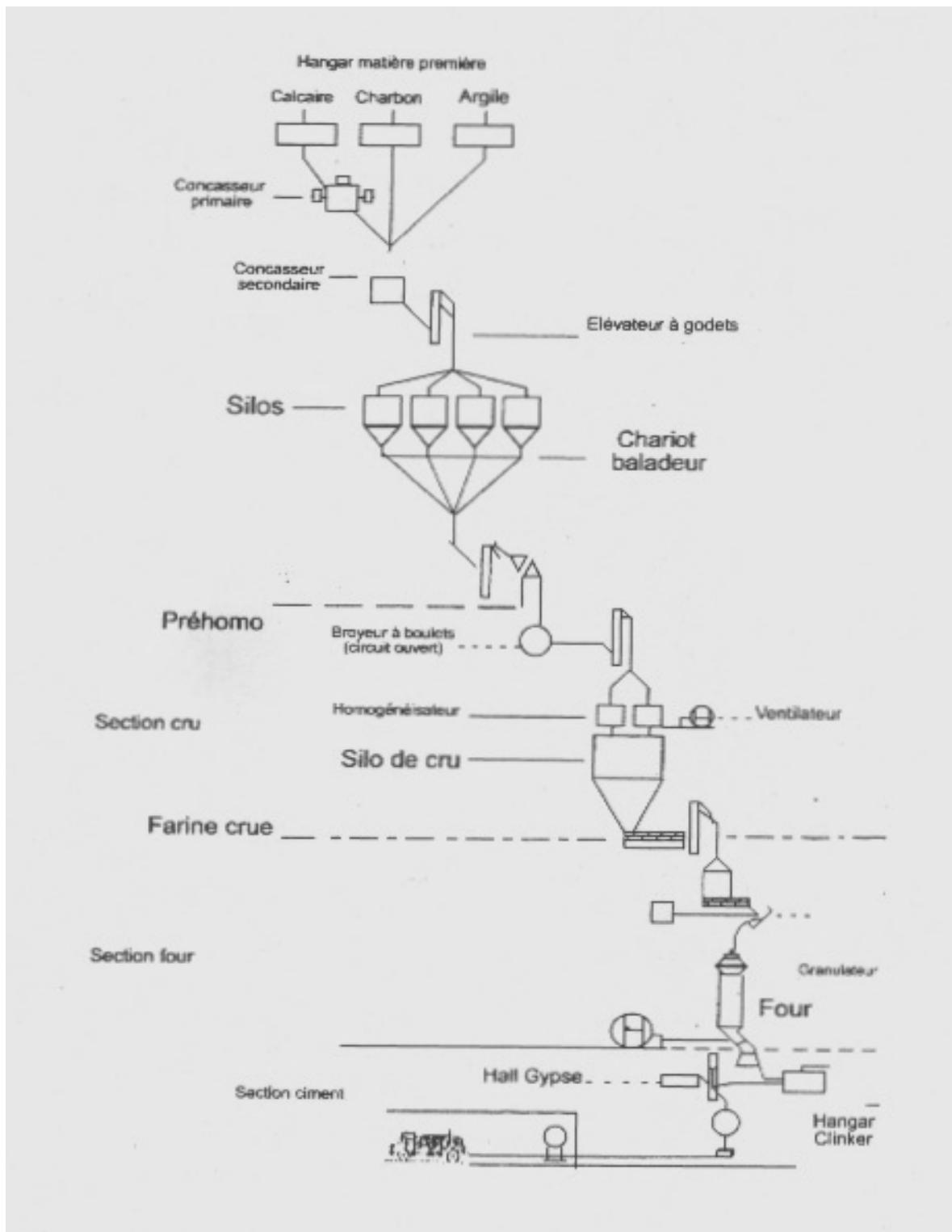
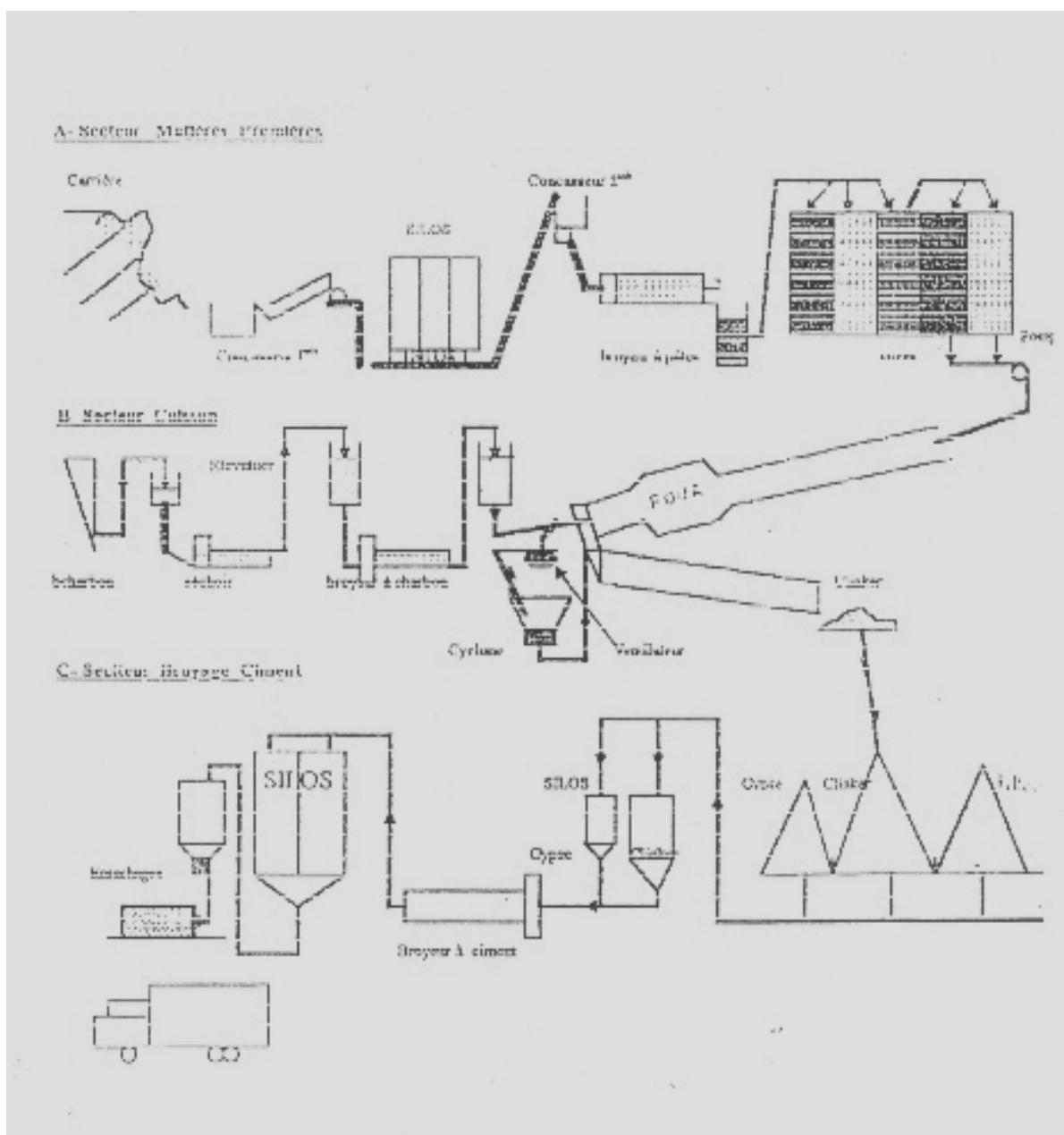


Figure n°03 : Installation pour procédé par voie semi-sèche (cas de la cimenterie d'Ibity)



**Figure n°04 :** Installation pour procédé par voie humide  
(cas de la cimenterie d'Amboanio)

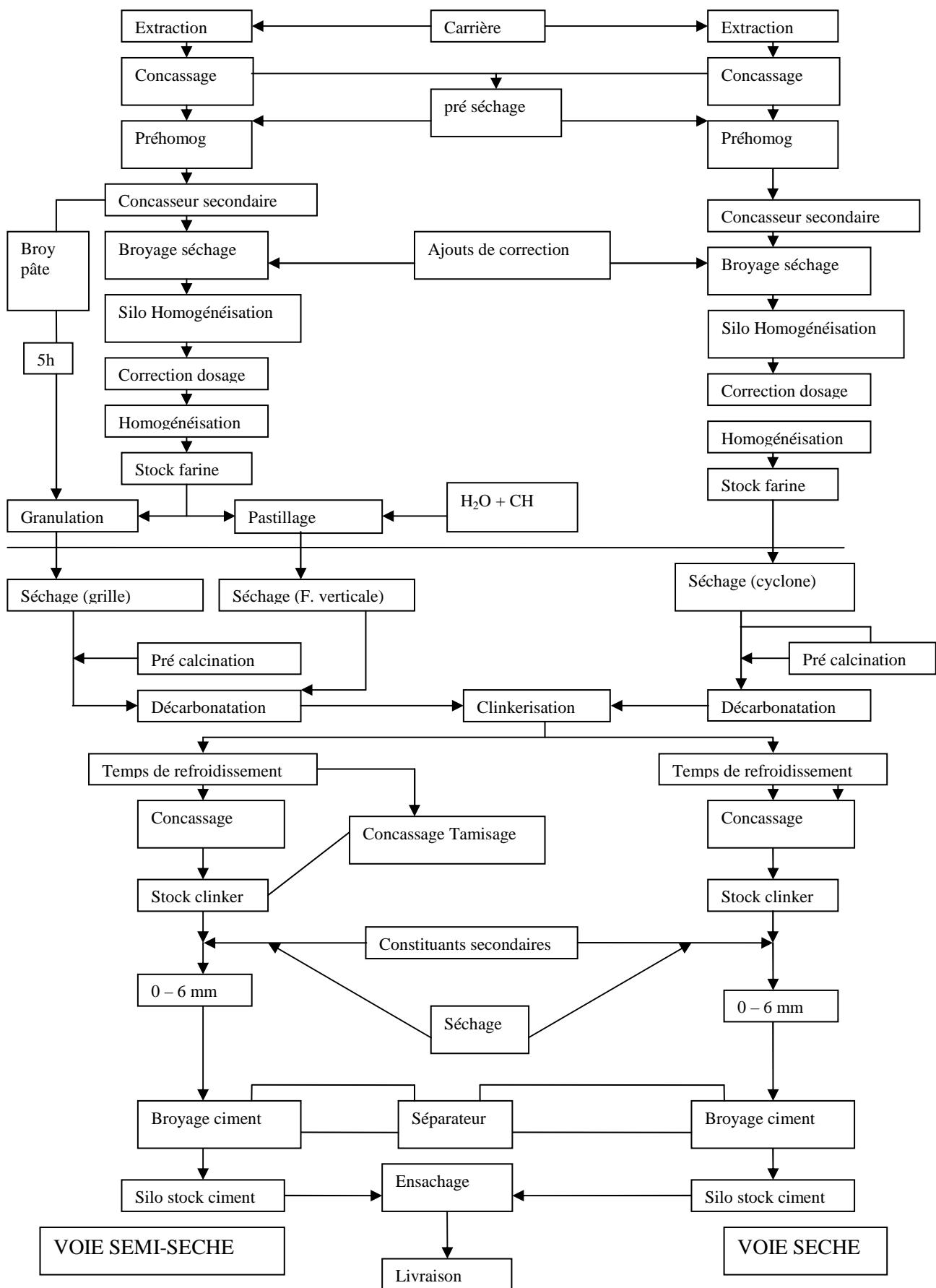


Figure n°05 : Procédé de fabrication par voie sèche et semi-sèche

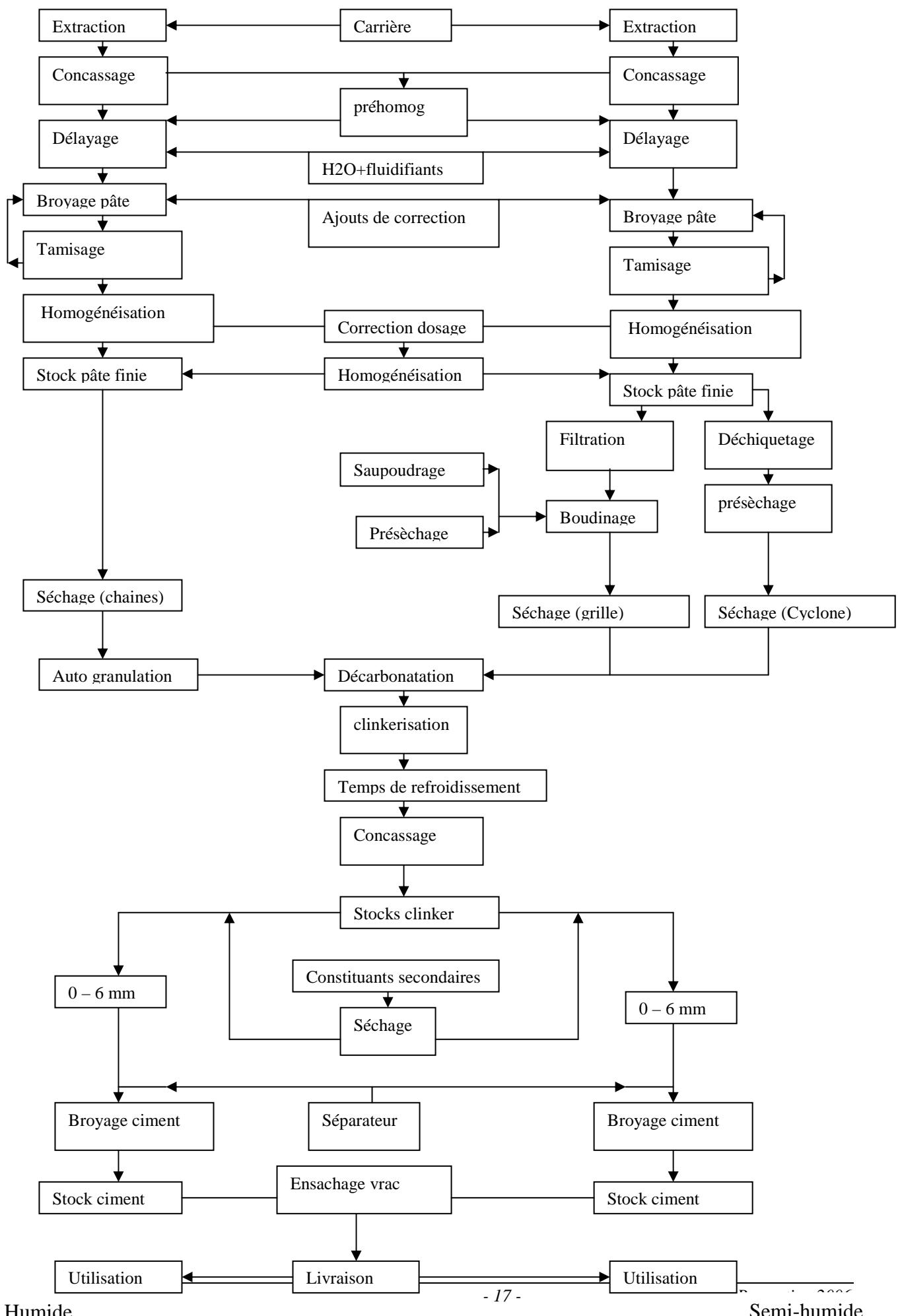


Figure n°06 : Procédé de fabrication par voie humide et semi-humide

## 1.3. LES SILICES ACTIVES

### 1.3.1. Définition

La silice a pour formule générale  $\text{SiO}_2$  et elle existe sous deux états différents :

Etat anhydre  $\text{SiO}_2$  : Cristallisé  
Amorphe

Etat hydraté  $(\text{SiO}_2)_n \cdot n \text{H}_2\text{O}$  avec  $n$  variable (entre 3 et 4)

La silice s'applique à des solides naturels, synthétiques dont l'unité est le tétraèdre  $\text{SiO}_4$ . C'est l'organisation spatiale de ces tétraèdres qui va définir la structure amorphe ou cristalline des composés.

Il faut remarquer que la silice est très abondante dans la balle de paddy (plus de la moitié en proportion).

La silice active est l'élément essentiel utilisé pour fabriquer des briques en terre ou un mortier.

### Constituants de brique de silice

Selon la matière première, la cuisson ou la fabrication, la brique de silice contiendra les éléments suivants [1] :

- ❖ Quartz pas encore totalement transformé, constituant principalement les éléments gros particules
- ❖ Tridymite et cristobalite
- ❖ Silicates de chaux
- ❖ Verre plus ou moins complexe

### 1.3.2. Analyse de transformation du paddy

Les unités industrielles ou artisanales de transformations sont dans la plupart des cas situées [17], soit dans les grandes régions de production de paddy, en particulier le Lac Alaotra et Marovoay; soit aux alentours des zones de production à haute densité démographique telle que le Vakinankaratra, Antananarivo, Fianarantsoa etc.

Vu l'état des infrastructures routières à Madagascar, et la rentabilité de l'opération, très peu d'opérateurs font le transport du paddy sur de longues distances. La balle qui constitue près de 7% du poids des grains n'est pas encore à ce jour valorisée industriellement.

Au niveau des paysans, le traitement se fait encore au moyen de pilon et de mortier. Le rendement moyen est dans ce cas de l'ordre de 60%. L'importance des pertes se situ ou de la production n'est pas à négliger car on accuserait une perte allant de 5 à 10% par rapport aux unités de transformations classiques. Même entre un décortiquer et une unité muni d'un dépailleur qui permet un traitement plus doux du paddy, la différence peut atteindre 2% en terme de rendement, et est particulièrement plus élevée si le paddy est de type long ou mi-long (Randrianarisoa 2001). Pourtant, le pilonnage est la pratique la plus répandue et la plus utilisée dans les campagnes Malagasy. Seule une petite partie des 2.450.000 tonnes de paddy produits annuellement à Madagascar est commercialisée. Tout au plus, 15% de cette quantité passera dans les unités industrielles ou semi industrielles de transformation C'est un problème réel car au regard de la différence de rendement observée, un simple calcul nous amène à une perte de l'ordre de 90,000 tonnes de riz blanc par an par cette technique, soit l'équivalent de 135.000 tonnes de paddy

### **Composition des balles de riz**

La balle de riz est constituée par un squelette siliceux des cellules végétales qui contiennent des pores microscopiques plus nombreux que ceux des frustules des diatomées.

Tableau n°06 : composant de la balle de riz et la valeur calorifique [15]

<b>Composant</b>	<b>Quantité en %</b>	
	<b>Sans séchage</b>	<b>Après séchage à l' air</b>
<b>Eau</b>	19.1	2.7
<b>Charbon</b>	12.7	15.2
<b>Matière volatile</b>	44.6	53.6
<b>Cendre</b>	23.7	28.5
<b>Valeur calorifique (tep/tonne)</b>	0.26	0.32

### **Autres constituants d'une balle de paddy [4]**

Tableau n°07 : Tableau récapitulatif des valeurs bromatologiques des balles de riz

Balle de riz	MS	MPB	Cell	MG	ENA	MM
Laboratoire	90.3	2.6	38.2	0.4	38.5	20.3

Source : laboratoire de l'élevage de Dakar Ham, ISRA

Tableau des valeurs bromatologiques (suite)

Balle de riz	IC	Ca	P	Mg	K	MAD	TDN	UF
Laboratoire	19.1	0.09	0.05	0.5	0.44	0	10.1	0.1

Source : laboratoire de l'élevage de Dakar Ham, ISRA

Avec MS : Matière Sèche

MPB : Matière Protéique Brute

Cell : Cellulose

MG : Matière Grasse

ENA : Extractif Non Azotée

MM : Matière Minérale totale ou cendre

IC : Insoluble Chlorhydrique ou silice

Ca : calcium

P : Phosphore

K : Potassium

Mg : Magnésium

MAD : Matière Azote Digestible

TDN : Nutriments Digestibles totaux

UF : Unité Fourragère

Tableau n°08 : Composition chimique de cendre de balle de paddy

Constituant	Pourcentage
$\text{SiO}_2$	92.995
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.592
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.152
$\text{CO}$	0.439
$\text{MgO}$	0.415
$\text{Na}_2\text{O}$	0.037
$\text{K}_2\text{O}$	2.932
<b>Perte au feu</b>	2.932

Les cendres épurées sont broyées et les poudres granulométriques obtenues sont mélangées avec un peu d'argile ou de latérite très réfractaire. Naturellement, plus il y a d'argile plus le produit sera solide, mais moins il sera poreux, donc isolant.

### 1.3.3. Classification de la silice suivant sa teneur en $\text{SiO}_2$ [9]

- Produits demi-silice : de teneur  $5 \leq \text{SiO}_2 < 93\%$
- Produit silice de teneur  $\text{SiO}_2 \geq 93\%$  en général 93% à 97% et le reste est formé par des alcalino-terreux ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ), des alcalins ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) de fer et des titanés en faible quantité.

### 1.3.4. Variétés de silice

Le silice se répartie en 8 variétés qui sont : [9]

- les quartz  $\alpha$  et  $\beta$  avec un accroissement de volume de 0.8% et une température de transformation 573°C.
- les tridymites  $\alpha$  et  $\beta$  avec un accroissement de volume 0.2% et une température de transformation 117°C. La transformation de  $\alpha$  en  $\beta$  s'effectue à 117°C tandis que la transformation de  $\beta$  en  $\alpha$  est à 163°C.
- les cristobalites  $\alpha$  et  $\beta$  dont la température de transformation varie de 200 à 265°C avec 3% d'accroissement de volume.
- Coesite et de la stishovite

### 1.3.5. Influence du fer

Le fer se présente sous la forme ferrique ; ou sous la forme ferreuse et qui donne avec la silice des composées très fusible et assez mal définis. On identifie la fayalite  $\text{SiO}_2\text{FeO}$ .

La forme ferrique a beaucoup moins d'influence sur la réfractarité. Les composés du fer sont les agents actifs des transformations. Actuellement, en Amérique, on fabrique des briques à haute teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## 1.4. TECHNIQUE DE STABILISATION

### 1.4.1. Principe

Le principe de cette stabilisation est de modifier la propriété d'un système terre-eau-air afin d'obtenir des propriétés compatibles à des applications particulières. Cependant, les problèmes suivants doivent être résolus :

- les propriétés des terres à stabiliser
- l'économie du projet, c'est-à-dire le coût et la durée de réalisation
- la technique de mise en œuvre de la terre.

### 1.4.2. Objectif

Les principaux objectifs de ce projet sont :

- d'obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques : il faut augmenter la résistance à la compression sèche et humide, et la résistance à la traction et au cisaillement.
- d'obtenir une bonne cohésion.
- de réduire la porosité et les variations des volumes
- d'améliorer la résistance à l'érosion, au vent et à la pluie. (imperméabilisation et réduction des surfaces abrégées).

Les trois types de stabilisation sont :

### **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 qu'on modifie la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité. [10]

### **Stabilisation physique**

Celui-ci consiste à modifier la texture de la terre par traitement thermique par désulfuration ou gel ou par traitement électrique.

### **Stabilisation chimique**

Le principe est d'additionner 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 d'inertes.

#### **1.4.3. Moyens**

La stabilisation se base sur la texture et sur la structure de la terre.

[4] Elle consiste à :

- réduire le volume des vides entre les particules : agir sur la porosité.
- colmater les vides qui ne peuvent être supprimés : agir sur la perméabilité.
- améliorer les liens entre les particules.

### **Mécanisme de stabilisation [10]**

Densifier : On a deux façons différentes pour densifier la latérite :

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

Armer : C'est l'introduction d'autres armatures constituées de fibre d'origine végétale (paille), animal (bouse, poils), minérale ou synthétique (fibre de synthèse) dans la terre. Le but est de créer un réseau de fibre omnidirectionnel qui améliore la résistance à la traction et au cisaillement du sol.

Enchaîner : C'est l'introduction d'une matrice tridimensionnelle inerte et résistante dans une structure de la terre, s'opposant à tout mouvement de la terre. 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 terre.

Lier : Pour se faire, il y a deux mécanismes :

- Une matrice inerte est formée par les argiles. On utilise les charges négatives et positives des plaquettes argileuses ou leur composition chimique pour les lier entre elles par l'intermédiaire d'un stabilisant, 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 matériaux (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.

Imperméabiliser : C'est la réduction de l'eau de gonflement par retrait pendant le cycle répété moulage séchage. Il y a deux moyens pour imperméabiliser :

- Tous les vides ou les pores, 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.

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

#### **1.4.4. Différents types de stabilisants**

Ciment portland artificiel : efficace avec les sols sableux, ne se mélange pas facilement avec la terre. Mais on doit malaxer à sec le mélange terre-ciment avant ajout d'eau.

- La chaux : chaux vive ou éteinte, meilleurs stabilisants pour l'argile, forme un liant.

- L'asphalte.
- La paille : utilisée dans la brique d'adobe
- Huile de coco : produit hydrofuge. Elle n'influe pas sur la cohésion mais augmente la résistance du sol humide.
- Les résines : extraits de la sève des adobes
- Les feuilles des bananiers pourries
- L'urine de bétail
- La bouse de vache
- La silice active additionnée de l'urée

**Tableau n°09 : STABILISATION SELON LA NATURE DU SOL [10]**

<b>NATURE DES SOLS</b>	<b>STABILISANTS</b>
Sable très fins Sable très fin limoneux Sable fin argileux Limon argileux	Ciments portland (le meilleur) L'émulsion asphalte La plupart des hydrofuges
Limon	Ciments portland Emulsion d'asphalte si le sol n'est trop collant
Argile graveleuse Argile sablonneuse Argile limoneuse	Chaux Sables Graviers
Gravier limoneux Mélange de sable limon et gravier	Ciments portland (le meilleur) Les émulsions d'asphalte peuvent aussi convenir
Mélange de gravier sable et argile	Chaux Le ciment de portland peut convenir si le mélange se gâche facilement
Sable limoneux	Ciment portland (le meilleur) Les émulsions d'asphalte peuvent convenir
Sable argileux	Chaux (le meilleur) Le ciment portland convenir si le mélange se gâche facilement

Source : bâtir en terre, collection technique Américains

#### 1.4.5. Stabilisation au ciment

Le ciment est un bon stabilisant pour confectionner des briques de terre stabilisées et extrudées. Le ciment permet de favoriser ses caractéristiques et sa résistance à l'eau. Avec la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons :

- Réaction avec la squelette sableuse et formation d'un mortier de ciment pur hydraté.
- Réaction avec l'argile selon 3 phases :
  - L'hydratation permettant de créer des gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. la chaux libérée pendant cette hydratation du ciment réagit ensuite avec l'argile ;
  - La Progression de l'hydratation qui active de dégradation des agglomérats ;
  - Et l'Interpénétration intime des gels de ciment argileux.

L'hydratation persiste mais de façon plus lente et on obtient alors trois structures mêlées :

- Une matrice inerte sableuse
- Une matrice d'argile stabilisée
- Une matrice de terre non stabilisée

#### 1.4.6. Effet de stabilisation

La résistance à la compression des matériaux stabilisés est favorisée par le ciment et elle évolue avec la teneur en eau et en ciment. Si la quantité de ciment est en forte proportion, on n'arrive pas à stabiliser les mauvaises terres et l'indice de plasticité  $Ip_{max}$  doit être assez faible (15 à 20%). De plus la stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait et du gonflement de matériaux stabilisés.

## Chapitre 2 : DETERMINATION DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES

### 2.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

#### 2.1.1. But

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

#### 2.1.2. Principe

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîter les unes sur les autres dont la dimension des ouvertures sont placées en ordre décroissant de haut vers le bas. Les constituants à analyser sont placés en haut du tamis supérieur et le classement des graines s'obtient par la vibration de la colonne de tamis.

### 2.2. LES LIMITES D'ATTERBERG

#### 2.2.1. But

Les limites d'Atterberg ont été élaborées au début du XX<sup>ème</sup> siècle par ATTERBERG, un pédologue suédois qui s'intéressait à la plasticité des argiles pour la fabrication des produits céramiques.

Les essais mis au point à cette époque ont été modifiés par CASAGRANDE, afin que leurs interprétations puissent établir un lien entre le teneur en eau du sol et son comportement.

### 2.2.2. Définitions

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol [5]. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau.

Les limites d'Atterberg sont aussi un moyen de traduire l'observation toute simple d'une résistance d'un sol qui varie avec la teneur en eau. Et quand la teneur en eau augmente les argiles passent par une consistance liquide.

Les limites d'Atterberg s'effectuent tout simplement sur le mortier qui passent dans le tamis 0.4mm.

Une teneur en eau élevée provoque la formation de boue ainsi la force de cohésion est moins importante.

Une teneur en eau faible permet d'avoir une structure plastique des matériaux c'est-à-dire qu'on peut modeler la terre sans qu'elle ne s'effrite.

Les deux limites utilisées sont :

- **L<sub>L</sub>** limite de liquidité
- C'est la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre l'état liquide et l'état plastique
- **L<sub>p</sub>** limite de plasticité

C'est la transition entre un état plastique et un état solide (le sol durcit et se fissure). Et c'est à partir des ces deux paramètres qu'on calcule l'indice de plasticité donnée par la relation suivante :

$$I_p = L_L - L_p$$

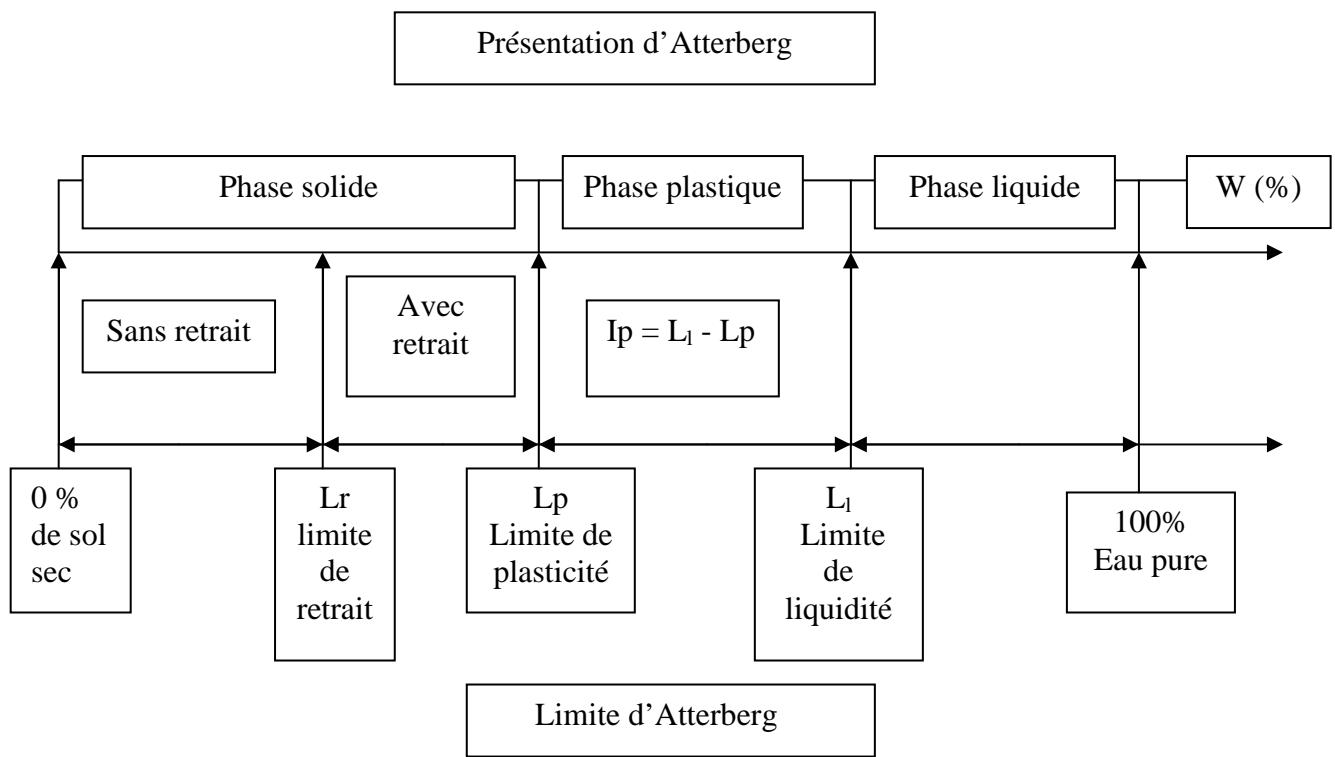


Figure n°07: Limite d' Atterberg

$I_p = L_L - L_p$  indice de plasticité : intervalle dans lequel on peut modifier le sol et on peut le travailler

### 2.2.3. Principe de l'essai

L'opération s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau  $L_L$  par un appareil de Casagrande constitué d'une coupelle normalisée, montée sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois bakélisé. La teneur en eau est rainurée par une dimension normalisée, pratiquée sur le sol disposé dans la coupelle de Casagrande. L'appareil se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée, l'essai est pratiqué pour différentes teneurs en eau et on trace la courbe d'évolution du nombre de coups.
- Recherche de la teneur en eau  $L_p$  par une plaque lisse en marbre pour le malaxage du sol et la confection de rouleaux de sol. Cette teneur est exprimée en pourcentage pondéral du poids de matériaux sec étuvé à 105°C.

Pour mesurer la teneur en eau, on utilise les appareils ci-dessous

- Une étuve de dessication réglée à 105 °C
- Un balance
- Des capsules en verre ou boîte de pétri, des spatules, une truelle

## 2.3. ESSAI PROCTOR

### 2.3.1. But

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.

### 2.3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée et suivant un processus bien défini, un échantillon des matériaux à étudier. On détermine sa teneur en eau et son poids volumique sec après compactage. On répète plusieurs fois de suite l'opération afin de faire évoluer la masse volumique des matériaux; ensuite on trace la courbe représentative du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau dont l'abscisse est la teneur optimal de PROCTOR et l'ordonnée le poids volumique sec optimal PROCTOR .

En fonction de l'intensité de compactage on distingue [14]

- L'essai Proctor normal qui est utilisé pour les travaux hydraulique (barrage,...)
- L'essai Proctor modifié qui est utilisé pour les travaux de type routier

	<b>ESSAI PROCTOR STANDARD AASHO</b> Poids du pilon : 2.496kg Diamètre du pilon : 5.08cm Hauteur du chute : 30.5cm Volume de moule : 949cm <sup>3</sup> Diamètre du moule : 10.16cm Hauteur du moule : 11.70cm Poids de la terre : 1.5kg Energie : 6j/cm <sup>3</sup> Coup par couche : 25 Hauteur de couche : 4cm Couches par échantillon : 3cm
--	--

Figure n°08 : Test de compressibilité ou essai PROCTOR

Voici une relation entre le poids volumique exprimé en g/cm<sup>3</sup> et la teneur en eau optimale exprimé en pourcentage pondéral.

$$\gamma_d = f(W_{opt})$$

$\gamma_d$  : poids volumique exprimé en g/cm<sup>3</sup>

$W_{opt}$  : teneur en eau optimale exprimé en pourcentage pondéral.

## 2.4. ETUDES GEOTECHNIQUES DES LATERITES DE VONTOVORONA

On a choisi d'étudier la latérite de Vontovorona parce que il contient encore des terrains exploitables ; elle a des caractères favorables et aussi une forte teneur en fer. De plus l'accès est facile pour le transport.

Les résultats des analyses géotechniques de latérite de Vontovorona sont donnés en annexe I

## Chapitre 3 : ANALYSE CHIMIQUE

### 3.1. ANALYSE CHIMIQUE DES LATERITES [6]

On détermine les éléments majeurs constituant une latérite par la méthode de dosage. Pour effectuer ce dosage on a 5g de latérite comme prise d'essai 5g de latérite.

#### 3.1.1. Dosage de $\text{SiO}_2$ par la méthode précipitation

Prise d'essai : liqueur d'attaque

Mode opératoire

- Mettre le bêcher contenant le liquide d'attaque sur bain de sable et sécher une première fois jusqu'à fin du dégagement de chaleur chlorhydrique : la silice gélatineuse commence à se déposer au fond du bêcher.
- Reprendre avec 50ml de HCl concentré et sécher une deuxième fois. La refroidir puis la mettre dans le bêcher contenant le résidu sec,
- Ajouter 10ml de HCl concentré et laisser reposer 12mn.
- Ajouter avec 100ml d'eau bouillante : le  $\text{SiO}_2$  est insoluble
- Filtrer

Le filtrat que nous appelons FILTRAT F<sub>1</sub> contient  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Fe}^{3+}$   $\text{Ti}^{4+}$   $\text{Al}^{3+}$ . .

Mettre à côté pour dosage ultérieur.

Le résidu que nous appelons RESIDU R<sub>1</sub> contient les dépôts solides de  $\text{SiO}_2$ .

- Tarer et calciner à 1000°C un creuset de platine : M<sub>1</sub> = poids trouvé.
- Mettre dans ce creuset le résidu R<sub>1</sub> + papier filtre. Passer au four à 1000°C pendant au moins de 2h 30mn. Peser et notons M<sub>2</sub> le poids trouvé.

$$\text{Poids de silice } \mathbf{\text{SiO}_2} = \mathbf{M_2 - M_1}$$

#### 3.1.2. Dosage du CaO par la méthode de précipitation

Prise d'essai le filtrat F<sub>1</sub>

Mode opératoire

- Chauffer le filtrat F<sub>1</sub> jusqu' au début d'ébullition.
  - Ajouter 15ml de NH<sub>4</sub>Cl 10% + quelques gouttes de bleu de bromothymol précipiter par l'ammoniaque concentré et puis filtrer.
- On obtient le filtrat F<sub>2</sub> qui contient  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ; le mettre de côté pour un dosage ultérieur ; et un résidu R<sub>2</sub> qui contient le dépôt de  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ .

On reprend le résidu R<sub>2</sub> avec 100ml d'eau + HCl concentré et on ajoute 15ml de NH<sub>4</sub>Cl à 10% et quelques gouttes de bleu de bromothymol .

-Précipiter avec l'ammoniaque concentré jusqu'au virage de l'indicateur coloré et puis filtrer

Le filtrat contient Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> et on appelle filtrat F<sub>3</sub>

Le résidu contient Fe<sup>3+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, Al<sup>3+</sup>. Le mettre de côté pour les dosages ultérieurs

-Réunir le filtrat F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> dans même bêcher et acidifier avec HCl concentré jusqu'à un teinte jaune. Chauffer jusqu'à 70 à 80 °C et ajouter 25ml de solution d'oxalate d'ammonium saturée.

-Précipiter avec l'ammoniaque concentré et laisser reposer une nuit et avant de filtrer.

Le mélange de F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> contient de Mg<sup>2+</sup>; à mettre de côté pour dosage ultérieur

Et le résidu R<sub>4</sub> contient le dépôt des précipités de Ca<sup>2+</sup>

-Reprendre le résidu R<sub>4</sub> avec H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10% et avec eau distillée et on ajoute 10ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré et chauffer à 70-80°C

On a dosé à chaud la solution avec KMnO<sub>4</sub> à 0.1N

Résultat **V = volume de KMnO<sub>4</sub> trouvé en ml**

$$\% \text{ CaO} = 0.56V$$

### **3.1.3. Dosage de MgO par la méthode de précipitation**

Prise d'essai le mélange des filtrats F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>

#### Mode opératoire

-Acidifier le mélange avec HCl concentré jusqu'à coloration jaune clair et ajouter 25ml de phosphate d'ammonium 10%. précipiter à froid avec l'ammoniaque concentré et laisser reposer une nuit puis filtrer.

-Prendre le résidu solide précipité de MgO

-Tarer et calciner un creuset porcelaine M<sub>1</sub> poids trouvé

-Mettre le creuset et le papier filtre dans un four de 1000°C et peser M<sub>2</sub> poids trouvé

$$\% \text{MgO} = 0.07244 (\text{M}_2 - \text{M}_1)$$

### **3.1.4. Dosage de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par la méthode manganimétrique**

#### Prise d'essai

Le résidu R<sub>3</sub>

Mode opératoire

-Tarer et calciner un creuset de platine au four réglé à 1000°C :  $M_1$  = poids trouvé calciner le résidu  $R_3$  au four pendant au moins de 2h 30mn et peser  $M_2$  = poids trouvé

$$M = M_2 - M_1 = \text{poids de } (Fe_2O_3 + Al_2O_3 + TiO_2)$$

-Attaque au sulfate acide de K par chauffage doux. Lorsque la solution est limpide, la fusion est terminée.

-Reprendre avec  $H_2SO_4$  concentré et à compléter à 200ml par eau distillée.

-Répartir ce volume en deux parties égales

La première partie « VOLUME A » servira comme PE du dosage de  $Fe_2O_3$  et la deuxième partie « VOLUME B » comme PE du dosage de  $TiO_2$

Pour le dosage de  $Fe_2O_3$  : dosage manganimétrique du volume A

-Vérifier si le pH du volume A = 1.5 Ajouter 20ml d'eau oxygénée concentré et puis doser par  $KMnO_4$  (0.1N)

$$V = \text{volume de } KMnO_4 \text{ en ml trouvé}^*$$

$$\%Fe_2O_3 = 0.7984V$$

### 3.1.5. Dosage du $TiO_2$ par la spectrométrie UV

Prise d'essai : Le volume B

Mode opératoire1) tracer la courbe d'étalonnage

Tableau n°10 : Tableau d'étalonnage de  $TiO_2$  par spectrométrie UV

Prendre des fioles de 100ml numérotées T et 1 à 5 et introduire successivement

Numéros de fioles	T	1	2	3	4	5
Solution d'étalon de $Ti(IV)$ (ml)	0	1	2	3	4	5
$H_2SO_4$ (10%) (ml)	10	10	10	10	10	10
$H_3PO_4$ (10%) (ml)	10	10	10	10	10	10
$H_2O_2$ (3%) (ml)	5	5	5	5	5	5
Eau distillée (ml)	100	100	100	100	100	100
Correspondance en $10^{-3}$ g $Ti$ (IV) (g/litre)	0	0.015	0.032	0.048	0.063	0.08

Effectuer les mesures spectrométriques sur la longueur d'onde de 410nm

2) mesure de l'échantillon à analyser

Prise d'essai 2ml de volume B. successivement dans un fiole de 100ml, et introduire : 10ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (10%)

10ml H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (10%)

5ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (3%)

Compléter à 100ml avec de l'eau distillée et agiter puis faire la mesure spectrométrique à la longueur d'onde de 410 nm et on obtient :

$$C = [\text{Ti(IV)}] \text{ en g/litre}$$

$$\% \text{TiO}_2 = 16.67C / \text{masse de PE}$$

**3.1.6. Dosage de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par la méthode de précipitation**

Mode opératoire : pas de mesure pour la détermination de % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; utiliser les résultats des dosage de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par méthode manganimétrique et TiO<sub>2</sub> par méthode spectrométrique UV

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \%(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) - \%(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$$

**3.1.7. Résultats des analyse chimiques des latérites de Vontovorona**

Tableau n°11 : résultats de l'analyse chimique des latérites de Vontovorona [14]

Elément à chercher	Pourcentage (en %)
perte au feu	19.00
humidité	2.00
SiO <sub>2</sub>	13.80
CaO	trace
MgO	Trace
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.70
TiO <sub>2</sub>	2.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.70
<b>total</b>	<b>98.70</b>

Tableau n°12 : Résultats de l'analyse chimique des latérites de Vontovorona après la réduction biologique dans une étuve à 30°C.

Elément à chercher	Pourcentage (en %)
<b>perte au feu</b>	12.0
<b>humidité</b>	0.7
<b>SiO<sub>2</sub></b>	40.6
<b>CaO</b>	Trace
<b>MgO</b>	Trace
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2.3
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	24.3
<b>total</b>	<b>99.9</b>

La méthode d'analyse des latérites réduite et non réduite reste toujours la même mais la seule différence est que lors de la réduction biologique, on ajoute une solution d'urée dans la latérite puis on ferme hermétiquement l'échantillon et après on dépose dans une étuve biologique pendant 15jrs avec une température réglée à 30°C. On effectuera l'analyse chimique de l'échantillon après cette durée.

## 3.2. ANALYSES DU CIMENT

### 3.2.1. Composition chimique

Le critère conventionnel du ciment concerne soit la poudre, soit la pâte pure, soit le mortier normal. Ces critères constituent les caractéristiques du ciment et elles sont d'ordre chimique, minéralogique, physique, et mécanique.

La composition chimique élémentaire est obtenue par les éléments chimiques dans le ciment et qui se présentent sous forme d'oxydes. On distingue :

- Les quatre principaux oxydes : CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- Les éléments secondaires : MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Cl<sup>-</sup>

Tableau n°13 : composition chimique moyenne des ciments selon les auteurs BOGUE et PAPADAKIS [13]

Auteur	Teneur	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	PF
<b>BOGUE</b>	<b>Max</b>	20	3.4	2.7	62	1	1	0.8
	<b>Min</b>	25	6	4.3	64	3	3	3
<b>PAPADAKIS</b>	<b>Max</b>	19	2	1	62	0	1	0.2
	<b>Min</b>	25	9	5	67	3	3	1.3

Source : selon le Pr RANAIVONIARIVO Gabriely

Tableau n°14 : composition minéralogique des ciments [14]

Ciment	CM1	CM2	CM3
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	9.61	10.70	10.46
<b>C<sub>3</sub>A</b>	7.22	5.24	5.13
<b>C<sub>3</sub>S</b>	67.97	70.61	69.29
<b>C<sub>2</sub>S</b>	5.73	2.60	2.35
<b>CaO libre</b>	1.03	1.09	1.79

Source : selon le Pr RANAIVONIARIVO Gabriely

### 3.2.2. Hydraulicité

Le ciment est un liant hydraulique et on détermine son hydraulicité par l'indice de l'hydraulicité **I** donné par la formule suivant

$$\mathbf{I} = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$$

C'est le rapport des constituants acides sur celles des constituants basiques du liant.

### 3.2.3. Méthode de détermination des éléments majeurs du ciment et du clinker

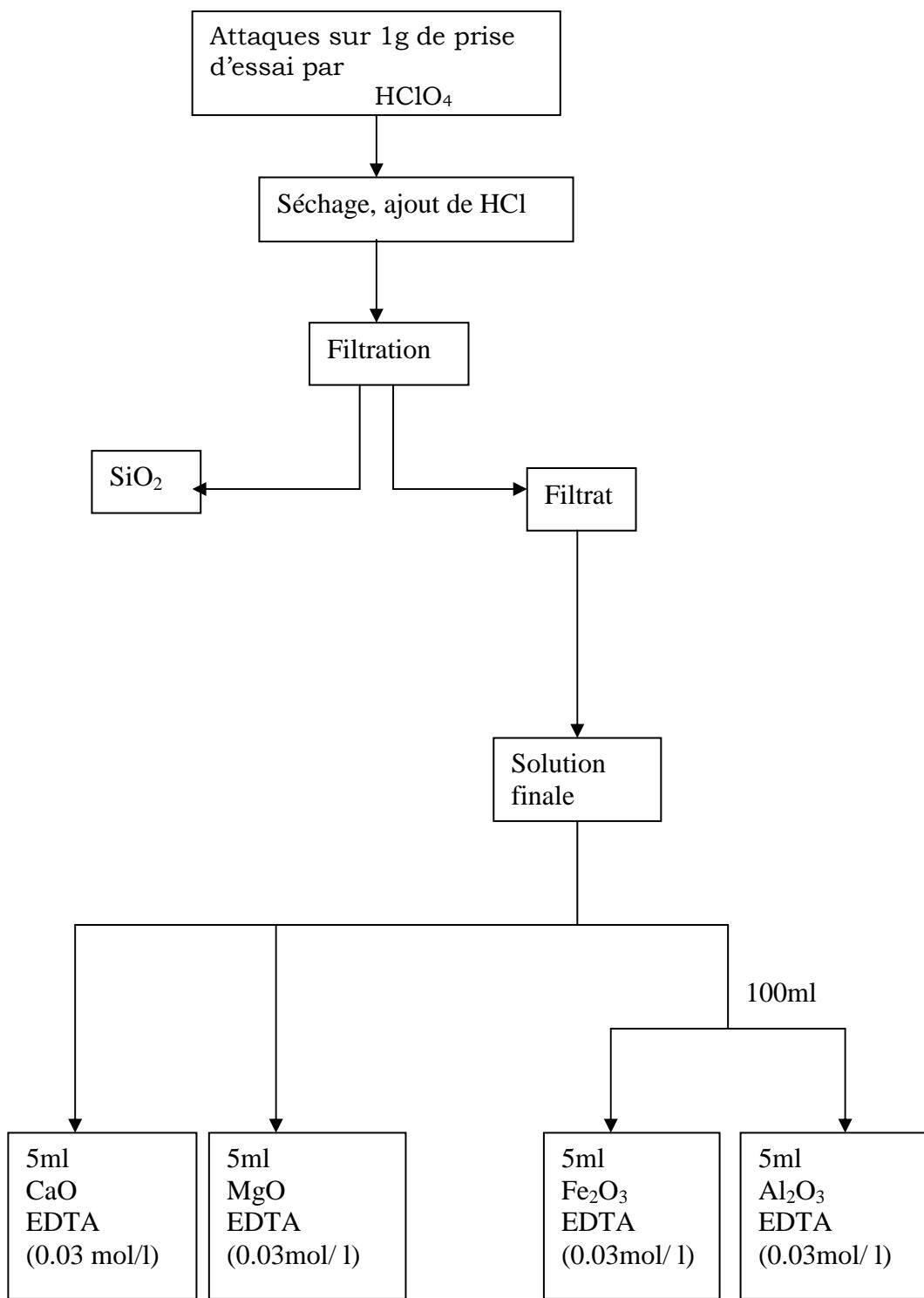


Figure n°09: Méthode de détermination des éléments majeurs du ciment [13]

**Deuxième Partie :  
ETUDES EXPERIMENTALES**

**Chapitre 1 : ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES DES LATERITES STABILISEES**

**1.1. CONFECTION DES EPROUVETTES**

**1.1.1. Pour le liant ciment**

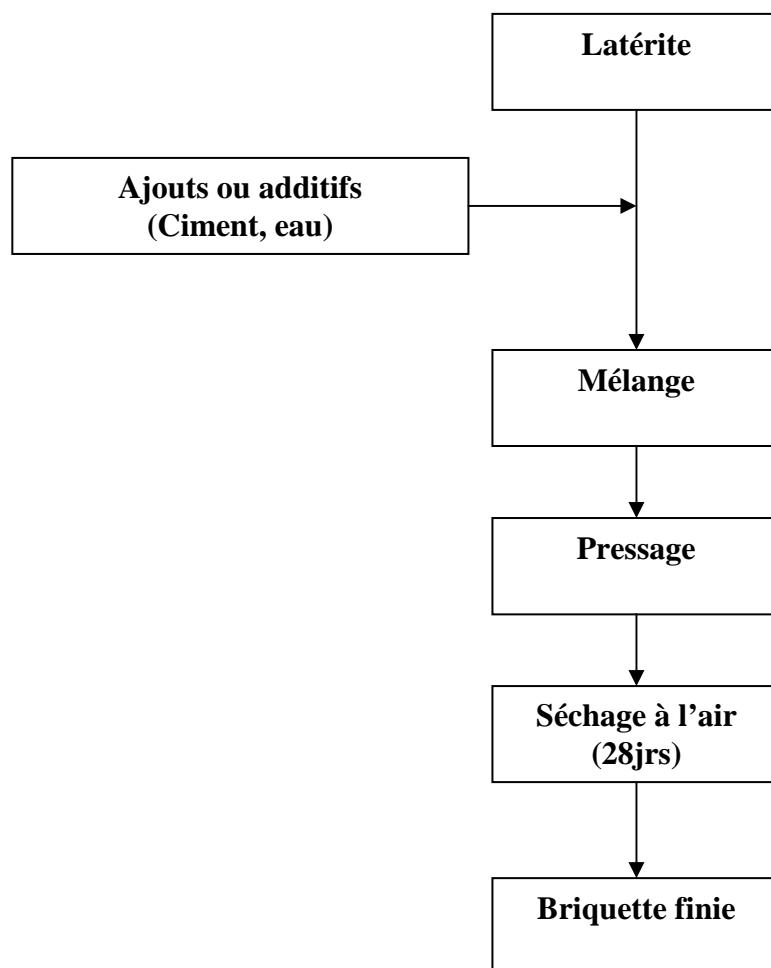


Figure n°10: Protocole d'essai pour le liant ciment

### 1.1.2. Pour les latérites stabilisées avec silice active et l'urée

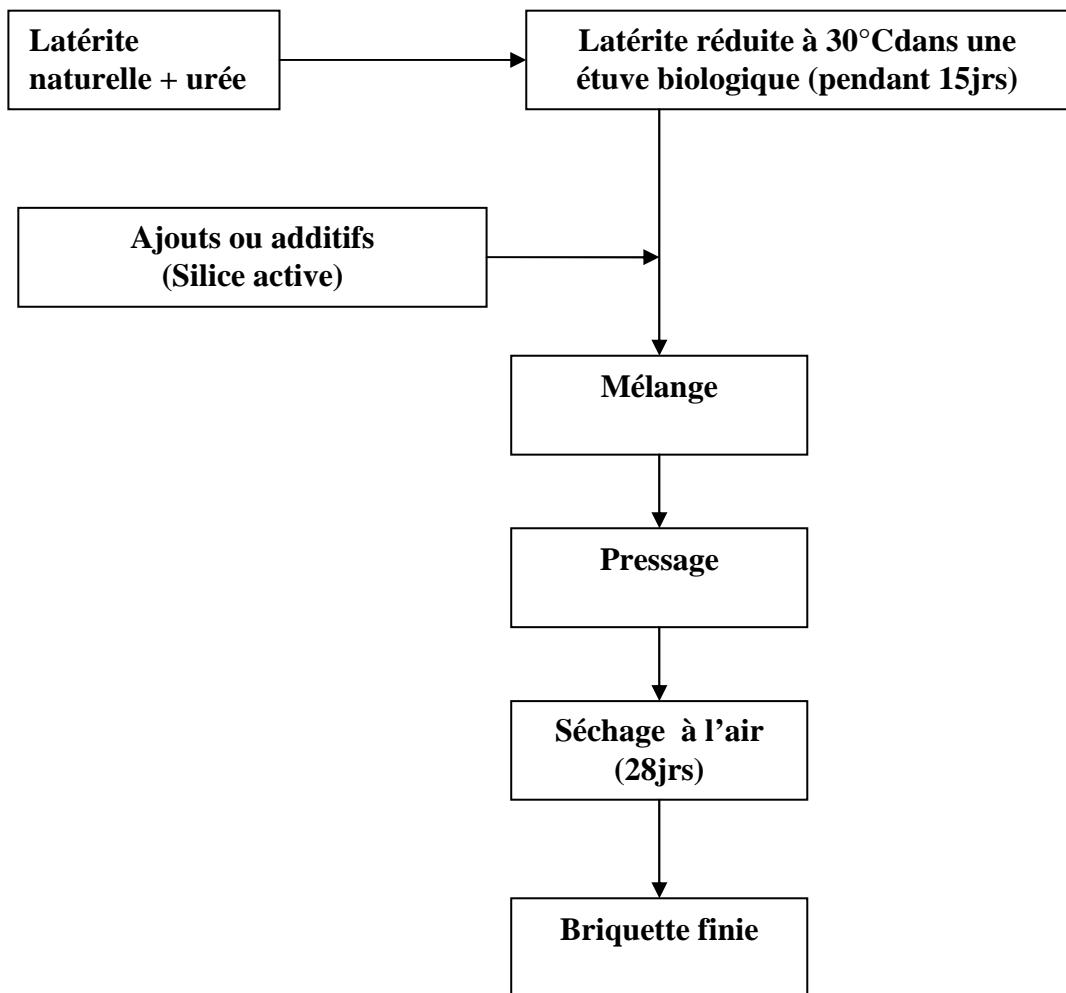


Figure n°11 : Protocole d'essai pour la silice active avec l'urée

On prépare un échantillon contenant :

- de la latérite de Vontovorona
- les additifs :
  - du ciment (5% en masse) ou
  - du ciment (10% en masse) ou
  - de la silice active (10% en masse)

L'échantillon doit être bien mélangé avant d'effectuer le moulage des éprouvettes à l'aide de la machine de Testwell ; la force de pression est réglée à 12000daN. Après le moulage, on les laisse sécher à l'air libre pendant 28jrs environ.

Après la période de séchage de 28 jours, on effectue le test de compression à sec (ou écrasement à sec) avec une force de pression de 4000daN et celui de compression humide après immersion dans l'eau de l'éprouvette pendant 24 heures.

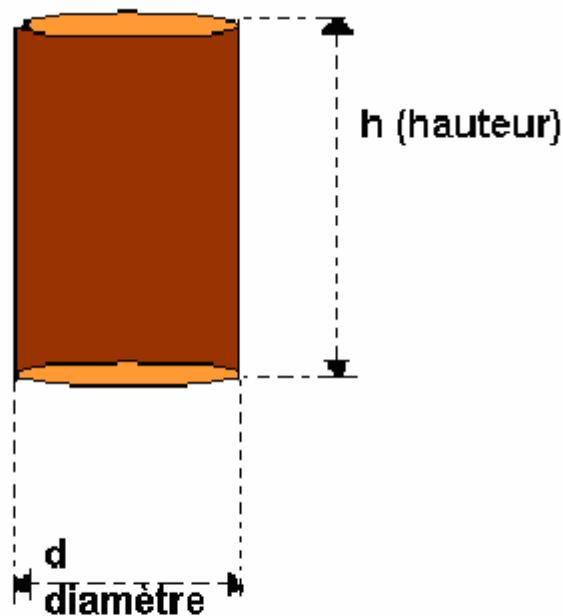
La valeur de la compression correspondant à l'écrasement est lue sur le cadran de la machine Testwell.

### 1.1.3. Machine de Testwell

La figure suivante montre la machine de Testwell :



Figure n°12 : Appareil de mesure des résistances à la compression (TESTWELL)

**1.1.4. Schéma de l'éprouvette**

**remarque:** **d** est invariable avec **d = 5cm**  
**h** est variable avec **h = x cm**

Figure n°13 : Schéma simplifié d'une éprouvette

## 1.2. RESULTATS

### 1.2.1. Essai avec les latérites d'Ambohidratrimo

ECHANTILLON °1 : (0% SiO<sub>2</sub> et 0% ciment)

Poids à mouler : 196g

Tableau n°15 : essai sur les latérites naturelles d'Ambodratrimeo

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Haute de l'éprouvette (cm)	4.7	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.7	4.6	4.7	7.8
Volume de l'éprouvette cm <sup>3</sup>	92.24	88.31	92.24	88.31	88.31	88.31	92.24	90.28	92.24	
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.05	2.13	2.15	2.13	2.14	2.15	2.16	1.99	2.05	
Poids d'éprouvette après séchage (g)						168	160	166	154	155
Poids humide après immersion						Désagrégation		197	180	désag
Porosité (%)								18.7	16.9	
Porosité moyenne (%)								17.8		
Rc 28j sec (bars)	28.07	20.27	42.10	43.14	44.70					
Rc <sub>28</sub> sec moy (bars)	35.656									
Rc humide (bars)						Désagrégation				
Rc <sup>hum</sup> moy (bars)						Désagrégation				
Poids de l'éprouvette humide Ps'	189	188	198	188	189	190	199	180	189	184

$$P_{S1} = 84.37 \text{ g (poids sec)}$$

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

ECHANTILLON °2 : (latérite + 5% ciment)

Poids à mouler : 200g

Tableau n°16 : latérites d'Ambodratrimeo plus 5% de ciment

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Haute de l'éprouvette (cm)	3.8	3.7	3.9	3.6	3.6	3.6	3.7	3.4	3.9	3.8
Volume de l'éprouvette cm <sup>3</sup>	74.58	72.63	76.55	70.65	70.65	70.65	72.63	66.73	76.55	74.58
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.21	2.11	2.14	2.02	2.26	2	2.11	2	2.09	2.23
Poids d'éprouvette après séchage (g)							132	114	136	143
Poids humide après immersion							157	135	—	—
Porosité (%)							18.9	18.4	—	—
Porosité moyenne (%)								18.7	—	—
Rc 28j sec (bars)	68.08	78.48	79.00	70.17	66.53					
Rc <sub>28</sub> <sup>sec</sup> moy (bars)	72.45									
Rc humide (bars)						14.55	8.84	—	—	—
Rc <sup>hum</sup> moy (bars)							11.70	—	—	—
Poids de l'éprouvette humide Ps'	165	153	164	143	160	141	153	134	160	166

$$P_{S1} = 81.20g \text{ (Poids sec)}$$

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

### Remarques

F=1 daN=1.02Kgf

P=F/S

## 1.2.2. Essai avec les latérites de Vontovorona

### 1.2.2.1. Première essai

**Tableau n°17 :** essai sur les latérites naturelles

ECHANTILLON °1 (témoin)

Latérite : Vontovorona

(0% SiO<sub>2</sub> et 0% ciment)

Poids à mouler : 190g; F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5
Haute de l'éprouvette (cm)	4.6	4.5	4.5	4.6	4.6
Volume de l'éprouvette cm <sup>3</sup>	90.28	88.31	88.31	88.31	90.28
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.08	2.11	2.12	2.08	2.04
Poids d'éprouvette après séchage (g)	161	164	165	163	164
Poids humide après immersion	Désagrégation				
Porosité (%)	Désagrégation				
Porosité moyenne (%)	Désagrégation				
Rc 28j sec [bars]				72.76	79.52
Rc28 sec moy (bars)				76.14	
Rc humide (bars)	Désagrégation				
Rc hum moy (bars)	Désagrégation				
Poids de l'éprouvette humide Ps'	188	186	187	184	184

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 25\% \quad (W : \text{Teneur en eau})$$

Avec Ps<sub>1</sub> = 44g et Ph<sub>1</sub> = 55g

Ps : Poids à sec de l'échantillon à mouler

Ph : Poids humide de l'échantillon à mouler

**Tableau n°18 :** latérites de Vontovorona plus 10% de ciment

ECHANTILLON °2 : (1800g L+ 200g C)

Poids à mouler : 190g

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Haute de l'éprouvette (cm)</b>	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	4.6
<b>Volume de l'éprouvette (cm<sup>3</sup>)</b>	84.4	88.33	88.33	88.33	88.33	88.33	88.33	88.33	90.28	90.28
<b>Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.19	2.11	2.13	2.11	2.13	2.12	2.12	2.13	2.09	2.08
<b>Poids d'éprouvette après séchage (g)</b>	161	162	163	161	162	163	163	161	164	163
<b>Poids humide après immersion</b>						190	190	191	191	190
<b>Porosité (%)</b>						16.5	16.5	18.6	16.5	16.6
<b>Porosité moyenne (%)</b>										16.9
<b>Rc<sub>28j</sub><sup>sec</sup> (bars)</b>	189.70	119.02	135.65	177.75						
<b>Rc<sub>28</sub><sup>sec</sup> moy (bars)</b>			155.53							
<b>Rc humide (bars)</b>						69.65	57.17	58.73	59.29	
<b>Rc<sup>hum</sup> moy (bars)</b>										61.21
<b>Poids de l'éprouvette humide Ps'</b>	185	186	188	186	188	187	187	188	189	188

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 19.52\% \quad (W : \text{Teneur en eau})$$

Avec Ps<sub>1</sub> = 41g et Ph<sub>1</sub> = 49g

Ps : Poids à sec de l'échantillon à mouler

Ph : Poids humide de l'échantillon à mouler

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

**Tableau n°19 :** latérites des Vontovorona plus 10% de silice active et urée  
**ECHANTILLON °3**  
Poids à mouler : 200g

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Haute de l'éprouvette (cm)</b>	4.3	4.5	4.6	4.6	4.7	4.5	4.6	4.8	4.3	4.5
<b>Volume de l'éprouvette (cm³)</b>	84.4	88.3	90.3	90.3	92.2	88.3	90.3	94.2	84.4	88.3
<b>Masse volumique (g/cm³)</b>	2.35	2.30	2.19	2.17	2.15	2.23	2.22	2.15	2.35	2.30
<b>Poids d'éprouvette après séchage (g)</b>	173	178	174	174	175	177	179	175	173	178
<b>Poids humide après immersion</b>	186	190	186	186	187	-	-	-	-	-
<b>Porosité (%)</b>	7.5	6.7	6.9	6.9	6.9					
<b>Porosité moyenne (%)</b>	7.0									
<b>Rc<sub>28j</sub><sup>sec</sup> (bars)</b>						59	55.5	57	57.5	58.5
<b>Rc<sub>28</sub><sup>sec</sup> moy (bars)</b>						57.5				
<b>Rc humide (bars)</b>	20.7	19.3	19.8	20.7	19.1					
<b>Rc<sup>hum</sup> moy (bars)</b>	20									
<b>Poids de l'éprouvette humide Ps'</b>	198	200	198	196	198	200	200	200	198	200

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 18.64\% \quad (W : \text{Teneur en eau})$$

Avec Ps<sub>1</sub> = 61g et Ph<sub>1</sub> = 70g

Ps : Poids à sec de l'échantillon à mouler

Ph : Poids humide de l'échantillon à mouler

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

### 1.2.2.2. Deuxième essai

**Tableau n°20 :** (Echantillon 1) Latérite de Vontovorona + 5% de ciment

Pois à mouler 190g

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Haute de l'éprouvette (cm)	4.6	4.6	4.5	4.3	4.6	4.6	4.6	4.7	4.5	4.5
Volume de l'éprouvette (cm <sup>3</sup> )	90.28	90.28	88.33	84.4	90.28	90.28	90.28	92.25	88.33	88.33
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.08	2.07	2.09	2.16	2.06	2.07	2.06	2.04	2.12	2.12
Poids d'éprouvette après séchage (g)	161	160	160	157	163	161	160	160	160	161
Poids humide après immersion						190	190	191	187	
Porosité (%)						18	18.8	19.4	16.9	
Porosité moyenne (%)						18.3				
Rc <sub>28j</sub> <sup>sec</sup> (bars)	149.68	126.30	119.54	109.15	125.26					
Rc <sub>28</sub> <sup>sec</sup> moy (bars)	125.99									
Rc humide (bars)						50.42	35.86	35.86	34.30	
Rc <sup>hum</sup> moy (bars)						39.11				
Poids de l'éprouvette humide Ps'	188	187	185	182	186	187	186	188	187	187

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 21.19\% \quad (W : \text{Teneur en eau})$$

Avec Ps<sub>1</sub> = 57.75g et Ph<sub>1</sub> = 70g

Ps : Poids à sec de l'échantillon à mouler

Ph : Poids humide de l'échantillon à mouler

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

**Tableau n°21 :** (Echantillon 2) latérites de Vontovorona + 10% de ciment

Poids à mouler : 190g

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Haute de l'éprouvette (cm)	4.5	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6	4.7
Volume de l'éprouvette (cm <sup>3</sup> )	88.33	90.28	90.28	88.33	88.33	88.33	90.28	90.28	90.28	92.25
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.07	2.02	2.07	2.07	2.11	2.11	2.06	2.05	2.09	2.06
Poids d'éprouvette après séchage (g)	159	161	171	160	163	164	163	162	165	164
Poids humide après immersion		186	198	186	189					
Porosité (%)		15.5	15.8	16.3	16					
Porosité moyenne (%)		15.9								
Rc <sub>28j</sub> <sup>sec</sup> (bars)						110.19	97.71	100.83	124.74	130.98
Rc <sub>28</sub> <sup>sec</sup> moy (bars)										112.89
Rc humide (bars)		71.21	35.34	67.56	35.34					
Rc <sup>hum</sup> moy (bars)		52.36								
Poids de l'éprouvette humide Ps'	183	182	187	183	186	186	186	185	189	190

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 19.97\% \quad (W : \text{Teneur en eau})$$

Avec Ps<sub>1</sub> = 58.344g et Ph<sub>1</sub> = 70g

Ps : Poids à sec de l'échantillon à mouler

Ph : Poids humide de l'échantillon à mouler

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

**Tableau n°22 :** (Echantillon 3) latérites de Vontovorona + 10% silice active

Poids à mouler : 190g

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Haute de l'éprouvette (cm)	5	3.7	5	5.1	5.5	5.4	5.4	4	3.5	3.5
Volume de l'éprouvette (cm <sup>3</sup> )	98.13	72.63	98.13	100.03	107.95	105.98	105.98	78.7	68.7	68.7
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	1.81	1.83	1.82	1.89	1.56	1.74	1.73	2.38	1.80	2.10
Poids d'éprouvette après séchage (g)	140	106	142	160	148	161	160	119	108	
Poids humide après immersion		133	178	201	187					
Porosité (%)		25.5	25.4	25.6	26.4					
Porosité moyenne (%)		25.7								
Rc <sub>28j</sub> <sup>sec</sup> (bars)						27.03	28.59	-	-	-
Rc <sub>28</sub> <sup>sec</sup> moy (bars)						27.81				
Rc humide (bars)		11.95	9.04	9.30	8.94					
Rc <sup>hum</sup> moy (bars)		9.80								
Poids de l'éprouvette humide Ps'	178	133	179	189	168	184	183	137	124	144

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 27.13\% \quad (W : \text{Teneur en eau})$$

Avec Ps<sub>1</sub> = 55.06g et Ph<sub>1</sub> = 70g

Ps : Poids à sec de l'échantillon à mouler

Ph : Poids humide de l'échantillon à mouler

F = 4000kg; Temps d'immersion = 24h

## 1.3. INTERPRETATION DES RESULTATS

Pendant les trois essais que nous avons effectués, on a constaté que l'interprétation se divisera en deux parties : on interprétera les résultats obtenus de la latérite avec le ciment et la latérite avec la silice active et l'urée.

### 1.3.1. Les latérites stabilisées aux ciment

La stabilisation des latérites avec le ciment est d'une grande importance pour l'avenir des matériaux de construction. En effet, lors des essais que nous avons effectués, les résultats obtenus sont satisfaisants : la résistance à l'état sec et humide augmente lorsque la quantité de ciment dans l'échantillon est accrue. En d'autres termes, la teneur en eau de l'échantillon diminue, ce qui implique que la quantité et les dimensions des pores sont réduites. Ainsi les liaisons entre le ciment et la latérite sont renforcées et on obtient des matériaux de construction de bonne qualité.

Les diagrammes suivants résument les différents tests de résistance à la compression des échantillons contenant du ciment de 0 à 10%.

#### Courbe de porosité des échantillons

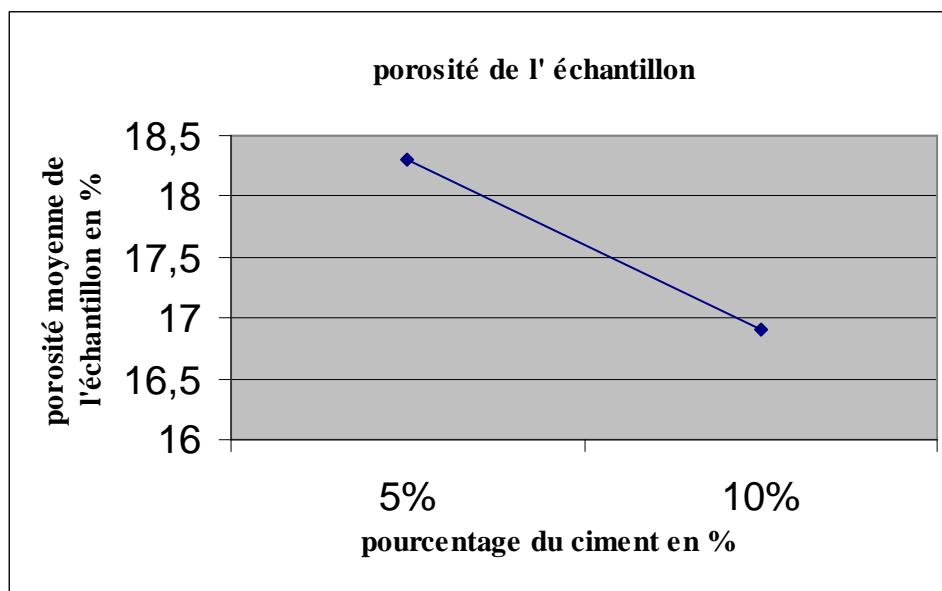


Figure n°14: Porosité des latérites avec le liant ciment

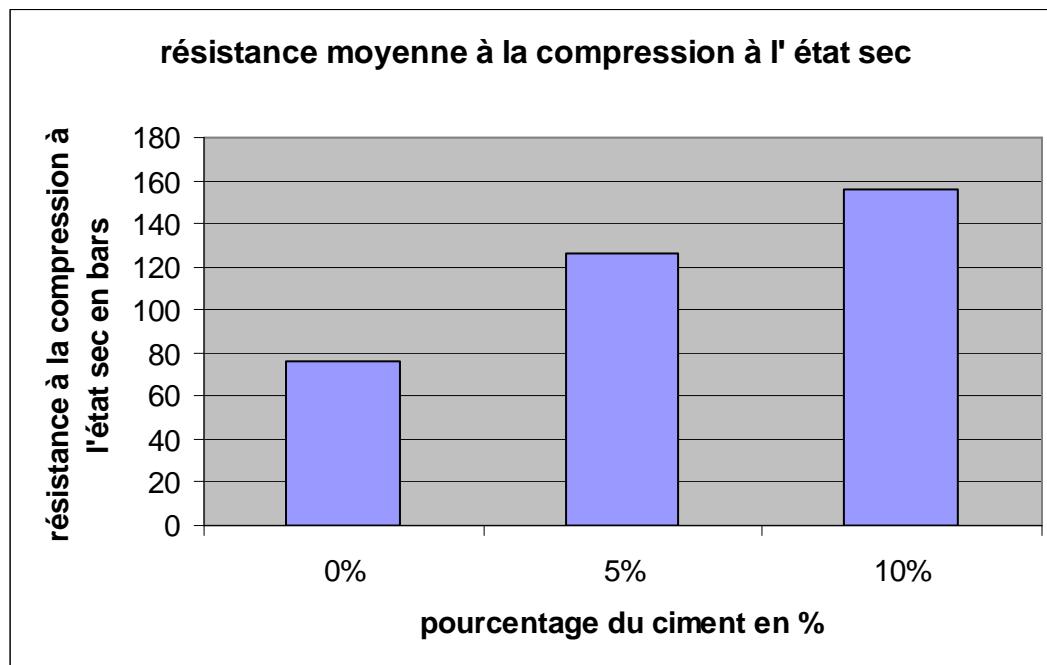


Figure n°15: Résistance à la compression à l'état sec du ciment

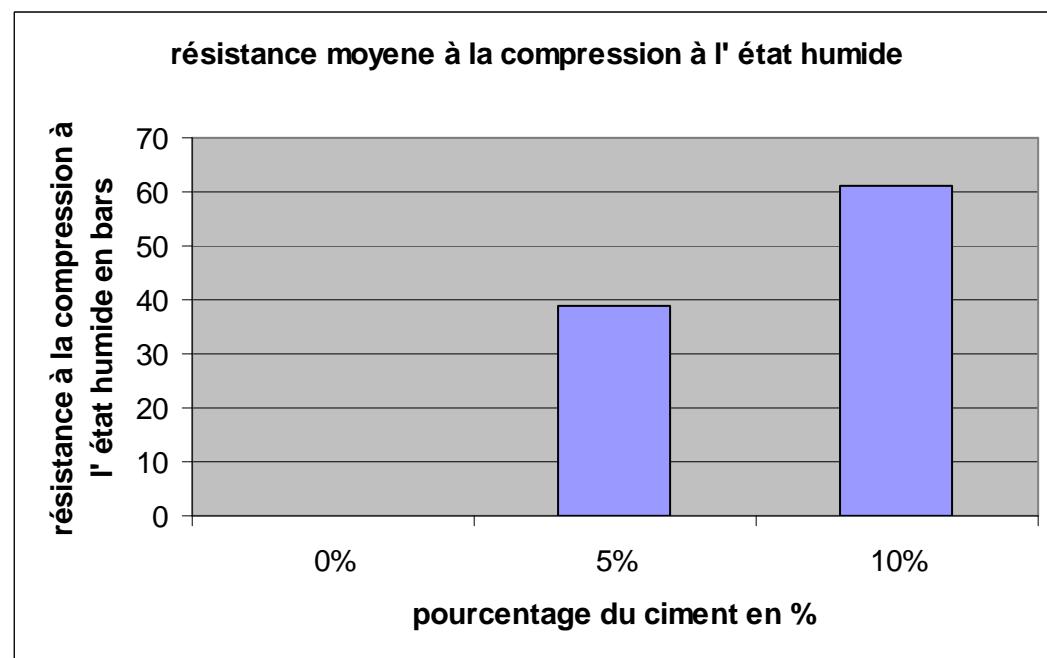


Figure n°16: Résistance à la compression à l'état humide des latérites avec du ciment

### **1.3.2. Les latérites stabilisées avec la phyllosilicate de fer [Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>] (silice active avec l'urée)**

L'addition de la silice active à la latérite nécessite une réduction biologique de la latérite. Pour vérification, nous avons effectué une comparaison entre la latérite réduite et celle non réduite

#### **1.3.2.1. Latérites non réduites**

Une étude déjà faite sur la stabilisation des latérites a montré que l'addition de la silice active dans des latérites non réduites [14] n'apporte aucune modification concernant la granulométrie. En effet, plus la quantité de silice augmente (de 5 à 20%), plus la courbe granulométrique s'écarte de la courbe idéale du bloc de terre stabilisé. Ainsi, la teneur en eau augmente de 17.7% à 19.8% pour une éprouvette contenant de la silice active dont la teneur varie de 0 à 10%. La porosité devient alors de plus en plus importante et la résistance à la compression sèche diminue tandis que la résistance humide après immersion de 24h est nulle. Notons que les valeurs de la résistance à sec sont comprises entre 40 à 37.5 bars.

Le tableau suivant montre une possibilité de classement des latérites stabilisées selon la teneur en eau optimale.

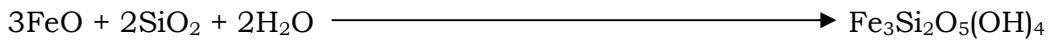
**Tableau n°23 : classification et appréciation des latérites suivant leur teneur en eau**

<b>W<sub>opt</sub></b>	<b>Appréciation</b>	<b>Possibilité de stabiliser</b>	<b>Places des échantillons</b>
<b>7 à 9</b>	Bien		
<b>9 à 17</b>	Excellent	Le plus facile à stabiliser	
<b>17 à 22</b>	Acceptable	Difficile à stabiliser	0% SiO <sub>2</sub> ; 5%SiO <sub>2</sub> ; 10%SiO <sub>2</sub> ; 15%SiO <sub>2</sub>
<b>22 à 25</b>	Eventuellement acceptable		20% SiO <sub>2</sub>

L'addition de silice active affaiblit donc la compressibilité, accroît la porosité, augmente la teneur en eau et diminue le coefficient d'activité (0.34 à 0.16%). Ainsi la liaison chimique entre latérite non réduite et silice active est nulle c'est-à-dire que l'addition de cette dernière n'influe pas les propriétés géotechniques des latérites non réduites.

### 1.3.2.2. Latérites réduites et silice active

Réaction mise en jeux :



$\{3\text{FeO} + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}\}$  = mélange Idoine

$\{\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\}$  = phyllosilicate de Fer

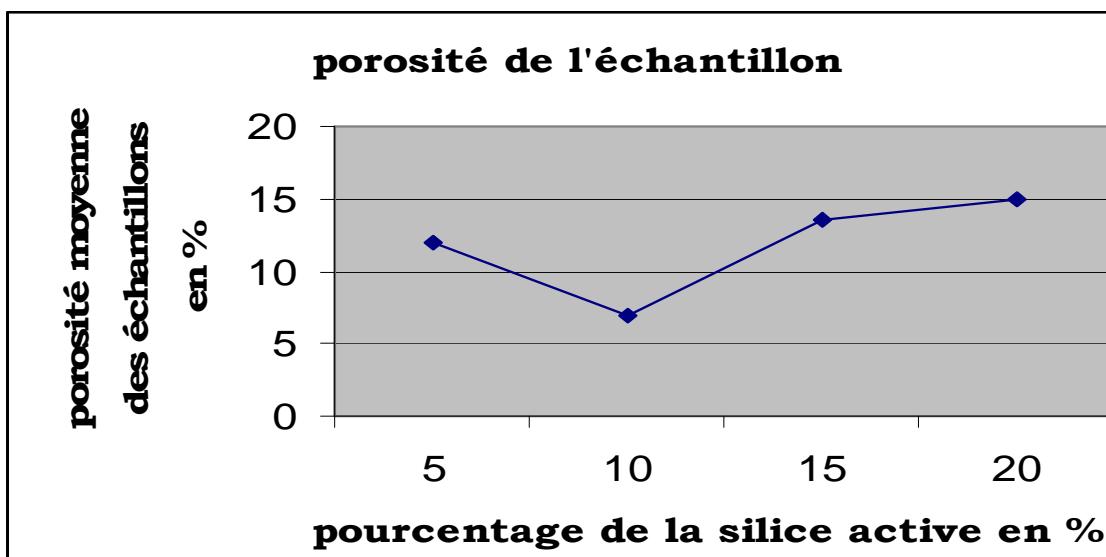
Les essais effectués sur les latérites réduites par de l'urée avec ajout de silice active à 10% ont permis d'avoir les résultats précédents. On obtient une porosité moyenne de 7.0 %, une résistance à la compression sèche moyenne de 57.5 bars et une résistance humide moyenne de 20 bars. Par ailleurs, la teneur en eau est faible.

Ainsi, la réduction biologique des latérites joue un rôle important dans la stabilisation des terres latéritiques. Lorsque la porosité diminue, la teneur en eau est réduite et le coefficient d'activité augmente. De plus, l'incubation à 30°C pendant 15 jours environ des latérites non réduite est la plus appropriée. Remarquons que l'ajout de 10% de silice active est le plus propice pour obtenir une valeur optimale de la résistance.

On constate alors que sans ajout de silice active ni réduction biologique, l'éprouvette se dégrade facilement.

**Tableau n°24 :** Comparaison des échantillons non réduit et réduit

Type d'éch°	N° éch°	% en SiO <sub>2</sub>	Moyenne des résistances à la compression sec à l'échéance de 28jrs en (bar)	Moyenne des résistances à la compression humide à l'échéance de 28jrs en (bar)	Moyenne de porosité (en %)
NON REDUIT	1	0	40	Désagrégation	Désagrégation
	2	5	38.5	Désagrégation	Désagrégation
	3	10	37.5	Désagrégation	Désagrégation
	4	15	30.6	Désagrégation	Désagrégation
	5	20	29.2	Désagrégation	Désagrégation
REDUIT	1	0	32.5	Désagrégation	Désagrégation
	2	5	40	15	12
	3	10	57.5	20	7
	4	15	37.5	12.5	13.5
	5	20	32.5	10	15

**Figure n°17:** Porosité des latérites avec de la silice active et urée

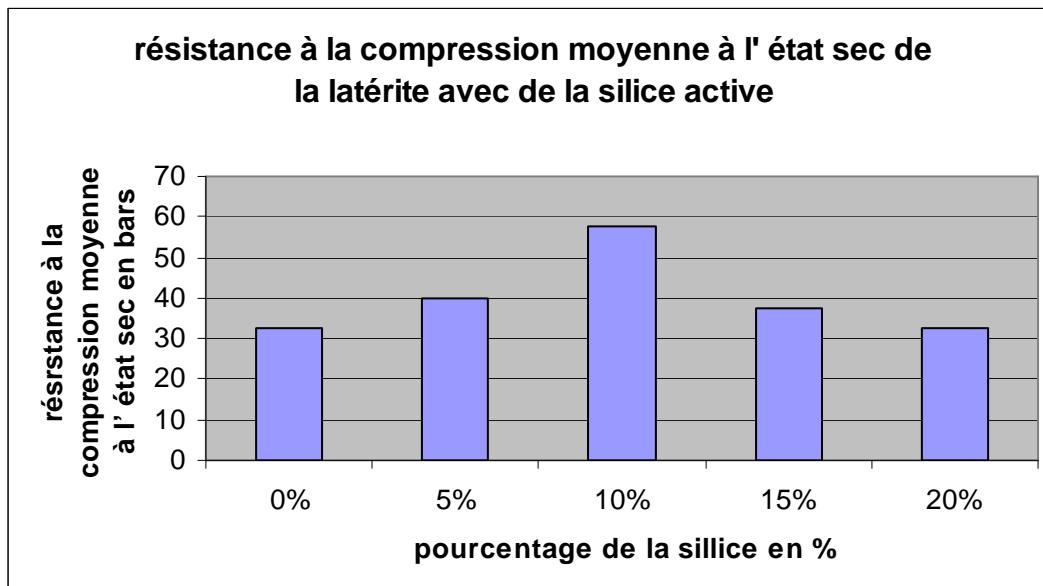


Figure n°18: Résistance à la compression à l'état sec des latérites avec silice active et l'urée

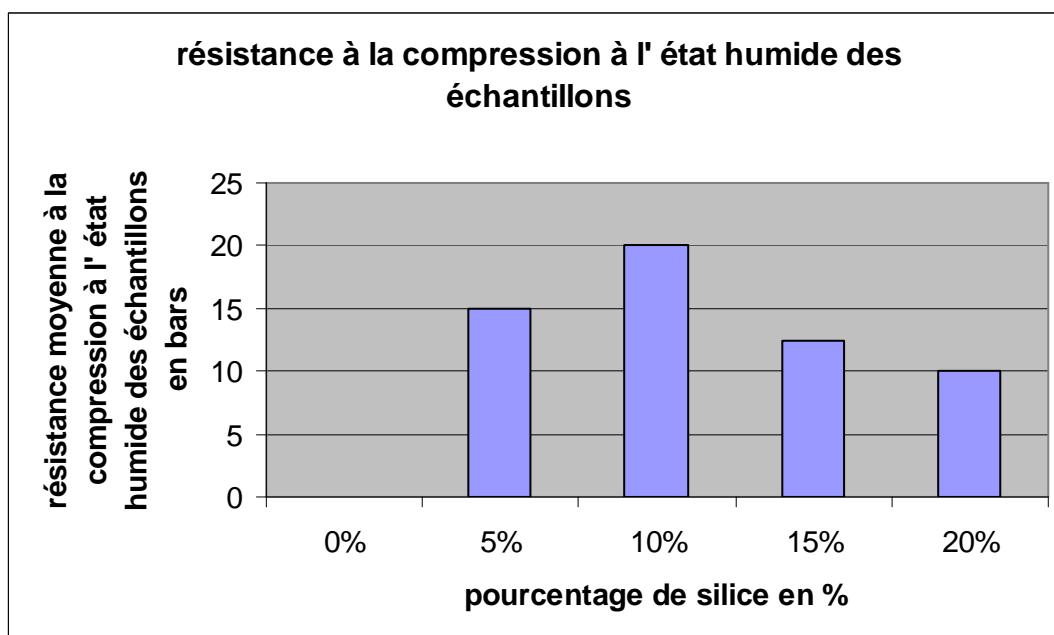


Figure n°19 : Résistance à la compression à l'état humide des latérites avec silice active et l'urée

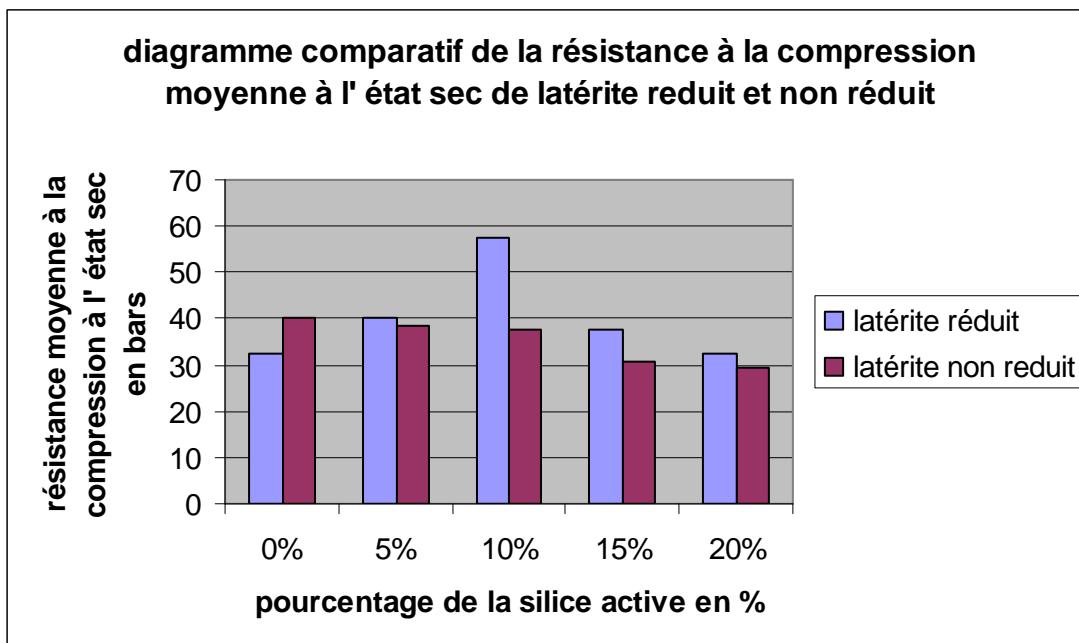


Figure n°20: Comparaison des latérites réduites et non réduites

## 1.4. CONCLUSION PARTIELLE

### Etude comparative du liant ciment et de la silice active avec l'urée

Diagramme comparatif de la résistance à sec et humide de le ciment et celle de la silice active avec l'urée lors de l'échéance de 28jrs

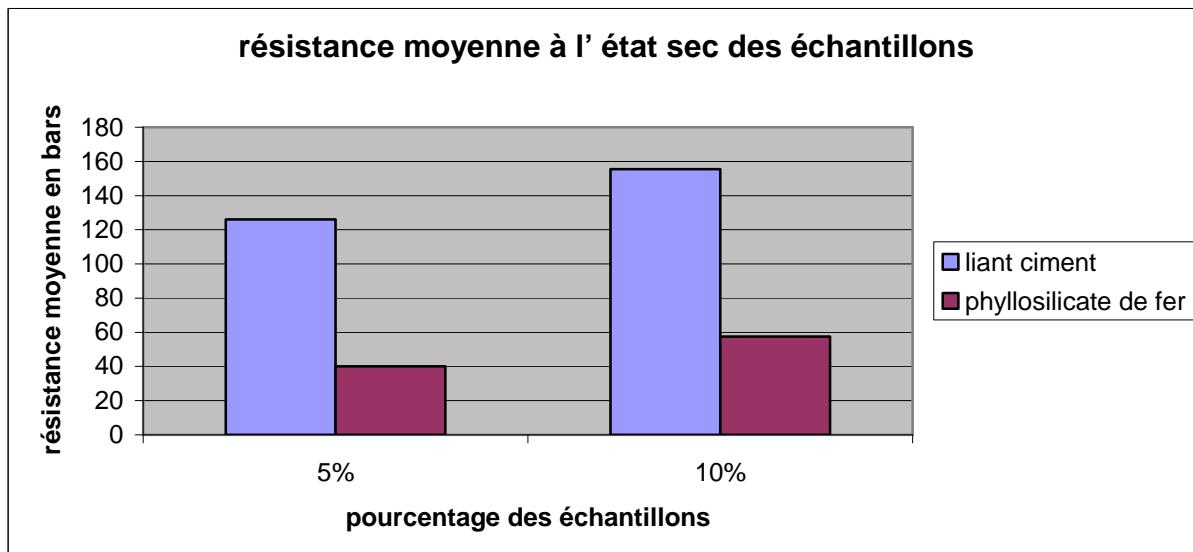


Figure n°21: Comparaison de la résistance à l'état sec de la silice active avec l'urée et du liant ciment

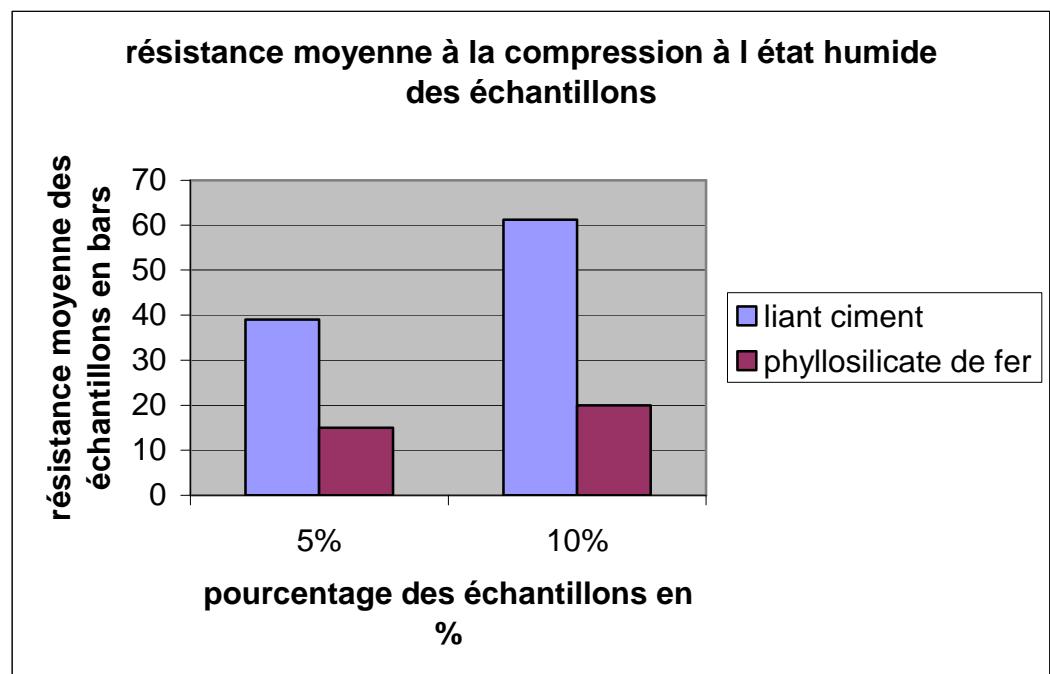


Figure n°22: Comparaison de la résistance à l'état humide de la silice active avec l'urée et du liant ciment

**Courbe comparative de la porosité de la silice active avec l'urée et du liant ciment**

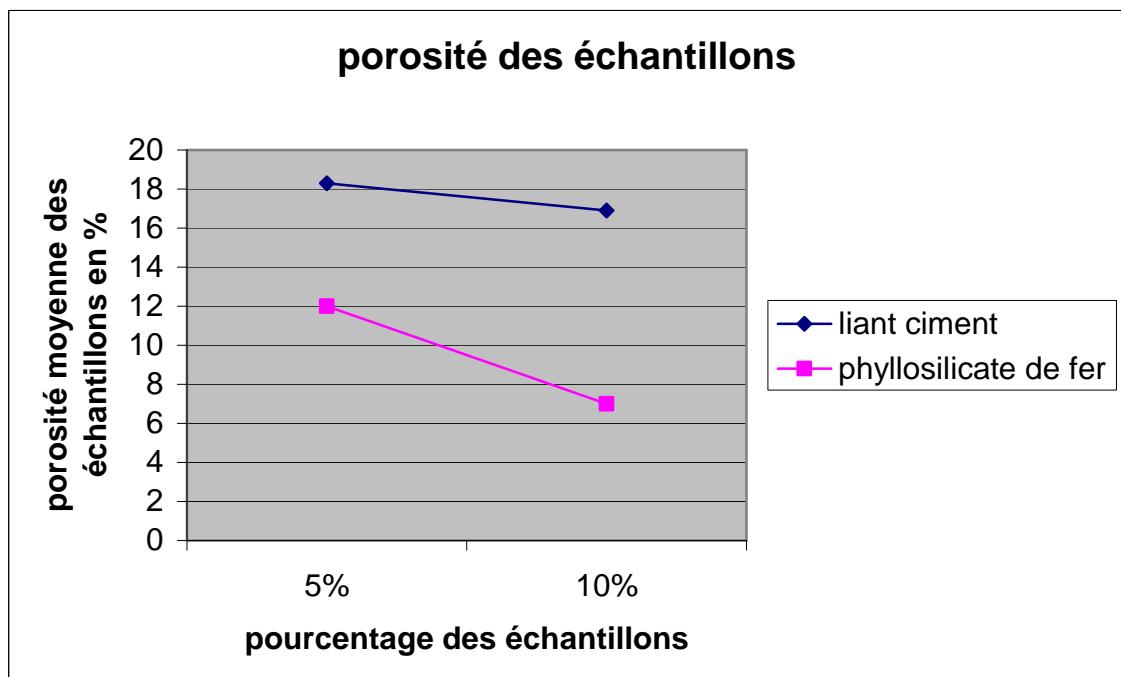


Figure n°23: Comparaison de la porosité de la silice active avec l'urée et du liant ciment

D'après les diagrammes comparatifs ci-dessus, les résistances à l'état sec et humide du ciment sont plus grandes que celles de la silice active avec l'urée. Pourtant, malgré la qualité supérieure du ciment, on peut envisager une construction avec des latérites stabilisées à la silice active avec l'urée. En effet, avec une porosité qui varie entre 12% à 7%, on peut avoir une bonne résistance à la compression à l'état sec (40 à 60 bars) et humide (15 à 20 bars) pour des échantillons contenant 5 à 10% de silice active. Ces résultats offrent des opportunités pour l'avenir des matériaux de construction et pour l'environnement.

Ainsi la réduction des latérites est nécessaire si on veut avoir un bon matériau de construction avec silice active et de l'urée. La réduction permet de réduire le Fer III en Fer II ; ce dernier va réagir avec la silice active pour former le phyllosilicate de fer de formule  $[Fe_3Si_2O_5(OH)_4]$ .

**Troisième Partie :**

**EVALUATION ECONOMIQUE**

**ET APPROCHE ENVIRONNEMENTAL**

**DES LATERITES**

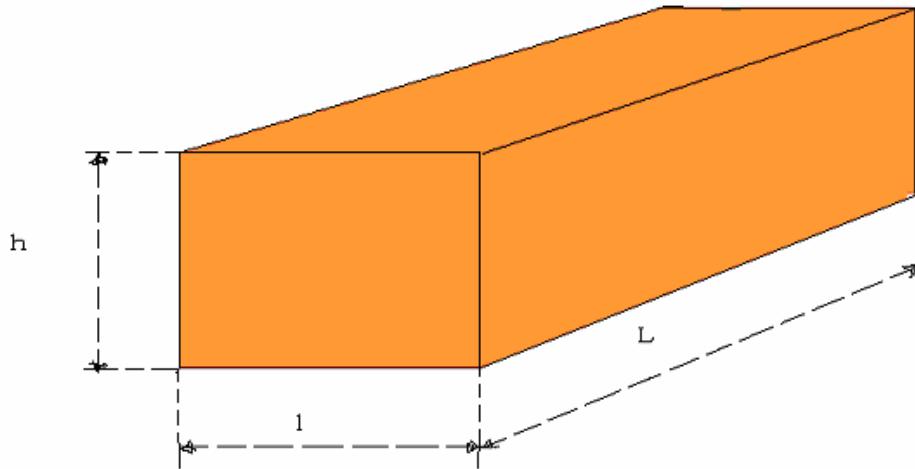
# Chapitre 1 : ETUDES COMPARATIVES DES COÛTS AU $m^2$

## DE CONSTRUCTION AVEC LES DEUX LIANTS :

### 1.1. CIMENT ET DU LIANT SILICE ACTIVE AVEC DE L'UREE

Cette partie est une étude comparative du coût au  $m^2$  du mur de briques stabilisées au ciment et celles stabilisées avec de l'urée et de la silice active. Pour effectuer le calcul il nous faut connaître le nombre de briques utilisées dans un mur 33.

#### **Calcul de nombre de briques dans un mur 33**



$h$  (hauteur) = 10cm  
 $l$  (largeur) = 10cm  
 $L$  (longueur) = 20cm

**Figure n°24 : Schéma simplifié d'une brique**

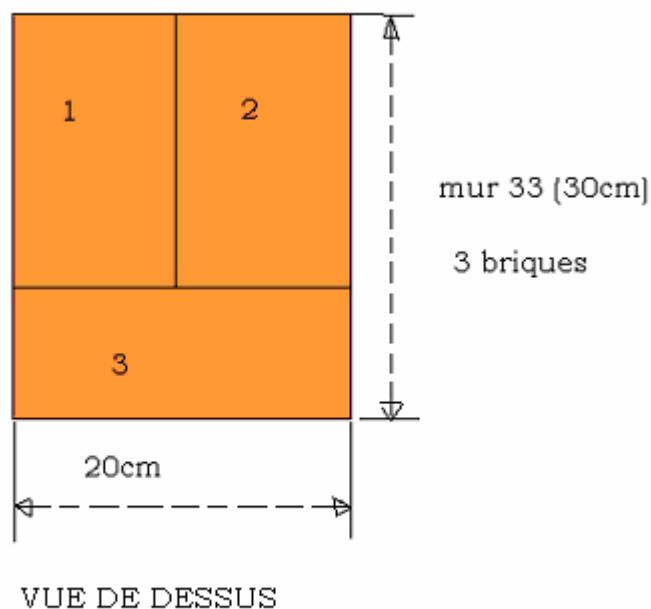


Figure n°25 : Vue de dessus d'un mur 33

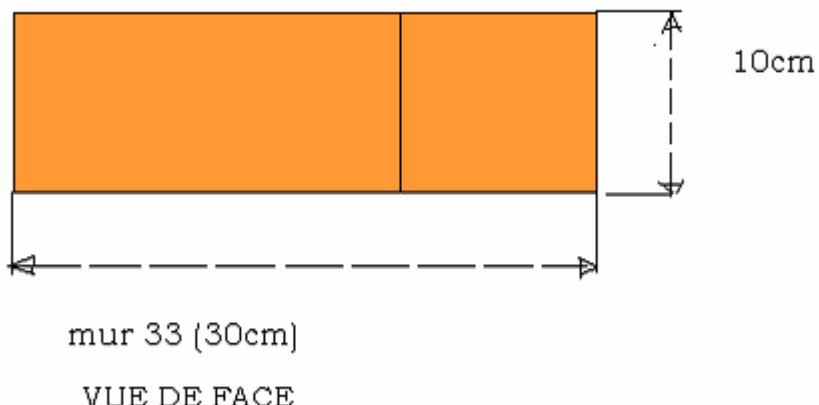


Figure n°26 : Vue de face d'un mur 33

Volume d'un brique ( $V_b$ ) = Longueur x largeur x hauteur

$$V_b = L \times l \times h$$

Avec  $V_b$  en  $\text{m}^3$  (volume d'une brique)

Et  $L$ ,  $l$ ,  $h$  en  $\text{m}$

Un mur 33 de 1m de longueur est donc composé de 15 briques  
 $1\text{m} = 100\text{cm}$  c'est à dire

$$\mathbf{1\text{m} = 100\text{cm} = 20\text{cm} \times 5} \longrightarrow \mathbf{3 \text{ briques} \times 5 = 15 \text{ briques}}$$

et avec 1m de hauteur on a

$$\mathbf{15 \text{ briques} \times 10 \text{ briques} = 150 \text{ briques}}$$

$\mathbf{n = 150 \text{ briques}}$  (nombre de briques)

Mais on peut calculer aussi à partir de cette formule

$$\mathbf{\text{nombre de briques}/m}^2 = \frac{\mathbf{\text{volume du mur de } 33}}{\mathbf{\text{volume d'une brique}}}$$

Et on a aussi  $\mathbf{n = 150 \text{ briques}}$

Or un mur est constitué de 90% de volume de brique et 10% de mortier  
 Donc V volume du brique dans un  $1\text{m}^2$  est :

$$\mathbf{V = 150 \times (0.1 \times 0.1 \times 0.2) = 0.3\text{m}^3}$$

V (volume des briques dans  $1\text{m}^2$ )

Alors dans  $1\text{m}^3$  on a  $0.3\text{m}^3$  de brique

Recherche du volume du mortier (  $\mathbf{V_m}$  en  $\mathbf{m}^3$  )

$$\mathbf{V_m = (0.3\text{m}^3 \times 10) / 100 = 0.03\text{m}^3 = 30\text{l de sable}}$$

On sait que le dosage d'un mortier est 300kg de ciment par  $1\text{m}^3$  de sable donc la masse de ciment utilisée dans un mur 33 de section  $1\text{m}^2$  est :

$$\mathbf{m_c = (0.03 \text{ m}^3 \times 300 \text{ kg}) / 1\text{m}^3 = 9\text{kg de ciment}}$$

$\mathbf{m_c}$  (masse du ciment nécessaire dans  $1\text{m}^2$  de mur 33)

Nombre de briques nécessaires

$$\mathbf{N_{br} = (0.3\text{m}^3 - 0.03\text{m}^3) / 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0.27\text{m}^3 / 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 135 \text{ briques}}$$

$\mathbf{N_{br}}$  (volume réel des briques dans  $1\text{m}^2$  de mur)

→ Ainsi pour avoir  $1\text{m}^2$  de mur 33 on a besoin de :

**135 briques**

**9kg de ciment**

**30l de sable**

→ Et la prix de revient d'un ciment est alors entre **3.600Ar/m<sup>2</sup>** à **5.400Ar/m<sup>2</sup>** de valeur moyenne **4.500Ar/m<sup>2</sup>**

### Calcul du prix de revient pour le silice active avec l'urée

Le calcul est toujours fait sur la base du mur 33

D'après les résultats des essais, une brique normale correspond à 8 éprouvettes avec un diamètre de 5 cm et une hauteur moyenne de 4.6 cm

#### Calcul de nombre des éprouvettes dans 1m<sup>2</sup> de mur 33

$$\mathbf{n_e = 8 \text{ éprouvettes} \times 150 \text{ briques} = 1200 \text{ éprouvettes}}$$

**n<sub>e</sub>** (nombre d'éprouvettes)

Lors des expériences que nous avons effectuées, on a fixé à 2% des latérites utilisées la masse de l'urée c'est à dire que pour 2kg de latérite on a utilisé 4g d'urée. 4g d'urée ajouté à 2kg de latérite peuvent fabriquer 10 éprouvettes.

#### Calcul de la masse d'urée utilisée dans 1m<sup>2</sup> de mur

$$10 \text{ éprouvettes} \longrightarrow 4 \cdot 10^{-3} \text{kg d'urée}$$

$$1200 \text{ éprouvettes} \longrightarrow M_{\text{urée}} = 48 \cdot 10^{-2} \text{kg}$$

$$\mathbf{M_{\text{urée}} = 0.48 \text{kg}}$$

**M<sub>urée</sub>** (masse de l'urée)

Or 1kg d'urée coûte 600Ar donc 0.48kg vaut 288Ar

→ Ainsi, le coût de l'urée est : **288Ar/m<sup>2</sup>** dans un mur 33

#### Calcul de coût du silice active

La quantité de la silice active dans les matériaux est de 10%. Alors dans un mélange de 2kg, il y a 200g de silice active et 1800g de latérite. On obtient 10 éprouvettes.

#### Calcul de la masse de silice dans 1m<sup>2</sup> de mur 33

$$10 \text{ éprouvettes} \longrightarrow 0.200 \text{kg de silice active}$$

$$1200 \text{ éprouvettes} \longrightarrow M_{\text{sa}} = 24 \text{kg}$$

Dans une rizerie, le balle de paddy se vend en gros : 300kg coûte en moyenne 12.500Ar et par simple calcul, 1kg de balle de paddy coûte 42Ar.

Ainsi le coût de silice active dans 1m<sup>2</sup> de mur 33 est :

$$\mathbf{24\text{kg} \times 42 \text{ Ar/kg} = 1008\text{Ar d'où } 1008\text{Ar/m}^2}$$

#### Calcul du coût total de silice active avec l'urée dans 1m<sup>2</sup> de mur 33

$$\mathbf{C_t = C_{sa} + C_{urée}}$$

$$\mathbf{C_t = 288\text{Ar/m}^2 + 1008\text{Ar/m}^2 = 1296\text{Ar/m}^2}$$

Avec **C<sub>t</sub>**: Coût total de silice active avec l'urée

**C<sub>sa</sub>** : Coût de silice active

**C<sub>urée</sub>**: Coût de l'urée

→ On peut dire alors que la dépense en phyllosilicate de fer dans 1m<sup>2</sup> de mur 33 est **1.296Ar/ m<sup>2</sup>**

#### Calcul du prix de revient pour le ciment à 10% dans 1m<sup>2</sup> de mur 33

Le principe de calcul reste identique et le nombre des éprouvettes sera encore de 1200. La masse du ciment dans le mélange à 10% est encore de 24kg (même calcul que la silice active).

On a donc:

$$\mathbf{24\text{kg} \times 500\text{Ar /kg} = 12000\text{Ar /m}^2}$$

→ La dépense au ciment dans 1m<sup>2</sup> de mur 33 est alors **12.000Ar/m<sup>2</sup>**

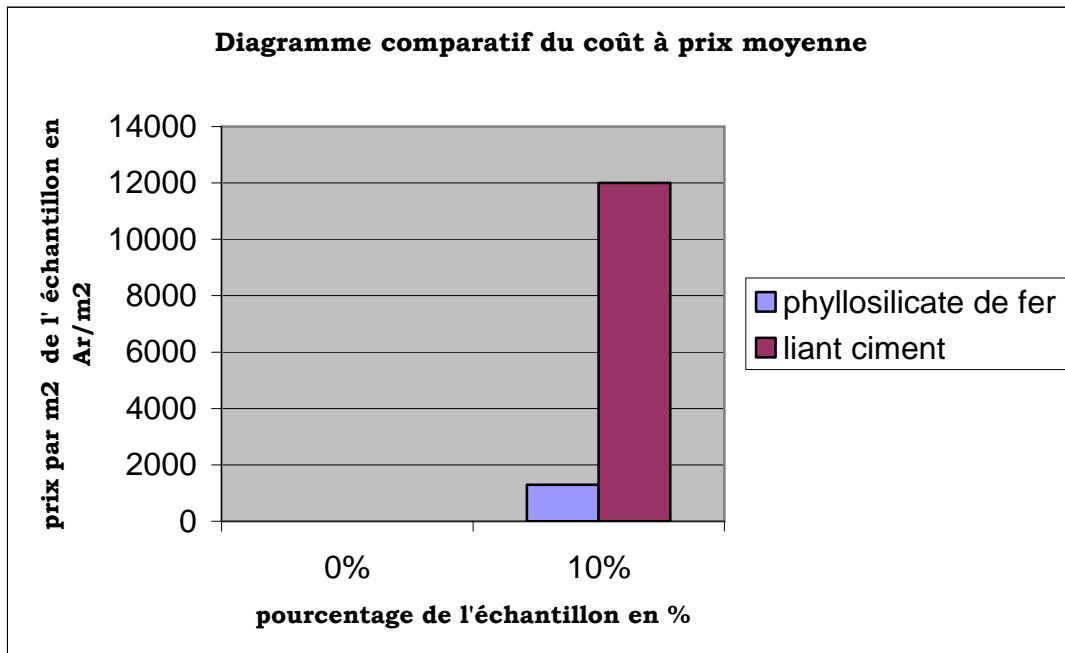


Figure n°27: Comparaison du coût de ciment et de la silice active avec de l'urée

L'utilisation d'une latérite stabilisée avec silice active et de l'urée est alors plus avantageuse. Son utilisation nous permet d'avoir un rendement de 10.8% avec un coût de 1.296Ar/m<sup>2</sup> de mur 33. Ce prix est très abordable comparé au prix du liant ciment qui est de 12.000Ar/m<sup>2</sup> de mur 33.

Ainsi on peut penser à la fabrication de ces matériaux pour lancer la politique de construction à Madagascar et pour répondre à la demande.

## **Chapitre 2 : APPROCHE ENVIRONNEMENTAL**

### **2.1. EFFETS DE L'UTILISATION DES LATÉRITES**

Les latérites sont de la terre rouge et sa valorisation diminue l'utilisation des bois pour la cuisson des briques par exemple. Cette valorisation fait diminuer la déforestation et la désertification ; ces dernières étant des problèmes environnementaux cruciaux nécessitant beaucoup d'efforts.

Mais il existe aussi des inconvénients à l'utilisation de la terre rouge comme matière de construction car ils peuvent être la source de la dégradation du sol ; c'est à dire l'appauvrissement de la terre. En effet, une carrière abandonnée représente un danger pour les populations environnantes. De plus, il y a dégradation des paysages donc gène pour le voisinage.

### **2.2.EFFETS D'UTILISATION DE CIMENT**

Le respect de l'environnement est un enjeu fort pour la filière ; pour l'extraction des granulats et la production de ciment particulièrement. L'extraction de matériaux dans les carrières s'accompagne en effet de la pollution de l'air, de l'eau, gène pour le voisinage.

## Types de déchets

Les déchets générés par l'activité de l'usine ont été classés suivant leur nature et leur mode de traitement. La classification est faite suivant le barème suivant [17]

**Tableau n°25**

<b>Types de déchets</b>	<b>exemples</b>
<b>Les déchets ménagers</b>	Tout type de déchets collectés dans les bureaux, les réfectoires, et les bennes à poubelles extérieures.
<b>Les matières inertes</b>	Terre, ciment, clinker, sable, gravier, etc.
<b>Déchets banals</b>	Déchets faiblement souillés ou non type bois, plastique, caoutchouc, tissus,
<b>Déchets souillés</b>	Déchets contenant d'importantes quantités d'hydrocarbures tel que torchons souillés, filtres à huiles, etc.
<b>Ferrailles</b>	Déchets métalliques tels que pièces mécaniques, barils, coupeaux, etc.
<b>Huiles de vidange</b>	Huiles provenant des installations mécaniques, et des équipements mobiles.
<b>Terres polluées</b>	Poussière, ciment, sable, terres etc. fortement pollués par des hydrocarbures ou autres déchets liquides.
<b>Déchets liquides de la centrale thermique</b>	Mélange d'eau et d'hydrocarbures
<b>Déchets radioactifs</b>	Sources provenant des différentes applications dans le four et le laboratoire.

<b>Types de déchets</b>	<b>exemples</b>
<b>Pneumatiques usagés</b>	Pneus de camions, chargeuses, et véhicules de l'usine, non rechapables et en fin de vie.
<b>Matériaux propres</b>	Matériau sorti de façon accidentelle ou chronique du système de production et dont la réutilisation directe est possible à condition qu'il ne soit pas pollué par d'autres déchets.
<b>Déchets verts</b>	Provenant des espaces verts dans l'usine
<b>Boues d'hydrocarbures</b>	Provenant des séparateurs à hydrocarbures
<b>Déchets de démolition sans amiante</b>	L'amiante provient essentiellement des plaques
<b>Déchets de démolition avec amiante</b>	

Ainsi les déchets d'une cimenterie et les déchets des latérites sont classés comme matières inertes et terres polluées. Leurs impacts négatifs sur l'environnement sont décrits comme suit

- les problèmes de santé publique tels que les nuisances diverses liées à la pollution de l'air par la poussière et les fumées des engins de terrassement et les véhicules de servitude ;
- la dégradation des terres le changement local du régime hydrologique des passages d'eau les risques d'érosion au droit des ouvrages et d'accidents ;
- les déchets liquides et solides des chantiers entraînant un risque de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines ; cette intrusion dans le milieu naturel (contamination, pollution) a également des conséquences négatives sur les conditions de vie des populations environnantes (nuisances, maladies) ;
- la destruction de végétation et de paysage : elle sera globalement modeste tout le long de l'exploitation, mais pourrait être relativement importante dans les 3 zones écologiquement sensibles comme les bas-fonds et galeries forestières, les zones d'emprunt et les pistes diverses ;
- la destruction de champs de culture

Ainsi, la cimenterie est très importante pour l'économie d'un état. Pourtant, sur le plan de l'environnement, il provoque des impacts néfastes qui nécessitent des précautions tant pour les personnels que pour les populations environnantes. C'est la raison pour laquelle l'installation de chantier doit être loin d'une ville, et ne gênant pas les villageois du voisinage. Il est également nécessaire d'utiliser une technologie moderne avec des impacts bien étudiés.

### **2.3.EFFET D'UTILISATION DE SILICE ACTIVE**

L'emploi de la silice active provoque un effet néfaste sur la santé publique (émission de poussière, pollution de l'air).

Elle constitue un gène pour la population (dépôt de silice entraînant la destruction des paysages).

Notons que le port de casque devrait être de rigueur pour les travailleurs.

Un arrangement de dépôt également est nécessaire (pour le paysage).

### **2.4.EFFET D'UTILISATION DE L'UREE**

Vu la faible quantité d'urée que nous avons utilisée (2%), les impacts de son utilisation sont donc peu importants. Mais en générale, l'urée peut être un polluant des eaux.

L'avantage est pourtant qu'elle améliore le pouvoir de fertilisation des sols.

# Conclusion Générale

## CONCLUSION GENERALE

Vu l'abondance de latérite à Madagascar, la disponibilité de la silice active et la hausse sans cesse du prix du ciment ;

Au regard des ressources financières limitées de la majorité des Malagasy et le coût pour l'Etat de la construction et de l'entretien d'une route (jusqu'à 1 milliard/km)

À cause du problème de la dégradation de l'environnement par l'utilisation du bois comme combustible pour la cuisson des briques ou en tant que matériaux de construction (planche, madrier, etc.) ;

Nous avons donc effectué une étude de stabilisation des latérites par une méthode :

sans cuisson ni ciment (économique),

facile,

pouvant concurrencer le TOPSIL dans le domaine routier,

dur et résistante,

Nous avons décidé de faire cette étude qui s'intitule : « Etude comparative de la stabilisation des latérites avec des liants : ciment et silice active additionnée de l'urée » afin non seulement de résoudre quelques problèmes liés aux infrastructures (prix du ciment élevé, environnement...etc.), mais également pour relancer la politique de construction à Madagascar ; ceci afin de contribuer au développement rapide et durable.

Durant nos recherches, l'analyse chimique des latérites nous a permis de constater que

la teneur en  $\text{SiO}_2$  et en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  croît après la réduction microbienne ;

la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , par contre diminue.

Ce travail est aussi une étude géotechnique des latérites de Vontovorona. Les valeurs trouvées sont combinées sur les essais Proctor, l'Analyse Granulométrique, et les limites d'Atterberg.

Au cours de cette étude. Nous avons obtenu des résultats probants pour le liant ciment (bonne propriété physique, hydrique et mécanique). Mais

nous avons constaté aussi que le ciment ne peut pas être stocké trop longtemps. Ainsi, le ciment dont l'emballage a été déjà troué ou en contact prolongé avec l'air ne permet pas d'avoir de résultat satisfaisant.

La stabilisation des latérites avec le ciment demande aussi de grandes précautions. En effet, le ciment doit être pure et de bonne qualité.

Par contre avec le liant silice active et l'urée, le résultat est acceptable même si les propriétés physiques, hydriques et mécaniques sont inférieures à celles du ciment.

Les essais nous ont permis d'obtenir des résultats de 57.5 bars pour un résistance à l'état sec et 20 bars pour un résistance à l'état humide. De plus, son coût est largement inférieur à celui du ciment.

Le prix de revient moyen de la silice active avec l'urée est 1.296Ar/m<sup>2</sup> de mur 33, ce qui est très abordable comparé à celui du ciment qui est de 12.000Ar/m<sup>2</sup> de mur 33. Donc l'utilisation de silice active et de l'urée

Comme liant de stabilisation des latérites nous permet de gagner 10.8% de rendement

Le processus de fabrication de la terre stabilisée par le liant pourrait être intéressant dans le domaine de la construction et de l'environnement. En effet, il y a suppression de l'étape de cuisson donc annulation de la consommation de combustible et élimination des émissions des gaz tels que le CO<sub>2</sub>, etc.

A l'égard de la déforestation annuelle à Madagascar, la consommation de combustible diminuera et la contribution de chaque filière permettra de lutter contre la déforestation

L'étude que nous avons menée a démontré que la technique de fabrication des éprouvettes avec le liant phyllosilicate de fer peut être maîtrisable. Mais des améliorations ou des affinages devront certainement être apportées au niveau de la chaîne de fabrication en vue de la qualification de processus de fabrication et du produit lui-même.

Actuellement, cette technique permet d'assurer une économie de 10.8% sur le plan financier. L'étude permet également d'économiser sur le

plan énergétique et contribue à la préservation de l'environnement (diminution de la consommation de combustible bois par exemple).

Enfin on espère que la production des éprouvettes en latérite stabilisée avec la silice active et l'urée puisse démarrer et se développer à Madagascar afin de soutenir la politique de construction, de protection de l'environnement et d'information pour les fabricants des briques. Notre souhait serait également de contribuer à l'amélioration de leur technique de fabrication, sans dépenser trop de dépenses.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A JOURDAN : ENSCP (chargée de cours à l' Ecole Nationale Supérieure de Céramiques Industrielle de Sèvres Paris Gauthier Villards ; 1966  
« Technologie des produits céramiques réfractaires »
- [2] ABD-EL MALIK DIT SIRADJ'EDDINE Mohamed Said M  
“ Contribution à l'étude de stabilisation de la latérite par la paille de riz : Approche biochimique ” ; 2005  
Mémoire de DEA en sciences des matériaux, 63 pages
- [3] ELISOAMIADANA Philippine  
Cours de chimie minérale II (5<sup>ème</sup> Année Génie Chimique)
- [4] IDA Nirina RAZAFIMALAHETO  
“ Contribution à l'étude de la stabilisation de la latérite par utilisation de la paille de riz : approche chimique ” ; 2005  
Mémoire de fin d'étude de DEA en sciences des matériaux, 82 pages
- [5] R. Dupain (docteur en génie civil) maître de conférence à l'IUT de Saint Nazaire  
R. Lanchon (Ingénieur)  
J. C. saint Arroman (Ingénieur INSA) et enseignant à l'IUT de saint Nazaire,  
GRANULATS, SOLS, CIMENTS ET BETONS  
Caractéristique des matériaux de Génie civil par essais de laboratoire  
2<sup>ème</sup> édition conforme aux normes européennes, 236 pages
- [6] RAKOTOARIVONIZAKA Ignace  
Méthodes d'analyse chimique (département Génie Chimique ESPA) 47 pages
- [7] RAKOTOARSON Simon  
Cours d'environnement écologique (5<sup>ème</sup> année Génie Chimique)

**[8] RAKOTONIAINA Herimalala**

« Contribution à l'études de quelques matières premières argileuses pour la fabrication des brique réfractaire » ; 1989

Mémoire de fin d'études pour l'obtention de diplôme d'ingénieur en filière Mine à l'ESPA, 57 pages

**[9] RAKOTONIRINA**

« Contribution à l'étude des latérites par la fabrication des produits réfractaires » ; 1988

Mémoire de fin d'études pour l'obtention de diplôme d'ingénieur en filière Mine à l'ESPA, 137 pages

**[10] RAKOTONIRINA Zo Ny Aina et RATOVONDRAHONA Johary Hasina**

« Etude de fabrication des matériaux de construction en terre stabilisée par extrusion » ; 1999

Mémoire de fin d'études pour l'obtention de diplôme d'ingénieur en filière Génie Chimique à l'ESPA, 68 pages

**[11] RAKOTOTSIMBA Sanda et RAKOTONDRAKABE Josélys**

« Contribution à la valorisation du matériaux terre caractéristiques et utilisation des latérites des environs d'Antananarivo » ; 2000

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie Chimique à l'ESPA, 77 pages

**[12] RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely**

Cours de ciment 3<sup>ème</sup> année SIM (Science Ingénierie des Matériaux)

**[13] RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Grabriely**

« Contribution à l'étude de l'élaboration de ciment à haute résistance à Madagascar action sur le mélange CRU » ; 2005

Doctorat d'état és- sciences physiques, 182 pages

**[14]** RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné

« Contribution à la stabilisation des latérites par élaboration d'un liant oxyde de fer et de silice active » ; 2004

Thèse de doctorat III<sup>ème</sup> CYCLE, 164 pages

**[15]** RANDRIANARISOA Herivola Elleonore et RAHARINTSOA Volanirina Nivo

« Contribution à l'étude de valorisation des balles de riz dans la région du lac Alaotra » ; 2001

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention de diplôme d'ingénieur de Mine et Génie Chimique, 89 pages

**[16]** RAZAFIMANDIMBY née RAHARIVAO A,

« Contribution à l'etude de quelques échantillons d'argiles Malgaches d'intérêt économique ». ; 1987

Thèse de Doctorat ès- sciences physiques, E.E.S.S Antananarivo Madagascar

**(17)** Webographie : <http://www.fr.wikipedia.org/wiki/latérite>

<http://www.fr.wikipedia.org/wiki/ciment>

<http://www.dotepea.com>

<http://www.faidherbe.org>

# **ANNEXES**

## **ANNEXE I**

**Etudes géotechnique des latérites de Vontovorona**

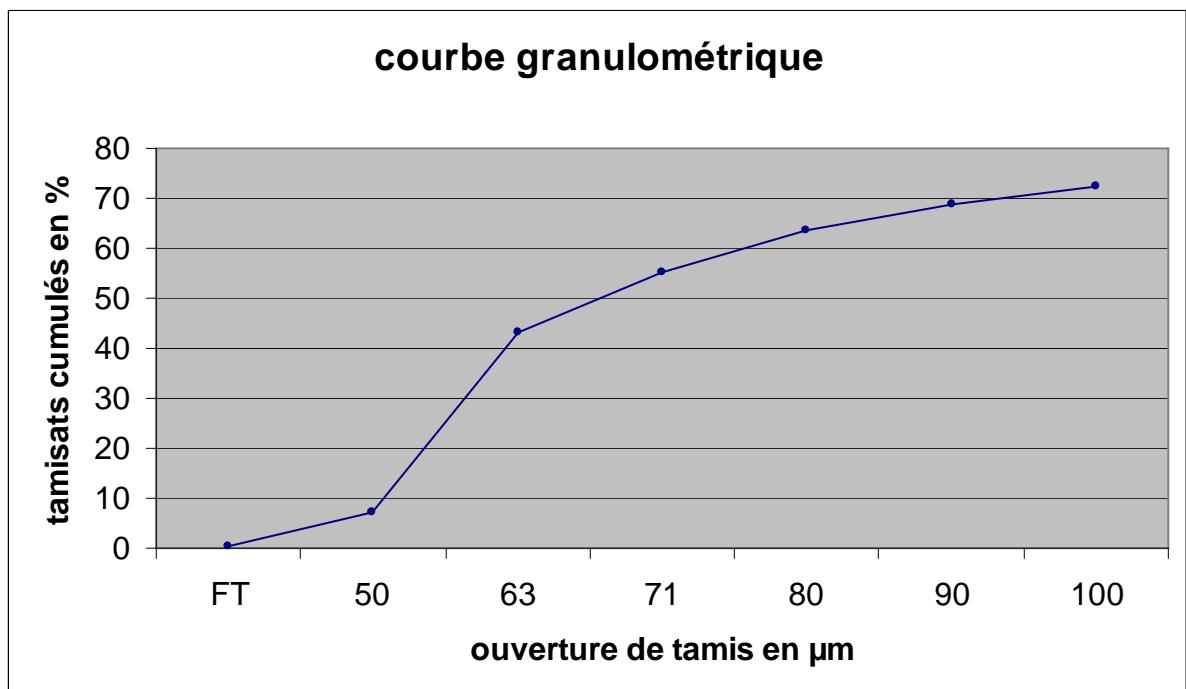
49  
—  
3

**ANNEXE II**  
**Granulométrie des latérites de Vontovorona**

**Tableau de la valeur granulométrique de la latérite de vontovorona sur un échantillon de M = 100g**

Ouverture de tamis (en µm)	Refus partiels R <sub>i</sub> (en g)	Refus cumulés R <sub>n</sub> (en g)	Refus cumulés (en %)	Tamisats cumulés (en %)
<b>100</b>	27.59	27.59	27.59	72.41
<b>90</b>	3.64	31.23	31.23	68.77
<b>80</b>	5.26	36.49	36.49	63.51
<b>71</b>	8.32	44.81	44.81	55.19
<b>63</b>	11.79	56.6	56.6	43.4
<b>50</b>	36.26	92.86	92.86	7.14
<b>Fond de tamis (FT)</b>	6.57	99.43	99.43	0.57

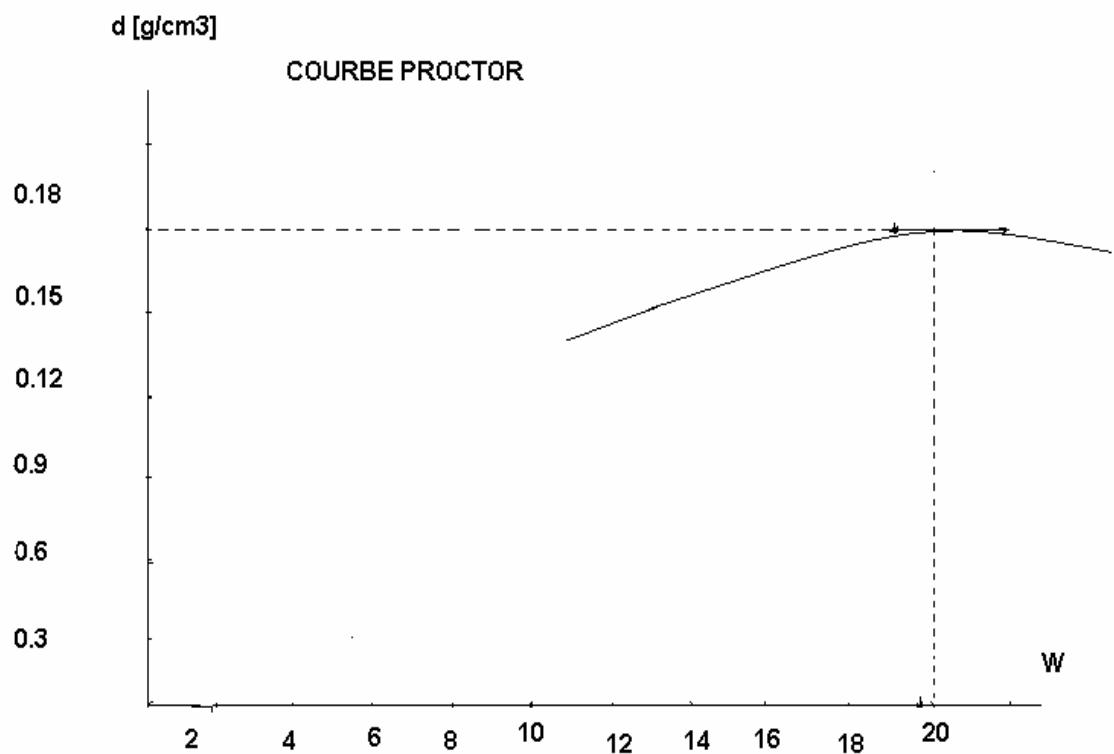
**Courbe de la granulométrique de la latérite de Vontovorona**



**ANNEXE III**  
**RESULTATS SUR LES ESSAIS PROCTOR**

	ESSAI I	ESSAI II	ESSAI III	ESSAI IV	ESSAI V
<b>Poids total humide Ph (g)</b>	8361	8857	9249	9526	9434
<b>Poids du moule vide Pm (g)</b>	3722	3722	3722	3722	3722
<b>Poids du sol humide Phs (g)</b>	4639	5135	5527	5804	5712
<b>Poids du sol secs Pss</b>	4176.24	4497.81	4759.92	4813.07	4649.30
<b>Volume du moule V (cm3)</b>	2758.16	2758.16	2758.16	2758.16	2758.16
<b>Densité apparente du sol d (g/cm3)</b>	1.51	1.63	1.72	1.74	1.68

	Essai I		Essai II		Essai III		Essai IV		Essai V	
<b>Poids total humide Ph [g]</b>	10.1	9.8	8.6	9.1	9.5	10	8	8.2	9	7.8
<b>Poids total sec Ps [g]</b>	9.5	9.3	8	8.5	8.8	9.1	7.4	7.4	8.2	7
<b>Poids de l'eau Pe [g]</b>	0.7	0.5	0.6	0.6	0.7	0.9	0.6	0.8	0.8	0.8
<b>Poids du sol Pss [g]</b>	5.5	5.3	4	4.5	4.8	5.1	3.4	3.4	4.2	3
<b>Teneur en eau W [%]</b>	0.127	0.094	0.15	0.13	0.14	0.17	0.17	0.22	0.19	0.26
<b>Tare Po [g]</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	0.11		0.14		0.16		0.19		0.23	



$$W_{\text{opt}} = 20.35\% \text{ et } \gamma_j^{\max} = 1.75 \text{T/m}^3$$

**ANNEXE IV**  
**PLASTICITE ET LIQUIDITE**

Nombre des coups de la coupelle	LIMITE DE LIQUIDITE W <sub>L</sub>					
	Essai n° 1		Essai n° 2			
	25°C	25°C	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 3	Mortier 4
<b>1. Poids de la tare en [g]</b>	4	4	4	4	4	
<b>2. Poids humide en [g]</b>	5.3	5.12	9.12	8.12		
<b>3. Poids total en sec [g]</b>	4.9	4.9	7.4	6.7		
<b>4. Poids de l'eau en [g]</b>	0.4	0.22	1.8	1.42		
<b>5. Poids du matériau sec en [g]</b>	0.9	0.9	3.4	2.7		
<b>6. Teneur en eau en (%)</b>	37.77	35.55	35.29	35.18		
<b>7. Teneur en eau moyenne en (%)</b>	36.667		35.23			

Remarques :

Poids de l'eau = poids total humide – poids total sec (en g)

Poids de matériau sec = poids total sec – poids de la tare (en g)

Teneur en eau = (poids de l'eau / poids du matériaux sec) \* 100

Nombre des coups de la coupelle	LIMITE DE LIQUIDITE W <sub>L</sub>					
	Essai n° 1		Essai n° 2			
	25°C	25°C	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 3	Mortier 4
<b>1. Poids de la tare en [g]</b>	4	4	4	4	4	
<b>2. Poids humide en [g]</b>	4.9	5	5.02	5		
<b>3. Poids total en sec [g]</b>	4.72	4.8	4.9	4.9		
<b>4. Poids de l'eau en [g]</b>	0.18	0.2	0.22	0.2		
<b>5. Poids du matériau sec en [g]</b>	0.7	0.8	0.9	0.9		
<b>6. Teneur en eau en (%)</b>	25.71	25.00	24.44	22.22		
<b>7. Teneur en eau moyenne en (%)</b>	25.35		23.33			

## **ANNEXE V**

### **Identification de matière première**

Analyse préliminaire

Il s'agit de faire des différents examens

Examen visuel :

On examine à l'œil nu la terre pour apprécier l'importance de sa fracture sableuse et de sa fraction fine. Puis on enlève les gros cailloux et les gros sables pour l'évaluation.

Examen de l'odeur

On sent la terre que l'on vient d'extraire : elle est de nature organique si on sent une odeur « moisi » cette odeur est amplifiée si l'on chauffe ou humidifie la terre.

Essai de toucher

La terre est sableuse si elle crisse avec une sensation désagréable

La terre est argileuse si l'on éprouve une sensation lisse est farineuse.

La terre est silteuse si le crissement ne donne pas une sensation désagréable

Analyses visuelles

Test de résistance à sec

On prépare 2 ou 3 pastilles de terre molle ; faire sécher jusqu'à ce qu'elles soient totalement sèches puis essayer d'écraser ensuite les pastilles entre le pouce et l'index. On note après le comportement de terre par rapport à celle d'argile pure et de limon pur et interpréter

Test de ressuage

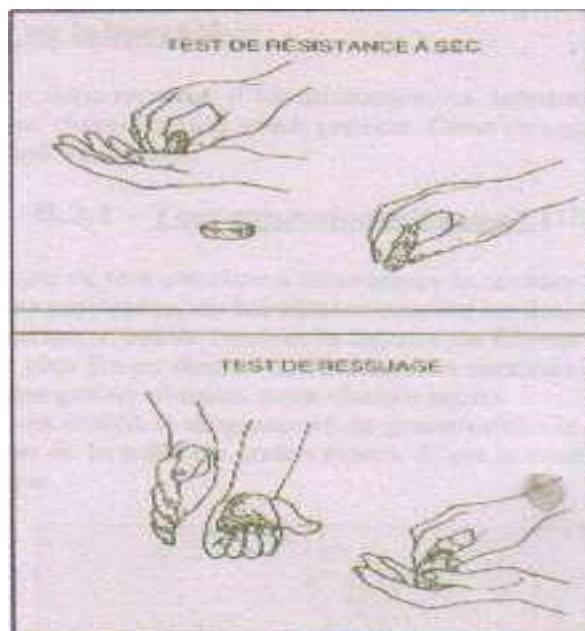
Confectionner une boule de mortier fin de 2 ou 3 cm de diamètre, puis mouiller de façon à ce qu'elle se tienne sans coller aux doigts. Faire aplatisir légèrement la boule dans la paume de la main en extension horizontale et du tranchant de l'autre main ensuite, frapper vigoureusement la paume portant la boule aplatie pour en faire sortir de l'eau. Enfin, presser entre le pouce et l'index et observer les réactions et interpréter.

Test de consistance

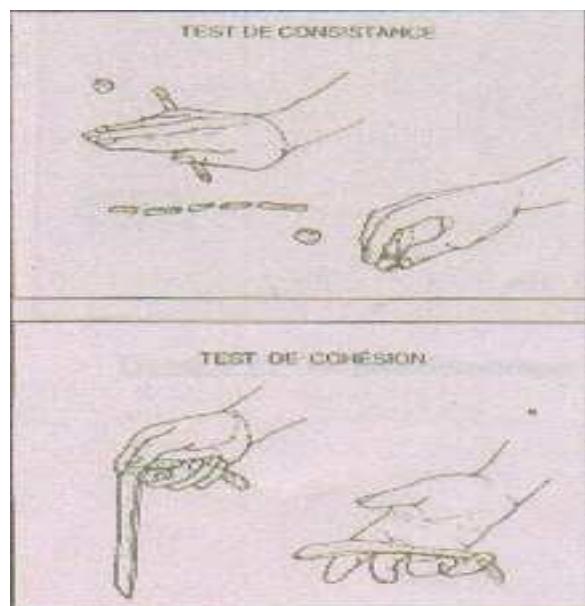
On réalise du colombeau le plus long possible de 3mm de diamètre sans qu'ils cassent. Le colombeau doit se fractionner dans ce cas.

### Test de cohésion

Confectionner de colombe de diamètre 12mm ; le placer dans la paume de la main et aplatis entre le pouce et l'index en commençant par l'extrémité jusqu'à obtenir un ruban de 3 à 6 mm de large mesurer ensuite la longueur obtenue avant que la ruban ne se casse et faire l'interprétation



Test de résistance à sec et ressuage



Test de consistance et test de cohésion

**ANNEXE VI**  
**TAMBOHON' NY NTAOLO**



**ANNEXE VII**  
**TERRE LATERITIQUE DE VONTOVORONA**



Latérite de Vontovorona, de coordonnées Laborde : **X** : 791500  
**Y** : 504500

**ANNEXE VIII**  
**EPROUVEtTES EN LATERITE**



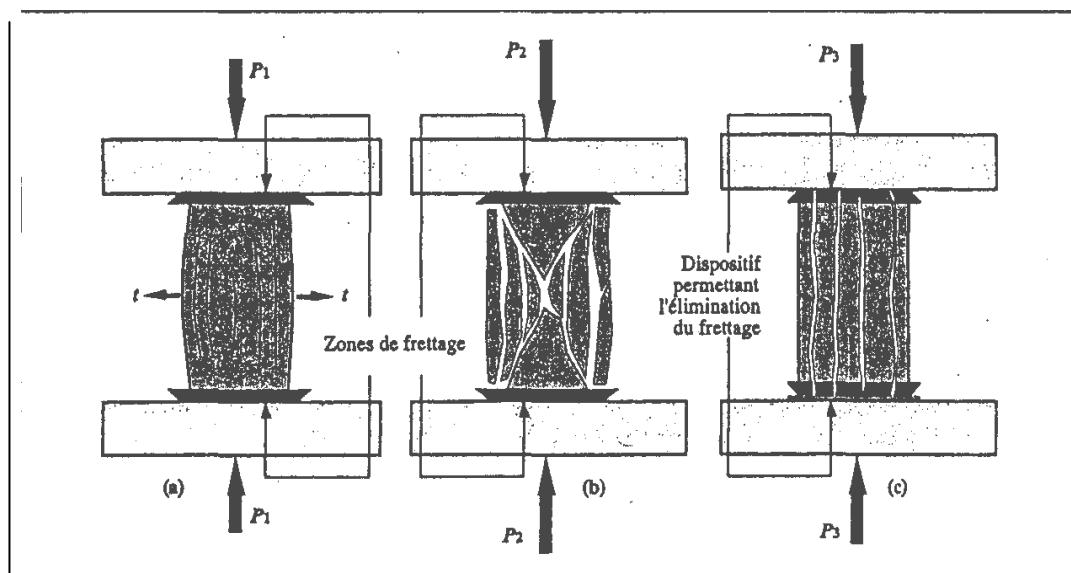
## **ANNEXE IX**

### **.PARTICULARITES DE LA RUPTURE EN COMPRESSION**

Pour des résistances supérieures à 60 MPa, et suivant la presse utilisée la rupture peut être brutale et il est bon d'équiper la presse d'un système de protection pour se protéger des éclats éventuels. En général l'éprouvette rompt de la manière indiquée sur la figure

Dans ce type de rupture, deux cônes apparaissent aux extrémités de l'éprouvette rompue. En effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la déformation transversale est libre; elle résulte des contraintes de traction (symbolisées par les flèches perpendiculaires à la compression (et à la fissuration). Ce sont ces contraintes de traction qui aboutissent dans la zone centrale à la fissuration longitudinale de l'éprouvette, puis à sa ruine. Les zones extrêmes, protégées par le fretage créé par les plateaux, ne sont pas détruites

Le fretage peut être limité en graissant les zones une jonction plateaux/éprouvette ou en y interposant des appuis en téflon. La rupture est alors du type de celle indiquée sur la figure. Elle se produit pour une charge habituellement plus faible que celle obtenue dans le cas général en protégeant ses extrémités de l'éclatement, le fretage permet à l'éprouvette d'encaisser des chargements légèrement plus importants.



**ANNEXE X**  
**LA ZONE LATERITIQUES DE VONTOVORONA**



## **TABLE DE MATIERE**

Remerciements	
Sommaire	
Liste de tableaux	
Liste de figures	
Liste de organigrammes	
Liste de courbes	
Liste de diagrammes	
Introduction .....	1
<b>PARTIE 1 : Etudes bibliographiques</b>	
Chapitre 1 : GENERALITES .....	3
1.1. LES LATERITES .....	3
1.1.1. Définitions .....	3
1.1.2. Intensité de latérisation .....	3
1.1.3. Classification des latérites.....	3
1.1.4. Constituants des latérites.....	4
1.1.5. Les structures des latérites .....	5
1.1.6. Utilisation des latérites :.....	6
1.2. LES CIMENTS .....	6
1.2.1. Définition .....	6
1.2.2. Les constituants.....	6
1.2.2.1. Les constituants d' un clinker .....	7
1.2.2.2. Les autres constituants .....	8
1.2.2.3. Les constituants secondaires .....	9
1.2.2.4. Les additifs .....	9
1.2.2.5. Sulfate de calcium .....	9
1.2.3. Les principales catégories de ciment.....	9
1.2.3.1. Classification des ciments en fonction de leur composition .....	10
1.2.3.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale .....	10
1.2.4. Description des cimenteries à Madagascar : Holcim Ibity et d'Amboanio .....	13
1.3. LES SILICES ACTIVES .....	18

1.3.1. Définition .....	18
1.3.2. Analyse de transformation du paddy .....	18
1.3.3. Classification de la silice suivant sa teneur.....	21
1.3.4. Variétés de silice .....	21
1.3.5. Influence du fer .....	22
1.4. TECHNIQUE DE STABILISATION.....	22
1.4.1. Principe .....	22
1.4.2. Objectif.....	22
1.4.3. Moyens .....	23
1.4.4. Différents types de stabilisants.....	24
1.4.5. Stabilisation au ciment .....	26
1.4.6. Effet de stabilisation.....	26
<b>Chapitre 2 : DETERMINATION DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES .....</b>	<b>27</b>
2.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	27
2.1.1. But .....	27
2.1.2. Principe .....	27
2.2. LIMITES D'ATTERBERG .....	27
2.2.1. But.....	27
2.2.2. Définition .....	28
2.2.3. Principe de l' essai .....	29
2.3. ESSAI PROCTOR .....	30
2.3.1. But.....	30
2.3.2. Principe de l' essai .....	30
2.4. ETUDES GEOTECHNIQUES DES LATERITES DE VONTOVORONA.....	31
<b>Chapitre 3 : ANALYSE CHIMIQUE .....</b>	<b>32</b>
3.1. ANALYSE CHIMIQUE DES LATERITES .....	32
3.1.1. Dosage de SiO <sub>2</sub> par la méthode précipitation .....	32
3.1.2. Dosage du CaO par la méthode de précipitation.....	32
3.1.3. Dosage de MgO par la méthode de précipitation.....	33
3.1.4. Dosage de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> par la méthode manganimétrique.....	33
3.1.5. Dosage du TiO <sub>2</sub> par la spectrométrie UV .....	34
3.1.6. Dosage de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> par la méthode de précipitation.....	35
3.1.7. Résultats des analyses chimique de latérite de Vontovorona.....	35
3.2. ANALYSES DU CIMENT .....	36
3.2.1. Composition chimique .....	36

3.2.2. Hydraulicité.....	37
3.2.3. Méthode de détermination des éléments majeurs du ciment et du clinker .....	38
<b>PARTIE 2: Etudes expérimentales</b>	
Chapitre 1 : ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES DES LATERITES STABILISEES .....	39
1.1. CONFECTION DES EPROUVETTES.....	39
1.1.1. Pour le liant ciment .....	39
1.1.2. Pour les latérites avec silice active et l' urée.....	40
1.1.3. Machine de testwell .....	41
1.1.4. Schéma de l' éprouvette .....	42
1.2. RESULTATS .....	43
1.2.1. Essai avec les latérites d' Ambohidratrimo.....	43
1.2.2. Essai avec les latérites de Vontovorona.....	45
1.2.2.1. Premièr essai .....	45
1.2.2.2. Deuxième essai.....	48
1.3. INTERPRETATIONS DES RESULTATS .....	51
1.3.1. Les latérites stabilisées au ciment .....	51
1.3.2. Les latérites stabilisées avec la phyllosilicate de fer $[Fe_3Si_2O_5(OH)_4]$ .....	53
1.3.2.1. Latérites non réduites .....	53
1.3.2.2. Latérites réduite et silice active .....	54
1.4. CONCLUSIONS PARTIELLES .....	57
<b>PARTIE 3: Evaluation économique et études environnementaux des latérites</b>	
Chapitre 1 : ETUDES COMPARATIVES DES COÛTS.....	60
1.1. CIMENT ET SILICE ACTIVE AVEC DE L'UREE .....	60
Chapitre 2 : ETUDES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX .....	66
2.1. EFFETS DE L'UTILISATION DE LA LATERITE.....	66
2.2. EFFETS D'UTILISATION DE CIMENT .....	66
2 3 EFFET D'UTILISATION DE SILICE ACTIVE .....	69
2 4 EFFET D'UTILISATION DE L'UREE .....	69
Conclusion générale .....	73
Bibliographie.....	75
Annexes	
ANNEXE I :     Etude géotechnique des latérites de Vontovorona	
ANNEXE II :    Granulométrie des latérites de Vontovorona	
ANNEXE III :   Résultats sur les essais Proctor	

- ANNEXE IV : Limite de liquidité et plasticité
- ANNEXE V : Détermination de matières premières
- ANNEXE VI : Tambohon' ny Ntaolo
- ANNEXE VII : Terre latéritique de Vontovorona
- ANNEXE VIII : Eprouvettes en latérite
- ANNEXE IX : Particularité de la rupture en compression
- ANNEXE X : La zone latéritique de Vontovorona (image satellite)



<b>Nom</b>	: RABOTOVAO
<b>Prénoms</b>	: Oswald Marie Antonio
<b>Titre</b>	: ETUDE COMPARATIVE DE LA STABILISATION DES LATERITES AVEC LES LIANTS : CIMENTS ET SILICE ACTIVE ADDITIONNEE DE L'UREE
<b>Nombre de pages</b>	: 75
<b>Nombre de tableaux</b>	: 25
<b>Nombre de figures</b>	: 27

### **RESUME**

Le but de cette étude est d'élaborer un procédé de stabilisation des latérites par la silice active et l'urée en remplacement des stabilisants usuels que sont les ciments et la chaux.

La silice active provenant de la cendre de balle de paddy et des latérites soumises à une réduction microbienne dans une étuve à 30°C pendant plus de 15 jours constituent des matériaux de construction dont la résistance à l'état sec est de 57 bars tandis que celle à l'état humide est de 20 bars. Les dites valeurs sont acceptables selon les normes internationales.

Nous avons effectué cette étude en comparant les résultats des essais avec ceux obtenus avec le liant ciment (les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des éprouvettes telles que la résistance à sec, la résistance humide, la porosité, etc....). Les éprouvettes sont caractérisées par leurs bas prix de revient et leur facilité de mise en œuvre qui s'effectue sans cuisson. Cela contribue non seulement à la préservation de notre environnement mais également à la relance de la politique de construction à Madagascar.

**Mots clés :** latérite, silice active, phyllosilicate de fer, résistance à la compression, éprouvette.

### **ABSTRACT**

The purpose of this work is to make a laterite stabilisation process with the iron phyllosilicate instead of the usual stabilisans which are cement and lime

The active silice which results from the ash of paddy bullet and laterites into microbienne reduction in a stearn around 30°C during more than 15 days

They constitute the constitute the building materials which resistance at dry state 57 bars while 20 bars at humid state; This value is in the internationals norme

We have effectuated this work by comparing essays result which those obtained with the cement securing (physical property, chemical and mechanical of eprouvette like the dry resistance, humi resistance, porosite and so an...)

This research is distinguished by its low in come price and its facility of manufacturing which is effectuated without cooking; this may contribute not only to the presentation of our environment but also to the relaunch of building political in.

**Keywords:** laterite, active silice, iron phyllosilicate, dry compression, eprouvette

**Rapporteur** : RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné

**Département** : Génie Chimique