

Université Assane SECK de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département de Chimie



Mémoire de Master

Spécialité: Chimie du Solide et des Matériaux

**CARACTERISATION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DES SOLS  
LATERITIQUES UTILISES EN CONSTRUCTION ROUTIERE : CAS DE LA  
ZONE DU BLOUF**

Présenté par: **Famara DIATTA**

Soutenu publiquement le 10 juillet 2018 devant un jury composé de:

**Président**

Prof. Diouma KOBOR

Enseignant-chercheur, UASZ

**Rapporteur**

Dr. Abdou MBAYE

Enseignant-chercheur, UASZ

**Examineur**

Dr. Saïdou Nourou DIOP

Enseignant-chercheur, UASZ

**Directeur de stage**

Prof. Magatte CAMARA

Enseignant-chercheur, UASZ

**Co-directeur de stage**

M. Mamadou Mbacké DIAW

Ingénieur Géotechnicien, Directeur des travaux, AREZKI

## **DEDICACES**

A mes parents,

pour leur amour et leurs sacrifices énormes consentis à ma formation qu'ils trouvent ici la récompense de leurs sacrifices ;

à mes frères, sœurs et amis qui m'ont soutenu durant tout mon cursus scolaire et universitaire.



## REMERCIEMENTS

Ce présent travail a été réalisé au Laboratoire de Chimie et Physique des Matériaux de l'Université Assane SECK de Ziguinchor, au Laboratoire de l'AREZKI de Ziguinchor et au Laboratoire de l'Université des Sciences de Rennes en France, sous la direction du Pr. Magatte CAMARA et de Monsieur Mamadou Mbacké DIAW.

Au moment où j'achève ce travail, je ne saurais manquer d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont participé à l'aboutissement de ce projet.

D'abord l'UNIQUE et TOUT PUISSANT qui m'a permis de terminer mon cycle de master dans de bonnes conditions.

J'exprime toute ma profonde gratitude au Pr. Magatte CAMARA pour le sujet qui m'a été confié. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance pour cette large contribution à ma formation.

Je voudrais également dire merci à Monsieur Mamadou Mbacké DIAW, Directeur des travaux l'AREZKI et à Monsieur Abou SOW technicien du Laboratoire de l'AREZKI, de m'avoir accepté dans leur Laboratoire avec une parfaite collaboration.

J'exprime ma vive reconnaissance au Pr. Diouma KOBOR qui a accepté de Présider ce Jury, au Dr. Abdou MBAYE d'avoir accepté aussi d'être le rapporteur de ce travail ainsi que Dr. Saïdou Nourou DIOP d'avoir accepté d'être membre du jury.

Ma reconnaissance et mes remerciements vont à l'endroit de Marie Rose MENDY, pour avoir bien orienté et apporté des remarques pertinentes à ce travail.

Un merci spécial à tous les enseignants du département de chimie et de physique de l'Université Assane SECK de Ziguinchor. Les connaissances acquises de vos différents enseignements, m'ont été d'une aide précieuse au cours de la rédaction de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les étudiants du département de chimie plus particulièrement à mes camarades Malick DIEDHIOU, Penda Seydi DEME, Albert DIATTA, Alphousseyni DIALLO, Ngara DIOUF, Khadim MBOUP, Mamadou Lamine SAGNA, Moussa TOURE et Papalaye DIEDHIOU.

Je remercie toute l'équipe du Laboratoire de Chimie et Physique des Matériaux de l'Université Assane SECK de Ziguinchor particulièrement les Doctorants Oumar SAMBOU, Albert M.

BADIANE, Ibrahima GOUDIABY, Yancouba KONTE, Malamine MANSALY, Armel DIATTA et au Dr. INSA BADIANE pour avoir contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

Merci à toute l'équipe du Laboratoire de l'AREZKI spécialement à Aliou DIA, Mamadiank DIAMANKA, Cheikh SOW, Abdourahoumane KANDE, Nabou SAMB.

Je tiens aussi à remercier mon grand frère Seckou DIATTA, sa femme Safiétou DIEDHIOU, Bacary DIATTA et mon tuteur Ibrahima SAMBOU.

## ABREVIATIONS

A : Spectre

AGEROUTE: *Agence des travaux et de Gestion des Routes;*

ATD::*Analyse Thermique Différentielle;*

ATG: *Analyse Thermogravimétrique;*

B : Spectre

BCI: *Budget Consolidé d'Investissement;*

BP: *Befor Present;*

CBR: *California Bearing Ratio;*

CEBTP: *Centre Experimental du Batiment et des Travaux Publics;*

C.E.T.E: *Centre d'Etude Technique de l'Equipement;*

CPT: *Cahier des Perspectives Techniques;*

DRX: *Diffraction des Rayonx X;*

ECD: *Echantillon Carrière Diendième;*

EDX: *Energie Dispersive Spectrométrie;*

GMTR: *Guide Marocain pour le Terrassement Routier;*

H: *Hématite;*

ICDD: *International Centre for Diffraction Data*

$I_p$ : *Indice de Plasticité;*

IPI: *Indice Portant Immédiat;*

IR: *Infrarouge;*

K: *Kaolinite;*

MEB: *Microscope Electronique à Balayage;*

Q: *Quartz;*

SOCOCIM: *Société Commerciale du Ciment (Sénégal);*

$W_1$ : *Limite de Liquidité;*

$W_p$ : *Limite de Plasticité.*

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Situation géographique du Blouf (tronçon Thionck-Essyl Tendième) [3]</i> .....	4
<i>Figure 2: Végétation de la zone du Blouf [3]</i> .....	5
<i>Figure 3: Exemple de sol latéritique [13]</i> .....	7
<i>Figure 3: Exemple de sol latéritique (Bohi 2006)</i> .....	7
<i>Figure 4: Coupe type d'une chaussée (Source : USIRF www.planete-tp: coupe type chaussée)</i> .....	9
<i>Figure 5: Récapitulatif des matériaux utilisés sur l'axe Thionck-Essyl Tendième</i> .....	13
<i>Figure 6: Carrière de Diendième</i> .....	14
<i>Figure 7: Granulométrie (source CETE)</i> .....	15
<i>Figure 8: Illustration des états du sol (Source CETE)</i> .....	16
<i>Figure 9 : Réalisation de la rainure (source CETE)</i> .....	16
<i>Figure 10 : Réalisation du rouleau (source CETE)</i> .....	17
<i>Figure 11: Moules protor et Presse (source CETE)</i> .....	18
<i>Figure 12: Essai CBR (Californian bearing ratio) (source CETE)</i> .....	19
<i>Figure 13: Courbe granulométrique du matériau cru ECD</i> .....	25
<i>Figure 14: Classification du sol de la carrière de Diendième</i> .....	26
<i>Figure 15: Courbes (a :b) essai protor modifié ECD</i> .....	27
<i>Figure 16: Courbes (c ;d) CBR ECD</i> .....	28
<i>Figure 17: Diffractogramme de l'échantillon de la carrière de Diendième</i> .....	29
<i>Figure 18 : Morphologie de l'échantillon ECD</i> .....	30
<i>Figure 19: Spectroscopie infrarouge ECD</i> .....	31
<i>Figure 20: Thermogramme d'ATG/ATD ECD</i> .....	32
<i>Figure 21: Courbe de limite de liquidité ECD</i> .....	38
<i>Figure 22: Courbes (e ;f) de poinçonnement du CBR ECD</i> .....	38
<i>Figure 23: Photographie du diffractomètre sur poudre</i> .....	41
<i>Figure 24: Schéma de la diffraction des rayons X</i> .....	42
<i>Figure 25: Photographie d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB)</i> .....	42
<i>Figure 26: Photo appareil Infrarouge</i> .....	43

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Pluviométrie annuelle de la station météo de Ziguinchor poste de Thionck-Essyl</i>	5
<i>Tableau 2: Pourcentage de tamis</i>	25
<i>Tableau 3: Limites d'Atterberg du matériau cru ECD</i>	26
<i>Tableau 4: Pourcentage (%) des éléments chimiques de l'ECD</i>	29
<i>Tableau 5: Températures correspondant aux départs et pertes de masse liées aux transformations chimiques lors de la cuisson</i>	31
<i>Tableau 6: Granulométrie ECD</i>	37
<i>Tableau 7: CBR latérite crue ECD</i>	38
<i>Tableau 8: CBR latérite améliorée</i>	38
<i>Tableau 9: Résistances sol ciment ECD</i>	39
<i>Tableau 10: Caractéristiques des matériaux selon le CPT</i>	39
<i>Tableau 11: Pourcentage (%) des éléments chimiques de l'échantillon ECD</i>	40

## *SOMMAIRE:*

<b>INTRODUCTION</b> -----	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I: GENERALITES</b> -----	<b>2</b>
<b>I.1. Présentation du projet et de la zone d'étude</b> -----	<b>3</b>
I.1.1. Présentation du projet-----	3
I.1.2. Situation géographique-----	3
I.1.3. Cadre géologique-----	5
<b>I.2. Généralités sur les latérites</b> -----	<b>6</b>
I.1. Définitions des latérites-----	6
I.2. Différents types de sols latéritiques-----	7
I.2.1. Sols ferrugineux-----	7
I.2.2. Sols ferralitiques-----	8
I.2.3. Ferrisols-----	8
I.3. Utilisation des latérites pour la construction routière-----	8
I.4. Utilisation du ciment pour la construction routière-----	10
<b>CHAPITRE II: MATERIAUX ETUDIES ET METHODES ANALYTIQUES</b> -----	<b>12</b>
<b>II.1. Localisation de la Carrière</b> -----	<b>13</b>
<b>II.2. Prélèvement et préparation des échantillons</b> -----	<b>14</b>
<b>II.3. Méthodes analytiques</b> -----	<b>14</b>
II.3.1. Analyse géotechnique-----	14
II.3.1.1. Analyse granulométrique-----	15
II.3.1.2. Limites d'Atterberg-----	16
II.3.1.3. Essai Proctor-----	18
II.3.1.4. Essai CBR (Californian Bearing Ratio)-----	19
II.3.2. Diffraction des Rayons X (DRX)-----	20
II.3.3. Microscope Électronique à Balayage (MEB)-----	21
II.3.4. Spectroscopie infrarouge (IR)-----	21
II.3.5. Analyses Thermiques (ATD/ATG)-----	22
<b>CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS</b> -----	<b>24</b>
<b>III.1. Analyse des paramètres d'identification géotechnique</b> -----	<b>25</b>
<b>III.2. Diffraction des Rayons X</b> -----	<b>28</b>
<b>III.3. Microscope Électronique à Balayage (MEB) Couplé à EDX</b> -----	<b>29</b>
<b>III.4. Analyse par spectroscopie (IR)</b> -----	<b>30</b>



<b>III.5. Analyses Thermiques (ATD /ATG)</b> -----	<b>31</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> -----	<b>33</b>
<b>Références bibliographiques</b> -----	<b>34</b>
<b>ANNEXES</b> -----	<b>37</b>
<b>RESUME</b> -----	<b>44</b>

## **INTRODUCTION**

La stratégie développée par le gouvernement dans le cadre de la Lettre de Politique Sectorielle des Transports (LPST) est de désenclaver toutes les régions du Sénégal et de résorber progressivement en priorité le déficit d'entretien du réseau routier. C'est dans ce cadre que la boucle du Blouf (Départementale 200) a été choisie. En effet, le développement de cette zone est freiné à cause de l'état de dégradation avancé de la route. Aussi, malgré les efforts fournis dans les travaux d'entretien, le Gouvernement a décidé de réhabiliter le tronçon de la boucle du Blouf qui fait partie intégrante du Programme de Relance des Activités Economiques en Casamance.

Au Sénégal, les sols latéritiques sont utilisés en corps de chaussées et les recommandations du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) sont utilisées comme critère de sélection de ces matériaux [1]. Ce travail vise à contribuer à l'identification et à la caractérisation des sols latéritiques utilisés dans le projet de réhabilitation de la route du Blouf: tronçon Thionck-Essyl Tendième sur 43 km. Ce travail contribue également à comprendre l'origine des microfissures.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres:

- Les généralités;
- Les matériaux étudiés et les méthodes analytiques;
- Les résultats et discussions.

Enfin une conclusion dans laquelle nous évoquerons quelques perspectives dans le cadre d'un développement ultérieur de ce travail qui sera faite.

# **CHAPITRE I: GENERALITES**

## **I.1. Présentation du projet et de la zone d'étude**

### **I.1.1. Présentation du projet**

L'Agence des travaux et de Gestion des Routes Sénégalaise (AGEROUTE) a obtenu du BCI un financement de 9 000 000 000 F CFA, par le biais du ministère des infrastructures des transports terrestres et du désanclavement pour les travaux de réparation du tronçon Tendième Thionck-Essyl sur 43 km [2]. Le projet a été signé en septembre 2015 et la construction de la route est assurée par l'entreprise AREZKI, sous le contrôle d'AGEROUTE. Ce financement est destiné à la mise en oeuvre du programme de développement intégré des régions Sud du pays. Le projet consiste à la réparation du tronçon Tendième Thionck-Essyl situé dans la région de Ziguinchor.

### **I.1.2. Situation géographique**

Le tronçon Tendième Thionck-Essyl est situé dans la zone du Blouf. C'est la Départementale 200 ou Boucle du Blouf traversée par une région aux caractères physiques et humains monotones. Le Blouf correspondant administrativement à l'Arrondissement de Tendouck, a des caractères subguinéens [3]. Du point de vue humain, c'est une région homogène exclusivement habitée par des Diolas. Le Blouf est limité au Nord par le Baako (dans le Diouloulou), au Sud par le département de Ziguinchor, à l'Est par la commune de Bignona et à l'Ouest par un ensemble d'estuaires qui débouchent un peu plus loin sur l'Océan Atlantique (Figure 1). La traduction du mot Blouf paraît complexe parce qu'elle ne fait pas l'unanimité d'un village à l'autre. D'après certains habitants du Blouf, ce nom serait dérivé de « oulouf » c'est-à-dire les non initiés. C'est à partir de ce nom qu'on parle de la boucle du Blouf comme on dirait la route du Baol ou la route du Fouta [3].



*Figure 1: Situation géographique du Blouf (tronçon Thionck-Essyl Tendième) [3]*

#### **a-Le relief**

Sur le plan structural le Blouf est une région qui se situe à 12,47° de latitude Nord et 16,30° de longitude Ouest [3;4]. Nombreuses vallées sont arrosées par une multitude de cours d'eau pour la plupart envahis par la mer. La partie haute du Blouf correspond à l'Est notamment Diégoune, Djimande, Kagnobon jusqu'à Kartiack est une zone caractérisée par d'importantes latérites.

#### **b-Le climat**

Le climat du Blouf est dans son ensemble subguinéen. Cependant on note quelques variations entre l'Est chaud et moyen humide (c'est la zone de Diégoune, Djimande, Dianki, Bessire, etc.) et l'Ouest plus humide et moins chaud (la bande de terre depuis Thiobon jusqu'à Affiniam) [4].

Les températures moyennes en période de chaleur varient entre 26°C le matin et 34°C dans la zone côtière alors que dans la zone continentale elles sont de l'ordre de 28°C et 36°C. En période de froid on constate que l'Est est plus frais le matin et la nuit mais en début d'après-midi on note des températures qui peuvent monter jusqu'à plus de 30°C [4]. Les cumuls pluviométriques d'après les données de la station de la météo de Ziguinchor poste de Thionck-Essyl, peuvent aller jusqu'à 4000 mm en moyenne par année mais on note des différences entre les années.

*Tableau 1: Pluviométrie annuelle de la station météo de Ziguinchor poste de Thionck-Essyl*

Station de Thionck-Essyl	2015	2016	2017
Pluviométrie moyenne (mm)	1807,5	1454,1	4204,2

### **c-La végétation**

On note une végétation abondante dans le Blouf en raison des conditions climatiques plus ou moins favorables et de l'hydrographie. Les espèces y sont variées; des arbustes aux grands arbres: *elaeis guinéensis* (palmier à huile) sous forme de forêt depuis Thiobon jusqu'à Affiniam, *parkia biglobosa* (nééré) un peu partout mais qui connaît aujourd'hui les effets de la déforestation (Figure 2). La mangrove est représentée par des espèces comme le *rhizophora racemosa* et *avicennia africana*. Les arbustes sont représentés par *combretum micrantum* (kinkéliba) et *guiera senegalensis* (nguer) [4].



*Figure 2: Végétation de la zone du Blouf [3]*

### **I.3. Cadre géologique**

Les événements géologiques sont d'une grande importance dans les projets de construction et de rénovation des routes. Il est primordial d'identifier les contraintes majeures liées à la nature, la structure, la morphologie, et aux évolutions actives des terrains. Le Blouf fait parti de la basse Casamance, qui a subi une longue histoire sédimentaire du Jurassique au Miocène [5]. Le golfe marin de Basse Casamance est comblé très récemment des cordons littoraux vers 1500 BP. La

morphologie actuelle est peu accidentée, le point culminant ne dépassant pas 36 m. Elle est constituée de bas-fonds, de versants et de plateaux. On distingue:

- Les formations littorales et deltaïques qui procèdent la sédimentation fluviomarine ou littorale qui sont constituées par les dunes littorales, les cordons littoraux, les types de vasières et de mangroves, les deltas et cuvettes de décantation du fleuve Sénégal et celles de la Casamance.
- Les formations alluvio-colluviales regroupant les vallées des fleuves ainsi que tout le système de drainage du pays [5].

## **I.2.. Généralités sur les latérites**

### **I.2.1. Définitions des latérites**

Ethymologiquement le mot latérite vient du latin « later » qui veut dire brique. Le terme a été suggéré pour la première fois par le géologue Buchanan en 1807 dans le compte-rendu de son voyage à Madras, à travers des provinces du Mysore, Kanabar et Malabar pour désigner un matériau ferrugineux utilisé en Inde pour confectionner des briques de terre destinées à la construction [6]. C'est un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer, de coloration rouge et jaune.

La définition du mot latérite ne fait pas l'unanimité chez les auteurs.

Ainsi, Rinne, Bertrand et Orcel en 1949 définissent les latérites comme des argiles et hydroxydes de fer et d'aluminium [6].

Routhier en 1963 qualifie la latérite à un mélange d'hydroxydes de fer et d'aluminium [6].

Vatan quant à lui, fait appel à la couleur, notamment rouge brique, qui viendrait du mot latin « later », terme plutôt utilitaire [6].

Maillot en 1963 utilise le terme « latérite » pour désigner l'ensemble des produits d'altération de la zone intertropicale [6].

Aujourd'hui, la définition qui semble faire l'unanimité chez les auteurs est celle de Schellman en 1986 [7] car elle s'appuie sur les conditions d'altération de la roche mère et la composition minéralogique. Selon lui les latérites sont des produits d'intense altération météorique et sont constitués d'un assemblage minéral qui peut être fait de goéthite, d'hématite, d'hydroxyde d'aluminium, de kaolinite et de quartz (Figure 3).





*Figure 3: Exemple de sol latéritique [13]*

## **I.2.2. Les différents types de sols latéritiques**

### **I.2.2.1. Les sols ferrugineux**

Ces sols se forment dans les régions à climat tropical avec une longue saison sèche. La végétation est de type savane et le drainage est médiocre ou mauvais. Pendant la saison sèche, les silicates, les oxydes de fer et d'aluminium libérés pendant la dissolution de la roche mère en saison de pluie remontent grâce à l'intense évaporation et le réhaussement du niveau de la nappe entraînant une migration des complexes ferro-siliciques [8]. À l'approche de la surface, leur déshydratation progressive provoque en définitif la cristallisation d'oxydes sous forme d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) responsables de la couleur rouge brique des latérites.

Les sols ferrugineux se caractérisent par:

- une forte proportion de nodules ayant un ciment ferrugineux,
- des éléments fins qui contiennent assez de matériaux argileux,
- un indice de plasticité généralement faible ( $< 25$ ),
- l'abondance de ciment ferrugineux en plus des nodules, qui peut aboutir à la formation d'une cuirasse dure et continue [8].



### **I.2.2.2. Les sols ferrallitiques**

Ils se forment en zone tropicale humide (pluviométrie >1500 mm, température moyenne >25° C) sans saison sèche nettement marquée. La végétation est de type forêt et le drainage est médiocre. Le processus est continue et irréversible [8]. Il n'y a pas de migration vers le haut. Les réactions d'hydrolyse ne sont pas les mêmes qu'en zone sèche, l'altération est plus rapide et plus complexe, les couches latéritisées sont plus épaisses. Tous les minéraux primaires excepté le quartz sont hydrolysés dans des conditions neutres, et une bonne partie de la silice et des bases sont mises en solution. Les sols ferrallitiques se caractérisent par:

- une assez importante proportion de nodules avec rarement un cuirassement,
- les éléments fins comprenant une forte proportion d'argile,
- l'indice de plasticité est en général élevé (> 25).

### **I.2.2.3. Les ferrisols**

Ce sont des sols ressemblant aux sols ferrallitiques en ce sens qu'on les rencontre sous les climats les plus humides avec des profils d'altération qui ne présentent pas d'hétérogénéité. Ces sols ne se forment qu'en profondeur à cause de l'activité des phénomènes d'érosion et sont décrits comme une classe intermédiaire entre les deux précédentes par l'étude des matériaux indurés qui cimentent les matériaux préexistants [8].

### **I.2.3. Utilisation des latérites pour la construction routière**

Les latérites sont utilisées en technique routière pour la réalisation des routes en terre et de chaussées revêtues. Selon leur qualité, elles servent de couche de fondation ou de couche de base. On rencontre différents matériaux latéritiques qui sont:

- Les sols fins latéritiques;
- Les graves et brèches latéritiques;
- Les blocs et brèches latéritiques.

Les sols fins latéritiques sont utilisés pour les terrassements, les blocs et débris de carapace sont rarement utilisés en couche de chaussée soit parce que cela nécessite une mise en œuvre manuelle et donnent des résultats médiocres, soit nécessite un broyage mécanique couteux et peu satisfaisant. Le matériau le plus utilisé est celui de la deuxième catégorie, graveleux latéritiques et brèches latéritiques, dont l'emploi selon la qualité va de la couche de forme à la couche de

base (Figure 4) utilisé naturel ou amélioré au ciment ou à la chaux et suivant les réglementations fixées par pays [9].

La structure d'une chaussée dépend de son dimensionnement qui est déterminée par un logiciel :

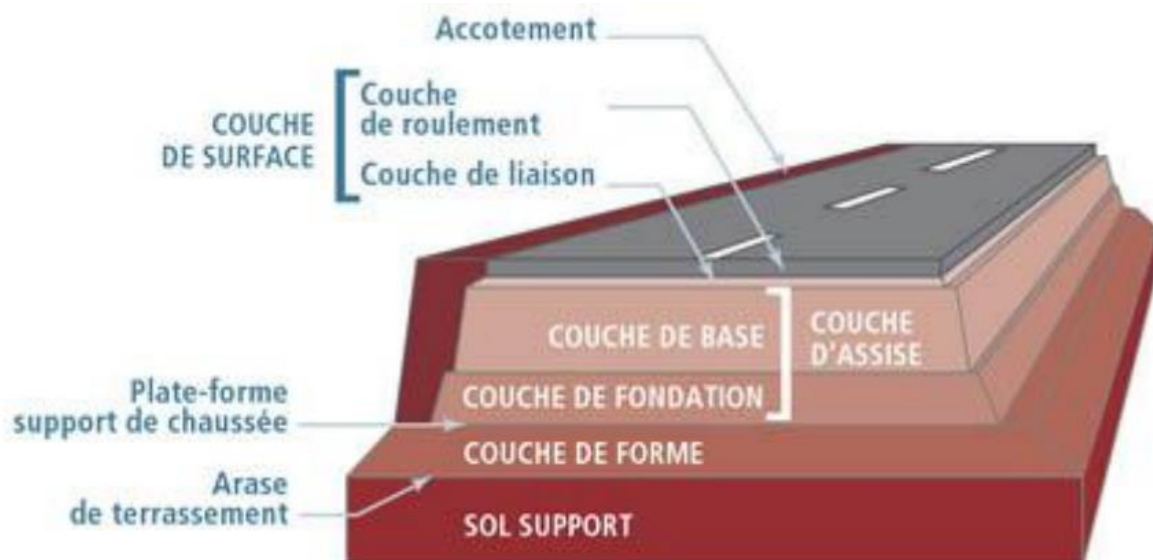
- les harges (le trafic des véhucules de poids lourds selon la durée de vie)
- le type de matériau à choisir (prix transport, sable, latérite, grave concassé, chaussée à béton, pavé).
- la durée de vie varie : 10 ans, 15 ans ; 20 ans.
- l'épaisseur de chaque couche (couche base et de fondation)

Les types de chaussées selon la qualité :

- chaussée à béton à béton (500000000f)
- Chaussée à grave butimé (grave basalte butimé)
- Chaussée à grave armé (grave basaltique)
- Chaussée à béton butimé (granulat basalte butime)
- Chaussée à latérite améliorée au ciment (latérite et ciment).

Les prix des matériaux sont :

- Basalte 25000f/km
- Ciment 66000f/t
- Butime 45000f/t



**Figure 4:** Coupe type d'une chaussée (Source : USIRF [www.planete-tp.com](http://www.planete-tp.com): coupe type chaussée)

#### I.2.4. Utilisation du ciment pour la construction routière

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui, finement moulu et gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Les équations (1) et (2) représentent les réactions chimiques produites durant l'hydratation et donnant les composés hydratés du matériau [10].



Les hydrates principalement formés du ciment Portland sont les silicates de calcium hydratés de la forme  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  notés « C-S-H » ou appelé gel de C-S-H dû à son faible degré de cristallisation. Ces C-S-H sont à l'origine du pouvoir adhérent de la pâte de ciment et améliorent sa résistance. En effet, les C-S-H présentent une grande surface spécifique et une porosité d'environ 28 % [11]. Les surfaces des C-S-H sont de plus très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment. En plus de ce gel, la pâte de ciment contient des cristaux grossiers comme la Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  symbolisée « CH » ayant peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique et diminuant la durée du béton par sa solubilité dans l'eau. La réaction d'hydratation du ciment continue et après deux heures, il y a formation des cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH). Ces composés connus sous le label de tobermorite [11] lient les composantes du mélange. Ces cristaux se développent et contribuent de façon notable à l'amélioration des propriétés mécaniques.

#### I.2.5. Amélioration au ciment

Le ciment incorporé à un sol latéritique développe un réseau de liaisons entre les grains qui les composent. La réaction d'hydratation présente l'avantage d'une évolution rapide, ce qui permet d'obtenir les résistances mécaniques nécessaires dans un délai court [11]. La réaction avec le matériau argileux provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats du matériau. Une latérite améliorée au ciment présente certains inconvénients :

- mise en œuvre délicate à cause du temps de prise du ciment;
- susceptibilité à la fissuration par retrait;
- difficulté des réparations et des reprises éventuelles, une fois la prise du ciment terminée et le compactage effectué ;

- le délai très court de mise en œuvre à moins de disposer d'un retardateur de prise;
- l'épaisseur minimale que doit prévoir le dimensionnement.

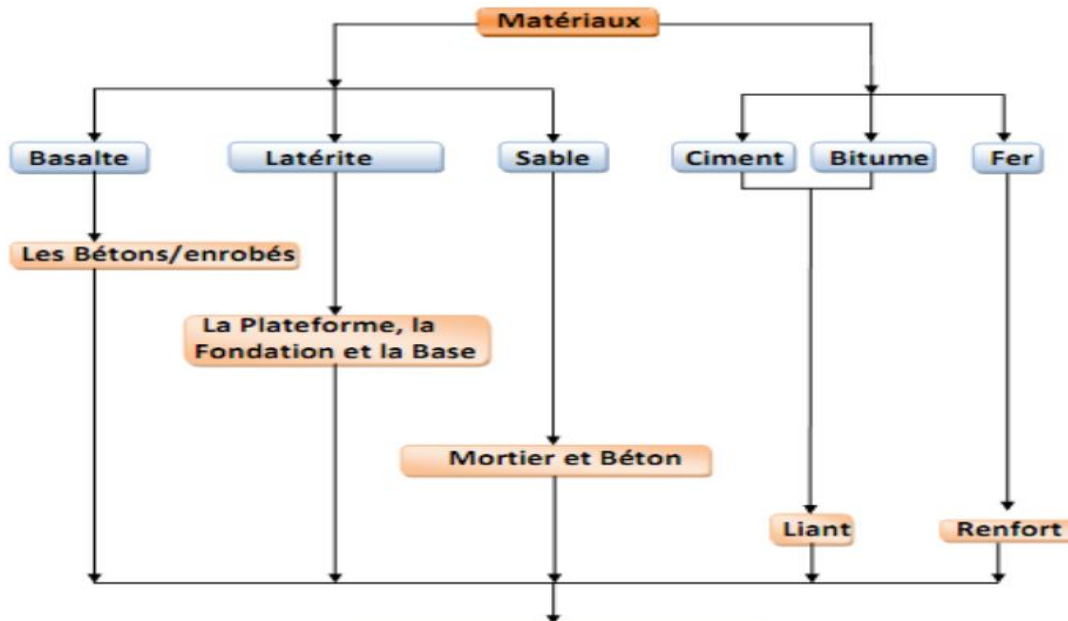
Dans le cadre de notre étude le type de ciment utilisé dans le chantier est le ciment SOCOCIM cem II 32,5 N.

# **CHAPITRE II: MATERIAUX ETUDIES ET METHODES ANALYTIQUES**

Ce chapitre présente l'origine du matériau servant de support aux travaux menés au cours de ce stage. Il présente également la description des différentes méthodes employées pour la caractérisation du matériau latéritique.

## II.1. Localisation de la Carrière

Les matériaux mis en oeuvre en couche de base et de fondation sur le tronçon Thionck-Essyl Tendième proviennent de la carrière de Diendième. Les principaux matériaux utilisés sur cette route sont: la latérite, les granulats de basalte, le ciment, le sable, le bitume et le fer (Figure 6).



*Figure 5: Récapitulatif des matériaux utilisés sur l'axe Thionck-Essyl Tendième*

Les graveleux latéritiques utilisés en technique routière se trouvent dans la nature sous forme d'une nappe d'épaisseur variable comprise approximativement entre 0,20 et 1 m, selon la région, recouverte d'une couche de végétation ou de débris de carapace [12]. Dans notre cas d'étude, les analyses ont été effectuées sur des prélèvements au niveau de la carrière de Diendième (Figure 7) située dans la région de Sédhiou département de Bounkiling.



*Figure 6: Carrière de Diendième*

## **II.2. Prélèvement et préparation des échantillons**

Le prélèvement est une étape importante dans l'étude des matériaux. Il faut veiller à prélever des échantillons représentatifs de la carrière. L'échantillon a été prélevé dans 4 points différents et est mis dans un sac de 50 kg étiqueté puis acheminé au Laboratoire de l'AREZKI. Il passe par l'échantillonneur pour être homogénéisé afin de prélever le matériau représentatif de toute la carrière. Un échantillon a été donc envoyé en France au Laboratoire de l'Université des Sciences de Rennes pour les besoins de la caractérisation chimique et minéralogique (DRX; MEB-EDX; IR et ATD/ATG).

## **II.3. Méthodes analytiques**

L'analyse géotechnique (granulométrie, limites d'Atterberg, essai proctor et essai CBR) a été réalisée au laboratoire de l'AREZKI de Ziguinchor tandis que la DRX, MEB-EDX, IR et ATD/ATG ont été faites au Laboratoire de l'Université des Sciences de Rennes en France.

### **II.3.1. Analyse géotechnique**

La caractérisation géotechnique de notre matériau est procédée par une opération dite échantillonnage dont le but est de prélever une fraction d'un matériau telle que la partie prélevée soit représentative de l'ensemble de la masse. Tous les essais à réaliser dépendent du soin apporté à la réalisation de l'échantillonnage. Il peut s'effectuer de deux manières différentes:

- par quartage lorsque la quantité de matériau est importante

- au moyen d'échantillonneurs lorsque la quantité du matériau est peu importante [13].

### II.3.1.1. Analyse granulométrique

La granulométrie est la distribution dimensionnelle d'un matériau donné. La méthode utilisée est celle par tamis à sec après lavage (Figure 8) [14].

#### Principe

L'essai consiste à tamiser au moyen d'une série de tamis normalisés à mailles carrées, un échantillon représentatif d'un matériau donné. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

#### ► Mode opératoire

L'échantillon soumis à l'essai est préalablement séché à l'étuve pendant au moins quatre heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Il est ensuite lavé au robinet au tamis de  $80 \mu\text{m}$ , qui représente le plus petit diamètre des tamis. Le lavage est repris plusieurs fois, jusqu'à ce que l'eau de lavage devienne claire. Ensuite le matériau humide est remis à l'étuve pour un séchage pendant au moins vingt quatre heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Après cela, le matériau sec est pesé à l'aide d'une balance, afin d'obtenir la masse de l'échantillon sec. Le matériau est versé dans une colonne de tamis constituée par l'emboîtement de tamis à mailles carrées, classés de haut en bas dans l'ordre de maille décroissante. Cette colonne est agitée mécaniquement, puis les tamis sont repris un à un en commençant par celui qui a le plus grand diamètre. Le refus des tamis est pesé de façon cumulée, en commençant par celui ayant le plus grand diamètre.

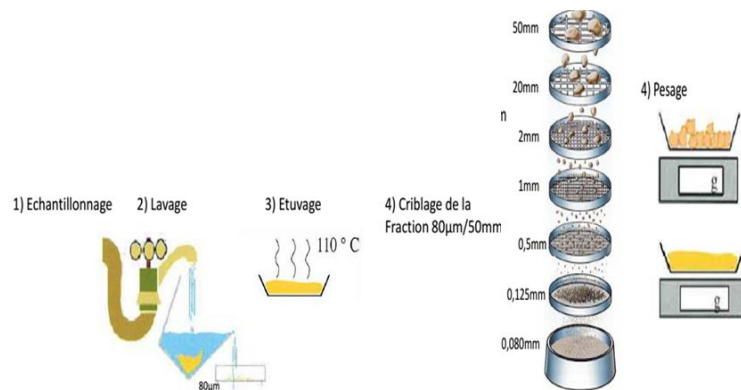


Figure 7: Granulométrie (source CETE)



### II.3.1.2. Limites d'Atterberg

Les limites sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre:

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité:  $W_L$ )
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité:  $W_P$ ) (Figure 9).

Ces limites ont pour valeur des teneurs en eau, exprimées en pourcentage du poids du matériau.

La différence  $I_p = W_L - W_P$  qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante: c'est l'indice de plasticité.

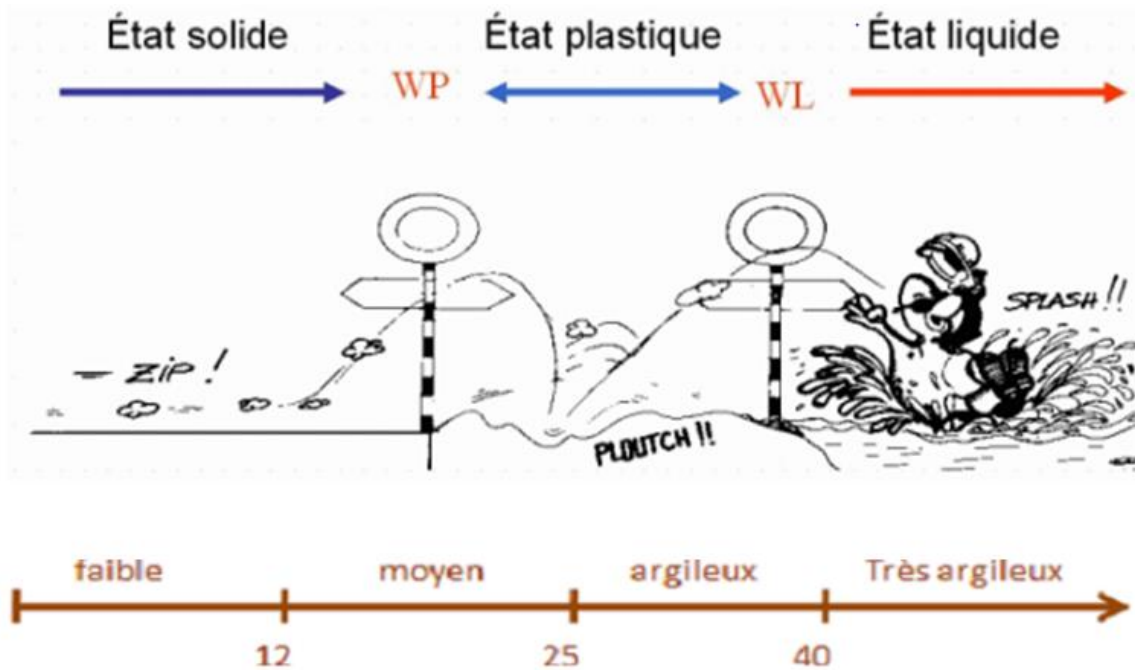


Figure 8: Illustration des états du sol (Source CETE)

#### Principe

L'essai s'effectue en deux phases. La première consiste en la recherche de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande; la deuxième phase consiste en la recherche de la limite de plasticité par la formation de rouleaux de 3 mm de diamètre [15].

#### ▲ Limite de liquidité



Figure9: Réalisation de la rainure (source CETE)

### ► Préparation de l'échantillon

L'essai s'effectue sur une quantité suffisante de matériau tamisé à 0,4 mm pour obtenir 150 à 200 mg de mortier. Avant le tamisage, le matériau est imbibé pendant au moins 12 heures. Après décantation de l'eau, on siphonne avec précaution, puis on soumet l'eau excédentaire à l'évaporation. On recueille ensuite les éléments inférieurs à 0,4 mm de diamètre à l'état pâteux. C'est cette pâte qui servira à l'exécution de l'essai.

### ■ Exécution de l'essai

La recherche de la limite de liquidité se fait à l'aide de l'appareil de Casagrande. La coupelle est remplie avec la pâte. A l'aide de l'outil à rainurer, on tient perpendiculairement la partie biseautée de l'outil vers l'avant de l'appareil, et divise la pâte en deux. La coupelle fixée sur l'appareil est soumise, à l'aide de la manivelle, à une série de chocs réguliers. On note le nombre de coups nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur de 1 cm. On prélève deux échantillons du matériau de part et d'autre de la rainure (Figure 10) dans des verres de montre. On fait ainsi quatre à cinq points à des teneurs en eau de plus en plus faibles. La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture de 1 cm de lèvres de la rainure après 25 chocs.

### ▲ Limite de plasticité



*Figure 10: Réalisation du rouleau (source CETE)*

La recherche de la limite de plasticité se fait après celle de la limite de liquidité. On dessèche l'échantillon en le malaxant et en l'étalant. On forme une boulette de l'échantillon et à l'aide de la main, on roule l'échantillon de façon à former un rouleau que l'on amincit progressivement jusqu'à ce qu'il ait atteint 3 mm de diamètre.

La limite de plasticité est atteinte quand le rouleau de 3 mm (Figure 11) se fissure en son milieu quand on le soulève de 1 à 2 cm. L'opération est répétée immédiatement après le premier essai. On pèse les deux rouleaux issus des deux essais, et on fait la moyenne des teneurs en eau [15].

### II.3.1.3. Essai Proctor

L'essai Proctor consiste à compacter dans des moules normalisés, avec une énergie de compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes teneurs en eau pour en déduire la teneur en eau optimale et la densité sèche maximum correspondante (Figure 12). On distingue:

- L'essai Proctor Normal avec une énergie de compactage modérée pour les remblais en terre (barrages en terre, digues par exemples).
- L'essai Proctor Modifié avec une énergie de compactage intense pour les couches de chaussées et les pistes. Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants. C'est l'essai Proctor Modifié qui est utilisé dans cette présente étude [16].



*Figure 11: Moules proctor et Presse (source CETE)*

#### Principe

Le principe de l'essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau d'une manière générale, cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique sèche, elle est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces 2 valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor Modifié.

### ► Préparation de l'échantillon

Le matériau est échantillonné dans cinq récipients pour l'exécution de l'essai. La masse du matériau dans chaque récipient doit être comprise entre 5 kg et 15 kg. Les matériaux sont alors mouillés à des teneurs en eau différentes. Les teneurs en eau doivent évoluer de 2 % [15].

### ■ Exécution de l'essai

Il faut d'abord solidariser le moule, l'embraser et le rehausser, lubrifier avec de l'huile les parois intérieures des moules et placer le disque d'espacement au fond du moule. Ensuite, il faut introduire le matériau dans le moule pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au cinquième de la hauteur du moule. On procède au compactage en appliquant 56 coups à raison de huit séquences. Après le compactage de la dernière couche, il faut retirer la rehausse, et raser soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Peser l'ensemble du moule avec le matériau, démouler le matériau et déterminer les teneurs en eau du matériau.

#### II.3.1.4. Essai CBR (Californian Bearing Ratio)

L'essai CBR est un essai de portance, c'est-à-dire qu'il permet de mesurer l'aptitude des matériaux à supporter les charges (Figure 13). On mesure trois types d'indice en fonction des buts fixés:

- l'indice Portant immédiat (IPI): Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux;
- l'indice C.B.R. immédiat: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau.
- l'indice C.B.R après immersion: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique



Figure 12: Essai CBR (Californian bearing ratio) (source CETE)

## **Principe**

L'essai CBR est donc de reproduire le processus de l'essai protor en compactant le matériau dans les mêmes conditions puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante [16].

### **► Préparation de l'échantillon**

Le matériau utilisé pour l'essai CBR est tamisé au tamis de 20 mm et doit avoir une masse d'environ 20 kg. Le matériau est mouillé à la teneur en eau optimum déterminée à partir de l'essai Proctor.

### **■ Exécution de l'essai**

Il faut préparer trois moules CBR, ensuite les solidariser, les embraser, et les rehausser, lubrifier les parois intérieures du moule et placer le disque d'espacement au fond du moule.

Après le compactage de chaque moule à l'aide d'une dame protor modifié, le premier moule est compacté à 10 coups, le deuxième à 25 coups et le troisième à 55 coups. Il faut retirer la rehausse puis araser soigneusement du centre vers la périphérie. Ensuite il faut peser au gramme près l'ensemble des moules du matériau. Après la pesée, retourner les moules puis les fixer à la plaque de base et déposer les surcharges dans chaque moule. Imbiber les trois moules pendant quatre jours et après l'imbibition on procède à l'essai de poinçonnement. Placer l'ensemble des plaques de base sur la presse, en position centrée par rapport au piston. Le poinçonnement se fait à vitesse constante et on note les efforts de poinçonnement correspondant à des valeurs d'enfoncements prédéfinies par la norme [16]. Une fiche d'étalonnage permet de lire la force correspondant à la lecture faite sur la presse. On procède ainsi de la même manière pour chaque moule.

## **II.3.2. Diffraction des Rayons X (DRX)**

### **Présentation de la méthode**

Pour déterminer la composition minéralogique de notre échantillon provenant du site, nous avons tout d'abord effectué des analyses de diffractométrie des rayons X (DRX). Les 7 échantillons ont été préalablement broyés à une granulométrie  $< 80 \mu\text{m}$  [17] puis séchés à l'air.

L'étude de l'échantillon du sol latéritique par diffraction des rayons X a permis:

La détermination des caractéristiques de la maille cristalline élémentaire (distances interréticulaires) des minéraux contenus dans l'échantillon latéritique. La détermination de la distance interréticulaire  $d$  permet ainsi l'identification de la phase cristalline correspondant à

chaque minéral contenu dans l'échantillon. Il faut noter que l'analyse de l'échantillon par la diffractométrie aux rayons X est principalement qualitative la connaissance du matériau de l'utilisateur étant le principal atout pour une analyse beaucoup plus pertinente.

Les différentes phases cristallines ainsi retrouvées ont été quantifiées par la méthode de Riedvelt. Celle-ci consiste à simuler un modèle de diffractogramme à partir de la base de données de l'ICDD (International Centre for Diffraction Data) et l'ajuster ainsi graduellement au modèle le plus proche du diffractogramme de l'échantillon analysé. La composition chimique de la simulation la plus proche du diffractogramme de l'échantillon testé est considérée comme étant la composition chimique de celui-ci. Au sens rigoureux du terme, il s'agit plutôt d'une approximation des phases minérales contenues dans les échantillons de sol latéritique. La méthode reste donc semi- quantitative.

Le principe de la méthode est détaillé en Annexe 2.

### **II.3.3. Microscopie Électronique à Balayage**

L'étude de la microstructure et de la composition chimique des sols latéritiques a été possible grâce à l'imagerie électronique. Celle-ci donne accès à davantage de détails que la microscopie optique. La microscopie électronique à balayage permet de réaliser un examen très rapide et détaillé des phases minérales ainsi que leur répartition. Il permet également de faire ressortir les différentes familles de pores caractérisant les échantillons de sol latéritique.

Le principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage est détaillé en Annexe 3.

Pour déterminer les éléments présents dans l'échantillon, la microscopie électronique à balayage couplée à EDX a été utilisée afin d'obtenir les concentrations des éléments présents dans le matériau avec des agrandissements de 500, 200, et 100  $\mu\text{m}$  [17;18].

### **II.3.4. Spectroscopie infrarouge**

La spectroscopie infrarouge est devenue une technique essentielle pour l'étude des sols. Elle complète les résultats des analyses chimiques, des analyses thermiques et des diffractions des rayons X. On distingue en effet trois domaines infrarouges :

- le proche infrarouge :  $15000\text{ cm}^{-1}$  -  $4000\text{ cm}^{-1}$ ;
- le moyen infrarouge :  $4000\text{ cm}^{-1}$  -  $400\text{ cm}^{-1}$ ;
- l'infrarouge lointain :  $400\text{ cm}^{-1}$  -  $10\text{ cm}^{-1}$  [19;20].

Si les liaisons chimiques sont soumises à une radiation infrarouge, il y a absorption d'énergie lorsque la fréquence de la radiation incidente entre en résonance avec un des mouvements de vibration propre des atomes récepteurs. Le spectre enregistré doit être formé de bandes d'absorption caractérisées par leurs fréquences et leurs intensités. Le principe de fonctionnement est détaillé en Annexe 4 [20].

### **II.3.5. Analyses Thermiques (ATD/ATG)**

L'analyse ATD couplée à l'ATG représente une méthode complémentaire de description qualitative des différents composés chimiques retrouvés dans les échantillons à l'aide de la microscopie optique et la DRX.

#### **a- Analyse thermique différentielle (ATD)**

L'Analyse Thermique Différentielle (ATD) est basée sur l'étude de la chaleur dégagée (réactions exothermiques) ou absorbée (réactions endothermiques) lors des différentes transformations chimiques et minéralogiques pouvant se produire au cours de la cuisson (frittage) d'un échantillon [21]. Elle consiste en la mesure de la différence entre la température de l'échantillon et celle d'un corps de référence en fonction du temps ou de la température. Elle permet de distinguer les transformations endothermiques, exothermiques et les phénomènes invariants que peut subir un matériau soumis à l'élévation de la température jusqu'à 1100°C sous un flux d'azote. La vitesse d'écoulement du gaz porteur est de 100 mL.min<sup>-1</sup> [21].

#### **b. Analyse Thermogravimétrique (ATG)**

La plupart des phénomènes physiques, chimiques ou physico-chimiques se caractérisent par des variations de masse des échantillons lorsque ces derniers sont soumis à un traitement thermique. L'Analyse Thermogravimétrique (ATG) détermine les pertes de masse que subit l'échantillon au cours du chauffage. Ces pertes de masse sont mesurées en fonction d'une élévation graduelle de la température de chauffe à l'aide d'une thermobalance. Les pertes de masse sont consécutives au départ d'eau zéolitique, à la décomposition des carbonates et hydrates et aux changements d'état des minéraux [21]. L'analyse des échantillons est effectuée sur la fraction fine (% de passants au tamis de 80 µm). Les pertes en masse en fonction de la température permettent d'obtenir la courbe d'analyse thermogravimétrique primitive pour mieux apprécier les températures de début et de fin de perte de masse. Cette courbe permet aussi de mieux différencier les pertes de masses consécutives à des phénomènes qui se produisent à des

températures bien déterminées et pour pouvoir comparer les thermogrammes obtenus à ceux de l'analyse thermique différentielle.

Ces méthodes d'analyses sont d'une grande importance dans le cadre de notre travail. Ainsi dans le chapitre suivant nous allons présenter les résultats obtenus et les discuter.



## **CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### III.1. Analyse des paramètres d'identification géotechnique

#### a- Analyse granulométrique

La distribution des classes granulométriques de la latérite provenant de la carrière de Diendième est présentée sur la Figure 14. En exploitant la courbe ci-dessous, nous obtenons les valeurs suivantes:

Tableau 2: Pourcentage de tamis

Diamètre du tamis (mm)	0,08	s2	10	30	60
Pourcentage du tamis (%)	21,2	39,1	67,4	94,5	100

Les caractéristiques du sol sont déterminées par deux coefficients:

- Le coefficient d'uniformité ou de HAZEN :  $C_u = D_{60}/D_{10} = 1,48$ ;
- Le coefficient de courbure:  $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60} = 1,3$ .

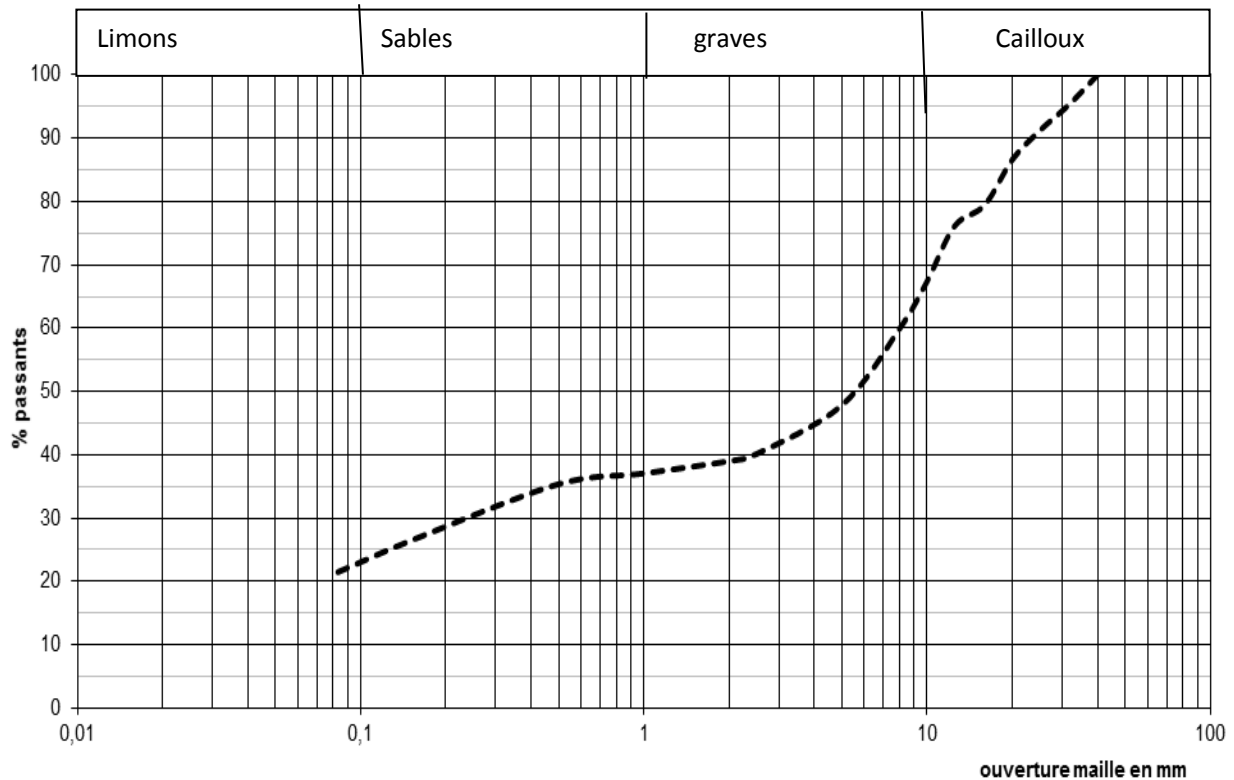


Figure 13: Courbe granulométrique du matériau cru ECD

Le coefficient d'uniformité de notre échantillon (1,48) est inférieur à 2: cela signifie que la granulométrie du matériau est uniforme. Le coefficient de courbure du matériau (1,3) est compris entre 1 et 3: cela signifie que le matériau est bien gradué. En analysant la courbe, il ressort que le

matériau a une répartition granulométrique qui est globalement comprise dans le fuseau granulométrique dicté par le CPT [13]. Une comparaison également est établie entre le fuseau granulométrique du matériau et le fuseau granulométrique type recommandé par le CEBTP (1984) pour l'utilisation en couche de base. L'analyse granulométrique, l'indice de plasticité et la teneur en pourcentage fine (Figure 15) nous ont permis de classer le sol de la carrière selon GMTR [22 ;23].

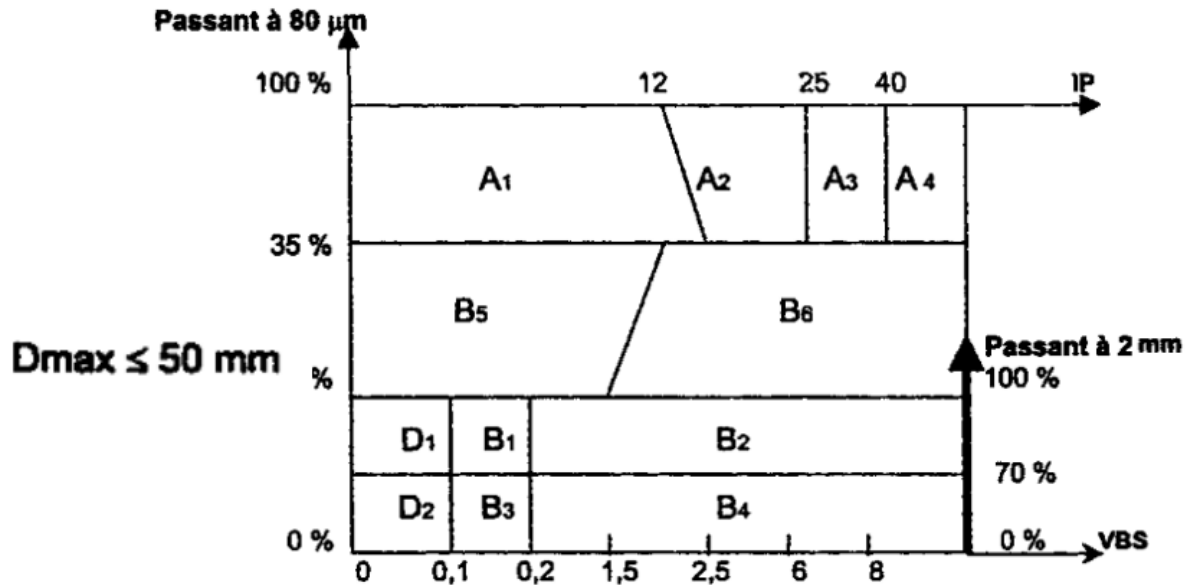


Figure14: Classification du sol de la carrière de Diendième

L'analyse granulométrique (pourcentage de fine =21,2 % déterminé par  $D_{0,08}$ ) et l'indice de plasticité (15,3) montrent que la classe du matériau est de type B sous classe  $B_6$  selon le GMTR

Classe B: sol sableux et graveleux avec fines

Sous classe  $B_6$ : Sables et graves argileux

### b-Limite d'Atterberg

Les limites de liquidité (30,7 %), de plasticité (15,4 %) (tableau 2) et l'indice de plasticité (15,3) montrent que le matériau est moyen plastique. La valeur élevée de la limite de liquidité peut se justifier par la présence d'eau contenue dans les graves et sables. Ainsi selon le CPT le matériau est moyen plastique car  $I_p$  est compris entre 12 et 25 [15;24],

Tableau 3: Limites d'Atterberg du matériau cru ECD

Limite de liquidité (%)	30,7
Limite de plasticité (%)	15.4
Indice de plasticité	15.3

### c-Essai proctor modifié

Une analyse comparative (Figure 16) est effectuée sur les courbes obtenues lors de l'essai (Figure 16). La teneur en eau optimale du matériau cru est de 9,2 %, alors que celle du matériau amélioré à 2 % de ciment est de 13,9 %. Les densités sèches maximales de nos échantillons crus et améliorés respectivement sont de 2,081 t/m<sup>3</sup> et 2,094 t/m<sup>3</sup>. Cette légère augmentation de la densité du matériau amélioré dépend du poids volumique du ciment.

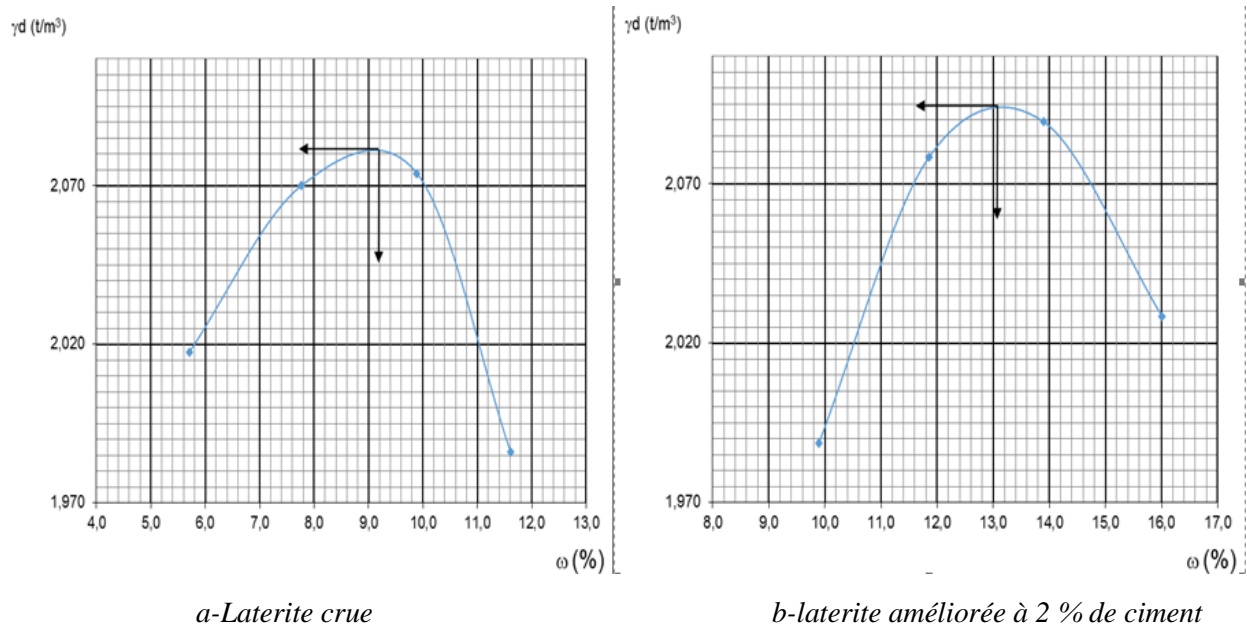
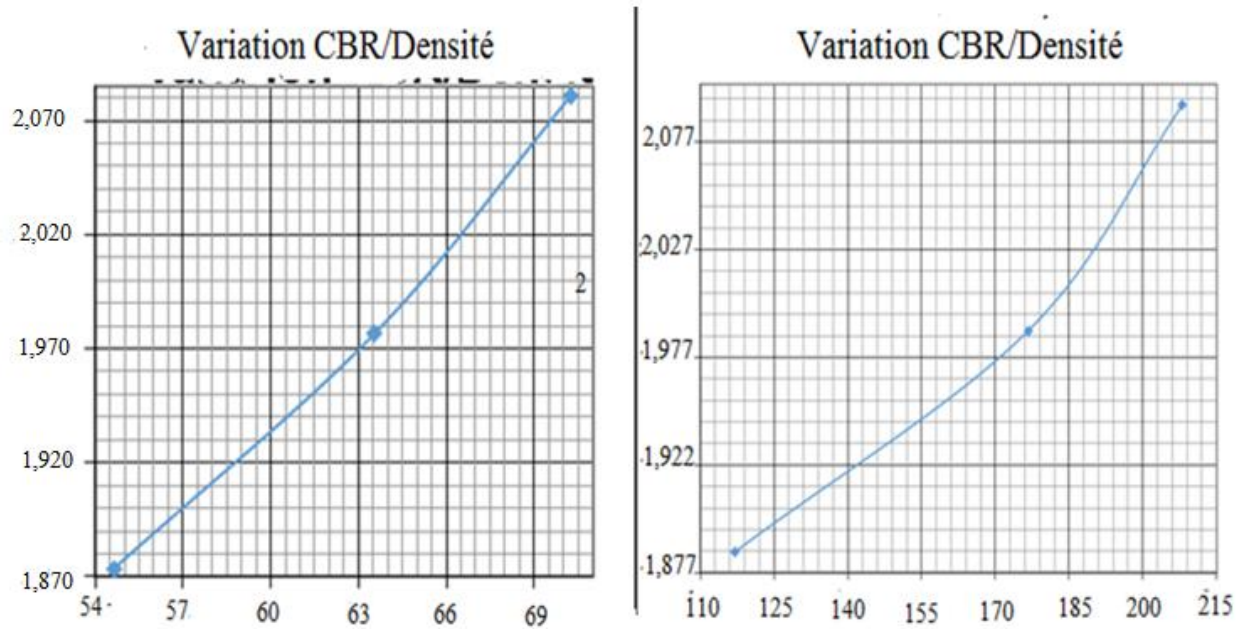


Figure 15: Courbes (a : b) essai proctor modifié ECD

### d- Essai CBR

On constate une augmentation de la capacité portante de 64 à 177 du matériau (Figure 17). Au Sénégal la valeur minimale de l'indice CBR à 30 est retenue pour une utilisation en couche de fondation tandis que pour une couche de base la valeur minimale est de 60. Pour se rassurer de la qualité globale du matériau, une amélioration est effectuée à 2% de ciment pour une utilisation en couche de base.



c-Latérite crue CBR à 95 % = 64

d-Latérite améliorée à 2% de ciment CBR 95 % =177

Figure 16: Courbes (c ;d) CBR ECD

### III.2. Diffraction des Rayons X

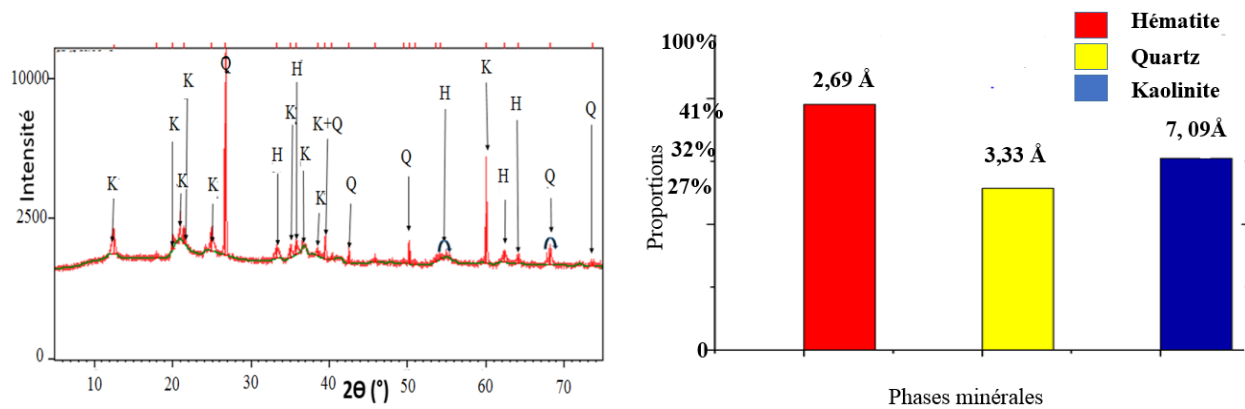
Les différentes phases minérales déterminées à la DRX sont quantifiées grâce aux pics des éléments chimiques par la méthode de Riedvelt. Cette méthode est une technique d'analyse qualitative et pseudo-quantitative des minéraux retrouvés. Le dépouillement du diffractogramme des rayons X du matériau (Figure 18) montre qu'il est constitué de [18;20; 25; 26; 27]:

- la kaolinite (7,09 Å ; 4,43 Å ; 4,14 Å ; 3,56 Å ; 2,33 Å ; 2,28 Å et 1,53 Å),
- l'hématite (2,69 Å ; 2,50 Å ; 1,69 Å et 1,48 Å);
- le quartz (3,33 Å; 2,28 Å 2,12 Å; 1,97 Å 1,81 Å et 1,37 Å).

Le pourcentage de chaque minéral dans le matériau est réparti comme suit:

La Kaolinite 32 %, l'Hématite 41 % et le Quartz 27 %.

Le minéral dominant dans le matériau est l'Hématite (41%); suivi de la Kaolinite (32%) et du Quartz (27%).



**K:** Kaolinite; **Q:** Quartz; **H:** Hématite

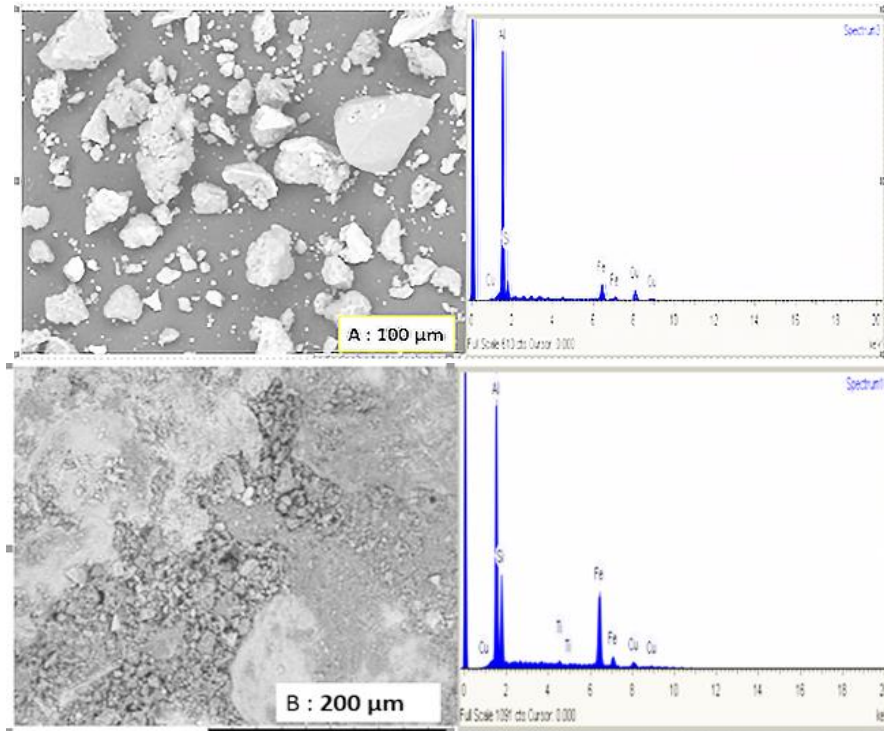
*Figure 17: Diffractogramme de l'échantillon de la carrière de Diendième*

### III.3. Microscope Électronique à Balayage (MEB) Couplé à EDX

La Figure 19 représente les spectres du MEB. Le tableau 3 montre le pourcentage des éléments présents dans le matériau

*Tableau 4: Pourcentage (%) des éléments chimiques de l'ECD*

Eléments	% atomique A	% atomique B
Al	79,3	37,3
Si	2,8	13,6
Fe	16,2	47,1
Cu	1,7	1,0
Ti	0	1,0
Total	100	100



*Figure 18: Morphologie de l'échantillon ECD*

L'analyse du tableau 3 et de la Figure 19 montre que notre échantillon est majoritairement constitué d'Aluminium (Al), de Fer (Fe), de silicium (Si) auquel s'ajoute le cuivre et le titane en faible proportion. La présence du cuivre et le titane sous forme de trace peut se justifier par le processus naturel d'altération des minéraux latéritiques. La teneur importante en fer explique la couleur rouge du matériau. L'analyse de l'EDX a montré une variation du pourcentage des éléments Si, Al et Fe, ce qui explique l'hétérogénéité de notre matériau.

#### **III.4. Analyse par spectroscopie IR**

Le spectre infrarouge du matériau étudié est représenté à la Figure 20 et comporte 3 principales bandes d'absorption.

- Entre 3700 et 3600  $\text{cm}^{-1}$ , les bandes observées sont celles des vibrations d'élongation des groupements hydroxyles (OH) de la kaolinite [19].
- Entre 1200 et 900  $\text{cm}^{-1}$ , les vibrations de déformation Al-OH ainsi que les vibrations d'élongation de Si-O-Si de la kaolinite sont observées
- Entre 800 et 550  $\text{cm}^{-1}$ , les bandes d'absorption correspondantes aux vibrations de valence Si-O de la kaolinite et du quartz sont observées [18],

L'infrarouge confirme ainsi la présence de la kaolinite et du quartz [18; 25; 28].

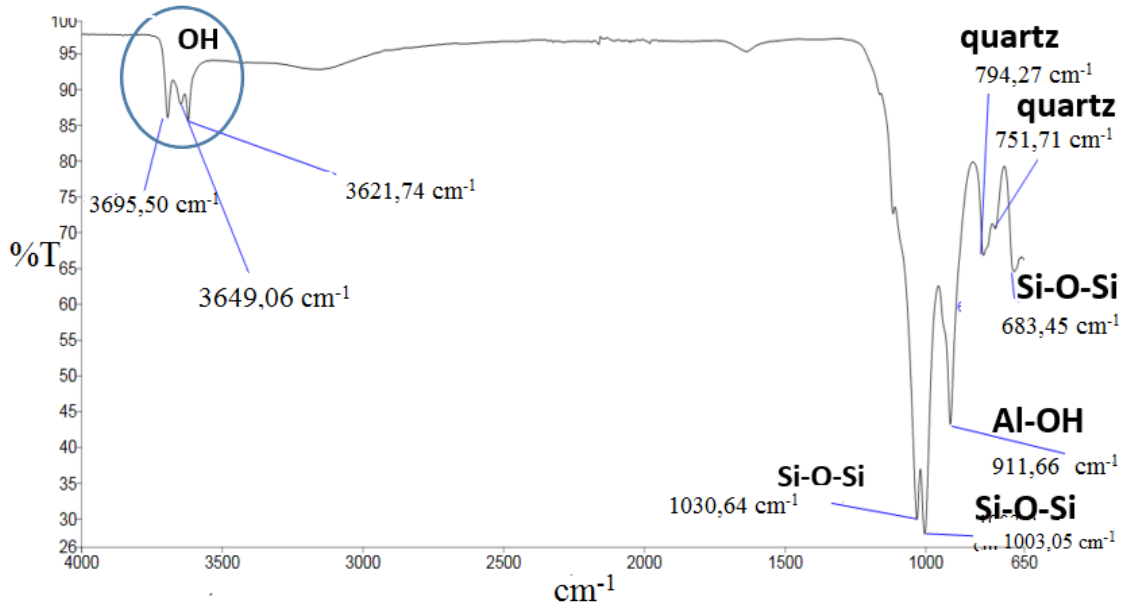


Figure 19: Spectroscopie infrarouge ECD

### III.5. Analyses Thermiques (ATD /ATG)

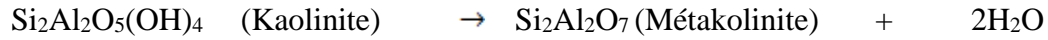
L'examen de la courbe ATD/ATG de notre sol latéritique (Figure 21) permet de distinguer cinq principaux accidents thermiques. Les plages de températures correspondant à ces accidents ainsi que les pertes de masses liées aux transformations chimiques sont fournies dans le Tableau 4. L'analyse de notre thermogramme est résumée au tableau 4.

Tableau 5: Températures correspondant aux départs et pertes de masse liées aux transformations chimiques lors de la cuisson

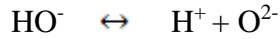
Nature du pic	Température (°C)	Perte de masse (%)	Observations
Endothermique	61,884	1,16	Perte de l'eau zéolithique
Endothermique	294,67	3,83	Transformation de l'hématite $\gamma$ en hématite $\alpha$ et combustion de la matière organique [25]
Endothermique	479,23	3,60	Déshydroxylation de la kaolinite et sa transformation en métakolinite
Endothermique	578,29		Passage quartz $\alpha$ au quartz $\beta$
Exothermique	971,8		Réorganisation structurale de la métakaolinite



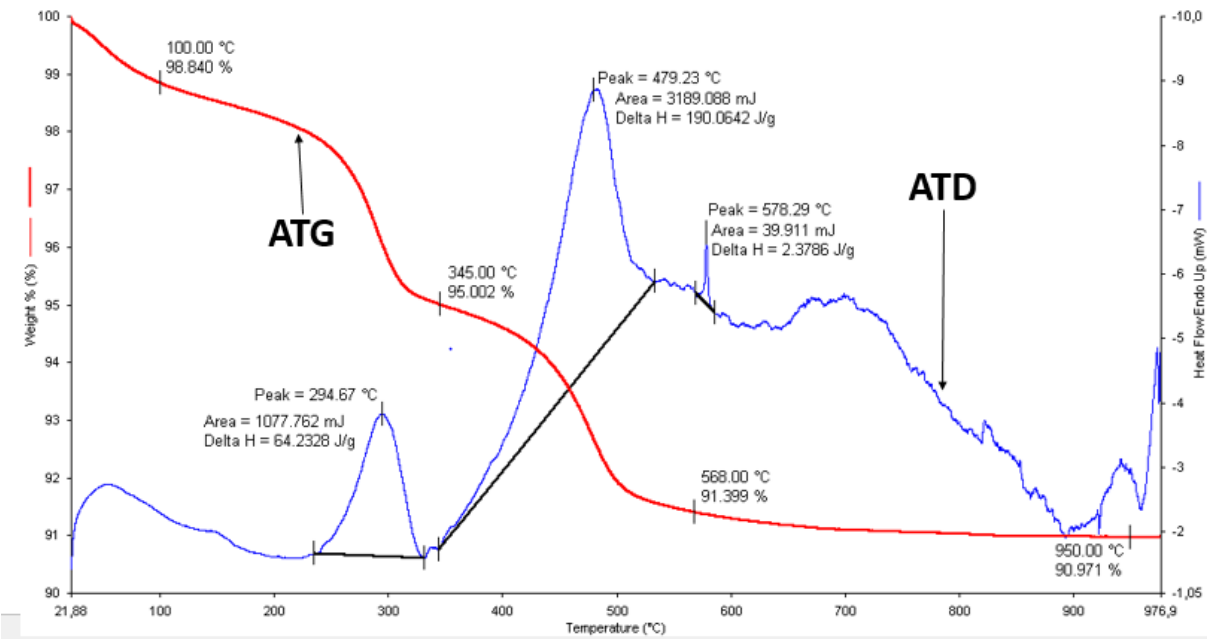
La déshydroxylation de la kaolinite et sa transformation en métakaolinite se traduit par l'équation suivante :



Le mécanisme consisterait en un transfert de proton entre deux hydroxydes selon les équations suivantes [26,29] :



La température de déshydroxylation d'une kaolinite ordonnée est autour de 600°C tandis que celle d'une kaolinite désordonnée est plus faible [30,31]. La température de déshydroxylation de la kaolinite de notre échantillon est de 479,23°C, donc notre kaolinite est désordonnée. Le phénomène exothermique vers 970°C est relatif à la réorganisation de la métakaolinite [32].



**Figure 20:** Thermogramme d'ATG/ATD ECD

Cette analyse confirme la présence de la kaolinite, de l'hématite et du quartz.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les routes constituent le moteur de tout développement socio-économique. Dans le domaine de la construction, le choix et la mise en oeuvre des matériaux dépendent fortement de la structure de la matière, de son état physico-chimique, des paramètres technologiques de mise en oeuvre ainsi que de l'environnement immédiat dans lequel il est élaboré et mise en place.

Notre étude basée sur l'analyse de quelques paramètres géotechniques ainsi que sur la diffraction des rayons X, la microscopie électronique à balayage, la spectroscopie infrarouge, l'analyse thermique différentielle et l'analyse thermogravimétrique a porté sur un échantillon prélevé à Diendième.

Les résultats de la caractérisation physico-chimique montrent que notre matériau est à base de kaolinite, d'hématite et de quartz.

Les résultats de l'analyse géotechnique de la latérite naturelle utilisée dans la réhabilitation de la route Thionck-Essyl Tendième montrent que le matériau est constitué de graves et de sables,

En somme, ce matériau est approprié pour la construction routière car il est en parfait accord avec les normes de constructions routières. Par ailleurs il servira de remblais, comme couche de fondation tandis que la latérite améliorée au ciment sera utilisée comme couche d'assise car la latérite crue est moins résistante (22,7 bars) que la latérite améliorée.

Nous pensons que l'étude physico-chimique des matériaux utilisés en construction routière peut être amélioré pour pérenniser les ouvrages réalisées.

Cependant il faut souligner que les matériaux utilisés dans la construction routière ne sont pas suffisamment étudiés dans le domaine physico-chimique.

Alors que cet aspect semble être déterminant surtout lorsqu'on procède à l'amélioration avec du ciment.

Toutefois, pour aboutir à des conclusions scientifiques beaucoup plus pointues, il faudrait nécessairement augmenter le nombre d'échantillons testés et aussi faire une étude chimique et minéralogique de chaque mélange latérite-liant hydraulique (ciment) dans le but de comprendre les problèmes qui en découlent. Ce qui permettra de suggérer des formulations à la fois efficaces et économiques pour la construction de routes ayant de longues durées de vie. Les travaux ultérieurs consisteront à valoriser la latérite de la carrière de Diendième dans le domaine de la construction des barrages, des digues et des briques de construction.

## Référence bibliographique

- [1] CEBTP **1984**, *Guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*, P 61,71,74 ;
- [2] AGEROUTE **2015**, Dossier D'appel D'offre pour les travaux de réparation du tronçon tendième thionck-essyl (43 km) situé sur la boucle du Blouf dans la région de Ziguinchor ;
- [3] **A. Sané 2007**, Rapport de Certificat d'aptitude à l'enseignement moyen (CAEM), Ecole Normale ;
- [4] Données **2007**, fournies par le service départemental de l'agriculture de bignona ;
- [5] **A. Ly 1989**, Données de susurface Sciences de l'Université de droit, d'économie et des Sciences d'Aix-Marseille ;
- [6] **M. Dibara 1978**, Synthèse bibliographique sur les phénomènes latéritiques .Rapport de DEA, Option géochimie appliqué, Université d'Orléans , P 56 ;
- [7] **Y. Tardy 1992**, pétrologie des latérites et sols tropicaux Masson, P 459 ;
- [8] Lyon associates latérite and latéric sols au engurecing study for A.I.D inc ;
- [9] **P. Autret 1983**, Latérite et graveleux Latériques, P 5,17,23,27,29 ;
- [10] **B. Sara et B. Soumia 2016**, fissures des chaussées souples cas de la RN3 et les aérodromes de DJanet et de Ouargla (types causes et méthodes de réparations), *Université kasdi Merbah-ouargla , faculté des sciences appliquées*, P 4,19 ;
- [11] **H. Vialisse-Terrisse 2000**, Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles, Université de Bourgogne, UFR des Sciences et Techniques, France, P 256 ;
- [12] **Bohi 2006**, Caractérisation des sols latéritiques utilisées dans le cadre de la construction routière : cas de la région de l'Agnéby côte-D'ivoire, École des ponts Paris, P 9,16 ;
- [13] NF **octobre 1978**, échantillonnage, P 18,555;

- [14] NF *mars 1996*, Analyse granulométrique : Méthode par tamissage à sec après lavage, P 56-94 ;
- [15] NF *octobre 1999*, Détermination des références de compétences, P 09,94 ;
- [16] NF *octobre 1999*, Indice CBR après Immersion, Indice CBR Immédiat, Indice portant Immédiat, P 08,94 *octobre* ;
- [17] **M. Souley Issiakou 2016**, Caractérisations et Valorisation des Matériaux Latéritiques Utilisés en construction Routière au Niger, Université de Bordeaux
- [18] **A. Mbaye 2013**, Caractérisations minéralogiques et physiques d'argiles naturelles du Sénégal silanisation et utilisation dans le piégeage des métaux lourds, UCAD, P 64,66 ,74, 143-150 ;
- [19] **V.C Farmer 1974**, The infrared spectra of minerals, Mineralogical Society, London ;
- [20] **J. Sigg 1991**, Les produits de la terre cuite. *Editions Septima, Paris*, 494p;
- [21] **C. Jouenne 1980**, Traité de céramique et matériaux minéraux. Editions Septima, Paris, P 657;
- [22] NF **Septembre 1992**, Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, P 6,9, 11, 300 ;
- [23] **A. Kadiri 2005** mémoire DEA, , Etude Géotechnique des produits d'altération sur granites de Ngaoundéré, Université de Yaoundé, Faculté des Sciences *PI*, 68 ;
- [24] **S, Caillère Henin S et Ratureau M 1982**, Minéralogie des argiles (tomes I et II), *Paris* ;
- [25] **R.L Frost et A.M Vassallo 1996**, The deshydroxylation of the kaolinite clay minerals using infraed emission spectroscopy. *Clays Miner*; P 635,651;
- [26] **A. Baldéyrou-Bailly 2000**, Etude expérimentale et modélisation de la stabilité des phylloslicates, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Science de la terre et de l'univers, P 303;
- [27] **Polyhedron V 2002**, The incorporation of propane-1, 3-diamine into silylant epoxide group through homogeneous and heterogeneous routes, *21*, P 2647,2651;
- [28] **Gc Maiti et F. Freund 1981**, Deshydratation related proton conductivity in kaolinite, clay *Miner*, P 395,415 ;

[29] R. **Bahar**, M. **Benazzoug**, S.**Kenai**, **Cem et concr compos 2014**, Performane of compacted cement-stabilised soil, *P 24, 811,820* ;

[30] EA. **Basha**, R. **Hashim**, HB. **Mahmud**, AS. **Muntohar 2005**, Stabilisation of residual soil wish rice husk ask and cement, Construc Build Mater , *19, P 448,453* ;

[31] **AP. Rollet**, R. **Bouaziz 1972**, L'analyse thermique, tome 2, Gauthier-Villars Editeur, Paris, P 587.

## ANNEXES

### Annexe: 1



*Echantillonneur*



*Coupelle Casagrande*

*Tableau 6: Granulométrie ECD*

Tamis (mm)	Refus Cumulés	Refus (%)	Passants(%)
40	0	0,0	100,0
31,5	289	4,8	95,2
25	527	8,8	91,2
20	802	13,4	86,6
16	1229	20,5	79,5
12,5	1432	23,9	76,1
10,0	1954	32,6	67,4
8	2402	40,0	60,0
05	3128	52,1	47,9
2,5	3588	59,8	40,2
2	3655	60,9	39,1
1	3772	62,9	37,1
0,50	3874	64,6	35,4
0,16	4379	73,0	27,0
0,08	4726	78,8	21,2

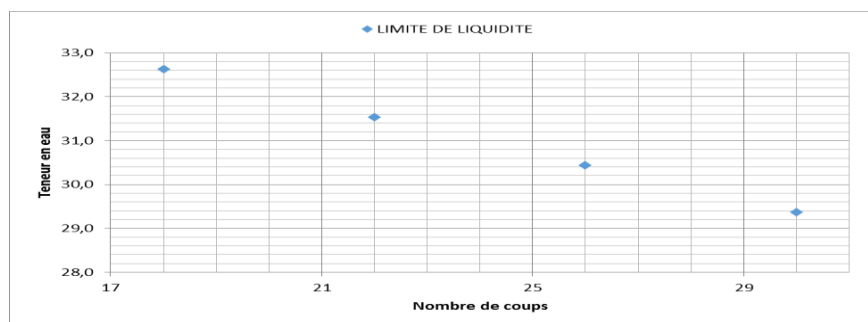
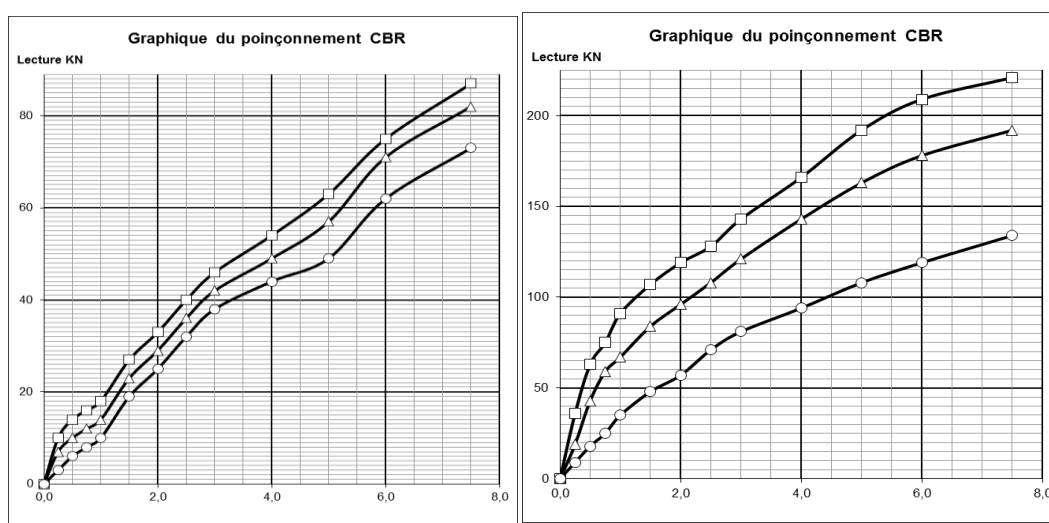


Figure 21: Courbe de limite de liquidité ECD



e-Matériau cru

f-Matériau amélioré

Figure 22: Courbes (e ;f) de poinçonnement du CBR ECD

Tableau 7: CBR latérite crue ECD

Moule	Nombre de coups	Compacité	Densité sèche (t/m <sup>3</sup> )	Valeur CBR (2,5 et 5 mm)
Moule A	10	90	1,874	55
Moule B	25	95	1,977	64
Moule C	55	100	2,08,	70

Tableau 8: CBR latérite améliorée

Moule	Nombre de coups	Compacité (%)	Densité sèche (t/m <sup>3</sup> )	Valeur CBR (2,5 et 5 mm)
Moule A	10	90.1	1,887	117
Moule B	25	95,0	1,989	177
Moule C	55	100,0	2,094	208

**Tableau 9: Résistances sol ciment ECD**

Résistances (bars)		Résultats	Forces (kg)
Résistance à la compression (bars) à 7 jours	Surface (cm <sup>2</sup> ) 181,4	22,7	4111,2
Résistance à la traction à 7 jours d'immersion	Section (cm <sup>2</sup> ) 291,1	2,55	741,6

**Tableau 10: Caractéristiques des matériaux selon le CPT**

Matériau	Nature de l'essai	Résultats exigés
Latérite	Granulométrie	Tamis (mm) Passant (%)
		10,0 < 75
		2,0 < 35
		0,08 < 25
	Limites	W <sub>1</sub> < 35 %; I <sub>p</sub> < 15 couche de base
		I <sub>p</sub> ≤ 20 couche de fondation
	Proctor	Y <sub>dOM</sub> ≥ 2,0 t/m <sup>3</sup>
	CBR à 95 % à 4 jours d'imbibition dans l'eau	≥ 60 couche de base
		≥ 30 couche de fondation
	Compacité (%)	≥ 98 couche de base
≥ 95 couche de fondation		
≥ 90 couche de forme		
Gonglement	0,1 %	
Latérite améliorée à 2 %	CBR	≥ 160
	Résistance (bars) compression à 7 jours	[ 18-25 ]



*Tableau 1: Poucentage (%) des éléments chimiques de l'échantillon ECD*

Eléments	Al	Si	Fe	Cu	Ti
Spectre 1	32,2	6,6	59,0	2,2	
Spectre 2	64,7	4,8	27,2	3,3	
Spectre 3	64,0	6,4	23,1	3,6	
Spectre 4	72,4	6,6	25,1	4,3	
Spectre 5	80,1	3,7	20,4	3,5	
Spectre 6	79,2	2,4	16,2	1,3	
Spectre 7	76,3	3,1	15,0	2,6	
Spectre 8	62,4	4,4	18,2	1,1	
Spectre 9	37,3	7,7	26,6	3,4	
Spectre 10	37,3	13,6	47,1	1,0	1,0

## Annexe 2

### Le diffractomètre utilisé

Les analyses sont réalisées sur environ 1 gramme de l'échantillon latéritique. L'échantillon est délicatement étalé sur le porte échantillon du diffractomètre. La préparation et l'installation de la poudre sur le porte échantillon ont été réalisées avec minutie de sorte que les cristallites soient orientées aléatoirement. Les analyses ont été effectuées avec l'aide de Mme Florence LE DRET de la composante INSA de l'équipe "Matériaux Inorganiques : Chimie Douce et Réactivité" de l'UMR 6226 "Sciences Chimiques de Rennes" avec un diffractomètre X'pertPRO (PANALytical) (Figure 24) automatisé opérant à 45 kV et 40 mA équipé d'un porte échantillon rotatif et d'une source  $\lambda_{K\alpha 1} = 1,5418 \text{ \AA}$  (anticathode de cuivre). Le diffractogramme a été dépouillé à l'aide des données de référence internationale de l'ICDD.

Les caractéristiques des essais sont les suivantes :

Balayage de 5 à 75 ( $2\theta$ ),

Vitesse de balayage de 0,008 ( $2\theta$ ),

Temps de comptage : 50,1650 s.



*Figure 23: Photographie du diffractomètre sur poudre*

Les longueurs d'onde des rayons X sont comparables aux distances interréticulaires  $d$  du réseau cristallin, de l'ordre de l'Angström. L'analyse cristalline des solides repose sur l'émission d'un rayonnement cohérent (i.e. de même longueur d'onde) dans toutes les directions (diffusion de Rayleigh) lorsqu'un faisceau monochromatique et parallèle de rayons X interagit avec la matière. L'organisation des atomes en réseau cristallin entraîne une interférence de ces ondes cohérentes, d'où le phénomène de diffraction des rayons X associé à l'interférence des ondes diffusées par chaque onde. Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées diffraction, sont régies par une loi empirique appelée la loi de Bragg :

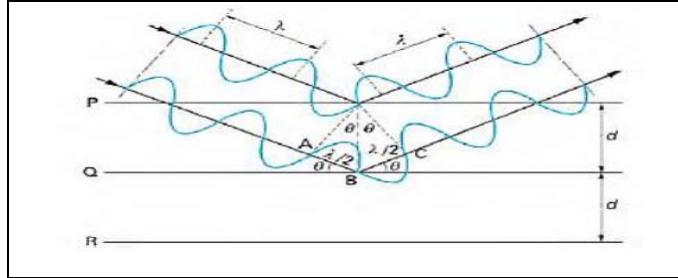
$$2 d \cdot \sin\theta = n\lambda$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde du rayonnement utilisé;

$\theta$  : l'angle de réflexion;

$d$  : la distance réticulaire entre deux plans atomiques adjacents d'une même famille;

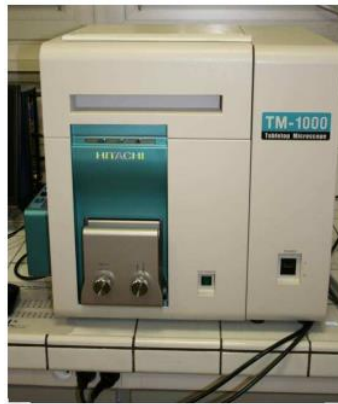
$n$  : l'ordre de réflexion (Figure 25):



**Figure 24:** Schéma de la diffraction des rayons X

### Annexe 3

La Figure 26 illustre la photographie MEB utilisé pour l'analyse de notre échantillon. L'appareil que nous avons utilisé était un MEB de paillasse Hitachi, TM-1000 avec une tension d'accélération de 7 kV. Toutes les analyses au MEB ont été effectuées en collaboration avec Mme Florence LE DRET de la composante INSA de l'équipe "Matériaux Inorganiques : Chimie Douce et Réactivité" de l'UMR 6226 "Sciences Chimiques de Rennes".



**Figure 25:** Photographie d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB)

En mode électrons secondaires, le pouvoir séparateur des MEB à effet de champs utilisé est de l'ordre de quelques nanomètres. La quantité d'électrons secondaires émise est surtout liée à la

topographie de surface de l'échantillon. Elle est en fait aussi fonction du numéro atomique  $Z$  du matériau puisque les électrons rétrodiffusés contribuent à l'émission d'électrons secondaires.

Ainsi, les images formées par la détection d'électrons secondaires contiennent deux types d'information : (1) contraste de relief et (2) contraste de phase. Ce dernier contraste est d'autant plus visible que le contraste de relief est doux et/ou la différence de numéro atomique est grande. La combinaison des deux types d'information peut ainsi parfois aider à mieux discriminer les interfaces.

#### **Annexe 4**

##### **Infrarouge (IR)**

La mesure a été effectuée en réflexion diffuse. L'échantillon est dilué dans du KBr pour atténuer les pertes en énergie. La radiation pénètre à l'intérieur de l'échantillon, subit des effets de réflexion, réfraction, diffusion et absorption puis est réémise dans toutes les directions d'un espace hémisphérique. Les spectres d'absorption ont été réalisés dans le domaine du moyen infrarouge, correspondant à des nombres d'onde ( $\nu = 1/\lambda$ ) compris entre  $400\text{ cm}^{-1}$  et  $4000\text{ cm}^{-1}$  et l'appareil utilisé est le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier.



*Figure 26: Photo appareil Infrarouge*



*Appareil ATD/ATG*

## RESUME

Ce travail a pour objectif l'identification et la caractérisation géotechnique des sols latéritiques utilisés dans le projet de réparation du tronçon Tendième Thionck-Essyl. Les résultats de l'étude géotechnique ont montré que le matériau convient pour une couche de fondation en construction routière. En vue de pouvoir utiliser ce matériau en couche de base, une amélioration à 2 % de ciment a été effectuée. Cet ajout engendre la formation de la portlandite et la tobermorite. La tobermorite est essentiellement formée par hydratation de  $C_2S$  et  $C_3S$  qui sont des constituants du ciment. La présence de celle-ci améliore les propriétés géotechniques du mélange.

Les résultats de la DRX, du MEB couplé à l'EDX, de l'IR et du l'ATD/ATG ont montré que l'échantillon provenant de la carrière de Diendième contient de la kaolinite 32 %, de l'hématite 41 % et du quartz 27 %. Le phénomène des microfissures observées sur la route est dû à plusieurs facteurs: une mauvaise mise en œuvre, un mauvais malaxage du matériau et un défaut de temps de prise lors de la mise en œuvre.

**Mots clés** : latérite, ciment, caractérisation, route.